

# БУЛАТОВСКИЕ ЧТЕНИЯ

Материалы II Международной  
научно-практической конференции  
(31 марта 2018 г.)



*Памяти доктора технических наук, профессора,  
Заслуженного деятеля науки и техники РФ,  
Заслуженного изобретателя РФ,  
академика Международной и Российской инженерных академий,  
**Анатолия Ивановича Булатова**  
посвящается*



# READINGS OF A.I. BULATOV

Materials of II International  
scientific and practical conference  
(on March 31, 2018)



*Dedicated in memories of Doctor of Technical Sciences, professor,  
Honored worker of science and technology of the Russian Federation,  
Honored inventor of the Russian Federation,  
Academician of the International and Russian  
engineering academies,  
**Anatoly Ivanovich Bulatov***



**ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР ----- EDITOR-IN-CHIEF**

**САВЕНОК Ольга Вадимовна**

доктор технических наук, профессор кафедры Нефтегазового дела имени профессора Г.Т. Вартумяна ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», Лауреат премии администрации Краснодарского края в области образования за 2015 год.

SAVENOK Olga Vadimovna  
Doctor of Technical Sciences, Professor of department of Oil and gas engineering department named after professor G.T. Vartumyan FGBOU VO «Kuban state technological university», Winner of an award of administration of Krasnodar Region in the field of education for 2015.

**ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА: ----- DEPUTY CHIEF EDITOR:**

**ПАРИНОВА Татьяна Анатольевна**

старший преподаватель кафедры русского языка ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет».

PARINOVA Tatyana Anatolyevna  
Senior Lecturer of department of Russian Language FGBOU VO «Kuban state technological university».

**РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ: ----- EDITORIAL COUNCIL:**

**АГЗАМОВ Фарит Акрамович**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Бурение нефтяных и газовых скважин» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», член Российской Академии Естественных Наук (РАЕН), член Академии горных наук, член диссертационного совета Д 212.289.04 на базе ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», член диссертационного совета Д 222.018.01 на базе Татарского научно-исследовательского и проектного института нефти имени В.Д. Шашина (ПАО «Татнефть»), Заслуженный деятель науки Российской Федерации, Заслуженный деятель науки Республики Башкортостан.

**AGZAMOV Farit Akramovich**

Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of «Drilling of Oil and Gas Wells» department FGBOU VO «Ufa state oil technical university», Member of the Russian Academy of Natural Sciences (Russian Academy of Natural Sciences), Member of Academy of mountain sciences, Member of dissertation council D 212.289.04 on the basis of FGBOU VO «The Ufa state oil technical university», Member of dissertation council D 222.018.01 on the basis of the Tatar research and design institute of oil of V.D. Shashin (PJSC «Tatneft»), Honored worker of science of the Russian Federation, Honored worker of science of the Republic of Bashkortostan.

**БЕКЕТОВ Сергей Борисович**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры геофизических методов поисков и разведки месторождений полезных ископаемых ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», Почётный работник науки и техники РФ, Почётный работник газовой промышленности, Почётный работник топливно-энергетического комплекса, Почётный работник науки и техники Российской Федерации, Патриарший знак св. великомученицы Варвары.

**BEKETOV Sergey Borisovich**

Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of department of geophysical methods of search and investigation of the mineral deposits FGAOU VO «North Caucasian federal university», Honorary worker of science and technology of the Russian Federation, Honorary worker of the gas industry, Honorary worker of fuel and energy complex, Honorary worker of science and technology of the Russian Federation, Patriarchal sign of the Saint great martyr Varvara.

**ГОЛЬЧИКОВА Надежда Николаевна**

доктор геолого-минералогических наук, доцент, заведующая кафедрой геологии нефти и газа ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет», член-корреспондент РАЕН, член УМО по прикладной геологии специальности «Геология нефти и газа», член Русского географического общества.

**GOLCHIKOVA Nadezhda Nikolaevna**

Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Associate professor, Head of geology of oil and gas department FGBOU VO «Astrakhan state technical university», Corresponding member of the Russian Academy of Natural Sciences, Member of UMO on applied geology of specialty «Geology of Oil and Gas», Member of the Russian Geographical Society.

### **МУХАМЕДГАЛИЕВ Бахтиёр Абдукадирович**

доктор химических наук, профессор, профессор кафедры «Строительные материалы и химия» Ташкентского архитектурно-строительного института, профессор Университета КЕИО (Иокогама, Япония), региональный эксперт ООН по Центрально-Азиатскому региону по вопросам охраны окружающей среды и экологии, региональный эксперт международной научно-технической программы «Global Environment System Leaders» (Japan) по странам Юго-Восточной и Центральной Азии, учёный секретарь экспертной комиссии ВАК Республики Узбекистан по естественным наукам, эксперт Госкомитета Республики Узбекистан по науке и инновационным технологиям, почётный профессор Каракалпакского государственного университета имени Бердак.

### **MUKHAMEDGALIYEV Bakhtiyor Abdukadirovich**

Doctor of Chemical Sciences, Professor, Professor of «Construction Materials and Chemistry» department of Tashkent architectural and construction institute, Professor of the KEIO University (Yokohama, Japan), Regional Expert of the UN in the Central Asian region in environmental protection and ecology, Regional Expert of the international scientific and technical program «Global Environment System Leaders» (Japan) in the countries of Southeast and Central Asia, Scientific Secretary of commission of experts of VAK of the Republic of Uzbekistan in natural sciences, Expert of the State Committee of the Republic Uzbekistan in science and innovative technologies, Honorary professor of the Karakalpak state university named after Berdak.

---

### **МУХАМЕТШИН Рустам Закиевич**

доктор геолого-минералогических наук, профессор, профессор кафедры геологии нефти и газа имени академика А.А. Трофимука ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», член-корреспондент Российской Академии Естественных Наук (РАЕН) (2015), член Общества экспертов России по недропользованию (ОЭРН), эксперт Государственной комиссии по запасам полезных ископаемых (ГКЗ РФ).

### **MUKHAMETSHIN Rustam Zakievich**

Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor, Professor of department of geology of oil and gas of a name of the academician A.A. Trophimuk FGAOU VO «The Kazan (Volga) federal university», Corresponding Member of the Russian Academy of Natural Sciences (RANS) (2015), Member of Society of Experts of Russia on subsurface use (OERN), Expert of the State Commission on Mineral Reserves (GKZ of the Russian Federation).

---

### **СИМОНЯНЦ Сергей Липаритович**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры бурения нефтяных и газовых скважин РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, действительный член (академик) Российской академии естественных наук (РАЕН), действительный член академии технологических наук РФ, член диссертационного совета Д 212.200.15 на базе Российского государственного университета (национальный исследовательский университет) нефти и газа имени И.М. Губкина, член Экспертного совета по проблемам нефти и газа ВАК при Минобрнауки России, Лауреат премии имени академика И.М. Губкина (1989), Почётный нефтяник (1998), Почётный работник топливно-энергетического комплекса (2000), Почётная серебряная медаль В.И. Вернадского, РАЕН

(2010), награждён медалью «В память 850-летия Москвы» (1997), член редакционных советов научно-технических журналов «Вестник Ассоциации буровых подрядчиков» и «Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море».

**SIMONYANTS Sergey Liparitovich**

Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Department of drilling of oil and gas wells of RGU of oil and gas named after I.M. Gubkin, Full Member (Academician) of the Russian Academy of Natural Sciences (RANS), Full Member of Academy of Technological Sciences of the Russian Federation, Member of dissertation council D 212.200.15 on the basis of the Russian state university (the national research university) of oil and gas of I.M. Gubkin, Member of Advisory Council on problems of oil and gas of VAK at the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Winner of an Award of a named after academician I.M. Gubkina (1989), Honourable Oil Industry Worker (1998), Honorary Worker of fuel and energy complex (2000), Honourable Silver Medal of V.I. Vernadsky, Russian Academy of Natural Sciences (2010), Awarded with a medal «In Commemoration of the 850<sup>th</sup> Anniversary of Moscow» (1997), Member of editorial councils of the scientific and technical magazines «Bulletin of Association of drilling contractors» and «Construction of oil and gas wells by land and by sea».

-----  
**СОЛОВЬЁВА Валентина Николаевна**

кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Заслуженный работник нефтяной и газовой промышленности РФ.

**SOLOVYYOVA Valentina Nikolaevna**

Candidate of Technical Sciences, Senior Research Associate, Honoured Worker of the oil and gas industry of the Russian Federation.

-----  
**ТРЕТЬЯК Александр Яковлевич**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Нефтегазовые техника и технологии» ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова», академик РАЕН, председатель диссертационного совета Д 212.304.07 при ФГБОУ ВО «ЮРГПУ (НПИ) имени М.И. Платова», Почётный разведчик недр, Почётный работник высшего профессионального образования Российской Федерации, награждён орденом Российской академии естественных наук «За пользу Отечеству» имени В.Н. Татищева, награждён медалью «За заслуги перед университетом», Заслуженный работник высшей школы Российской Федерации, присвоено почётное звание «Заслуженный профессор ЮРГТУ (НПИ)».

**TRETIK Alexander Yakovlevich**

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department «Oil and gas equipment and technologies» FGBOU VO «The southern Russian state polytechnical university (NPI) of M.I. Platov», Academician of the Russian Academy of Natural Sciences, Chairman of dissertation council D 212.304.07 at FGBOU VO «YURGPU (NPI) of M.I. Platov», Honourable prospector of subsoil, Honorary Worker of higher education of the Russian Federation, Awarded the order the Russian academy of natural sciences «For advantage to the Fatherland» named after V.N. Tatishchev, Honoured worker of the higher school of the Russian Federation, Awarded with the medal «For Merits before the University», Honorary title «Honored professor of YURGTU (NPI)».



### **ХИЖНЯК Григорий Петрович**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Нефтегазовые технологии» ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

### **HIZHNYAK Grigory Petrovich**

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department «Oil and gas technologies» FGBOU VO «Perm National Research Polytechnical University».

---

### **ЯРЕМИЙЧУК Роман Семёнович**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры бурения нефтяных и газовых скважин Ивано-Франковского национального технического университета нефти и газа, Заслуженный деятель науки СССР, Лауреат Государственной премии в области науки Украины, награждён орденом «За заслуги» 3-ей степени, действительный член Научного общества имени Шевченко, академик Украинской нефтегазовой академии, Иностраннный член Российской академии естественных наук имени В. Вернадского, награждён серебряной медалью имени Вернадского.

### **YAREMIYCHUK Roman Semyonovich**

Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Department of drilling of oil and gas wells of the Ivano-Frankivsk national technical university of oil and gas, Honored Worker of Science of USSR, Winner of the State Award in the field of science of Ukraine, Awarded the order «For Merits» of the 3-rd degree, Full Member of Scientific Organization of Shevchenko, Academician of the Ukrainian oil and gas Academy, Foreign Member of the Russian Academy of Natural Sciences of V. Vernadsky, Awarded with a silver medal named after Vernadsky.

---

### **Доктор Джошуа Лелези Конне**

доктор химии материалов, Бристоль, Великобритания, старший лектор, отдел химии, отделение естественных наук, государственный университет рек, Порт-Харкорт, Нигерия.

### **Dr. Joshua Lelesi Konne**

PhD Materials Chemistry, Bristol, UK, Senior Lecturer, Chemistry Department, Faculty of Science, Rivers State University, Port Harcourt, Nigeria.



# **БУЛАТОВСКИЕ ЧТЕНИЯ**

**Материалы II Международной  
научно-практической конференции  
(31 марта 2018 г.)**

**Зарегистрировано в Национальном агентстве ISSN  
Российской Федерации 27.07.2017**

**ISSN 2587-8913**

---

**Том 6:**

**ТЕХНИЧЕСКИЕ  
И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ.**

**ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ  
В НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ**

---

**Сборник статей**

**Краснодар  
2018**

УДК 622.1+622.323  
ББК 33.1+33.36-5  
Б90

**Б90 Булатовские чтения** : материалы II Международной научно-практической конференции (31 марта 2018 г.) : в 7 т. : сборник статей / Под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. О.В. Савенок. – Краснодар : Издательский Дом – Юг.

Т. 6: Технические и технологические разработки.  
Электрооборудование в нефтегазовой отрасли. – 2018. – 254 с.

Сборник содержит материалы II Международной научно-практической конференции «Булатовские чтения», проведенной в г. Краснодаре 31 марта 2018 г., посвященной памяти выдающегося инженера-нефтяника, доктора технических наук, профессора, академика Анатолия Ивановича Булатова.

Участники конференции дали всестороннюю характеристику развития нефтегазовой отрасли, проанализировали применяемые на сегодняшний день методы, технику и технологии и сделали предложения по их модернизации; выработали рекомендации по дальнейшему развитию прикладных направлений научных исследований; внесли предложения по совершенствованию кадрового обеспечения и международному сотрудничеству.

В сборнике изложены результаты исследовательских и опытно-конструкторских работ по широкому кругу вопросов, а также рассмотрены актуальные вопросы и проблемы освоения углеводородного потенциала Российской Федерации и зарубежных стран. Решение поставленных задач отражено в создании новых технологий разработки нефтегазовых месторождений, добычи, транспортировки и переработки углеводородного сырья. Широко представлены вопросы истории и современного состояния нефтегазового комплекса, подготовки кадров, разработки и внедрения энергетического и технологического оборудования, экономических и правовых исследований.

Научное издание предназначено для докторов и кандидатов наук различных специальностей, преподавателей вузов, докторантов, аспирантов, магистрантов, практикующих специалистов, студентов учебных заведений, а также всех, проявляющих интерес к рассматриваемой проблематике с целью использования в научной работе и учебной деятельности.

Издание выполнено в виде 7 томов, соответствующих тематическим направлениям работы конференции.

Материалы публикуются в авторской редакции. За достоверность сведений, изложенных в статьях, ответственность несут авторы.

Мнение редакции может не совпадать с мнением авторов статей. При использовании и заимствовании материалов ссылка на издание обязательна.

ББК 33.1+33.36-5  
УДК 622.1+622.323

© Коллектив авторов, 2018  
© ООО «Издательский Дом – Юг», 2018

# **READINGS OF A.I. BULATOV**

**Materials of II International  
scientific and practical conference  
(on March 31, 2018)**

**It is registered in the National agency ISSN of  
the Russian Federation 07.27.2017**

**ISSN 2587-8913**

---

**Volume 6:  
TECHNICAL  
AND TECHNOLOGICAL DEVELOPMENTS.  
ELECTRIC EQUIPMENT  
IN OIL AND GAS BRANCH**

---

**Conference bulletin**

Krasnodar  
2018

UDC 622.1+622.323  
BBC 33.1+33.36-5  
Б90

Б90 **Readings of A.I. Bulatov** : Materials of II International scientific and practical conference (On March 31, 2018) : in 7 v. : Conference bulletin / Under the general editor, Doctor of Technical Sciences, Professor O.V. Savenok. – Krasnodar : Publishing House – South.

V. 6: Technical and technological developments.  
Electric equipment in oil and gas branch. – 2018. – 254 p.

The Conference bulletin contains materials of the II International scientific and practical conference «Readings of A.I. Bulatov» held in Krasnodar on March 31, 2018 devoted to memory of the outstanding oil engineer, Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician Anatoly Ivanovich Bulatov.

Participants of the Conference gave a comprehensive characteristic of the development of oil and gas fields, analysed the methods applied today, the equipment and technology and made offers on their modernization; developed recommendations about further development of applied scientific research; made offers on improvement of staffing and the international cooperation.

In the Conference bulletin results of research and developmental works on a wide range of questions are stated and also topical issues and problems of development of hydrocarbon capacity of the Russian Federation and foreign countries are considered. The solution based on the objectives is reflected in creation of new technologies of development of oil and gas fields, production, transportation and processing of hydrocarbon raw materials. Questions of history and the current state of an oil and gas complex, training, development and deployment of power and processing equipment, economic and legal researches are widely presented.

The scientific publication is intended for doctors and candidates of science of various specialties, teachers of higher education institutions, doctoral candidates, graduate students, undergraduates, practicing experts, students of educational institutions and also everyone, showing interest in the considered perspective for the purpose of use in scientific work and educational activity.

The edition is executed in 7 volumes corresponding to the thematic areas of the Conference.

Materials are published in author's original form as they were presented. Authors bear the reliability and responsibility of the data stated in the articles.

Editorial opinion can not coincide with opinion of authors of articles. It is obligatory that all materials cited are referenced.

BBC 33.1+33.36-5  
UDC 622.1+622.323

© Group of authors, 2018  
© LLC «Publishing House – South», 2018



## ОГЛАВЛЕНИЕ

\*\*\*\*\*

## TABLE OF CONTENTS

## ТЕХНИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

\*\*\*\*\*

## TECHNICAL AND TECHNOLOGICAL DEVELOPMENTS

<b>Phi Hong Thinh, Doan Cong Bien, Pham Minh Nam, Trinh Ngoc Anh</b> Cement deep mixing for soft soil improvement in Vietnam .....	23
<b>Фи Х.Т.</b> Геологические явления в связи с извлечением подземных вод на территории города Ханоя (Вьетнам) .....	31
<b>Phi Hong Thinh</b> The geological phenomena due to the extraction of underground waters in the territory of the city of Hanoi (Vietnam)	
<b>Абашев Д.М., Миляев И.М., Алымов М.И., Буряков И.Н., Юсупов В.С., Зеленский В.А., Лайшева Н.В.</b> Магнитные свойства порошкового магнитотвёрдого сплава 27X10KM .....	38
<b>Milyaev I.M., Alymov M.I., Buryakov I.N., Yusupov V.S., Zelensky V.A., Laysheva N.V.</b> Magnetic properties of powder magnetosolid alloy 27X10KM	
<b>Галиев А.А.</b> Программный комплекс и методика оптимизации планировки высадки деревьев в городе .....	45
<b>Galiev A.A.</b> Program complex and methodology of optimization of planning of tilling of trees in the city	
<b>Гасанов Р.А., Гасимова Т.М.</b> Разработка захватных механизмов на основе эффекта «сварка трением» .....	48
<b>Gasanov R.A., Gasymova T.M.</b> Development of gripping mechanisms on the basis of effect «welding by friction»	
<b>Грушев В.В.</b> Антикоррозионная защита оборудования от действия агрессивных средств минеральными покрытиями, внедряемыми ультразвуковой обработкой .....	51
<b>Grushev V.V.</b> Anticorrosion protection of equipment from the action of aggressive agents with mineral coatings by the introduced ultrasonic treatment	
<b>Гулгезли А.С., Ефендиев О.Ю.</b> Устойчивость прямого стержня из пористого материала, шарнирно закрепленного концами .....	55
<b>Gulgezli A.S., Efendiyev O.Yu.</b> Stability of a direct core from the porous material pivotally fixed by the ends	
<b>Магеррамова Т.М. кызы</b> Алгоритм оптимизации режимов технологического процесса получения пропиленгликоля .....	60
<b>Magerramova T.M.</b> Algorithm of optimization modes of technological process of propilenglikol production	
<b>Мухаметрахимов М.Х.</b> Получение высокопрочных слоистых композитных материалов из титанового сплава BT6 в условиях низкотемпературной сверхпластичности .....	65
<b>Mukhametrakhimov M.K.</b> Production of high-strength layered composit materials from temperature superplasticity	
<b>Окурокова О.В., Цыганов И.А.</b> Получение электротехнической изотропной стали для высокочастотных машин .....	70
<b>Okorokova O.V., Tsyganov I.A.</b> Obtaining of electrotechnical isotropic steel for rapid machines	



<b>Рахмонов Т.З.</b>	
Методы применения пылеулавливающего аппарата мокрого типа в технологических схемах очистки промышленных выбросов от мелкодисперсных частиц .....	73
<b>Rahmonov T.Z.</b>	
Methods of application of a wet dust collector in technological schemes for cleaning industrial emissions from fine particles	
<b>Рахмонов Т.З.</b>	
Исследование гидродинамики массообменных тарелок колонных аппаратов установок для очистки природного газа .....	79
<b>Rahmonov T.Z.</b>	
Investigation of hydrodynamics of mass exchange plates of column apparatuses for natural gas purification plants	
<b>Ткачёв Е.С.</b>	
Разработка новых сталей для повышения энергетической эффективности угольных теплоэлектростанций .....	85
<b>Tkachyov E.S.</b>	
Development of new steels for increase in power efficiency of coal thermal power plants	
<b>Филиппов А.А., Пачурин Г.В., Кузьмин А.Н.</b>	
Экологичная схема подготовки проката для крепежных изделий .....	93
<b>Filippov A.A., Pachurin G.V., Kuzmin A.N.</b>	
Environmental scheme of preparation of the roller for fixing products	
<b>Чичерин С.В.</b>	
Основные трудности, связанные с применением гибких теплоизолированных труб бесканальной прокладки тепловых сетей .....	97
<b>Chicherin S.V.</b>	
Major obstacles to flexible pipe systems for directly buried hot water networks	
<b>Шипулина Ю.В., Руденко А.М., Ермачков А.А., Власов В.А., Григорьев М.И.</b>	
Получение холода из солнечной энергии. Разработка гелиоэнергетических термотрансформаторов циклического действия .....	100
<b>Shipulina Yu.V., Rudenko A.M., Ermachkov A.A., Vlasov V. A., Grigoriev M.I.</b>	
Receiving cold from solar energy. development of heliopower thermotransformers of cyclic action	
<b>Юсубов Ф.Ф.</b>	
Исследование триботехнической эффективности наноструктурных фрикционных материалов для тормозных систем .....	105
<b>Yusubov F.F.</b>	
Investigation of tribotechnical efficiency of nanostructured friction materials for brake systems	
<b>Ялакаева М.А.</b>	
Освоение частного сектора по технологии FTTH .....	108
<b>Yalakaeva M.A.</b>	
Development of the private sector on FTTH technology	

## ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ В НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ

\*\*\*\*\*

### ELECTRIC EQUIPMENT IN OIL AND GAS BRANCH

<b>Автайкин И.Н., Квон А.М.</b>	
Использование среды Ansoft Maxwell на этапе исследования 3D модели аксиального электродвигателя .....	113
<b>Avtaykin I.N., Kvon A.M.</b>	
Using the Ansoft Maxwell environment in the exploration phase, the 3D model of the axial electric motor	
<b>Автайкин И.Н., Квон А.М.</b>	
Определение основных геометрических размеров магнитопровода аксиальной асинхронной машины .....	116
<b>Avtaykin I.N., Kvon A.M.</b>	
Determination of the main geometric dimensions of the magnetic circuit of the axial induction machines	





<b>Алиева Л.А., Маилов Р.А. оглы</b> Разработка системы управления сложными коммутируемыми цепями на базе программируемых контроллеров .....	119
<b>Aliyeva L.A., Mayilov R.A.</b> Development of a control system for complex commutated circuits based on programmable controllers	
<b>Белоусов А.С., Мещеряков В.Н.</b> Модель преобразователя частоты с пространственно-векторной широтно-импульсной модуляцией для двухфазного электропривода .....	122
<b>Belousov A.S., Meshcheryakov V.N.</b> Model of frequency converter with Space Vector Pulse Width Modulation for two-phase electric drive	
<b>Брейдо И.В., Котов Е.С., Сичкаренко А.В.</b> Система автоматического контроля режимов работы подстанций .....	128
<b>Breydo I.V., Kotov E.S., Sichkarenko A.V.</b> System of automatic control of working hours of substations	
<b>Гайтов Б.Х., Артемян К.З., Христофоров М.С., Шаршак А.А.</b> Регулировочные характеристики ветро-солнечного генератора для электроснабжения объектов нефтегазовой отрасли .....	131
<b>Gaitov B.H., Artenyan K.Z., Khristoforov M.S., Sharshak A.A.</b> Adjusting characteristics of a wind-solar generator for power supply of oil and gas facilities	
<b>Гайтов Б.Х., Артемян К.З., Дюка К.В., Христофорова К.С.</b> Технико-экономические показатели применения установки для сепарирования нефти совмещенной конструкции .....	134
<b>Gaitov B.H., Artenyan K.Z., Duka K.V., Khristoforova K.S.</b> Technical and economic indicators of application of a unit for oil separation of a combined structure	
<b>Головин А.Ю., Кокорев А.В., Мещеряков В.Н.</b> Система импульсного управления ДПТ с отдачей энергии в трёхфазную сеть переменного тока ....	137
<b>Golovin A.Y., Kokorev A.V., Meshcheryakov V.N.</b> System of DC motor impulse control control with recuperation in three-phase alternating current network	
<b>Гололобова А.А., Гололобов Д.В.</b> Прогнозирование погрешностей геометрических параметров технологической оснастки в процессе ее проектирования .....	141
<b>Gololobova A.A., Gololobov D.V.</b> The prediction errors of the geometric parameters of the tooling during its design	
<b>Гололобова А.А., Гололобов Д.В.</b> Статическая поднастройка станка с ЧПУ с использованием оптической системы .....	144
<b>Gololobova A.A., Gololobov D.V.</b> Static possibility for adjustment of the CNC machine with the optical system	
<b>Добробаба Ю.П., Прохоренко Н.Я., Кошкин Г.А.</b> Оптимальное по быстродействию управление средними перемещениями исполнительного органа электропривода постоянного тока с зависящим от скорости моментом сопротивления .....	148
<b>Dobrobaba Yu.P., Prokhorenko N.Y., Koshkin G.A.</b> Time-optimal control the average displacement of the executive body of DC motor with dependent from the speed point of resistance	
<b>Добробаба Ю.П., Кошкин Г.А., Синюк В.П.</b> Энергоэффективная второго вида диаграмма перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока .....	151
<b>Dobrobaba Yu.P., Koshkin G.A., Sinyuk V.P.</b> Energy efficient second type diagram for movement of executive body of precision DC electric drive	
<b>Добробаба Ю.П., Кошкин Г.А., Громницкий Е.Е.</b> Оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока с упругим валопроводом с ограничениями максимального и минимального значений тока и пятой производной скорости .....	159
<b>Dobrobaba Yu.P., Koshkin G.A., Gromnitsky E.E.</b> Time-optimal diagram of movement of executive body of the direct current drive with elastic shafting with constrains of maximum and minimum current and the fifth derivative of the speed	



- Добробаба Ю.П., Кошкин Г.А., Громницкий Е.Е.**  
 Оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока с упругим валопроводом с ограничениями максимального и минимального значений тока, скорости и её пятой производной ..... 167  
**Dobrobaba Yu.P., Koshkin G.A., Gromnitsky E.E.**  
 Time-optimal diagram of movement of executive body of the direct current drive with elastic shafting with constrains of maximum and minimum current and the fifth derivative of the speed
- Еременко С.С., Попов Б.К.**  
 Разработка основных положений расчёта электромагнитного поля катушки в трёхмерном пространстве ..... 175  
**Eremenko S.S., Popov B.K.**  
 Development of the basic positions of calculation of electromagnetic field of coil in three-dimensional space
- Карандей В.Ю., Афанасьев В.Л., Махинько В.С., Ляшенко А.М.**  
 Расчет электромагнитных параметров электропривода насоса горизонтальной конструкции ..... 181  
**Karandey V.Yu., Afanasiev V.L., Mahinko V.S., Lyashenko A.M.**  
 Calculation of electromagnetic parameters of the electric drive of the pump of the horizontal design
- Карандей В.Ю., Афанасьев В.Л., Махинько В.С., Ляшенко А.М.**  
 Расчет электромагнитных параметров электропривода насоса вертикальной конструкции ..... 185  
**Karandey V.Yu., Afanasiev V.L., Mahinko V.S., Lyashenko A.M.**  
 Calculation of electromagnetic parameters of the electric drive of the pump of the vertical design
- Карандей В.Ю., Афанасьев В.Л., Махинько В.С., Ляшенко А.М.**  
 Алгоритм программ для расчета электромагнитных параметров электропривода насосов различных конструкций ..... 189  
**Karandey V.Yu., Afanasiev V.L., Mahinko V.S., Lyashenko A.M.**  
 Algorithm of programs for calculation of electromagnetic parameters of the electric drive of pumps of various designs
- Карандей В.Ю., Афанасьев В.Л., Махинько В.С., Ляшенко А.М.**  
 Определение запасенной энергии электропривода насосов различных конструкций ..... 193  
**Karandey V.Yu., Afanasiev V.L., Mahinko V.S., Lyashenko A.M.**  
 Definition of the reserved energy of the electric drive of pumps of various designs
- Кашин Я.М., Ким В.А., Христофоров М.С., Шаршак А.А.**  
 Использование двухвходовой генераторной установки для преобразования энергии ветра и солнца с целью электроснабжения локальных маломощных объектов нефтегазовой отрасли ..... 197  
**Kashin Ya.M., Kim V.A., Khristoforov M.S., Sharshak A.A.**  
 The use of a two-input generator set for converting wind and solar energy for the purpose of supplying local low-power objects of the oil and gas industry
- Кашин Я.М., Ким В.А., Войнов А.В.**  
 Бесконтактный многофазный генератор переменного тока ..... 202  
**Kashin Ya.M., Kim V.A., Voynov A.V.**  
 Non-contact multiphase AC generator
- Копелевич Л.Е., Ким В.А., Шаршак А.А.**  
 Математическая модель температурного поля установки для сепарирования нефти совмещенной конструкции ..... 205  
**Kopelevich L.E., Kim V.A., Sharshak A.A.**  
 Mathematical model of the temperature field of a unit for oil separation of a combined structure
- Кульбаракова М.Б., Руденко М.Ф., Руденко А.М.**  
 Аналитические исследования плоского концентратора солнечной энергии для электро-теплоснабжения вахтовых поселков нефтяников ..... 208  
**Kulbarakova M.B., Rudenko M.F., Rudenko A.M.**  
 Analytical researches of the flat concentrator of solar energy for electro-heat supply field camps of oil industry workers
- Мазуров П.С., Тягливая И.Н.**  
 Модернизация электрообессоливающих установок (ЭЛОУ) ..... 212  
**Mazurov P.S., Tyaglyvaya I.N.**  
 Modernization of electro-desalting plants (ELOU)



<b>Маркешин Е.Р., Морозова Е.С.</b> Об электромагнитной дефектоскопии скважин .....	215
<b>Markeshin E.R., Morozova E.S.</b> About electromagnetic defectoscopy of wells	
<b>Мещеряков В.Н., Шишлин Д.И., Ласточкин Д.В.</b> Энергосберегающий каскадно-частотный электропривод для турбомеханизмов нефтегазовой отрасли .....	218
<b>Meshcheryakov V.N., Shishlin D.I., Lastochkin D.V.</b> Energy-saving cascade-frequency electric drive for turbo-mechanisms of oil and gas industry	
<b>Мещеряков В.Н., Данилов В.В., Мещерякова О.В.</b> Математическое моделирование процесса намагничивания асинхронного электродвигателя на начальном участке пуска при работе от преобразователя частоты .....	221
<b>Meshcheryakov V.N., Danilov V.V., Meshcheryakova O.V.</b> Mathematical modeling of the magnetization process of the induction motor at the initial part of the start by operation from the frequency converter	
<b>Пауков Д.В.</b> Экспериментальные исследования переходных процессов в аксиальном генератора постоянного тока .....	225
<b>Paikov D.V.</b> Pilot studies of transition processes in axial the generator of the direct current	
<b>Руденко В.Г., Киселев С.П.</b> Аксиальные регуляторы напряжения для радиотехнических систем .....	230
<b>Rudenko V.G., Kiselev S.P.</b> Axial voltage regulators for radio systems	
<b>Самородов А.В., Ким В.А., Христофоров М.С.</b> Способы синхронизации ветро-солнечных генераторов для электроснабжения локальных объектов нефтегазовой отрасли .....	233
<b>Samorodov A.V., Kim V.A., Khristoforov M.S.</b> Ways of synchronization of wind-solar generators for power supply of local oil and gas facilities	
<b>Тихонов Д.А., Попов Б.К.</b> Разработка основных положений расчёта электрических схем частотных преобразователей .....	236
<b>Tikhonov D.A., Popov B.K.</b> Development of the basic positions of calculation of electrical schemes of frequency converters	
<b>Хазиева Р.Т., Бочкарева Т.А.</b> Электрогидроимпульсная очистительная система с индуктивно-емкостным преобразователем .....	242
<b>Khazieva R.T., Bochkareva T.A.</b> Electro-hydro impulse purification system with inductive-capacitive converter	
<b>Христофоров М.С., Христофорова К.С.</b> Перспективная конструкция бесконтактного ветро-солнечного генератора .....	246
<b>Hristoforov M.S., Hristoforova K.S.</b> Prospective design of non-contact wind-solar generator	
<b>Ягафаров И.Р.</b> Автоматизация систем электрообогрева МВ-35 .....	248
<b>Yagafarov I.R.</b> Automation of electrical heating systems MB-35	



**ТЕХНИЧЕСКИЕ  
И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ**

**\*\*\*\*\***

**TECHNICAL  
AND TECHNOLOGICAL DEVELOPMENTS**





УДК 624.131

## CEMENT DEEP MIXING FOR SOFT SOIL IMPROVEMENT IN VIETNAM

### CEMENT DEEP MIXING FOR SOFT SOIL IMPROVEMENT IN VIETNAM

#### Phi Hong Thinh

University of Transport and Communications, Hanoi, Vietnam  
phthinh.tomsk@gmail.com

#### Doan Cong Bien

University of Transport and Communications, Hanoi, Vietnam

#### Pham Minh Nam

University of Transport and Communications, Hanoi, Vietnam

#### Trinh Ngoc Anh

University of Transport and Communications, Hanoi, Vietnam

**Аннотация.** Cement Deep Mixing (CDM) method is a technique to chemically solidify and strengthen soft soils by in-situ mixing of the soil with cement slurry. For many years, this high quality, environment friendly, low cost ground improvement technique has become the most popular ground improvement method in Vietnam. The CDM method is often superior to other methods in a wide range of ground improvement applications such as prevention of embankment in stability and settlement, improving ground stability for construction projects, countermeasures against liquefaction, and reinforcement of ground to improve earthquake-response of superstructures. In this paper, the CDM is analyzed by FEM model with support of Plaxis software to estimate the effective mean stress, horizontal and vertical displacement when diameter of column is 0.8 m; length of column changed from 9m to 11m and column spacing changed from 1.8m to 3.0 m when improve soft soil for a road in Quang Ninh province of Vietnam. The research results show that with diameter of CDM column is 0.8m, column length of 11m, column spacing of 2.2m, and cement content of 300kg/m<sup>3</sup> are suitable CDM parameters in soft soil improvement for this road.

**Ключевые слова:** Cement Deep Mixing (CDM), Stability, Displacement, Plaxis, FEM model.

#### Phi Hong Thinh

University of Transport and Communications,  
Hanoi, Vietnam  
phthinh.tomsk@gmail.com

#### Doan Cong Bien

University of Transport and Communications,  
Hanoi, Vietnam

#### Pham Minh Nam

University of Transport and Communications,  
Hanoi, Vietnam

#### Trinh Ngoc Anh

University of Transport and Communications,  
Hanoi, Vietnam

**Annotation.** Cement Deep Mixing (CDM) method is a technique to chemically solidify and strengthen soft soils by in-situ mixing of the soil with cement slurry. For many years, this high quality, environment friendly, low cost ground improvement technique has become the most popular ground improvement method in Vietnam. The CDM method is often superior to other methods in a wide range of ground improvement applications such as prevention of embankment in stability and settlement, improving ground stability for construction projects, countermeasures against liquefaction, and reinforcement of ground to improve earthquake-response of superstructures. In this paper, the CDM is analyzed by FEM model with support of Plaxis software to estimate the effective mean stress, horizontal and vertical displacement when diameter of column is 0.8 m; length of column changed from 9m to 11m and column spacing changed from 1.8m to 3.0 m when improve soft soil for a road in Quang Ninh province of Vietnam. The research results show that with diameter of CDM column is 0.8m, column length of 11m, column spacing of 2.2m, and cement content of 300kg/m<sup>3</sup> are suitable CDM parameters in soft soil improvement for this road.

**Keywords:** Cement Deep Mixing (CDM), Stability, Displacement, Plaxis, FEM model.

## INTRODUCTION

Cement Deep Mixing Method (CDM) was derived from Sweden and Japan in 1960s. Dry mixing method application using lime powder and wet mixing cement has been used in Japan since the 1970s, during the same time as lime column was also introduced in Sweden [5]. This method is popular all around the world. Recently there are some more kinds of new material, such as cement-mixing, lime with gypsum, flyash or slag, introduced with advanced mixing equipment. The method is also applied in many countries to solve environmental problems such as preventing and treating pollution areas. Compared with a number of previous improvement methods, CDM technology can be processed at a depth of 50m under tight conditions, reduced of construction time for other items. Especially, with Japanese technology, it can be processed proximately 70m depth in offshore soil conditions.

In Viet Nam, CDM method was first introduced the 1980s under support constructed equipment by Swedish Geotechnical Institute (SGI). Up to now, this method has been applied in some constructions, and there are many limitations in the design, calculation and construction. In the design, CDM is calculated in terms of equivalent ground under the TCXDVN 385: 2006 standard developed by Vietnam Institute for Building Science and Technology in 2016. From 2013 to 2016, the quality of CDM was constructed in Viet Nam about 10.4 million meter with different items such as Road foundation of 59 %. According to the prediction of BOT data project, there will be increase in the number of CDM by 7.2 million meter between 2016 and 2018.



Figure 1 – The number of CDM used in Vietnam from 2013 to 2016 [10]

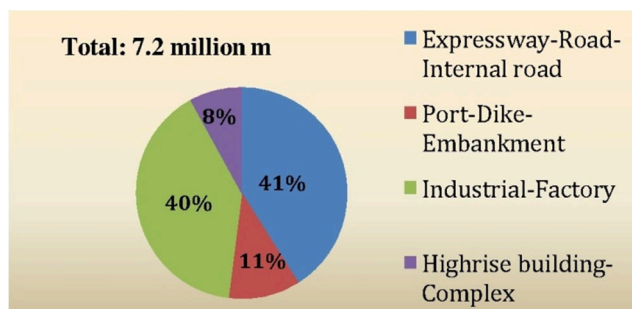


Figure 2 – Prediction of CDM quantity in Vietnam from 2016 to 2018 [10]

**METHODOLOGY**

Cement Deep Mixing (CDM) is a method for improving the ground to a prescribed strength by mixing cement slurry with the soft soil in situ. Generally, the cement used is either ordinary portland cement or a mixture of portland cement and blast-furnace slag. The cement alone creates cementitious materials through hydration, although the reaction differs with the soil type, the calcium hydroxide liberated from the cement also undergoes a pozzolanic reaction with the soil to create cementitious materials. As the mixture ages, these cementitious materials gradually fill the void space between the soil particles, which results in higher strength and lower volume compressibility of soil.

There are number of theory analysis to estimate settlement of cement deep mixing. According to TCXDVN 385: 2006 “Stabilization of Soft Soil by the Soil Cement Column Method” of Vietnam [1], the settlement of CDM column is calculate pursuant to ground equivalent method which is taken the average of modulus, shear strength value between ground and column. On the other hand, according to Asian Institute of Technology (AIT), the bearing capacity of single cement pile in weak clay is determined by surrounding the weak clay resistance (failure earth) or the shear strength resistance of the cement column (failure column), as documented by D.T. Bergado [5].

$$S_1 = \frac{q.H}{E_{tb}} = \frac{q.H}{a.E_c + (1-a)E_s}$$

- q: Loading of construction transfer to improvement stratum;
- H: Layer thickness;
- Ec: Modulus of column material,  
Ec = (50±100).Cc;
- Es: Elastic Modulus of soil between each column,  
Es = 250.Cu.

According to TCVN 9403-2012, ground equivalent method

$$Q_{ult.soil} = (\pi.d.L + \frac{9\pi.d^2}{4}).C_{u.soil}$$

- d: Cement column diameter;
- L: Length of cement column;
- Cu.soil: average undraige shear strength of surrounding soft soil (Determined by in-situ test, such as vane shear test (VST), cone penetration test (CPT));

$$Q_{ult.col} = (3.5C_{col} + K_{boh}).A_{col}$$

Kboh : Passive pressure.

According to Asian Institute of Technology (AIT)

In this paper, Finite element method (FEM) is applied to compute the settlement of the ground at several selected positions with the support of PLAXIS software. Both Plane Strain and Axisymmetric Models were used for CDM structures. A plane strain model is used for geometries with a (more or less) uniform cross-section and corresponding stress state and loading cheme over a certain length perpendicular to the cross section (Z-direction). Displacements and strains in Z-direction are assumed to be zero. However, normal stress in Z-direction are fully taken into account. An Axisymmetric model is used for circular structures with a (more or less) uniform radial cross section and loading scheme around the central axis, where the deformation and stress state are assumed to be identical in any radial direction [11].

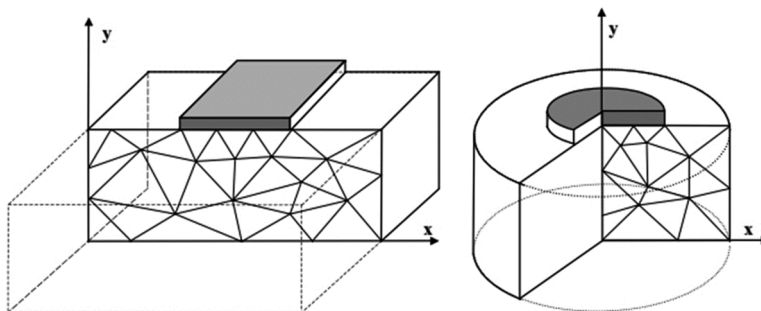


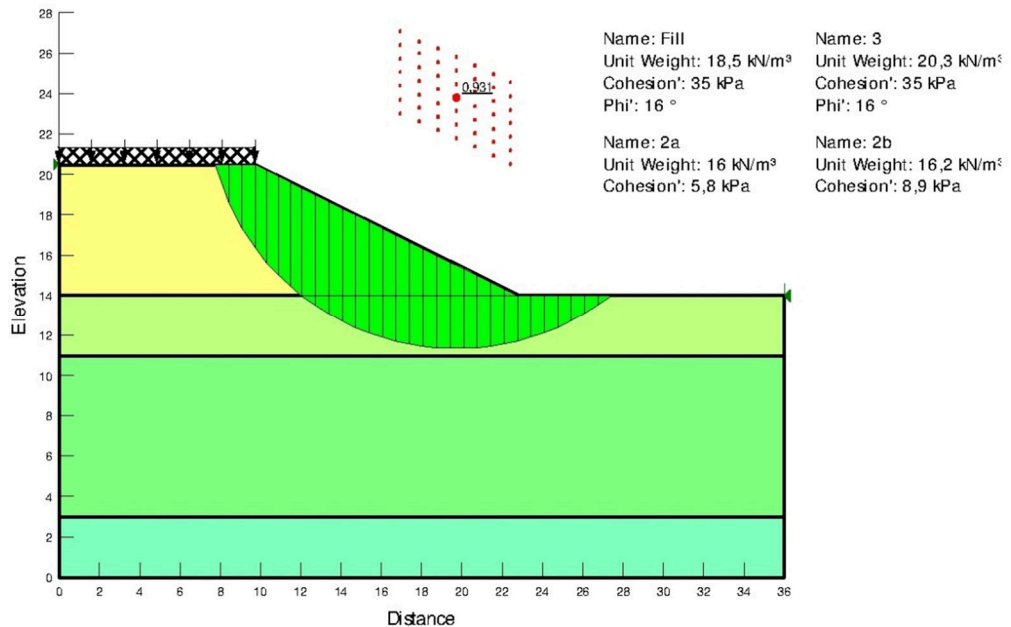
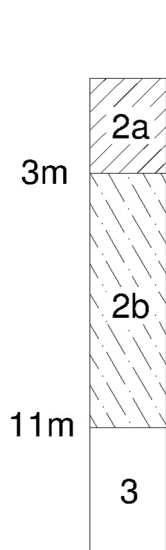
Figure 3 – Plane strain and Axisymmetric model [11]





**DESIGN AND ANALYSIS**  
**Geotechnical Condition**

Ha Long Cement Plant is one of the three large-scale cement projects of Quang Ninh Province, it was designed and provided equipment by F.L.Sminth of Denmark and was invested by Ha Long Cement Joint Stock Company. The factory is built on an area of 60.5ha, with a total investment of more than 3.984 billion VND. The access road from berth to the factory is more than 3km long, 26m wide, and 4m high designed over soft soils with the average thickness of 11m.



**Figure 4** – Geological strata

**Figure 5** – Overall stability of embankment calculated by Geoslope software

The geotechnical condition beneath of access road to Ha Long Cement Plant is rather complicated with the presence of soft soil layers of 2a, 2b. According to estimate preadsheet and Geo-slope software, the settlement is about 1.6m and overall stability coefficient ( $K_{min}$ ) = 0.93.

**Tab. 1** – Geotechnical data

Name	Symbol	Fill Soil	Silt Clay (layer 2a)	Clay (layer 2b)	Sandy Clay (layer 3)	Unit
Unit Weight Natural	$\gamma$	18.5	15.8	16	19.5	kN/m <sup>3</sup>
Plastic Limit	PL	-	54.94	54.41	29.15	%
Liquid Limit	LL	-	26.36	25.22	15.32	%
Plastic index	PI	-	28.58	29.18	13.84	%
Water content	W	-	64.46	61.89	22.2	%
Permeability Vertical	$K_y$	1 (m)	0.25	0.30	0.41	10 <sup>-4</sup> m/day
Permeability Horizontal	$K_x$	1(m)	0.75	0.91	1.24	10 <sup>-4</sup> m/day
Void Ratio	$e_0$	-	1.766	1.687	0.614	-
Compression index	$C_c$	-	0.55	0.44	0.10	-
Cohesion	c	35	5.8	8.9	35.0	kN/m <sup>2</sup>
Internal friction angle	$\phi$	16	2	2	16	Degree
Young's Modulus	$E_{ref}$	10000	1450	2200	8750	kN/m <sup>2</sup>
Poison's ratio	$\nu$	0.2	0.35	0.35	0.3	-

**Tab. 2** – Estimate settlement pursuant to the nondimensional time factor

Time	Nondimensional time factor	Consolidation	Total Settlement	Estimate Settlement
Year	$T_v$	U	S (cm)	S(t) (cm)
0.5	0.0017	3.3%	160	5.31
1	0.0033	6.7%	160	<b>10.63</b>
5	0.0166	14.5%	160	23.20
10	0.0333	20.5%	160	32.81
15	0.0499	25.2%	160	<b>40.17</b>
25	0.0832	32.5%	160	51.82
50	0.1664	46.0%	160	73.45

**Cement Deep Mixing Dimensions and Properties**

Based on calculation, the settlement will be about 1.6m and  $K_{min}$  is 0.93, so that ground improvement is necessary to ensure safety and smoothly during operation time. The soft soil improvement method chosen is CDM.

With live load (LL) = 15.15 kN/m<sup>2</sup>, the length of column (L) of 9 to 11m and spacing between columns (S) of 1.8m to 3.0m will be researched for selection.



Tab. 3 – CDM dimensions and Properties

Name	Model	Length (m)	Diameter (m)	Spacing (m)	Unconfined compressive strength (kN/m <sup>2</sup> )	Undrained Shear Strength (kN/m <sup>2</sup> )	Young's Modulus (kN/m <sup>2</sup> )	Poisson's ratio
CDM	Axisymmetric	9	0.8	1.8÷3.0	600	300	150000	0.2
		10		1.8÷3.0				
		11		1.8÷3.0				
	Plane Strain	11		2.2				

**Designed Result Analysis**

According to Axisymmetric model, there are simulations of cement deep mixing from 9m to 11m in length with a variety of spacing between 1.8m to 3.0m. The figures from 6 to 10 show vertical displacement distribution increased slightly in the number of column for spacing go up and reach a peak at 29.8cm for L = 9m, S = 3m. It is sharp fall by over 10cm for rise of CDM's length from 9m to 11m. For effective mean stresses, the stresses are distributed to both of column's tip and soil surrounding for kind of CDM friction. However, the major of stress transfers from embankment to layer 3 through column so there are high of stress at the tip of CDM, it is about 479.5 kN/m<sup>2</sup> for 11m of length and spacing 3m.

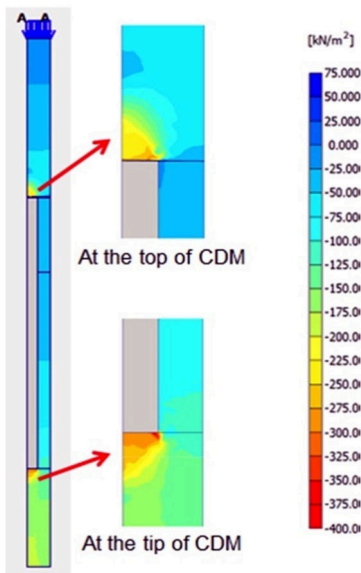


Figure 6 – Effective mean stresses

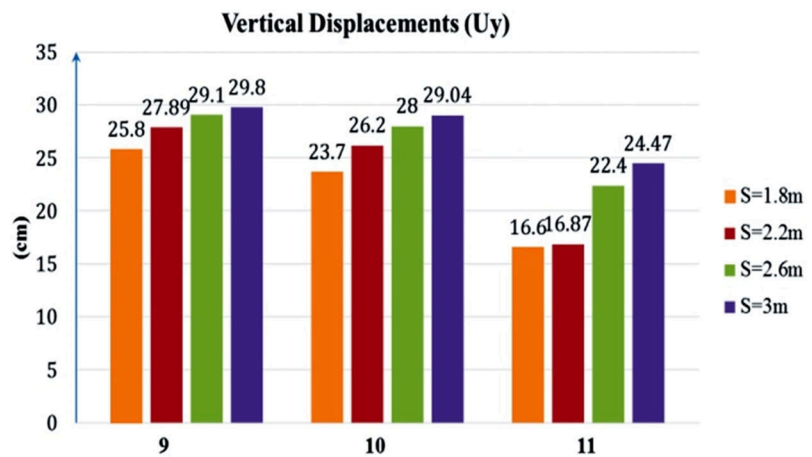


Figure 7 – Comparison of vertical displacements

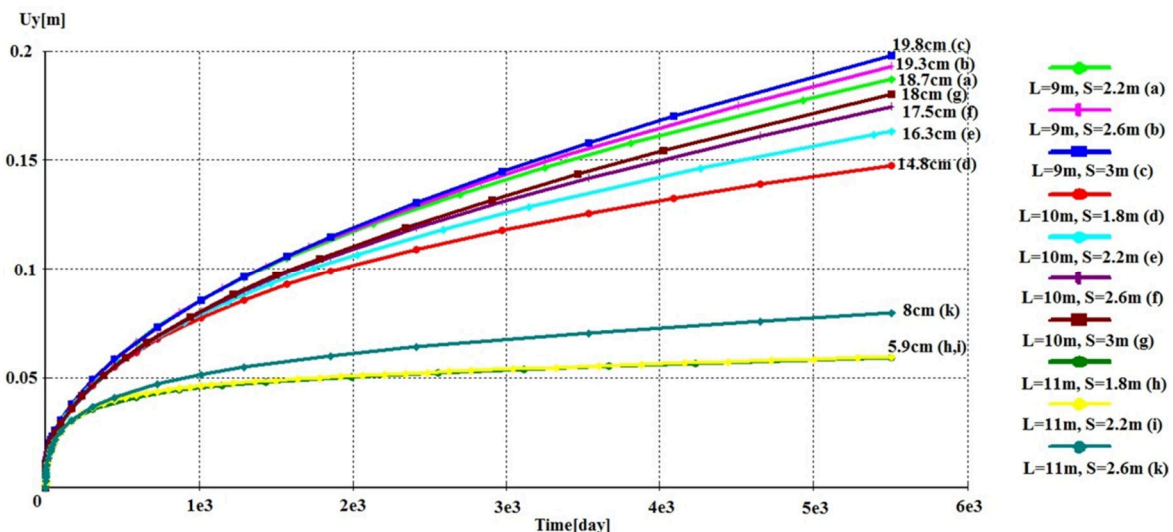


Figure 8 – Vertical displacements at the tip of each column

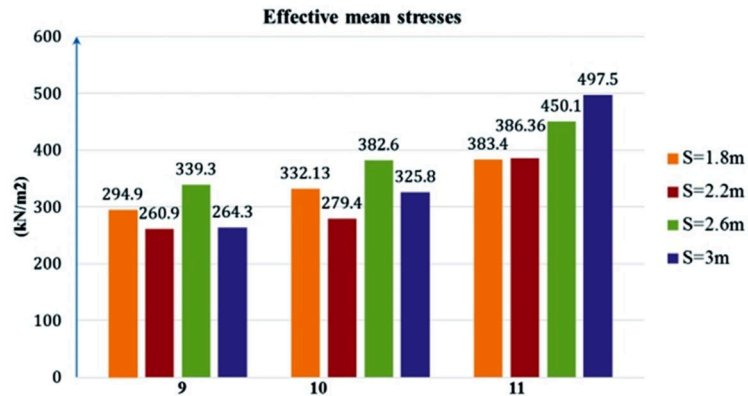


Figure 9 – Effective mean stresses comparison

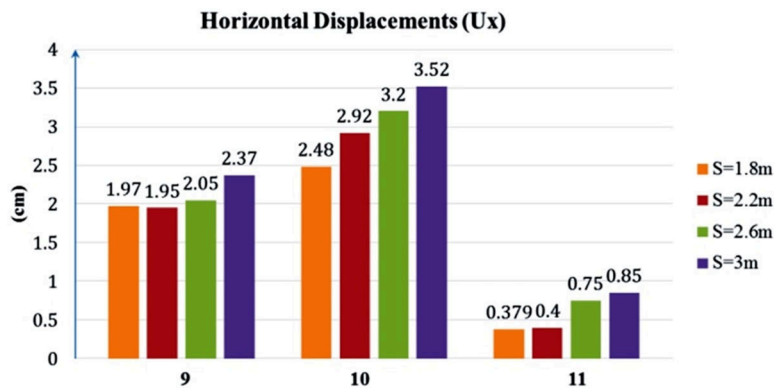


Figure 10 – Horizontal displacements comparison

According to Plane strain model, the CDM is designed with 19 columns with 11m in length and spacing of 2.2m. With the support of Plaxis software, the results show that vertical displacement and effective mean stress has a different in the number of each column. For example, column in the center of embankment, the settlement at the tip of column is proximately 5.5cm but it is 2cm for column near the toe of the embankment. Specially, this model can check the stability of embankment thought each stage of construction. It is peak at 2.1 for the last of the construction time and satisfy requirement on safety (overall stability coefficient should be greater than 1.4).

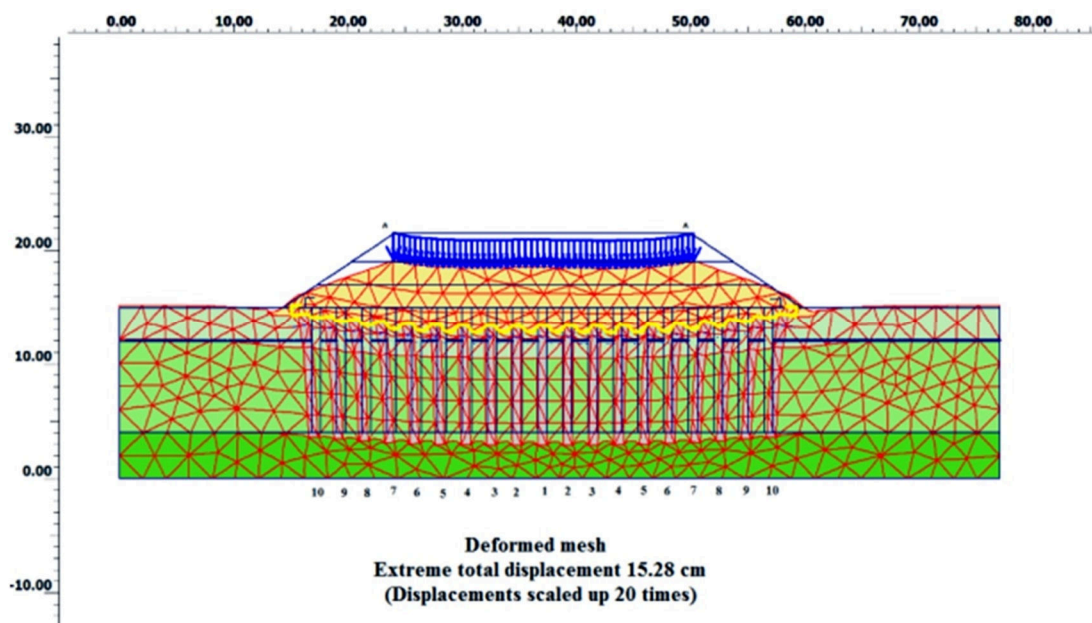


Figure 11 – Deformed mesh with scaled up 20 times

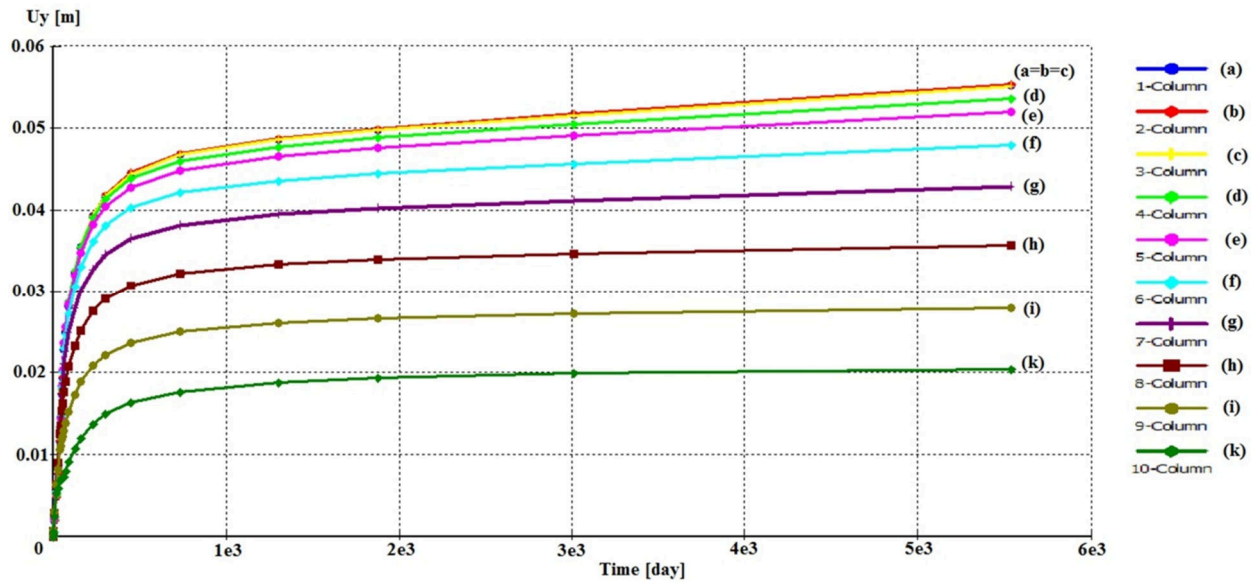


Figure 12 – Settlement of CDM for each column location

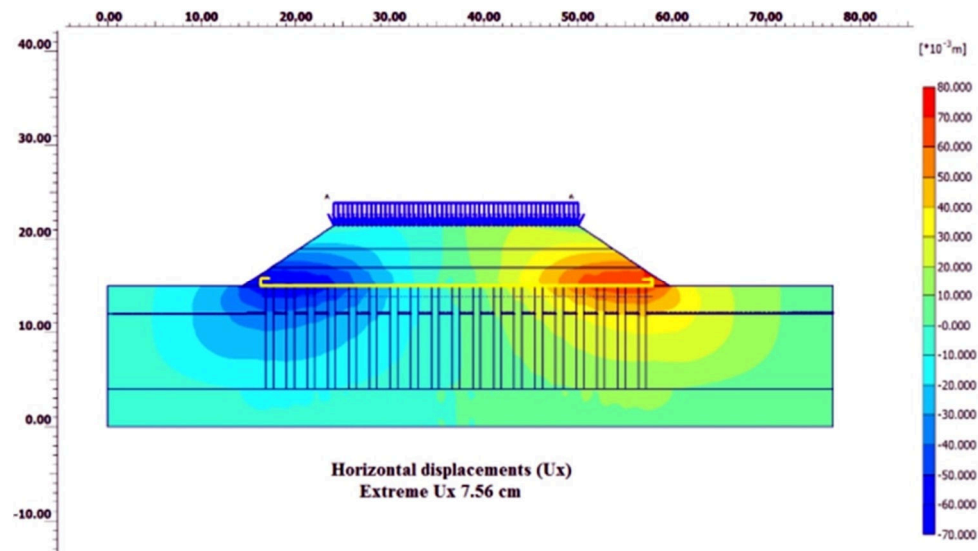


Figure 13 – Horizontal displacement ( $U_x$ ) of CDM

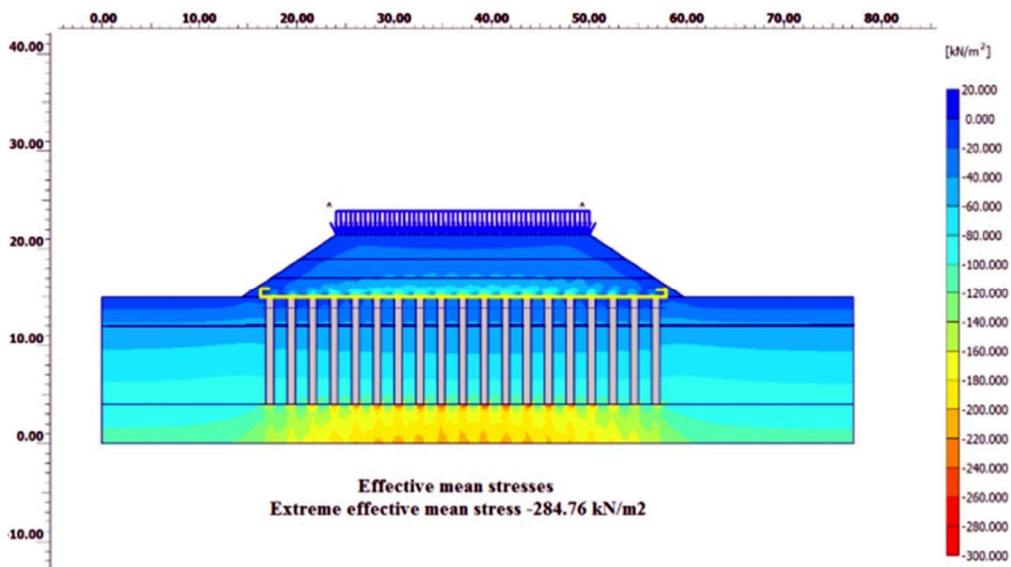


Figure 14 – Effective mean stresses of CDM

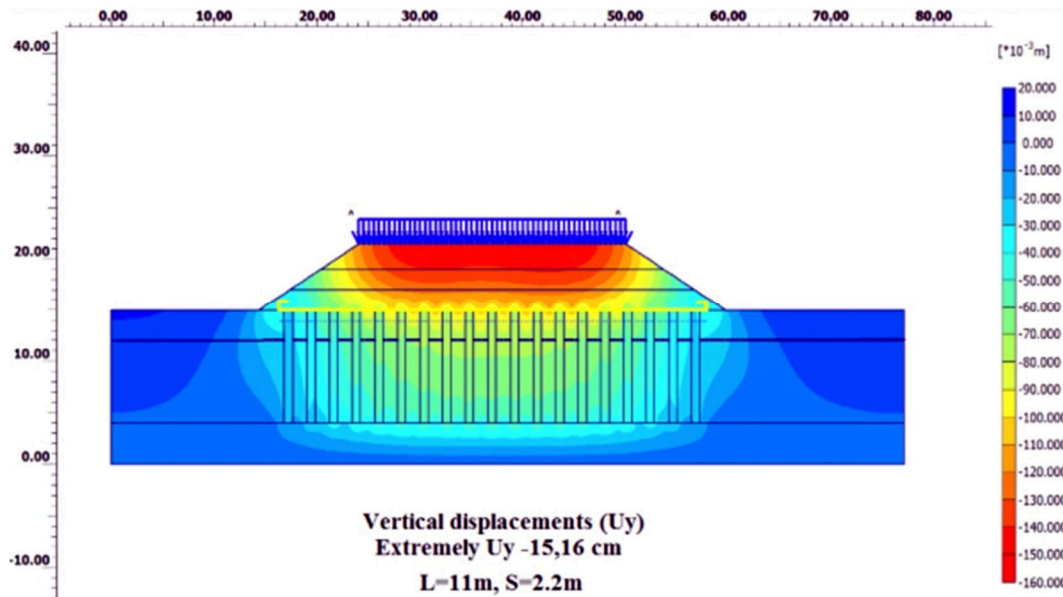


Figure 15 – Vertical displacements (Uy) of CDM

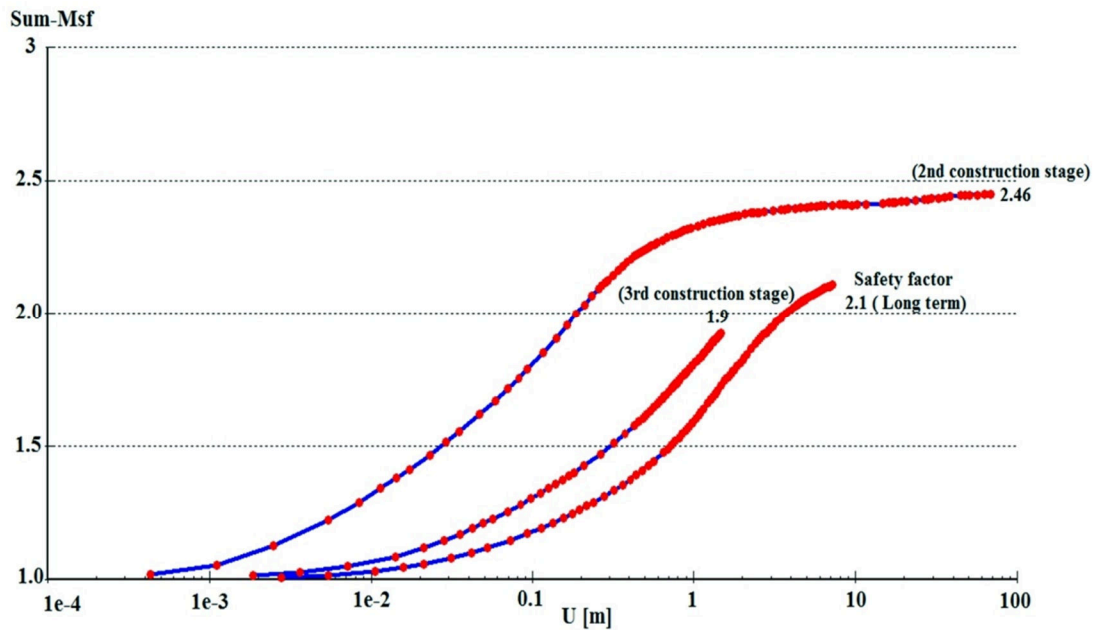


Figure 16 – Overall stability factor for construction stages

**CONCLUSION**

Application of CDM in soft soil improvement is aim to reduce the time of construction, reduce settlement and increase the stability of road embankment. This method is suitable for clay and high embankment.

CDM with diameter of 0.8m, length of 11m, spacing of 2.2m is proposed for soft soil improvement for the access road of Ha Long Cement Plant.

Special reinforcement for CDMs at the center of the embankment should be applied because positions at center line of embankment have the largest settlement.

The length of CDM column should be smaller than 20m and spacing between columns should not greater than 2.2m.

Load and stress are considered all directions around column in the axis symmetry model. However, the only one side was analyzed in the plane strain model.

The plane strain mode shows the work of all the piles as group column while the axissymmetry model only considers one column for all of them.

**Литература: / References:**



1. TCXDVN 385: 2006 «Stabilization of Soft Soil by the Soil Cement Column Method».
2. 22TCN262-2000 standard, «Quy trình khảo sát, thiết kế nền đường oto đắp trên nền đất yếu».
3. «Deep mixing for embankment and foundation support». FHWA-HRT-13-406
4. «The Deep Mixing Method». Masaki Kitazume, Masaaki Terashi. ISBN-978-0-203-58963-2.
5. Nguyen Viet Hung. «Nghiên cứu xác định các thông số chính khi sử dụng hệ cọc xi măng đất trong xây dựng nền đường đắp trên đất yếu ở Việt Nam», Dr. Nguyen Viet Hung.
6. Youngyth Taesiri, Ph.D, «Design of lime column for ground improvement of Bangna – Bang Pa Kong highway».
7. «Research on Correlation between Compression index (Cc) and Other Properties of Soil for Geotechnical Design in Coastal Regions of Viet Nam and Cambodia». Thinh PH, Tuan HA, Bien DC, Ha NH. MOJ Civil Eng 2(3): 00034. DOI: 10.15406/mojce.2017.02.00034
8. Tsuchida, Takashi. «Strength mobilization and the estimation of cement treated marine clays». Hiroshima University, Graduate School of Engineering.
9. L.T. Trung, D.T.K. Cuong, N.T. Kien. «Development and application of cement deep mixing method in Vietnam». Geotechnics for Sustainable Infrastructure Development, Geotec Hanoi 2016, ISBN 978-604-82-1821-8.
10. Binh N., Tomohide T., Masaki K. «Embankment slope supported by deep mixing columns with a shallow layer reinforcement». Geotechnics for Sustainable Infrastructure Development, Geotec Hanoi 2016, ISBN 978-604-82-1821-8.
11. PLAXIS VERSION 8, Material Models Manual.



УДК 624.131

## ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В СВЯЗИ С ИЗВЛЕЧЕНИЕМ ПОДЗЕМНЫХ ВОД НА ТЕРРИТОРИИ ГОРОДА ХАНОЯ (ВЬЕТНАМ)

### THE GEOLOGICAL PHENOMENA DUE TO THE EXTRACTION OF UNDERGROUND WATERS IN THE TERRITORY OF THE CITY OF HANOI (VIETNAM)

**Фи Х.Т.**

Ханойский университет транспорта и коммуникаций,  
Ханой, Вьетнам  
phthinh.tomsk@gmail.com

**Phi Hong Thinh**

Hanoi university of transport  
and communications,  
Hanoi, Vietnam  
phthinh.tomsk@gmail.com

**Аннотация.** В статье проанализированы геологические явления, возникающие в связи с извлечением подземных вод на территории города Ханоя (Вьетнам), сформулированы рекомендации для смягчения отрицательного влияния оседания земной поверхности.

**Annotation.** In article the geological phenomena arising in connection with extraction of underground waters in the territory of the city of Hanoi (Vietnam) are analysed, recommendations for mitigation of negative influence of subsidence of the land surface are formulated.

**Ключевые слова:** г. Ханой, состояние извлечения подземных вод, геологические явления, загрязнение водоносных комплексов, оседание земной поверхности.

**Keywords:** Hanoi, condition of extraction of underground waters, geological phenomena, pollution of water-bearing complexes, subsidence of the land surface.

Город Ханой является одним из крупнейших мегаполисов азиатского региона с развитой промышленностью, инфраструктурой, высокой плотностью населения. В 2017 г. Ханой имеет площадь 3.344,7 кв. км и население 7,5 млн человек.

На территории г. Ханоя развиты геологические формации с возрастом от протерозоя до кайнозоя. Породы дочетвертичного возраста распространены, в основном, в горных и холмистых местностях районов Шокшон, Бави, Шонтаи, Мидык и т.д. Четвертичные отложения мощностью до 90 м залегают в Ханое с поверхности повсеместно. В разрезе четвертичных отложений выделяют следующие пять свит, различающиеся по возрасту, генезису и составу. Галечники и плотные глины нижнеплейстоценовой свиты *Лэчи* (*alc*) мощностью 2,5–24,5 м имеют глубину залегания 45,0–80,0 м и сложены аллювиальными отложениями с гальками, гравием, линзами песков, супесей и суглинков. Средневерхнеплейстоценовую свиту *Ханой* (*a,apll-III<sup>1</sup>hn*) мощностью 2,5–34,0 м, сложенную аллювиальными и аллювиально-пролювиальными грунтами, представляют галечник, гравий и песок, местами суглинок и супесь, развитые в верхней части разреза. Верхнеплейстоценовая свита *Виньфук* (*a,alb,amll<sup>2</sup>vp<sub>1,2,3</sub>*) мощностью 6,2–38,0 м состоит из аллювиальных, аллювиально-озерно-болотных и аллювиально-морских отложений – песков в нижней части разреза, суглинков и глин в верхней (местами также прослеживаются суглинки с органическими остатками). Нижне-среднеголоценовая свита *Хайхынг* (*lb,m,ambIV<sup>1-2</sup>hh<sub>1,2,3</sub>*) мощностью 1,0–43,0 м состоит из озерно-болотных, морских и аллювиально-болотно-морских отложений, относящихся к специфическим слабым водонасыщенным грунтам и представленным суглинками и глинами с органическими остатками в основании разреза, постепенно сменяющимися морскими глинами синего цвета. Верхнеголоценовая свита *Тхайбинь* (*a,alblV<sup>3</sup>tb<sub>1,2</sub>*) мощностью 0,5–26,5 м представлена аллювиальными и аллювиально-озерно-болотными отложениями, имеющими широкое распространение и характеризующимися постепенным переходом от песков к супесям и суглинкам, местами с включениями органических остатков [4, 5].

В пределах Ханоя зафиксировано наличие двух поэтажно расположенных водоносных горизонтов [1, 4, 5]. Повсеместное распространение в городе имеет плейстоценовый слабонапорный водоносный комплекс (qp), водовмещающими породами которого являются крупнообломочные образования (галька и гравий) и пески свит Ханой и Виньфук, которые рассматриваются и как важный несущий горизонт для свайных фундаментов в Ханое. В верхней части разреза современных аллювиальных отложений, представленных водонасыщенными песками, местами с гравием, прослеживается голоценовый водоносный комплекс (qh).

#### Состояние извлечения подземных вод на территории г. Ханоя

Первый общественный водозабор г. Ханоя был построен в 1905 г. с мощностью 15.000 м<sup>3</sup>/сутки. В начале 1950-х годов мощность добычи подземных вод составляла 25.000 м<sup>3</sup>/сутки. В 1960-х – 1970-х годов со строительством других водозаборных предприятий, общая мощность добычи подземных вод увеличилась до 150.000 – 170.000 м<sup>3</sup>/сутки.

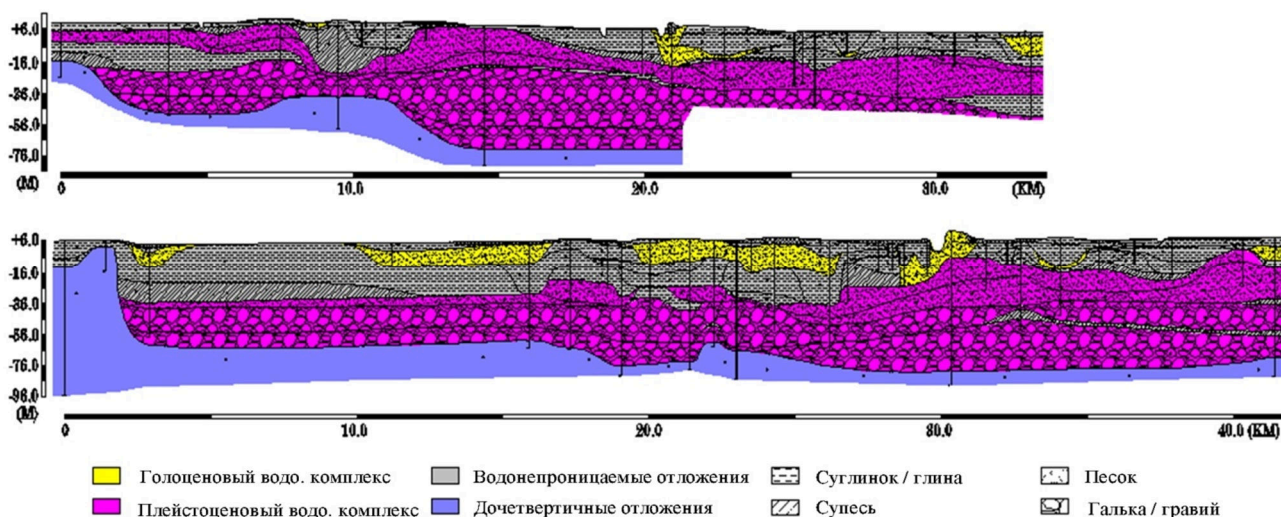


Рисунок 1 – Гидрогеологические разрезы (Фи Х.Т., 2013)

С 1985 г. по настоящее время заметен рост уровня урбанизации, что привело к увеличению общего спроса на чистую воду. При поддержке Финляндии, в ходе реализации так называемой «Финской программы чистой воды» были построены новые и модернизированы существующие водозаборные предприятия. Мощность добычи подземных вод для общественных нужд значительно увеличилась с 250.000 в 1985 г. до 670.000 м<sup>3</sup>/сутки в 2017 г. в Ханое.

Большая часть воды забирается из голоценового и плейстоценового водоносных комплексов (qh и qr). Голоценовый водоносный комплекс (qh) малодобитен и слабо защищен от поверхностного загрязнения. Вода из голоценового водоносного комплекса (qh) забирается в основном сельским населением с целью питьевого и промышленного водоснабжения. Плейстоценовый водоносный комплекс (qr) – высокодебитный, имеет большую мощность и хорошие питьевые качества. Все общественные водозаборные предприятия г. Ханоя забирают воду из плейстоценового водоносного комплекса (qr).

В настоящее время в г. Ханое действуют три основных формы водозабора подземных вод: общественные, промышленных предприятий и частные.

**Форма общественного водозабора:** Это форма водозабора подземных вод – самая крупная по количеству добываемой воды, находится под контролем специализированной службы (Ханойская компания чистой воды) и обеспечивает большую часть спроса воды в городе. Водозаборные скважины организованы по разным формам, в основном прямолинейно и по кругу. Вода из скважин обрабатывается на заводах, затем распространяется потребителям по системам трубного водоснабжения. Общая добыча подземных вод по этой форме – около 670.000 м<sup>3</sup>/сутки.

**Форма промышленного водозабора:** Это форма забора подземных вод промышленными предприятиями, заводами, больницами, школами, общежитиями, ресторанами из отдельных скважин с малым дебитом. Водоотбор производится без документации о скважинах, мощности водозабора и анализах качества подземных вод, без данных мониторинга изменений уровней подземных вод, его влиянии на окружающую среду. Эти скважины действуют прерывно, в среднем от 6 до 8 часов в сутки. Эта форма водозабора не подчиняется административному контролю специализированных служб и носит самовольный характер. В настоящее время на территории г. Ханоя общее количество скважин в системе промышленного водозабора – 1.102, они расположены, в основном, в сельских районах. Вода забирается из плейстоценового водоносного комплекса (qr). Общая добыча подземных вод по этой форме – около 309.282 м<sup>3</sup>/сутки.

**Форма частного забора подземных вод:** В форме частного водозабора, вода забирается отдельными скважинами небольшого диаметра или колодцами для питьевых и бытовых нужд семей. Мощность водозабора скважины в среднем 0,5–1,0 м<sup>3</sup>/сутки. Эта форма водозабора также не подчиняется административному контролю специализированных служб и носит самовольный характер. Общее количество скважин в системе частного забора подземных вод в настоящее время – 791.648, они расположены в сельских районах. Вода забирается из голоценового и верхнего плейстоценового (qr<sup>2</sup>) водоносных комплексов. Общая добыча подземных вод по этой форме – около 777.662 м<sup>3</sup>/сутки.

#### Геологические явления в связи с извлечением подземных вод на территории г. Ханоя

С середины 1980 годов на территории г. Ханоя наблюдаются некоторые геологические явления, основной причиной которых с высокой вероятностью можно считать процесс извлечения подземных вод. Некоторые явления указаны ниже:





### 1. Снижение уровней подземных вод

Результаты мониторинга показывают, что на станциях водоснабжения уровни подземных вод быстро снижаются. До 1980 годов глубина залегания подземных вод составляла 2–4 м, в некоторых местах – 8–10 м, в настоящее время уровни подземных вод залегают на глубинах 15–35 м (Хадинь, Тьонгмай).



Рисунок 2 – Уровни подземных вод гр в 2015 г. (Фи Х.Т., 2018)

Результаты мониторинга за уровнями подземных вод в Ханое показывают, что с 1994 г. до 2004 г. уровни подземных вод значительно снизились. С 2004 г. по настоящее время уровни подземных вод стали более стабильными, хотя довольно глубокими (34,6 м ниже земной поверхности в Хадинь).

Извлечение подземных вод образовало депрессионную воронку с сечением вида эллипса длинной осью параллельной реке Красной (от района Тылием до района Тханьчи) и короткой осью перпендикулярной реке Красной (от района Хадонг до реки Красной). Большинство мест, в которых уровни подземных вод интенсивно снижаются, расположено на территории крупных общественных водозаборных предприятий в городе, как Тханьсуан, Каузаи, Донгда.

Однако в последние годы благодаря ограничению водоотбора на крупных водозаборных предприятиях уровни подземных вод снижаются менее интенсивно.

В некоторых местах подземная вода из qh исчезла, например:

- Микрорайон Майзич: на территории школы T500, находящейся в коммуне Мидинь района Тылием, около 400 м северо-западнее от водозаборного предприятия Майзчи, ил и среднезернистый песок в голоценовом водоносном комплексе (qh) на глубине 15 м полностью высохли [1, 4, 5].

- Микрорайон Иенфу: мелкозернистый песок в голоценовом водоносном комплексе (qh) стал сухим до глубины 8 м [1, 4, 5].

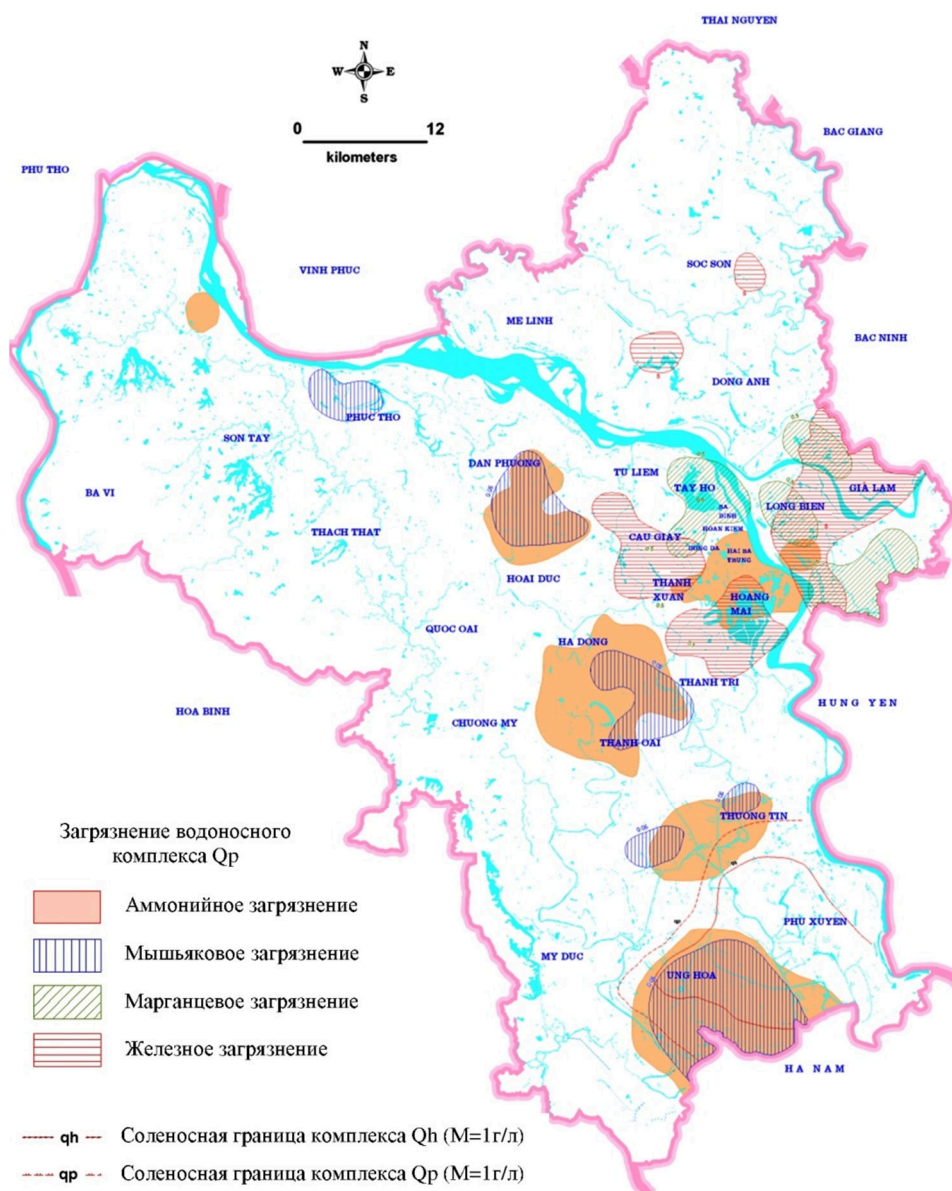
Примеры показывают, что извлечение подземных вод привело в некоторых местах к снижению или исчезновению воды из голоценового водоносного комплекса (qh). Основной причиной является снижение давления воды при добыче подземных вод, приводящее к осмосу воды сверху вниз и в ре-



зультате к исчезновению воды в верхних водоносных комплексах. Именно микрорайоны, в которых водонепроницаемые горизонты между голоценовым водоносным комплексом (qh) и плейстоценовым водоносным комплексом (qr) разрушаются при ведении горных работ, снижение уровня или исчезновение подземных вод происходит в короткие сроки. Сотни частных скважин действовали раньше нормально, а в настоящее время высохли и перестали использоваться.

**2. Загрязнение водоносных комплексов**

Со снижением уровней подземных вод, поднимается загрязнение водоносных комплексов. Во время добычи вод, загрязняющие вещества с поверхности фильтруются (из-за снижения давления воды при добыче подземных вод) и загрязняют водоносные комплексы.



**Рисунок 3** – Схема зонирования загрязнения подземных вод qr по Вьетнамскому стандарту QCVN 09:2008/BTNMT [1]

Результаты проекта «Составление базы данных водных ресурсов на территории расширенного города Ханоя – 2-й этап», выполненного Конфедерацией планирования и исследования водных ресурсов Северного региона в 2011 и 2016 годах [1], убедительно свидетельствуют о загрязнении.

Голоценовый водоносный комплекс (qh) результаты анализа подземных вод этого комплекса показывает, что качество водоносного комплекса (qh) относительно хорошее. Почти все показатели воды менее допустимых пределов по Вьетнамскому стандарту QCVN 09:2008/BTNMT. Однако, некоторые показатели такие, как железо, марганец, нитрит,  $KMnO_4$ , цианид, мышьяк, кишечная палочка и колиподобная бактерия в некоторых местах превышают допустимые пределы в районах Ынгхоа,



Данфьюнг, Мелинь, Фусуен, Тылием, Тханьчи. Голоценовый водоносный комплекс (qh) является первым от поверхности, имеет тесную связь с поверхностными водами, поэтому легко загрязняется.

Плейстоценовый водоносный комплекс (qp) результаты анализа подземных вод этого комплекса показывает, что качество водоносного комплекса (qp) хорошее. Почти все показатели воды ниже допустимых пределов по Вьетнамскому стандарту QCVN 09:2008/BTNMT. Однако, некоторые показатели такие, как КМпО<sub>4</sub>, нитрит, нитрат, аммоний, мышьяк в некоторых местах превышают допустимые пределы.

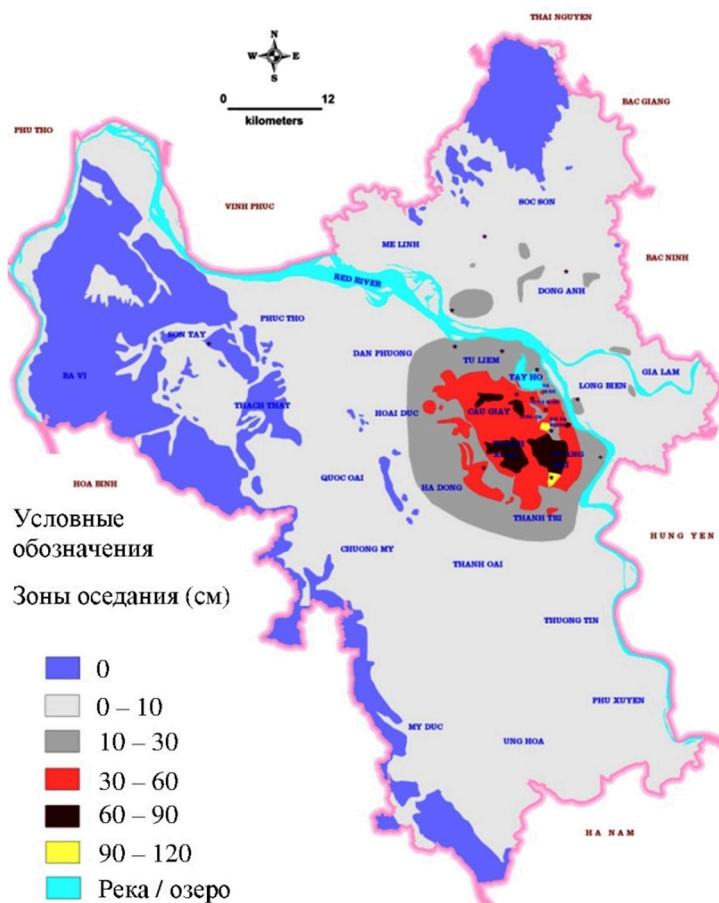
На территории г. Ханоя плейстоценовый водоносный комплекс (qp) начал загрязняться.

- В районах Данфьюнг, Хадонг, Тханьоай, Тхьонгтин и Ынгоа содержания мышьяка и аммония превышают допустимые пределы;
- В районах Каузаи, Хоангмай и юге города содержания железа и аммония превышают допустимые пределы;
- В районе Залам содержания железа и марганца превышают допустимые пределы.

Плейстоценовый водоносный комплекс (qp) является главным водозаборным комплексом с большим резервом на территории г. Ханоя. Но этот водоносный комплекс начал загрязняться дождевой и поверхностной водами.

### 3. Оседание земной поверхности

Извлечение подземных вод на территории г. Ханоя началось в 1905 г. Но только в 1988 г., то есть 83 года спустя, стали заниматься проблемой оседания земной поверхности. Высокая скорость оседания земной поверхности (более 10 мм/год) наблюдалась в центральной части и южных районах города. Максимальная скорость оседания земной поверхности наблюдалась в микрорайонах Зангво – Тханьконг и Фапван (средняя скорость 20–44 мм/год).



**Рисунок 4** – Схема зонирования оседания земной поверхности на территории г. Ханоя в период 1988 г. – 2013 г. (Фи Х.Т., 2013)

Кроме этого Народный комитет города Ханоя заказал Ханойской института науки, технологии и строительной экономики построить новую систему мониторинга за оседанием земной поверхности. Эта новая система была спроектирована и построена с 1994 г. до 2003 г., вначале в микрорайоне Нгокха. В настоящее время эта система состоит из 10 станций.



Анализ данных по 10 станциям мониторинга за оседанием земной поверхности в связи с водозабором подземных вод в последние годы показывает оседание земной поверхности в результате извлечения подземных вод. На станциях со слоями слабых грунтов скорость оседания земной поверхности сравнительно высокая, например, Тханьконг – 40,46 мм/год, Нгошилиен – 26,52 мм/год, Фапван – 21,02 мм/год; на станциях без слабых грунтов скорость оседания земной поверхности низкая, например, Нгокха – 1,73 мм/год, Майзич – 2,81 мм/год, Донгань – 4,66 мм/год; на станциях, расположенных около реки Красной, скорость оседания ниже в результате пополнения подземных вод речной водой, например, Лыонгиен – 15,94 мм/год, Залам – 19,13 мм/год.

### Выводы

1. В пределах глубины градостроительного освоения Ханоя зафиксировано наличие двух водоносных комплексов. Повсеместное распространение в городе имеет плейстоценовый слабораспорный водоносный комплекс (qr), водовмещающими породами которого являются крупнообломочные образования (галька и гравий) и пески ( $alIc$ ,  $a,aplI-III^1hn$  и  $allI^2vp_1$ ).

2. В городе действуют три основные формы водозабора подземных вод: общественные, промышленных предприятий и частные. Большая часть воды забирается из плейстоценового водоносного комплекса.

3. Извлечение подземных вод в г. Ханое непрерывно увеличивается от 15.000 м<sup>3</sup>/сутки (1905 г.), 145.000 м<sup>3</sup>/сутки (1965 г.); 455.000 м<sup>3</sup>/сутки (1995 г.) до 628.000 м<sup>3</sup>/сутки (2005 г. – 2016 г.). Увеличение добычи подземных вод, необоснованное расположение и мощность добычи на станциях водоснабжения способствовали образованию большой депрессионной воронки в центральной части г. Ханоя, и вызвали оседание земной поверхности, сопровождающееся деформациями и разрушениями зданий и жилых домов и загрязнением водоносных комплексов.

Результаты постоянного мониторинга уровней подземных вод с 1988 г. указывают, что с 1988 г. по 2005 г. уровни подземных вод в городе значительно и непрерывно понижались. Но с 2006 г. положение уровней подземных вод стабилизировалось. Это значит, что режим и мощность добычи на станциях водоснабжения стали более разумно регулироваться. В 2016 г. максимальные снижения уровней подземных вод зафиксированы 26,0 м в Майзич и 31,2 м в Хадинь.

4. Город Ханой расположен на сложной природной территории. Широкое распространение слабых пылевато-глинистых грунтов в верхней части разреза, неглубокое залегание грунтовых вод и интенсивное извлечение подземных вод определяют появление оседания земной поверхности для территории.

### Рекомендации

1. Для смягчения отрицательного влияния оседания земной поверхности следует предпринять некоторые меры:

– Прекратить или снизить мощность добычи на станциях водоснабжения Хадинь, Майзич, Тьонгмай, Нгокха, Фапван, Бачкхоа, Мавзолей президента Хошиминь и Нгошилиен. Мощность добычи на этих станциях необходимо пересмотреть.

– Строить новые станции водоснабжения в менее опасных зонах. В их числе зона вдоль рек Красной и Дуонг является самой благоприятной для добычи подземных вод. В этой зоне существуют «гидрогеологические окна». Подземные воды постоянно пополняются водой из рек Красной и Дуонг.

– Использовать максимально мощность станции поверхностного водоснабжения «река Да».

2. Необходимо построить другие станции для проведения мониторинга за оседанием поверхности на территории г. Ханоя, чтобы дополнить данные мониторинга для своевременного и точного предупреждения оседания поверхности.

### Литература:

1. Конфедерация планирования и исследования водных ресурсов Северного региона Вьетнама (КПИВРСРВ). Составление базы данных водных ресурсов на территории Нового Ханоя – второй этап: отчет о научно-исследовательской работе. – Ханой : Изд-во «КПИВРСРВ». – 187 с.

2. Национальный технический стандарт по качеству подземных вод QCVN – 09:2008/BTNMT [Электронный ресурс]. – URL : [http://ru.scribd.com/doc/41409725/QCVN-09-2008-Chat-Luong-Nuoc-Ngam-Thay-the-TCVN-5944-1995/16\(9\)2013](http://ru.scribd.com/doc/41409725/QCVN-09-2008-Chat-Luong-Nuoc-Ngam-Thay-the-TCVN-5944-1995/16(9)2013).

3. Ханойский институт строительных технологий – НИВТ. Исследование оседания земной поверхности в связи с изменением уровня грунтовых вод в городе Ханое. Отчет о научно-исследовательской работе. – Ханой : Изд-во НИВТ, 2004. – 125 с.

4. Фи Х.Т., Строкова Л.А. Прогноз оседания земной поверхности в результате извлечения подземных вод в городе Ханой (Вьетнам) // Известия ТПУ. – 2013. – Т. 323. – № 1. – С. 161–167.

5. Фи Х.Т., Строкова Л.А. Причины оседания земной поверхности в Ханое // Разведка и охрана недр. – 2012. – № 12. – С. 30–33.

**References:**

1. Confederation of planning and research of water resources of the Northern region of Vietnam (KPIVRSRV). Database compilation of water resources in the territory of New Hanoi – the second stage: report on research work. – Hanoi : KPIVRSRV publishing house. – 187 p.
2. The national technical standard on quality of underground QCVN waters – 09:2008/BTNMT [An electronic resource]. – URL : [http://ru.scribd.com/doc/41409725/QCVN-09-2008-Chat-Luong-Nuoc-Ngam-Thay-the-TCVN-5944-1995/16\(9\)2013](http://ru.scribd.com/doc/41409725/QCVN-09-2008-Chat-Luong-Nuoc-Ngam-Thay-the-TCVN-5944-1995/16(9)2013).
3. The Hanoi institute of construction technologies – HIBT. A research of subsidence of the land surface in connection with change of level of ground waters in the city of Hanoi. Report on research work. – Hanoi : Publishing house HIBT, 2004. – 125 p.
4. Phi H.Th., Strokova L.A. The forecast of subsidence of the land surface as a result of extraction of underground waters in the city of Hanoi (Vietnam) // TPU News. – 2013. – V. 323. – № 1. – P. 161–167.
5. Phi H.Th., Strokova L.A. The reasons of subsidence of the land surface in Hanoi // Investigation and protection of a subsoil. – 2012. – № 12. – P. 30–33.



УДК 621.762; 669.1

**МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ПОРОШКОВОГО  
МАГНИТОТВЕРДОГО СПЛАВА 27X10KM****MAGNETIC PROPERTIES OF POWDER MAGNETOSOLID ALLOY 27X10KM****Абашев Денис Маратович**

начальник цеха АО «Спецмагнит»  
d.abashev@gmail.com

**Миляев Игорь Матвеевич**

доктор технических наук,  
главный научный сотрудник,  
Институт металлургии и материаловедения  
им. А.А. Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН)  
imilyaev@mail.ru

**Алымов Михаил Иванович**

член-корреспондент РАН,  
доктор технических наук, директор,  
Институт макрокинетики и материаловедения  
Российской академии наук (ИСМАН РАН)  
alymov@ism.ac.ru

**Буряков Илья Николаевич**

кандидат технических наук,  
генеральный директор,  
АО «Спецмагнит»  
bouriakov@mail.ru

**Юсупов Владимир Сабитович**

доктор технических наук,  
заведующий лабораторией,  
Институт металлургии и материаловедения  
им. А.А. Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН)  
yusupov@aport2000.ru

**Зеленский Виктор Александрович**

кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник,  
Институт металлургии и материаловедения  
им. А.А. Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН)  
zelensky55@bk.ru

**Лайшева Надежда Владимировна**

научный сотрудник,  
Институт металлургии и материаловедения  
им. А.А. Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН)

**Аннотация.** Изучены магнитные гистерезисные свойства магнитотвёрдого сплава 27X10K2M (Fe-27Cr-10Co-1Mo). После проведения оптимальной термообработки, полученной с использованием программ Statgraphics Centurion, получены: остаточная индукция  $B_r$  до 1,39 Тл, коэрцитивная сила  $H_{CB}$  свыше 45 кА/м и максимальное энергетическое произведение  $(BH)_{\text{макс}}$  до 45 кДж/м<sup>3</sup>, что превышает аналогичные свойства промышленного железохромкобальтового сплава 25X15KA (ГОСТ 24897-81) в среднем на 15–20 %. Показано, что оптимальная термическая обработка различна для получения оп-

**Abashev Denis Maratovich**

Foreman of JSC Spetsmagnit  
d.abashev@gmail.com

**Milyaev Igor Matveevich**

Doctor of Engineering,  
Chief Researcher,  
Institute of metallurgy and materials science  
of A.A. Baykov of the Russian Academy of  
Sciences (IMET RAS)  
imilyaev@mail.ru

**Alymov Mikhail Ivanovich**

Corresponding member of RAS,  
Doctor of Engineering, Director,  
Institute of macrokinetics and materials  
science of the Russian Academy of  
Sciences (ISMAN RAHN)  
alymov@ism.ac.ru

**Buryakov Ilya Nikolaevich**

Candidate of Technical Sciences,  
CEO of JSC Spetsmagnit  
bouriakov@mail.ru

**Yusupov Vladimir Sabitovich**

Doctor of Engineering,  
Head of the laboratory,  
Institute of metallurgy and materials science  
of A.A. Baykov of the Russian Academy of  
Sciences (IMET RAS)  
yusupov@aport2000.ru

**Zelensky Victor Aleksandrovich**

Candidate of Technical Sciences,  
Senior Research Associate,  
Institute of metallurgy and materials science  
of A.A. Baykov of the Russian Academy of  
Sciences (IMET RAS)  
zelensky55@bk.ru

**Laysheva Nadezhda Vladimirovna**

Research Associate,  
Institute of metallurgy and materials science  
of A.A. Baykov of the Russian Academy of  
Sciences (IMET RAS)

**Annotation.** Magnetic hysteresis properties of magnetosolid alloy 27X10K2M (Fe-27Cr-10Co-1Mo) are studied. After carrying out the optimum heat treatment received with use of the Statgraphics Centurion programs are received: residual induction of  $B_r$  up to 1,39 T, the coercive force  $H_{CB}$  over 45 kA/m and the maximum power work  $(BH)_{\text{макс}}$  up to 45 kJ/m<sup>3</sup> that exceeds similar properties of industrial zhelezokhromkobaltovy alloy 25X15KA (GOST 24897-81) on average for 15–20 %. It is shown that optimum heat treatment is various for obtain-



тимальных значений остаточной индукции  $B_r$ , коэрцитивной силы  $H_{CB}$  и максимального энергетического произведения  $(BH)_{\max}$ .

**Ключевые слова:** магнитотвердый сплав, остаточная индукция, коэрцитивная сила, максимальное энергетическое произведение, намагниченность, порошковая металлургия, термоманнитная обработка, поверхность отклика.

ing optimum values of residual induction of  $B_r$ , coercive force of NSV and the maximum power work  $((BH)_{\max})$ .

**Keywords:** magnetosolid alloy, residual induction, coercive force, maximum power work, magnetization, powder metallurgy, thermomagnetic processing, response surface.

## Введение

Интерес к низкокобальтовым магнитотвёрдым сплавам системы Fe-Cr-Co связан с их высокой экономической эффективностью и высокими пластическими свойствами, позволяющими их использовать в качестве сферических мембран в телефонных трубках, в магнитно-поляризованных реле, в ряде других малогабаритных устройствах радиоаппаратуры и аппаратуры средств связи [1]. На сплавах с 4–10 масс. % кобальта получены значения магнитного энергетического произведения  $(BH)_{\max}$  свыше 40 кДж/м<sup>3</sup>, что делает их вполне конкурентоспособными со сплавами ЮНДК24, содержащих в 5–6 раз больше дорогого и остродефицитного кобальта [2–3].

Однако, недостатком низкокобальтовых FeCrCo сплавов является низкая скорость формирования в них высококоэрцитивного состояния (скорость охлаждения в магнитном поле от оптимальных температур расслоения высокотемпературного  $\alpha$ -твёрдого раствора до 500 °С 0,4–4,4 °С/час в зависимости от содержания кобальта), которая представляет определённые трудности при промышленном производстве постоянных магнитов из этих сплавов с точки зрения производительности всего технологического процесса [4].

Целью настоящей работы было изучение хода формирования эксплуатационных магнитных гистерезисных свойств магнитотвёрдого FeCrCo сплава с 10 масс. % кобальта и 1 масс. % молибдена. Молибден был выбран в качестве дополнительного легирующего компонента в связи с тем, что в ряде других FeCrCo магнитотвёрдых сплавов он заметно повышает коэрцитивную силу и повышает другие гистерезисные свойства [5–10].

## Материалы и методики проведения экспериментов

Для приготовления порошковых образцов исследуемого сплава были использованы порошки железа (марки ПЖРВ1 ГОСТ 9849-86), хрома (ПХЕ1), кобальта (ПК-1у ГОСТ 9721-79) и восстановленный порошок молибдена (рядовой ПМ99,9) с размером частиц < 0,07 мм. Их смешивали в турбулентном смесителе С2.0 в течение 2–3 часов. Механоактивацию полученной порошковой смеси проводили путём помола в планетарной мельнице Pulverizette-7 в течение 15 минут со скоростью 600 об/мин. В ряде случаев в порошковую смесь добавляли поверхностно-активные вещества (ПАВ) в виде стеариновой или олеиновой кислоты. Формование заготовок образцов проводили на ручном прессе в разъёмной матрице с внутренним диаметром 13,6 мм при давлении 600 МПа. Сырые прессовки имели относительную плотность 78–80 %. Спекание проводили в вакуумной шахтной печи СШВ-1,25/24-И1 в вакууме 10<sup>-2</sup> Па при температуре 1420 °С в течение 2,5 часов. После спекания образцы полностью сохраняли форму прессовок, имели плотность 94–96 %, но в силу использования схемы одностороннего прессования разница в размере верхнего и нижнего диаметров образцов составляла до 0,2 мм. Легирующую добавку молибдена вводили сверх 100 % базового состава Fe-27Cr-10Co.

Термическую обработку спечённых порошковых образцов проводили в стандартных муфельных печах в контейнере диаметром 60 мм, заполненным металлическим балластом с целью моделирования реальных производственных условий. Температурно-временные режимы термообработки регулировали с помощью программируемых пропорционально-интегрально-дифференцирующих (ПИД) регуляторов ТРМ251. Термомагнитную обработку проводили в лабораторной установке с панцирным электромагнитом в магнитном поле  $H = 320$  кА/м (> 4000 Э).

Магнитные гистерезисные свойства образцов исследуемого сплава измеряли на гистерезис-графе «Permagraph L» (Германия).

Изучение магнитных гистерезисных свойств сплава 27Х10КМ и оптимизацию режима его термической обработки проводили как методом однофакторного эксперимента, так и методом планирования эксперимента с построением центрального композиционного плана 2<sup>3</sup> + звёздные точки [11].

Выбор центрального композиционного (последовательного) плана, применяемого, как правило, для описания почти стационарной области, которая не может быть описана с помощью линейного приближения, был обусловлен тем обстоятельством, что предварительные эксперименты по оценке магнитных гистерезисных свойств после термообработки по режиму близкому к нулевому не показали резких колебаний. Выбранный план – ротатабельный (т.е. информация, содержащаяся в уравнении регрессии, равномерно распределена по сфере, на которой выбираются точки проведения эксперимента, и исследователь заранее не знает той области поверхности отклика, где находится интересу-



ющий его оптимальный участок) и рандомизированный (порядок проведения эксперимента определяется случайным образом). Статистическую обработку полученных результатов проводили с использованием программного пакета «Statgraphics Centurion XVI».

Исходя из существующего понимания механизма формирования высококоэрцитивного состояния в магнитотвёрдых Fe-Cr-Co-сплавах [12], считали, что в общем случае магнитные гистерезисные свойства зависят от таких параметров как: 1 – температура закалки на α-твёрдый раствор; 2 – температура и время проведения изотермической термомагнитной обработки (ИТМО) или, что эквивалентно, от скорости охлаждения V1 от температуры начала термомагнитной обработки (ТМО) до температурного интервала 580–600 °С; 3 – скорость охлаждения V2 от температурного интервала 580–600 °С до 500 °С. Влияют также и другие факторы как, например, скорость нагрева до температуры начала ТМО, время выдержки при температуре начала ТМО и другие, которые в данной работе по возможности стабилизировали. В частности, закалку образцов в воде проводили от 1100 °С с выдержкой в течение 15 минут, нагрев контейнера до температуры начала ТМО осуществляли в течение 40–50 мин, время выдержки при температуре начала ТМО составляло 10 минут.

### Результаты исследования и их обсуждение

При изучении анизотропных образцов сплава 27X10KM в качестве нулевого (начального) режима был взят режим: нагрев до 660 °С (начальная температура ТМО) + охлаждение в магнитном поле до 580 °С со скоростью V1 = 15 °С/час + охлаждение до 500 °С без магнитного поля со скоростью V2 = 7 °С/час + дополнительный отпуск при всех последующих режимах термической обработки в температурном интервале 500–460 °С. Варьирование начальной температуры ТМО составляло ± 10 °С, скоростей охлаждения V1 и V2 – ± 2 °С/час. Результаты проведенных экспериментов совместно с матрицей планирования приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Магнитные гистерезисные свойства анизотропных образцов сплава 27X10KM

№ п/п	Температура начала ТМО, °С	Скорость охлаждения V1 до 580 °С, °С/час	Скорость охлаждения V2 до 500 °С, °С/час	B <sub>r</sub> , Тл	H <sub>св</sub> , кА/м	(BH) <sub>макс</sub> , кДж/м <sup>3</sup>
1	650 (-1)	13 (-1)	9 (1)	1,33	35,3	29,5
2	660 (0)	18,4 (1,68)	7 (0)	1,35	42,7	36,9
3	660 (0)	15 (0)	10,4 (1,68)	1,33	43,0	37,4
4	643 (-1,68)	15 (0)	7 (0)	1,326	41,3	35,1
5	650 (-1)	17 (1)	5 (-1)	1,35	44,25	40,6
6	650 (-1)	13 (-1)	5 (-1)	1,34	36,8	33,5
7	660 (0)	15 (0)	7 (0)	1,35	44,5	40,1
8	660 (0)	11,6 (-1,68)	7 (0)	1,31	44,6	39,8
9	670 (1)	13 (-1)	5 (-1)	1,33	44,9	40,0
10	670 (1)	13 (-1)	9 (1)	1,33	42,95	37,5
11	670 (1)	17 (1)	9 (1)	1,36	44,8	40,4
12	677 (1,68)	15 (0)	7 (0)	1,316	43,9	37,2
13	670 (1)	17 (1)	5 (-1)	1,34	44,4	40,2
14	650 (-1)	17 (1)	9 (1)	1,36	41,9	35,7
15	660 (0)	15 (0)	3,6 (-1,68)	1,34	45,05	41,4
16	660 (0)	15 (0)	7 (0)	1,34	42,5	40,6
17	660 (0)	15 (0)	7 (0)	1,33	43,0	38,2

Проведенный статистический анализ данных таблицы 1, выполненный с помощью программ Statgraphics Centurion XVI, с учётом соответствующих диаграмм Парето (рис. 1) дал возможность получить аналитические зависимости в виде регрессионных уравнений остаточной индукции B<sub>r</sub>, коэрцитивной силы H<sub>св</sub> и максимального энергетического произведения (BH)<sub>макс</sub> от выбранных факторов варьирования:

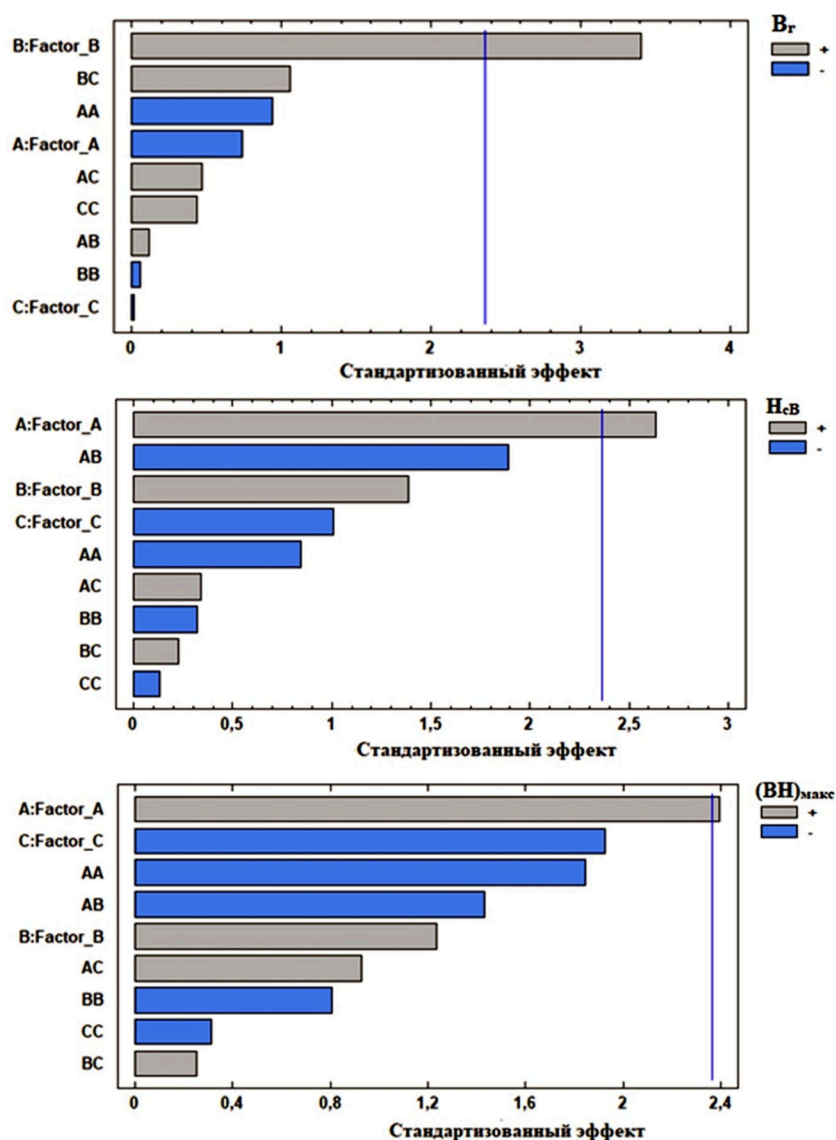
$$B_r = 1,34 + 0,1 V. \tag{1}$$

$$H_{св} = 43,4 + 1,7 A. \tag{2}$$

$$(BH)_{макс} = 39,7 + 1,635 A. \tag{3}$$

В уравнениях (1) – (3) свободные члены дают средние значения указанных параметров сплава в анизотропном состоянии в выбранных пределах варьирования факторов. Уравнения (1) – (3) адекватно описывают те части поверхностей отклика исследуемых параметров в фазовых пространствах варьироваемых факторов, о чём свидетельствуют данные таблицы 2.





**Рисунок 1** – Стандартизованные диаграммы Парето для остаточной индукции  $B_r$ , коэрцитивной силы  $H_{cb}$  и максимального энергетического произведения  $(BH)_{max}$  от выбранных факторов варьирования

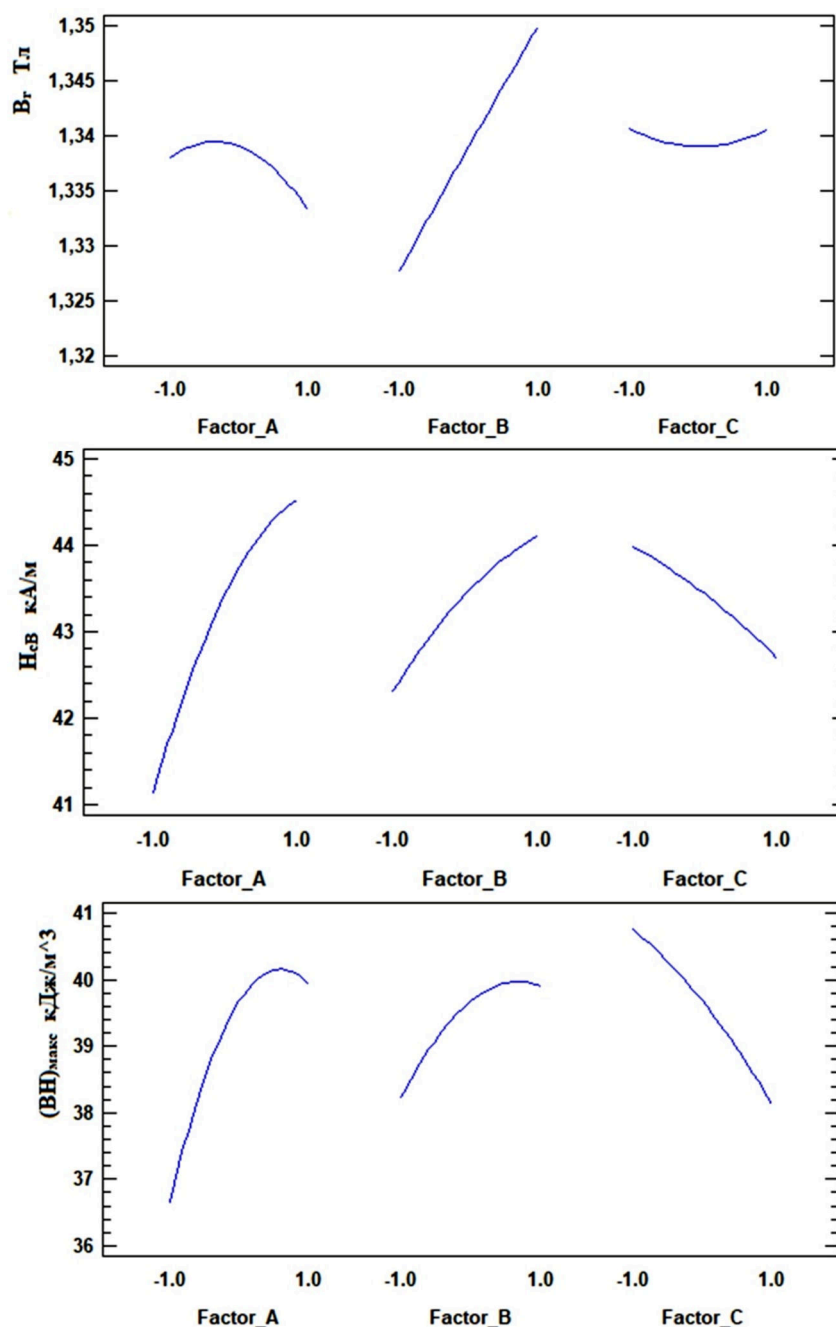
**Таблица 2** – Экспериментальные и расчётные данные магнитных гистерезисных свойств порошкового сплава 27X10KM

№	Экспериментально полученные значения			Расчётные значения по уравнениям (1) – (3)		
	$B_r$ , Тл	$H_{cb}$ , кА/м	$(BH)_{max}$ , кДж/м <sup>3</sup>	$B_r$ , Тл	$B_r$ , Тл	$(BH)_{max}$ , кДж/м <sup>3</sup>
1	1,35	44,5	40,1	1,34	43,4	39,7
2	1,34	42,5	40,6	1,34	43,4	39,7
3	1,33	43,0	38,2	1,34	43,4	39,6
4	1,32	43,9	37,2	1,32	44,6	38,5
5	1,326	41,3	35,1	1,33	38,9	33,0
6	1,31	44,6	39,8	1,32	41,3	36,5
7	1,33	43,0	37,4	1,34	42,1	36,8
8	1,36	44,8	40,4	1,35	43,4	38,4
9	1,33	35,3	29,5	1,32	37,2	31,3
10	1,34	36,8	33,5	1,34	39,4	36,0
11	1,35	44,2	40,6	1,35	44,0	39,8
12	1,34	44,4	40,2	1,34	43,7	38,9
13	1,36	41,9	35,7	1,35	42,5	36,0
14	1,33	44,9	40,0	1,33	45,4	40,2
15	1,34	45,05	41,4	1,34	44,3	41,2
16	1,35	42,7	36,9	1,36	44,3	39,4
17	1,33	42,95	37,5	1,32	44,3	38,8



Наглядную и полезную информацию влияния основных факторов на магнитные гистерезисные свойства исследуемого сплава дают графики (рис. 2), из которых отчётливо видно, что, если для повышения остаточной индукции  $B_r$  надо резко повышать фактор В относительно нулевой точки (факторы А и С имеют почти оптимальные значения), то для повышения коэрцитивной силы  $H_{св}$  надо повышать значение фактора А, а для достижения максимального энергетического произведения  $(BH)_{макс}$  следует понижать фактор С. В таблице 3 приведены оптимальные значения факторов А, В и С для получения оптимальных значений параметров  $B_r$ ,  $H_{св}$  и  $(BH)_{макс}$ .

По оптимальному режиму термической обработки сплава 27Х10КМ на получение оптимального значения  $(BH)_{макс}$ : закалка от 1100 °С в воде + ТМО (660 °С (10 мин) + охлаждение до 580 °С со скоростью  $V1 = 16$  °С/час) + охлаждение от 580 °С до 500 °С со скоростью  $V2 = 3,6$  °С/час + дополнительные отпуска в температурном интервале 500–460 °С были обработаны 6 штук образцов в одной партии. Полученные значения остаточной индукции  $B_r$ , коэрцитивной силы  $H_{св}$  и максимального энергетического произведения  $(BH)_{макс}$  приведены в таблице 3.



**Рисунок 2** – Графические зависимости влияния основных факторов на остаточную индукцию  $B_r$ , коэрцитивную силу  $H_{св}$  и максимальное энергетическое произведение  $(BH)_{макс}$  порошкового сплава 27Х10КМ (Fe-27Cr-10Co-1Mo)



**Таблица 3** – Оптимальные значения факторов А, В, С и оптимальные значения параметров  $B_r$ ,  $H_{CB}$ ,  $(BH)_{\text{макс}}$

Факторы	Параметры		
	$B_r$	$H_{CB}$	$(BH)_{\text{макс}}$
Фактор А	- 0,42	1,68	- 0,16
Фактор В	1,68	- 1,68	0,5
Фактор С	1,68	- 1,42	- 1,68
Расчётные оптимальные значения	1,37 Тл	47,4 кА/м	41,3 кДж/м <sup>3</sup>

Данные таблицы 3 показывают, что оптимальная термическая обработка магнитотвёрдого сплава 27Х15К10М действительно обеспечивает, во-первых, магнитные гистерезисные свойства несколько даже большие, чем дают расчёты программы Statgraphics, и, во-вторых, при экономии кобальта более 30 % по сравнению с промышленными сплавами 22Х15К и 25Х15КЮБФ (ГОСТ 24897-81) сплав имеет магнитные гистерезисные свойства на 15–20 % выше, чем у названных промышленных сплавов.

**Таблица 4** – Магнитные гистерезисные свойства сплава 27Х10КМ после проведения оптимальной термообработки

№ образца	$B_r$ , Тл	$H_{CB}$ , кА/м	$(BH)_{\text{макс}}$ , кДж/м <sup>3</sup>
1	1,36	45,0	42,0
2	1,36	45,1	42,0
3	1,37	45,3	42,2
4	1,37	45,4	44,0
5	1,36	45,1	42,6
6	1,39	45,0	45,0

**Выводы**

На порошковом магнитотвёрдом сплаве Fe-27Cr-10Co-1Mo после проведения оптимальной термической обработки на получение оптимального значения максимального энергетического произведения  $(BH)_{\text{макс}}$  получены: остаточная индукция  $B_r$  до 1,39 Тл, коэрцитивная сила  $H_{CB}$  свыше 45 кА/м и максимальное энергетическое произведение  $(BH)_{\text{макс}}$  до 46 кДж/м<sup>3</sup>.

Статистическая обработка экспериментальных результатов, полученных после проведения различных термообработок, показала, что такие факторы как температура начала проведения ТМО, скорость охлаждения при проведении ТМО и скорость охлаждения от температуры конца ТМО до 500<sup>0</sup>С по-разному влияют на получение оптимальных значений остаточной индукции  $B_r$ , коэрцитивной силы  $H_{CB}$  и максимального энергетического произведения  $(BH)_{\text{макс}}$ .

*Работа выполнялась по государственному заданию № 007-00129-18-00 при финансовой поддержке ФЦНТП-2017 по государственному контракту от 26.09.2017 г. № 14.579.21.0149.*

**Литература:**

1. Jin S., Chin G.Y. and Wonsiewicz B.C. A Low Cobalt Ternary Cr-Co-Fe Alloy for Telephone Receiver Magnet Use // IEEE Transactions on Magnetics. – 1980. – MAG-16. – № 1. – P. 139–146.
2. Green M.L., Sherwood R.C., Chin G.Y., Wernick J.H. and Bernardini J. Low cobalt CrCoFe and CrCoFe-X permanent magnet alloys // IEEE Transactions on Magnetics. – 1980. – MAG-16. – № 5. – P. 1053–1055.
3. Green M.L., Scherwood R.C., Wong C.C. Powder metallurgy proceeding of CrCoFe permanent magnet alloys containing 5–25 wt. % Co // Journal of Applied Physics. – 1982. – V. 53. – № 3. – P. 2398–2400.
4. Jin S. and Gayle N.V. Low-Cobalt Cr-Co-Fe Magnet Alloys Obtained by Slow Cooling under Magnetic Field // IEEE Transactions on Magnetics. – 1980. – MAG-16. – № 3. – P. 526–529.
5. Kaneko H., Inoue K. Magnetic alloys. US Patent № 3 806 336. April 23, 1974. Int. Cl. C22c 39/16; H01f 1/00., US. Cl. 75-122.
6. Влияние содержания молибдена на магнитные свойства сплава X30K15M(1-5)T. / Р.И. Малинина [и др.] // Сталь. – 2009. – № 8. – С. 80–83.
7. Магнитные свойства магнитотвёрдого сплава Fe-30Cr-21Co-3Mo в изотропном и анизотропном состояниях / И.М. Миляев [и др.] // Перспективные материалы. Специальный выпуск. – 2009. – № 6. – Ч. 1. – С. 359–361.
8. Szymura S., Sojka L. Structure and magnetic properties of Fe-Cr-Co-Mo alloy melted in open induction furnace // Metal Science. – 1979. – V. 13. – Iss. 5. – P. 320–321.
9. Ahmad Z., ul Haq A., Husain S.W., Abbas T. Magnetic properties of isotropic Fe-28Cr-15Co-3,5Mo permanent magnets with additives // Physica B. – 2002. – V. 321. – P. 54–59.
10. Sugimoto S., Honda J., Ohtani Y., Okada M. and Homma M. Improvements of the magnetic properties of equiaxed Fe-Cr-Co-Mo hard magnets by two-step thermomagnetic treatment // IEEE Transactions on Magnetics. – 1987. – MAG-23. – № 5. – P. 3193–3195.
11. Нахимов В.В., Чернова Н.А. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. – М. : Наука, 1965. – 340 с. (Программа Statgraphics Centurion XVI).



12. Мильяев И.М., Мильяев А.И., Юсупов В.С. О механизме формирования высококоэрцитивного состояния в наноструктурированных магнитотвёрдых сплавах систем Fe-Cr-Co и Fe-Ni-Al-Co-Cu // *Металлы*. – 2009. – № 3. – С. 83–66.

#### References:

1. Jin S., Chin G.Y. and Wonsiewicz B.C. A Low Cobalt Ternary Cr-Co-Fe Alloy for Telephone Receiver Magnet Use // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 1980. – MAG-16. – № 1. – P. 139–146.
2. Green M.L., Sherwood R.C., Chin G.Y., Wernick J.H. and Bernardini J. Low cobalt CrCoFe and CrCoFe-X permanent magnet alloys // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 1980. – MAG-16. – № 5. – P. 1053–1055.
3. Green M.L., Scherwood R.C., Wong C.C. Powder metallurgy proceeding of CrCoFe permanent magnet alloys containing 5–25 wt. % Co // *Journal of Applied Physics*. – 1982. – V. 53. – № 3. – P. 2398–2400.
4. Jin S. and Gayle N.V. Low-Cobalt Cr-Co-Fe Magnet Alloys Obtained by Slow Cooling under Magnetic Field // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 1980. – MAG-16. – № 3. – P. 526–529.
5. Kaneko H., Inoue K. Magnetic alloys. US Patent № 3 806 336. April 23, 1974. Int. Cl. C22c 39/16; H01f 1/00., US. Cl. 75-122.
6. Influence of content of molybdenum on magnetic properties of X30K15M(1-5)T alloy. / R.I. Malinina [etc.] // *Steel*. – 2009. – № 8. – P. 80–83.
7. Magnetic properties of magnetosolid Fe-30Cr-21Co-3Mo alloy in isotropic and anisotropic states / I.M. Milyaev [etc.] // *Perspective materials. Special release*. – 2009. – № 6. – Part. 1. – P. 359–361.
8. Szymura S., Sojka L. Structure and magnetic properties of Fe-Cr-Co-Mo alloy melted in open induction furnace // *Metal Science*. – 1979. – V. 13. – Iss. 5. – P. 320–321.
9. Ahmad Z., ul Haq A., Husain S.W., Abbas T. Magnetic properties of isotropic Fe-28Cr-15Co-3,5Mo permanent magnets with additives // *Physica B*. – 2002. – V. 321. – P. 54–59.
10. Sugimoto S., Honda J., Ohtani Y., Okada M. and Homma M. Improvements of the magnetic properties of equiaxed Fe-Cr-Co-Mo hard magnets by two-step thermomagnetic treatment // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 1987. – MAG-23. – № 5. – P. 3193–3195.
11. Nalimov V.V., Chernova N.A. Statistical methods of planning of extreme experiments. – M. : Science, 1965. – 340 p. (Statgraphics Centurion XVI program).
12. Milyaev I.M., Milyaev A.I., Yusupov V.S. About the mechanism of formation of a high-coercive state in the nanostructured magnetosolid alloys of the Fe-Cr-Co and Fe-Ni-Al-Co-Cu systems // *Metals*. – 2009. – № 3. – P. 83–66.



УДК 504.06

## ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС И МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ ПЛАНИРОВКИ ВЫСАДКИ ДЕРЕВЬЕВ В ГОРОДЕ

### PROGRAM COMPLEX AND METHODOLOGY OF OPTIMIZATION OF PLANNING OF TILLING OF TREES IN THE CITY

**Галиев Азат Альбиртович**

магистр,  
Казанский государственный энергетический университет  
azat.galiev.1995@mail.ru

**Galiev Azat Albirtovich**

Master,  
Kazan state power engineering university  
azat.galiev.1995@mail.ru

**Аннотация.** Данная работа основана на озеленении города, жилых массивов и дворов, используя различные виды деревьев, кустарников. Для этого создана математическая модель местности в программном обеспечении ANSYS Fluent и представлены распределения концентрации CO с учетом и без учета зеленых насаждений, также планируется создание программного комплекса или методики по озеленению жилых местностей.

**Annotation.** This work is based on the greening of the city, residential areas and yards, using different types of trees, shrubs. For this purpose, a mathematical model of the terrain in ANSYS Fluent software was created and the distribution of CO concentration with and without consideration of green plantations is presented, and a program complex or a technique for gardening of residential areas is also planned.

**Ключевые слова:** озеленение, ANSYS Fluent, математическая модель, концентрации CO, деревья, кустарники, модель местности.

**Keywords:** landscaping, ANSYS Fluent, mathematical model, CO concentration, trees, bushes, terrain model.

**Н** и для кого не секрет, что деревья и кустарниковые насаждения – самый эффективный естественный фильтр для очистки городского воздуха от пыли и нежелательных газов. Однако не каждый понимает, что беспорядочная высадка деревьев вдоль дорог с большим автомобильным потоком, а также вдоль жилых домов может не только не защищать от загрязнений, но и менять гидродинамику потока, турбулизируя или перенаправляя поток, тем самым создавая максимальную концентрацию примесей вблизи тротуаров и строений. Подобные исследования особо значимы для экономии как постоянно снижающегося свободного пространства земли в городе, так и для обеспечения экологической безопасности жителей. Следует отметить, что форма листьев деревьев, а также их вид сильно влияют на эффективность осадения пыли. Для различных мест следует использовать свой тип дерева, соблюдать определенную плотность посадки и расстояние от дороги. Поведение пылевых частиц и газов возможно прогнозировать и выбирать оптимальные параметры для высадки.

**Актуальность проведенных исследований** обусловлена тем, что озеленение города сказывается на экологическую обстановку района и жизнедеятельность проживающих людей.

**Целью работы** основана на создании математических моделей различного уровня сложности для расчета ветровых течений внутри зоны зеленых насаждений и транспорта, и осадения газовых, и пылевых загрязнений. Планируется проведение параметрических исследований эффективности улавливания загрязнений при различной плотности насаждений, типа деревьев (проницаемость кроны), скорости и направления ветра, размера дисперсных примесей.

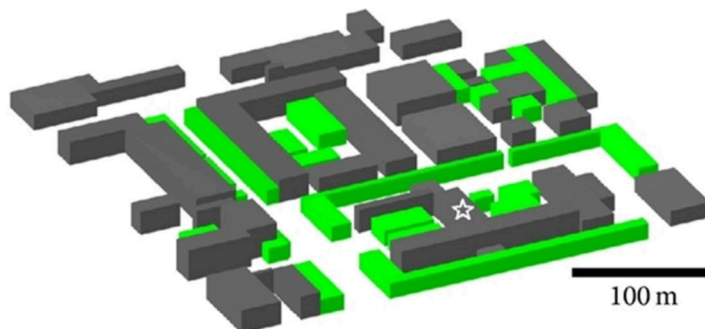
#### **Задачи исследования:**

- создание математической модели;
- проведение параметрических исследований эффективности улавливания загрязнений;
- определение концентрации CO с учетом и без учета зеленых насаждений.

Предметом исследования является зеленые насаждения различных видов и математическая модель местности.

Объектом изучения является зеленые массивы, из которых формируются парки, лесопарки, сады и скверы, требует владение композиционными приемами, отвечающими строению местных ландшафтов, почвенным и климатическим условиям, аэродинамике потока, плотности насаждений, видов деревьев, а также безупречного знания биологических и декоративных особенностей растений.

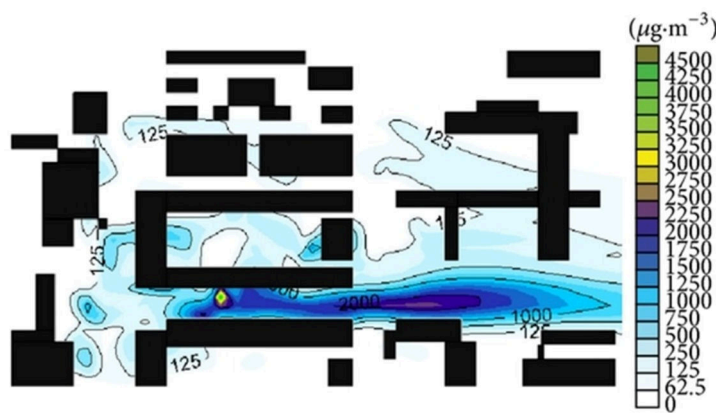
Полученные результаты показали, что корректно подобранная схема посадки насаждений может существенно снизить загрязнение окружающей среды. На рисунке 1 представлена модель местности, где зеленым цветом показаны зеленые насаждения и после были проведены моделирования в ПО. По рисункам 2 и 3 видно, что насаждения вносят существенный вклад в поглощение концентрации вредных выбросов.



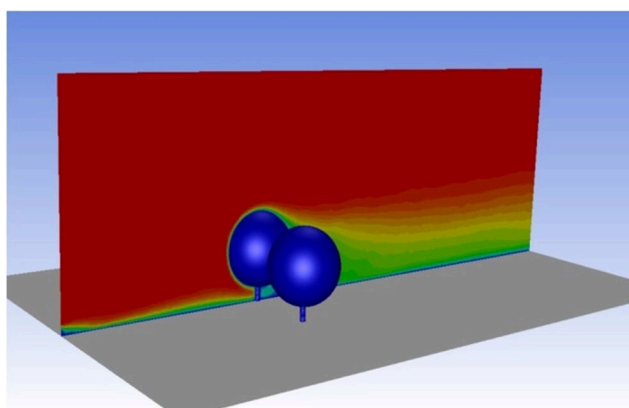
**Рисунок 1** – Модель местности со школой (обозначена звездочкой). Зеленым цветом показаны зеленые насаждения



**Рисунок 2** – Распределение концентрации CO рядом со школой с учетом зеленых насаждений



**Рисунок 3** – Распределение концентрации CO рядом со школой без учета зеленых насаждений



**Рисунок 4** – Распределение концентрации выбросов до и после деревьев (красным цветом показано максимальное значение концентрации, синем – минимальное)



**Выводы:** по рисункам видно, как деревья задерживают вредные выбросы.

В результате планируется создать методику и программный комплекс для практического использования организациями, занимающимися вопросами озеленения города.

#### **Литература:**

1. Благоустройство и озеленения территории: [Электронный ресурс]. – URL : RONL.RU <http://www.ronl.ru/referaty/gosudarstvo-pravo/396342/>

2. ПРИКАЗ Госстроя РФ от 15-12-99 153 Об утверждении правил создания охраны и содержания зеленых насаждений в городах российской... Актуально в 2017 году: [Электронный ресурс] // Закон прост. Правовая конституционная служба. – URL : <http://www.zakonprost.ru/content/base/part/292265>

#### **References:**

1. Landscaping and landscaping of the territory: [Electronic resource]. – URL : RONL.RU <http://www.ronl.ru/referaty/gosudarstvo-pravo/396342/>

2. ORDER GOSSTROY RF from 15-12-99 153 About the approval of the rules of creation and containment of green plants in the cities of the russian ... Actually in 2017: [Electronic resource] // The law is simple. Legal constitutional service. – URL : <http://www.zakonprost.ru/content/base/part/292265>



УДК 55.533.585

## РАЗРАБОТКА ЗАХВАТНЫХ МЕХАНИЗМОВ НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА «СВАРКА ТРЕНИЕМ»

### DEVELOPMENT OF GRIPPING MECHANISMS ON THE BASIS OF EFFECT «WELDING BY FRICTION»

**Гасанов Рамиз Алиш**

доктор технических наук, профессор,  
Азербайджанский Государственный Университет  
Нефти и Промышленности  
ramizhasanov52@hotmail.com

**Гасымова Тила Мамед**

старший научный сотрудник, докторант,  
Азербайджанский Государственный Университет  
Нефти и Промышленности  
tagieva89@list.ru

**Аннотация.** Рассмотрен процесс и конструктивное исполнение скважинного инструмента для применения ловли посторонних предметов в условиях скважин. Подтверждено и экспериментально доказано возможность ловли и извлечения металлических предметов с использованием эффекта сварки трением, что позволяет упростить конструкцию, снизить трудоемкость процесса производства ремонтных работ с применением ловильных устройств.

Экспериментально подтверждено, что удовлетворительное качество сварных соединений для ловли посторонних предметов (по типоразмерам и материалу) можно получить в определенных диапазонах, скорость вращения и величины осевого усилия при проковке и времени реализации процесса соединения с аварийным предметом.

**Ключевые слова:** фрезерная коронка, скважинный инструмент, скорость вращения, ловильные устройства, бурильные трубы, сменная втулка.

**Gasanov Ramiz Alish**

Doctor of Engineering, professor,  
Azerbaijani State University of  
Oil and Industry  
ramizhasanov52@hotmail.com

**Gasymova Tila Mamed**

Senior Research Associate,  
Doctoral candidate,  
Azerbaijani State University of  
Oil and Industry  
tagieva89@list.ru

**Annotation.** Process and constructive executions of the borehole tool for application of catching of postoreny objects in the conditions of wells is considered. It is confirmed and experimentally proved a possibility of catching and extraction of metal objects with use of effect of welding by friction that allows to simplify a design, to reduce labor input of process of production of repair work with use of lovilny devices.

It is experimentally confirmed that the satisfactory quality of welded connections for catching of postoreny objects (on standard sizes and material) can be received in the certain ranges, the speed of rotation and size of axial effort at pro-forging and time of realization of process of connection with an emergency subject.

**Keywords:** milling crown, borehole tool, rotation speed, lovilny devices, boring pipes, replaceable plug.

**В** процессе бурения нефтяных и газовых скважин аварией считают нарушение технологического процесса, вызываемое прихватом или поломкой с оставлением в скважине инструментов, элементов бурильной колонны или других предметов, для извлечения которых требуются специальные работы.

Для очистки забоя скважины от металлических предметов в нефтепромысловой практике, известно могут применяться инструменты, в основу функционирования которых заложена возможность воздействия на ловимые предметы различными физическими полями. Опыт применения этих инструментов с относительно низкой эффективностью свидетельствует о наличии больших резервов в совершенствовании, как самих инструментов, так и технологии их использования.

В настоящей работе рассматривается возможность осуществления захвата и извлечения предметов из скважины с помощью сварного шва, образуемого теплом трения, генерируемого при относительном вращении под нагрузкой с последующим поступательным движением инструмента. Это решение значительно простое в сравнении с существующими ловителями в конструктивном исполнении и позволяет выполнять все функции, предназначенные этому классу инструментов (захват и транспортирование; извлечение по частям путем отворота; освобождение, см. рис. 1).

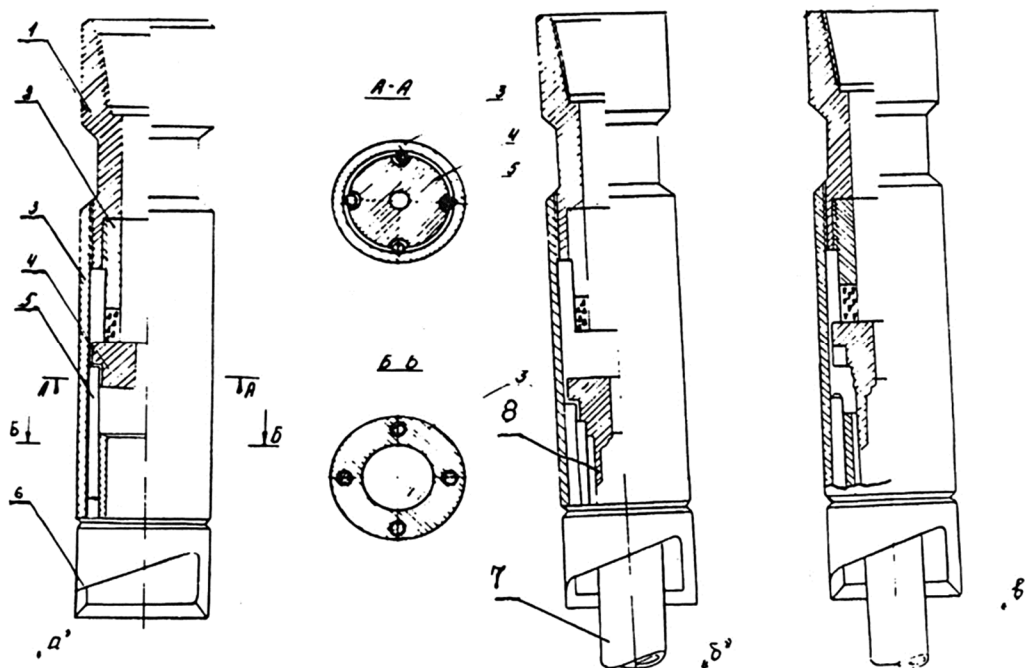
На рисунке 1, а изображено устройство в сборе в транспортном положении; на рисунке 1, б – устройство в сборе после захвата ловимого объекта; на рисунке 1, в – устройство в сборе при его освобождении от ловимого объекта.

Устройство для ловли и извлечения металлических предметов из скважины, при помощи которого реализуется способ, содержит переводник 1, фрезерную коронку 2, корпус 3, внутри которого размещена





сменная втулка 4 взаимодействующая с штифтами 5, легко запрессованными в специальные отверстия, направляющую воронку 6. Сменная втулка 4 предназначена для образования пары трения с ловимым объектом, от взаимодействия элементов которой генерируется тепло и происходит формирование сварного шва в зоне контакта, Фрезерная коронка, армированная композитным сплавом, служит для фрезерования образованного сварного шва и освобождения устройства от ловимого объекта.



**Рисунок 1** – Способ ловли и извлечения металлических предметов из скважины и устройство для его реализации:

а – в транспортном положении; б – в процессе функционирования (захвата); в – в процессе освобождения

Способ осуществляется с помощью устройства следующим образом.

Устройство на трубах спускают в скважину до месторасположения ловимого объекта 7. При достижении объекта его верхний торец посредством воронки 6 вводится во внутрь корпуса 3 устройства до посадки к опорной поверхности сменной втулки 4, после чего инструмент нагружается определенной осевой нагрузкой до полной посадки ловимого объекта. Затем устройство под нагрузкой приводится во вращательное движение посредством колонны буровых труб. При этом в зоне взаимодействия сменной втулки и ловимого объекта образуются пары трения, генерируется высокая температура, способствующая размягчению взаимодействующих поверхностей. После этого вращение устройства прекращают и нагружают его дополнительной осевой нагрузкой. Выдержав под этой нагрузкой определенное время за счет усадки взаимодействующих поверхностей получают сварочный шов 8 и осуществляют тем самым захват ловимого объекта. После захвата объекта производят его подъем (целиком или по частям) на дневную поверхность путем подъема колонны труб. Если при подъеме устройства с заловленным объектом наблюдаются затяжки, то производят его освобождение следующим образом. Опускают устройства до достижения приваренной к ловимому объекту сменной втулки 4 Фрезерной коронки 2. Затем путем вращения устройства фрезеруют образованный при захвате ловимого объекта сварочный шов 8. Освободив устройство поднимают его на поверхность на колонне труб. Подготовка устройства к повторному спуску осуществляется заменой сменной втулки 4.

Применение предлагаемого способа и устройства позволит:

- упростить технологию извлечения металлических предметов из скважины;
- упростить конструкцию и повысить грузоподъемность устройства для осуществления предлагаемого способа;
- предотвратить возможные повторные спуско-подъемные операции в связи с падением заловленного объекта в скважину;
- сократить время, отводимое на восстановление аварийных скважин и сэкономить определенные материальные ресурсы.

Реализация этих преимуществ в полной мере возможна лишь при условии разработки наиболее оптимальной технологии изготовления соединений при сварке трением. В этой связи, с целью изучения возможности получения стыковых соединений труб сваркой трением в условиях скважины, были проведены экспериментальные исследования на образцах [1, 3].



Следует отметить, что использование сварки трением в условиях скважины имеет ряд отличительных особенностей, которые включают:

– сварка ведется в среде жидкости, что влияет на условие разогрева и образования сварного соединения;

– относительно небольшая скорость вращения инструмента.

Одной из задач опытного изготовления стыковых соединений труб сваркой трением была оценка технологических особенностей и фактической трудоемкости при выполнении работ в условиях, близких к тем, которые существуют. Известно множество технологических процессов сопровождающихся генерацией высоких температур. К ним можно отнести разрушения горных пород, фрезерование металлических изделий и т.д. В таких случаях для предупреждения чрезмерного разогрева трущихся поверхностей используется промывочно-охлаждающая жидкость.

Для оценки возможности получения сварного шва нами были проведены экспериментальные исследования в условиях приближенных к скважинам, в процессе реализации которых использовалась в качестве такой жидкости техническая вода.

Свариваемые образцы имели различную форму очертания соприкасающихся поверхностей для плитации различных видов стыковых трубчатых соединений.

Были заварены стыковые соединения из труб диаметром 60 мм с толщиной стенки 5 мм в количестве 3 шт. по каждому виду соединения. Материал образцов – сталь 40ХН.

Рассчитывалась несущая способность сварных соединений, учитываемая при задании величины усилия нагрева и проковки. Все перечисленные условия позволяют считать изготовленные образцы близким прототипом конструкций в реальных условиях скважины.

Кромки соединяемых труб имел: плоскую поверхность, которая подготавливалась механической обработкой. Подготовленные к сварке трубы помещали на опоры машины для сварки трением, где обеспечивалась их соосность. Параметры режима сварки по каждой схемы проведены в таблице 1.

**Таблица 1** – Результаты экспериментов

Схема сварки образцов	Среда	Осевое усилие		Время вращения, сек
		При нагреве	При проковке	
1	Вода	8–20	80	45
2		20–40	120	40
3		20–40	100	40
4		20–40	100	75
5		20	100	35

Давление при трении и проковке принималось соответственно (20 ÷ 50) МПа и (80 ÷ 120) МПа, а линейная скорость вращения инструмента – 1 м/с.

Из описанного следует, что проведенные экспериментальные и стендовые испытания как способа ловли объектов сваркой трением, так и устройства для его реализации позволили отработать конструкцию инструмента и соответствующий технологический регламент его эксплуатации. Учитывая большую эффективность возможной замены этими инструментами целого класса сложного ловильного инструмента, применяемого в настоящее время в стране и зарубежом разработка рекомендована к широкому внедрению в промышленности. Для использования разработанных захватных механизмов условиях скважин настоящее время проводятся работы для отработки предлагаемой технологий с их использованием.

#### Литература:

1. Гасанов Р.А. Статистический метод принятия решения по реализации ремонтно восстановительных работ // Тезисы докладов научно-технической конференции по динамике и прочности нефтепромыслового оборудования. – Баку, 1989. – С. 84.
2. Булатов А.И., Проселков Ю.М., Шаманов С.А. Техника и технология бурения нефтяных и газовых скважин. – М. : ООО «Недра-Бизнесцентр», 2003. – 1007 с.
3. Басарыгин Ю.М., Булатов А.И., Проселков Ю.М. Осложнения и аварии при бурении нефтяных и газовых скважин. – М. : Недра, 2000. – 680 с.

#### References:

1. Gasanov R.A. A statistical method of decision-making on realization it is repair recovery work // Theses of reports of a scientific and technical conference on dynamics and durability of the oil-field equipment. – Baku, 1989. – P. 84.
2. Bulatov A.I., Proselkov Yu.M., Shamanov S.A. Equipment and technology of drilling of oil and gas wells. – M. : LLC Nedra-Businesscentre, 2003. – 1007 p.
3. Basarygin Yu.M., Bulatov A.I., Proselkov Yu.M. Complications and accidents when drilling oil and gas wells. – M. : Nedra, 2000. – 680 p.



УДК 621.9.048.6

## АНТИКОРРОЗИОННАЯ ЗАЩИТА ОБОРУДОВАНИЯ ОТ ДЕЙСТВИЯ АГРЕССИВНЫХ СРЕДСТВ МИНЕРАЛЬНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ, ВНЕДРЯЕМЫМИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКОЙ

### ANTICORROSION PROTECTION OF EQUIPMENT FROM THE ACTION OF AGGRESSIVE AGENTS WITH MINERAL COATINGS BY THE INTRODUCED ULTRASONIC TREATMENT

**Грушев Виталий Викторович**

кандидат технических наук, доцент,  
Забайкальский государственный университет  
Guushev.49@mail.ru

**Grushev Vitaliy Viktorovich**  
Candidate of Technical Sciences,  
Associate Professor,  
Transbaikal State University  
Guushev.49@mail.ru

**Аннотация.** Рассматривается влияние ультразвуковой обработки на упаковку минеральных материалов в поверхностный слой, обеспечивающее антикоррозионные свойства изделий машиностроительного назначения.

**Annotation.** Examines the influence of ultrasonic treatment on the packaging of mineral materials in the surface layer, providing anti-corrosion properties of products in mechanical engineering.

**Ключевые слова:** минералы, покрытия, энергия, структура, ультразвук.

**Keywords:** minerals, coatings, energy, structure, ultrasound.

Прогресс в развитии машиностроительного производства во многом зависит от создания изделий с высокими технологическими и эксплуатационными характеристиками практически всех типов деталей. Достижение заданных параметров требует более тонкого и вместе с тем, более глубокого технологического воздействия на структуру металлов, а в ряде случаев и создания принципиально новых технологических процессов и конструкционных материалов. Возникла потребность в совершенствовании теоретических представлений и кинетики физико-химических процессов на поверхности и в поверхностном слое твердых тел, в разработке технологий молекулярного и атомного уровня.

Известно, что в 57 случаях из 100 причиной преждевременного выхода оборудования из строя является коррозия. Поэтому для обеспечения надежности работы горно-шахтного и энергетического оборудования, работающих в коррозионно активных средах, необходим новый подход по повышению их эксплуатационных свойств

Оборудование работает в закрытом пространстве и подвержено воздействию различных растворов, соленой воды и т.д. На детали оказывают влияние динамические и вибрационные нагрузки, вызывающие интенсивный износ агрегатов. При эксплуатации поверхностный слой детали подвергается особо сильным физико-химическим воздействиям: механическому, тепловому, магнито-электрическому, химическому и др. В большинстве случаев у деталей ухудшаются служебные свойства поверхности. Износ, эрозия, кавитация, коррозия, усталостные трещины и другие разрушения первоначально развиваются на поверхности. Поэтому к поверхностному слою предъявляют более высокие требования, чем к основной массе детали.

В настоящее время проблема антикоррозионной защиты является актуальной, как в России, так и во многих других странах. Ежегодно экономические потери от коррозии составляют значительный процент от общих затрат в технологических отраслях. Потери, по приблизительной оценке, составляют порядка 10–14 % от общего количества добываемых металлов. Данные потери трудно подвергаются точной оценке. А косвенные экономические потери увеличивают значения затрат ещё на порядок. В статьях различных авторов приводятся результаты анализа современных методов борьбы и предупреждения коррозии, которые подразделяются на три группы: технологические, физические и химические. Наиболее распространённым из данных групп методов является применение различных антикоррозионных покрытий.

Одним из наиболее действенных способов повышения эксплуатационных свойств изделия является понятие о трансформации структуры металла в наноразмерное состояние, при котором размер структуры составляет менее 100 нм [1].

Увеличение прочностных характеристик и твердости при сохранении удовлетворительной пластичности и ударной вязкости при наноконструировании связывают с изменением закономерностей пластического деформирования поликристаллического тела, обусловленного уменьшением размера зерна и увеличением относительного объема границ зерна.

Экспериментальные данные характеризуют зависимость механических и эксплуатационных свойств изделия от режимов деформационного наноконструирования.



На данном этапе развития теории и практики в области технологического обеспечения эксплуатационных свойств изделия количество и качество накопленных знаний не дают возможности в полной мере использовать эти методы для решения инженерных задач.

Перспективным методом поверхностно-пластической деформации с целью модификации поверхности является технология упрочняюще-чистовой обработки – ультразвуковая финишная обработка (УФО) [2].

В результате данной обработки повышается микротвёрдость поверхностных слоев, формируются сжимающие остаточные напряжения и повышается износостойкость при трении скольжения.

Создание нанокристаллической структуры в поверхностном слое на основе УФО позволяет существенно улучшить характеристики металлов и их сплавов. Этот метод характеризуется простотой и низкой себестоимостью.

Насыщение минеральными материалами природного происхождения поверхностной структуры металла ультразвуком создает возможность обеспечить антикоррозионную защиту оборудования, работающего в агрессивных средах. Разработка такой технологии ультразвуковой обработки поверхности металлов вносит серьезные коррективы в представления о парах трения в машинах и механизмах и антикоррозионных покрытиях, которые можно получить, используя новые комплексные технологии обработки поверхностных слоев металлов [3]. Такое комбинированное воздействие не только упрочняет поверхностный слой, но и модифицирует его.

Выбор технологии модификации определяется условиями эксплуатации изделия и свойствами исходного материала детали. Модифицирование поверхности на различную глубину позволяет, прежде всего, сохранять свойства основного металла, его способность выдерживать определённые нагрузки, не уменьшать усталостную прочность и т.п. В связи с этим, наиболее рационально модифицировать только тонкие поверхностные слои [3].

Применение минеральных материалов природного происхождения в качестве конструкционных материалов для формирования поверхностных слоев деталей, обладающих высокими антифрикционными, антикоррозионными и другими специальными свойствами требует новых теоретических, методологических и технологических подходов. Это требование вызвано рядом обстоятельств, связанных со специфическими физико-механическими свойствами природных материалов, отличными от свойств традиционных материалов (сталей, сплавов и т.д.), получаемых искусственным путём.

В зависимости от технологии нанесения покрытия на поверхность детали возможно получение однослойного и многослойных покрытий, способных надёжно защитить поверхность и придать ей дополнительно требуемые свойства. Технологический процесс обработки строится по простой схеме, не требующей дорогостоящего оборудования.

Внедрение минеральных покрытий при сверхпластичном течении при ультразвуковой обработке представляет многофакторный процесс. Упрочнение достигается в результате сложных структурных изменений во время действия ультразвука и после него, являющихся синтезом нескольких физических механизмов и реализуемых при фазовых превращениях.

Деформации высокой степени в поверхностном слое при малых общих деформациях детали приводят к созданию в слое значительных сжимающих напряжений [2].

Для оценки влияния ультразвуковых колебаний на формирование поверхностного слоя деталей при внедрении минеральных материалов проведены исследования на деталях «Шток» горного оборудования из стали 45, полученных по заводской технологии (шлифованных до  $Ra = 0,4$  мкм), обработанных только резцом до  $Ra = 6,3$  мкм и обработанных композитом после закалки ТВЧ.

Параметры режимов УЗО имели следующие значения: частота  $f = 22$  кГц, амплитуда  $A = 10$  мкм, радиус бочкообразного индентора  $R_{инд} = 8$  мм, с величиной подачи  $S_{прод} = 0,054–0,090$ , сила статического прижима  $F_{см} = 50...60$  Н.

В результате ультразвуковой обработки закалённой нешлифованной стали 45 покрытой геоматериалом улучшается шероховатость с  $Ra = 6,3$  мкм до  $Ra = 0,1...0,3$  мкм и повышает микротвёрдость с HRC = 42 ед. до HRC = 50 ед., что позволяет исключить обработку шлифованием. Количество проходов зависит от технологических требований к изготавливаемой детали (шероховатость и твёрдость) и соответствует 1... 3 проходам.

Микроструктуру упроченной поверхности определяли растровым электронным микроскопом JSM-6510LV (Япония) с системой микроанализа INCAEnergy 350, OxfordInstruments.

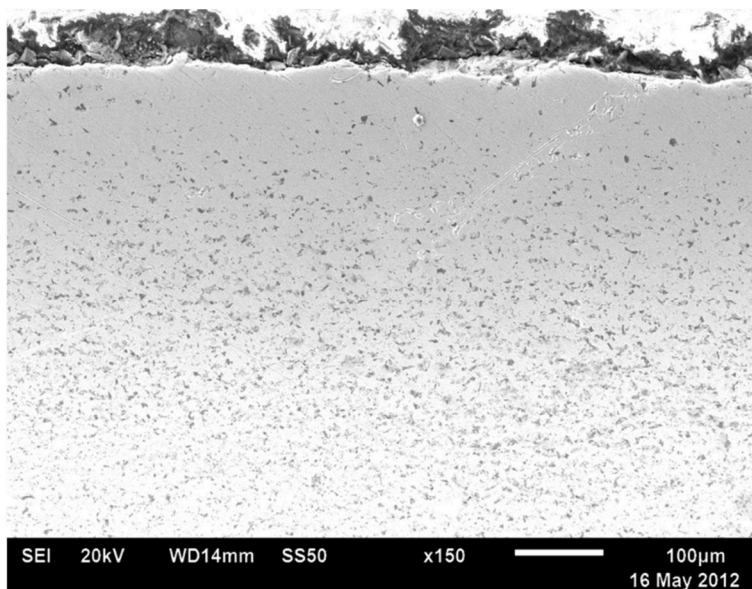
Результаты проведенных исследований формирования различных покрытий из минералов природного происхождения под воздействием ультразвуковой обработки показали возможность изменения микроструктуры поверхностного слоя.

Микроструктура поверхностного слоя с внедренным геоматериалом закаленного и незакаленного образца представлена на рисунках 1 и 2.

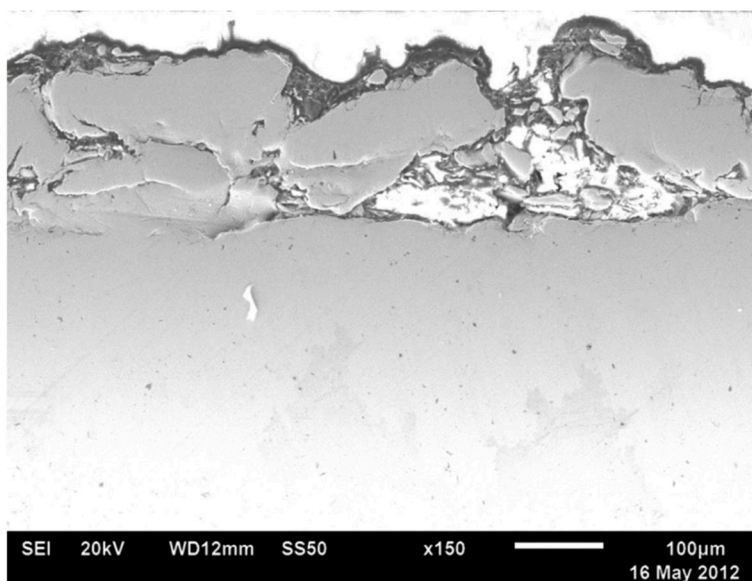
Для проверки стойкости минеральных покрытий к агрессивным средам в лаборатории «Технология машиностроения» ЗабГУ проведены испытания деталей из различных материалов с разными типами покрытий и без них в среде соляного тумана NaCl при концентрации последнего 30граммов на



литр дисциллированной воды. Испытания проводились в течение 168 часов. После испытаний проведён визуальный осмотр поверхностей и оценка степени их повреждения.



**Рисунок 1** – Микроструктура поверхностного слоя. Закаленный образец. Сталь 45 при  $S = 0,09$ ;  $V = 25$  м/мин



**Рисунок 2** – Микроструктура поверхностного слоя. Незакаленный образец. Сталь 45 при  $S = 0,09$ ;  $V = 25$  м/мин

Поверхность с минеральным покрытием после испытаний соответствовала первоначальной шероховатости 0,63–0,32 мкм. Образцы обследовались профилометром Mahr Surf.

Структура дробится и размеры отдельных кристаллов уменьшаются. При этом дефектность структуры снижается. Формирование различных покрытий с помощью ультразвуковой обработки позволяет принципиально изменять состояние поверхностного слоя детали.

На рисунках 1 и 2 видно уплотнение поверхностного слоя и сглаживание шероховатости, происходящее под воздействием ультразвука. Слой геоматериала, внедренного в поверхность (область поверхности темного цвета), препятствует образованию коррозии материала. Изменение характеристик поверхностных слоев материалов при обработке ультразвуком с геоматериалом позитивно сказывается на коррозионной стойкости в следствии увеличения адгезионного числа приповерхностного слоя материала за счет энергии, необходимой для установления связи между атомами поверхностного слоя и атомами геоматериала при одинаковом давлении. Рисунки 1 и 2 отражают различия, с которыми происходит воздействие ультразвука на приповерхностные слои закаленного и незакаленного образцов по глубине внедрения (от 10 мкм до 20 мкм) и степень воздействия на уплотнение микроструктуры.

**Выводы:**

1. Внедрение минеральных материалов природного происхождения под воздействием ультразвуковой обработки модифицирует приповерхностный слой эффективно заполняя поры и раковины, что предотвращает развитие коррозии.
2. Величина внедрения слоя из минералов природного происхождения в закаленные и незакаленные образцы соответствует 10–20 мкм и позволяет сохранять свойства основного материала после ультразвуковой обработки.
3. Эксплуатационные характеристики деталей после внедрения минеральных материалов ультразвуком имеют повышенную сопротивляемость коррозии по сравнению со шлифованными, что позволяет исключить операции шлифования.

**Литература:**

1. Алехин В.П., Алехин О.В. Нанотехнологии поверхностной упрочняющей и финишной обработки деталей из конструкционных и инструментальных сталей // Машиностроение и инженерное образование. – 2007. – № 4. – С. 2–13.
2. Холопов Ю.В. Машиностроение ультразвук: УЗС БУФО ГЕО. – СПб. : ООО «Типография «Береста», 2008. – 328 с., ил
3. Грушев В.В., Лазарев С.Ю. Промышленное применение минеральных покрытий и ультразвуковой обработки. – Чита : ЗабГУ, 2012. – 144 с.

**References:**

1. Alekhin V.P., Alekhin O.V. Nanotechnology of surface hardening and finishing of parts from structural and tool steels // Mechanical engineering and engineering education. – 2007. – № 4. – P. 2–13.
2. Kholopov Yu.V. Mechanical engineering ultrasound: USS BUFO GEO. – St. Petersburg : Printing house «Beresta», 2008. – 328 p.
3. Grushev V.V., Lazarev S.Yu. Industrial application of mineral coatings and ultrasonic treatment. – Chita : ZabGU, 2012. – 144 p.



УДК 539.3

## УСТОЙЧИВОСТЬ ПРЯМОГО СТЕРЖНЯ ИЗ ПОРИСТОГО МАТЕРИАЛА, ШАРНИРНО ЗАКРЕПЛЕННОГО КОНЦАМИ

### STABILITY OF A DIRECT CORE FROM THE POROUS MATERIAL PIVOTALLY FIXED BY THE ENDS

**Гулгезли А.С.**

доктор технических наук,  
доцент кафедры «механика»,  
Азербайджанский Государственный Университет  
Нефти и Промышленности  
alesker.gulgezli@mail.ru

**Ефендиев О.Ю.**

аспирант кафедры «механика»,  
Азербайджанский Государственный  
Архитектурно-Строительный Университет  
o.efendiyev@mail.ru

**Gulgezli A.S.**

Doctor of Engineering,  
associate professor of  
mekhanika department,  
Azerbaijani State University of  
Oil and Industry  
alesker.gulgezli@mail.ru

**Efendiyev O.Yu.**

Graduate Student of mekhanika department,  
Azerbaijani State Architectural  
and Construction University  
o.efendiyev@mail.ru

**Аннотация.** В статье рассматривается задача о потере устойчивости прямого стержня с прямоугольным поперечным сечением. Концы стержня закреплены шарнирно. Материал стержня из пористого материала. Поэтому, связи деформациями и напряжениями являются нелинейными. Учитывается так же геометрическая нелинейность в одном из поперечных направлений. Таким образом задача является и физически и геометрически нелинейной, следовательно её решение связано с большими математическими трудностями. Для устранения эти трудности при решении задачи применен вариационный принцип. Эйлеровы уравнения предложенного функционала дают систему нелинейных дифференциальных уравнений, которая решена с применением метода Рунге-Кутта четвертого порядка. Графически построены зависимости критических значений сжимающей силы от начального прогиба относительной толщины.

**Ключевые слова:** устойчивость, пористость, тонкостенность, физическая нелинейность, геометрическая нелинейность, перемещение, деформация, напряжение.

**Annotation.** In article the task about loss of stability of a direct core with rectangular cross section is considered. The ends of a core are fixed pivotally. Core material from porous material. Therefore, communications by deformations and tension are nonlinear. Also geometrical nonlinearity in one of the cross directions is considered. Thus the task is and physically and geometrically nonlinear, therefore her decision is connected with great mathematical difficulties. The variation principle is applied to elimination these difficulties at the solution of a task. The Euler equations of the offered functionality give the system of the nonlinear differential equations which is solved with application of the Runge-Kutta method of the fourth order. Dependences of critical values of the squeezing force on an initial deflection of relative thickness are graphically constructed.

**Keywords:** stability, porosity, tonkostennost, physical nonlinearity, geometrical nonlinearity, movement, deformation, tension.

**Постановка задачи.** Стержень постоянной толщины, из пористого материала, находится в вертикальном положении, причем верхняя опора свободна перемещается в вертикальном направлении и на него действует центрально-сжимающая сила  $P$ . Считается, что стержень тонкий. Температура и коэффициент Пуассона считаются постоянными. Требуется определить критическую силу, соответствующую потери устойчивости.

**Решение задачи.** Введем декартову систему координат  $oxuz$  так, чтобы ось  $x$  была направлена по оси стержня и проходила через центр тяжести поперечного сечения, а оси  $y$  и  $z$  напомним по главным осям инерции поперечного сечения.

Сделаем следующие предположения:

1. Геометрическая нелинейность имеет место только в направлении нормали (нормальную координату будем обозначать через  $-z$ ).
2. Учитывается гипотеза Кирхгофа-Лява, т.е. сечения, перпендикулярные к оси стержня до деформирования, остаются перпендикулярными к оси стержня и после деформирования.
3. В направлении оси  $y$  точки стержня не получают перемещения и остальные величины не зависят от  $y$ .
4. В направлении оси  $z$  толщина стержня равна единице.
5. Начало системы координат находится на серединной поверхности не деформированного стержня, длина стержня равна  $2l$ , причем  $-l \leq x \leq l$ .
6. В направлении оси  $z$  толщина стержня равна  $2h$ , причем  $-h \leq z \leq h$ .



Тогда компоненты тензора деформаций срединной поверхности и её изгиба выражаются через компоненты вектора перемещения на срединной поверхности следующим образом [4]:

$$\varepsilon = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2; \quad \varkappa = -\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}, \quad (1)$$

где  $w$  – перемещения точек срединного слоя в направлении оси  $z$ ;  $\varepsilon(x, t)$ ,  $\varkappa(x, t)$  – соответственно, деформация и изменение кривизны на срединной поверхности стержня;  $t$  – время.

Уравнение равновесия с учетом геометрической нелинейности, связь между компонентами тензора деформаций и напряжений и граничные условия в декартовой системе координат имеют следующий вид [1, 3, 4]

$$[\sigma_{ij}(u_{\alpha,i} + \delta_{\alpha i})]_{,j} = 0. \quad (2)$$

$$\varepsilon_{ij} = (1 - k_0) \left( \frac{1+\nu}{E_{\text{сек}}} \sigma_{ij} - \frac{\nu I_1}{E_{\text{сек}}} \delta_{ij} \right). \quad (3)$$

$$\begin{cases} \sigma_{ij}(\delta_{\alpha i} + u_{\alpha,i}) \cdot n_j = \bar{N}_\alpha \text{ на } S_\sigma \\ u_i = \bar{u}_i \text{ на } S_u \end{cases}. \quad (4)$$

где  $k_0 = \sqrt{\frac{\sigma_m^2}{I_1^2 + 2(1+\nu)I_2} - 1}; \quad (5)$

$\sigma_m$  – максимальное значение нормального напряжения;  $E_{\text{сек}}$  – секущий модуль упругости в момент разрыва, которые всегда можно определить из эксперимента на одноосное растяжение;  $\varepsilon_{ij}$ ,  $\sigma_{ij}$  – компоненты тензоров деформации и напряжения;  $\delta_{ij}$  – символы Кронекера;  $I_1, I_2$  – соответственно первый и второй инварианты тензора напряжений, запятые означает дифференцирование по координате с индексом, который следует после запятой;  $u_\alpha$  – компоненты вектора перемещений,  $n_j$  – компоненты вектора нормали,  $\bar{N}_i$  – заданные компоненты вектора поверхностных сил на  $S_\sigma$ ,  $\bar{u}_i$  – заданные перемещения на поверхности  $S_u$ , по повторяющимся индексам идет суммирование от 1 до 3.

Систему (3) перепишем следующим образом:

$$\varepsilon_{ij} = \left( \frac{1-k_0}{E_{\text{сек}}} \right) [(1 + \nu)\sigma_{ij} - \nu \cdot I_1 \delta_{ij}]. \quad (6)$$

Введем следующее обозначение:

$$K = \frac{1-k_0}{E_{\text{сек}}}. \quad (7)$$

С учетом (7) в (6) имеем:

$$\varepsilon_{ij} = K[(1 + \nu)\sigma_{ij} - \nu I_1 g_{ij}]. \quad (8)$$

Предлагаемый функционал имеет следующий вид [2]:

$$\begin{aligned} J = \int_V \left\{ \dot{\sigma}_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij} + \frac{1}{2} \sigma_{ij} \dot{u}_{\alpha,j} \dot{u}_{\alpha,i} - \dot{\sigma}_{ij} [K((1 + \nu)\sigma_{ij} - \nu I_1 \delta_{ij}) + K((1 + \nu)\dot{\sigma}_{ij} - \nu \dot{I}_1 \delta_{ij})] \right\} dV - \\ - \int_{S_\sigma} \bar{N}_i \dot{u}_i ds + \int_{S_u} (\dot{u}_i - \bar{u}_i) \dot{N}_i ds, \end{aligned} \quad (9)$$

где точка над величинами означает производную по времени;  $V$  – объем;  $s_u$  – площадь поперечного сечения стержня. При линейном напряженном состоянии  $\sigma_{11} = \sigma$  и остальные компоненты тензора напряжений равны нулю. Из системы (3) получается, что

$$\tilde{\varepsilon} = \left( \frac{1-k_0}{E_{\text{сек}}} \right) \tilde{\sigma}, \quad (10)$$

где  $\tilde{\varepsilon} = \varepsilon_{11}; \tilde{\sigma} = \sigma_{11};$

$$k_0 = \sqrt{\frac{\sigma_m^2}{\tilde{\sigma}^2} - 1}. \quad (11)$$

Из (9):

$$J = \int_V \left[ \dot{\tilde{\sigma}} \dot{\tilde{\varepsilon}} + \frac{1}{2} \tilde{\sigma} \left( \frac{\partial \tilde{w}}{\partial x} \right)^2 - \dot{\tilde{\sigma}} (K \tilde{\sigma} + K \dot{\tilde{\sigma}}) \right] dV - \int_{S_\sigma} \dot{P} u ds. \quad (12)$$





На основе известных соотношений, компонент тензора конечной деформации  $\tilde{\epsilon}$  в слое стержня, удаленном на расстоянии  $z$  от срединного слоя, имеет вид [3]:

$$\tilde{\epsilon} = \epsilon + z\alpha. \tag{13}$$

Компонент тензора напряжений в произвольной точке стержня имеет вид [3]:

$$\tilde{\sigma} = \frac{1}{2h}N(x, t) + \frac{3z}{2h^3}M(x, t),$$

где 
$$N(x, t) = \int_{-h}^h \tilde{\sigma} dz; M(x, t) = \int_{-h}^h z \tilde{\sigma} dz. \tag{14}$$

Приравнявая первую вариацию (12) к нулю имеем:

$$\delta J = \int_V [\dot{\tilde{\sigma}} \delta \dot{\epsilon} + \dot{\epsilon} \delta \dot{\tilde{\sigma}} + \tilde{\sigma} \frac{\partial w}{\partial x} \delta \frac{\partial w}{\partial x} - (\dot{K} \cdot \tilde{\sigma} + 2K \cdot \dot{\tilde{\sigma}}) \delta \dot{\tilde{\sigma}} - \tilde{\sigma} \dot{\tilde{\sigma}} \delta \dot{K}] dV - \int_{S_\sigma} \dot{p} \delta u dS = 0. \tag{15}$$

По условию стержень шарнирно закреплен по торцам, т.е. граничные условия можем записать в виде

$$w(x, \tau)|_{x=-l, l} = 0; M|_{x=-l, l} = 0. \tag{16}$$

Исходя из граничных условий (16) и физических соображений, для прогиба  $w(x, \tau)$  примем следующую аппроксимацию:

$$w(x, \tau) = \varphi(\tau) \cdot \cos \frac{\pi x}{2l}, \tag{17}$$

где  $\varphi(\tau)$  – неизвестная функция времени. Для  $u(x, \tau)$  выберем следующую аппроксимацию:

$$u(x, \tau) = \psi(\tau)x, \tag{18}$$

где  $k(\tau)$  – неизвестная функция времени.

Тогда компоненты тензора скорости деформации срединной поверхности имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\epsilon} &= \frac{\partial \dot{u}}{\partial x} + \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right] = \dot{\psi}(\tau) + \frac{\pi^2}{4l^2} \cdot \varphi(\tau) \cdot \dot{\varphi}(\tau) \sin^2 \frac{\pi x}{2l} \\ \dot{\kappa} &= \left[ \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right] = -\frac{\pi^2}{4l^2} \dot{\varphi}(\tau) \cos \frac{\pi x}{2l} \end{aligned} \right\}. \tag{19}$$

Исходя из уравнения состояния (10) и физических соображений для  $N(x, t)$  и  $M(x, t)$  примем следующие аппроксимации:

$$N(x, t) = N_1(t) + N_2(t) \sin^2 \frac{\pi x}{2l}; M(x, t) = M(t) \cos \frac{\pi x}{2l}, \tag{20}$$

где  $N_1(t), N_2(t), M(t)$  – неизвестные функции времени.

С учетом (17)–(20), (15) получает вид:

$$\begin{aligned} \delta J &= \int_{-l}^l [\dot{N} \delta \dot{\epsilon} + \dot{M} \delta \dot{\kappa} + N \frac{\partial w}{\partial x} \delta \frac{\partial w}{\partial x} + \left( \dot{\epsilon} - \frac{3}{2E} (4\dot{N}N - 2\dot{N}N_0 + \frac{3}{h^2} M\dot{M}) \right) \delta \dot{N} + \\ &+ \left( \dot{\kappa} - \frac{3}{h^2 E} (3\dot{N}M + 4N\dot{M} - 3N_0\dot{M}) \right) \delta \dot{M}] dx - 2h\dot{P} \cdot \delta \dot{u} = 0, \end{aligned} \tag{21}$$

где  $E = hN_0 E_{сек}$ .

Подставим выражения для  $\dot{\epsilon}, \dot{\kappa}, \dot{N}, \dot{M}$  в (21). После вычисления интегралов,

$$\begin{aligned} \delta J &= (2\dot{N}_1 l + \dot{N}_2 l - 2hl\dot{P}) \delta \dot{\psi} + \left[ \frac{\pi^2}{4l} \cdot \varphi \left( \dot{N}_1 + \frac{3}{4} \dot{N}_2 \right) - \frac{\pi^2}{4l} \dot{M} + \frac{\pi^2}{4l} \dot{\varphi} (N_1 + \frac{3}{4} N_2) \right] \delta \dot{\varphi} + \\ &+ \left[ 2l\dot{\psi} + \frac{\pi^2}{4l} \varphi \dot{\varphi} - \frac{3l}{2E} (8N_1\dot{N}_1 + 4N_1\dot{N}_2 + 4\dot{N}_1 N_2 + 3N_2\dot{N}_2) - 4N_0\dot{N}_1 - 2N_0\dot{N}_2 + \right. \\ &+ \frac{3}{h^2} M\dot{M} \left. \right] \delta \dot{N}_1 + \left[ \dot{\psi} l + \frac{\pi^2}{16l} \varphi \dot{\varphi} - \frac{3l}{2E} (4N_1\dot{N}_1 + 3N_1\dot{N}_2 + 3\dot{N}_1 N_2 + 3N_2\dot{N}_2) - 2N_0\dot{N}_1 - \frac{3}{2} N_0\dot{N}_2 + \right. \\ &+ \left. \frac{3}{4h^2} M\dot{M} \right] \delta \dot{N}_2 + \left[ -\frac{\pi^2}{4l^2} \dot{\varphi} l - \frac{3l}{h^2 E} \left( 3\dot{N}_1 M + 3\dot{N}_2 M \frac{1}{4} + 3N_1\dot{M} + \frac{3}{4} N_2\dot{M} - 3N_0\dot{M} \right) \right] \delta \dot{M} = 0. \end{aligned} \tag{22}$$

Из-за независимости вариаций  $-\delta \dot{\psi}, \delta \dot{\varphi}, \delta \dot{N}_1, \delta \dot{N}_2$  и  $\delta \dot{M}$  все их коэффициенты должны равняться нулю. Таким образом, Эйлеравы уравнения функционала (12) будут, где введены следующие обозначения безразмерных величин:

$$n_1 = \frac{N_1}{hE_{сек}}; n_2 = \frac{N_2}{hE_{сек}}; n_0 = \frac{N_0}{hE_{сек}}; p = \frac{P_0}{E_{сек}}; f = \frac{\varphi}{l}; m = \frac{M}{h^2 E_{сек}}; \gamma = \frac{l}{h}. \tag{23}$$



$$\begin{cases} 2\dot{n}_1 + \dot{n}_2 - 2p = 0 \\ f(4\dot{n}_1 + 3\dot{n}_2) - 4\dot{m} + \dot{f}(4n_1 + 3n_2) = 0; \\ 16n_0\dot{\psi} + 2\pi^2 n_0 f \dot{f} - 3(8n_1\dot{n}_1 + 4n_1\dot{n}_2 + 4n_2\dot{n}_2 + 3\dot{n}_1 n_2) - \\ \quad 32\dot{n}_1 n_0 - 16n_0 + 24\gamma^2 m \dot{m} = 0 \\ 16n_0\dot{\psi} + \pi^2 n_0 f \dot{f} - 24(4n_1\dot{n}_1 + 3(n_1\dot{n}_2 + \dot{n}_1 n_2) + 3n_2\dot{n}_2) - \\ \quad 32\dot{n}_1 n_0 - 24\dot{n}_2 n_0 + 12\gamma^2 m \dot{m} = 0 \\ \pi^2 \gamma n_0 f + 9\gamma(4\dot{n}_1 m + \dot{n}_2 m + 4n_1 \dot{m} + n_2 \dot{m} - 4n_0 \dot{m}) = 0 \end{cases} \quad (24)$$

Начальные условия для системы (27) будут: При  $t = 0$ ;

$$f(0) = \bar{f}; \psi(0) = 0; n_1(0) = n_2(0) = n_{10}(0) = n_{20}(0) = m(0) = m_0(0) = 0,$$

где  $\bar{f}$  – безразмерный начальный прогиб стержня.

Система дифференциальных уравнений (27) с учетом начальных условий решена на ЭВМ методом Рунге-Кутты четвертого порядка. Полученные результаты показаны на графиках. На рисунках даны зависимости  $p = p(\bar{\varphi})$  для различных значений  $\bar{\varphi}_0$  и  $\gamma$ . Изложим алгоритм, по которому решена система (55). Систему (55) перепишем в следующем виде.

$$\dot{y}_i = f_i(y_1, y_2, y_3, \dots, y_7, t), \quad (25)$$

где  $i = 1, 2, \dots, 5$ .

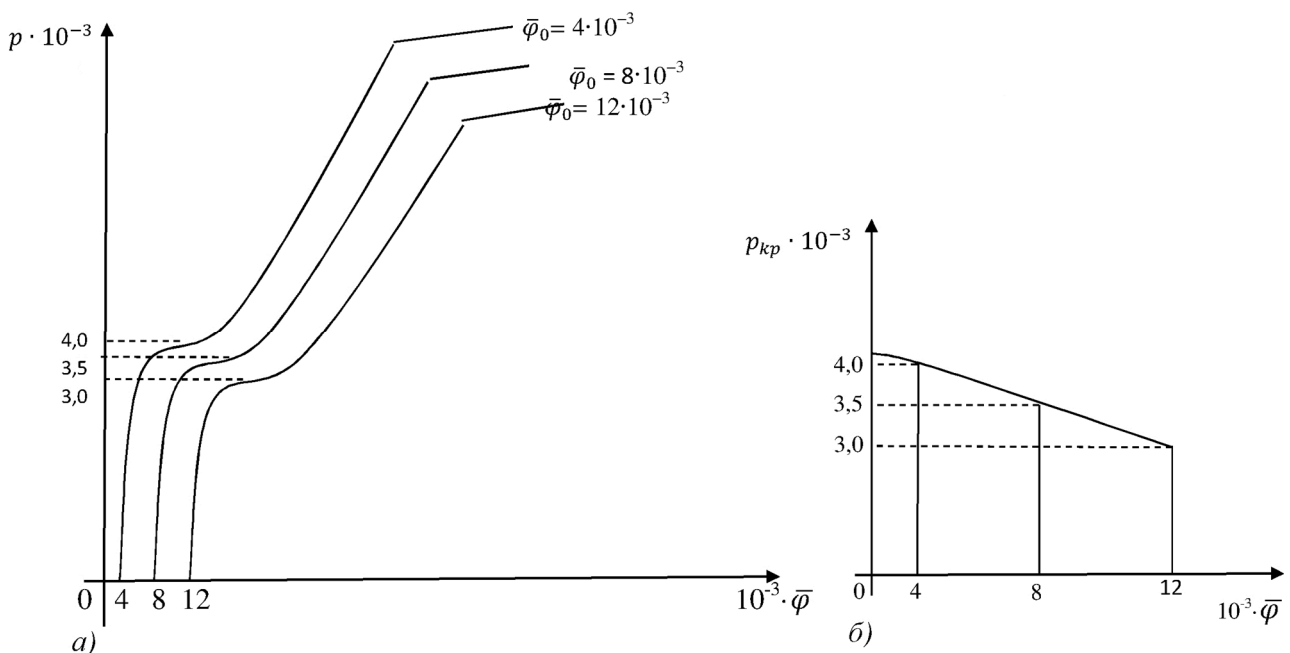
Если обозначить значения  $y_i$  ( $i = \overline{1,5}$ ) в  $n$ -ом шаге через  $y_i^n$  ( $i = \overline{1,5}$ ), то на  $n + 1$ -ом шаге значения этих величин по методу Рунге-Кутты четвертого порядка будут следующие:

$$y_i^{n+1} = y_i^n + \frac{H}{6}(k_{1i} + 2k_{2i} + 2k_{3i} + k_{4i}),$$

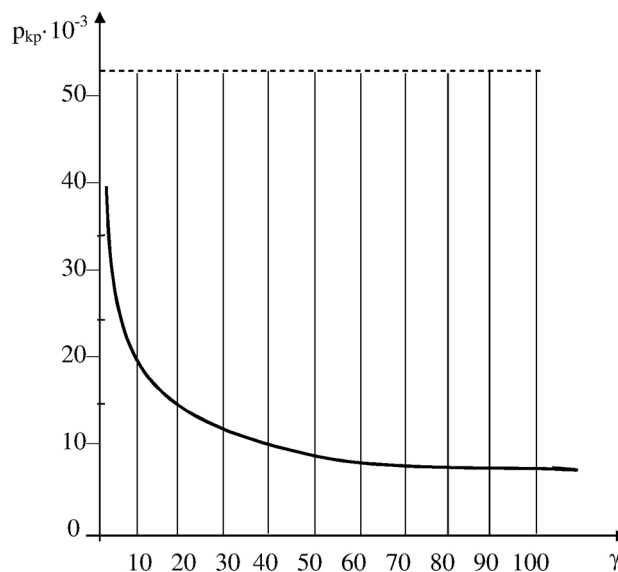
где  $H$  – длина шага,

$$\begin{aligned} k_{1i} &= f_i(y_1^n, y_2^n, \dots, y_7^n, t^n); \\ k_{2i} &= f_i\left(y_1^n + \frac{H}{2}k_{11}, y_2^n + \frac{H}{2}k_{12}, \dots, y_7^n + \frac{H}{2}k_{17}, t^n + \frac{H}{2}\right); \\ k_{3i} &= f_i\left(y_1^n + \frac{H}{2}k_{21}, y_2^n + \frac{H}{2}k_{22}, \dots, y_7^n + \frac{H}{2}k_{27}, t^n + \frac{H}{2}\right); \\ k_{4i} &= f_i\left(y_1^n + Hk_{31}, y_2^n + Hk_{32}, \dots, y_7^n + Hk_{37}, t^n + H\right); \end{aligned}$$

Ниже приводится зависимость  $p = p(\bar{\varphi})$  в различных значениях начального прогиба  $\bar{\varphi}_0$  (а) и  $p_{кр} = p_{кр}(\bar{\varphi}_0)$  (б) для прямого стержня при различных значениях относительной толщины  $\gamma$ .



**Рисунок 1** – Зависимость  $p = p(\bar{\varphi})$  в различных значениях начального прогиба  $\bar{\varphi}_0$  (а) и  $p_{кр} = p_{кр}(\bar{\varphi}_0)$  (б) для прямого стержня при  $\gamma = 100$



**Рисунок 2** – Зависимость критического момента выпучивания от относительной толщины стретжня в данном значении начального прогиба

**Литература:**

1. Гасанов Р.А., Гулгазли А.С., Зейналов А.И. Общий вид уравнения состояния пористой среды // Азербайджанское Нефтяное Хозяйство. – 2016. – № 9. – С. 31–33.
2. Hasanov R.A., Vasylyev O., Smirnova A., Gulgazli A.S. Modeling design and analysis of multi-layer axide fuel cells inb. // J. Hydrogen Energi. – 2011. – V. 36. – № 2. – P. 1671–1682.
3. Вольмир А.С. Нелинейная динамика пластинок и оболочек. – М. : Наука, 1972.
4. Амензаде Ю.А. Теория упругости. – М. : Высшая школа, 1976. – 275 с.
5. Ализаде А.Н., Гулгазли А.С. Вариационный принцип для определения напряженно-деформированного состояния упругой оболочки при облучении с учетом геометрической нелинейности // Изв. АН Азерб. ССР. Серия физ-тех. и матем. наук. – 1979. – № 6. – С. 84–87.

**References:**

1. Gasanov R.A., Gulgazli A.S., Zeynalov A.I. General view of the equation of a condition of the porous environment // Azerbaijani Oil Economy. – 2016. – № 9. – P. 31–33.
2. Hasanov R.A., Vasylyev O., Smirnova A., Gulgazli A.S. Modeling design and analysis of multi-layer axide fuel cells inb. // J. Hydrogen Energi. – 2011. – V. 36. – № 2. – P. 1671–1682.
3. Volmir A.S. Nonlinear dynamics of plates and covers. – M. : Science, 1972.
4. Amenzade Yu.A. Theory of elasticity. – M. : The higher school, 1976. – 275 p.
5. Alizadeh A.N., Gulgazli A.S. The variation principle for definition of the intense deformed condition of an elastic cover at radiation taking into account geometrical nonlinearity // Izv. AS of Azerb. SSR. Series Physics and Technology faculty and mat. sciences. – 1979. – № 6. – P. 84–87.



УДК 519.7

## АЛГОРИТМ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ПРОПИЛЕНГЛИКОЛЯ

### ALGORITHM OF OPTIMIZATION MODES OF TECHNOLOGICAL PROSESS OF PROPYLENGLIKOL PRODUCTION

**Магеррамова Тамелла Мустафа кызы**

кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры инженерии систем управления,  
Азербайджанский Государственный Университет  
Нефти и Промышленности  
tamellatm@gmail.com

**Magerramova Tamella Mustafa**

Ph. D., Associate Professor of  
Engineering control systems,  
Azerbaijan State University of  
Oil and Industry  
tamellatm@gmail.com

**Аннотация.** На основе всестороннего исследования технологического процесса получения пропиленгликоля, в частности реакции получения пропиленгликоля в гидраторе, сформулирована физически обоснованная математическая постановка задачи оптимального управления эти аппаратом. Установлено, что по своему характеру она является задачей нелинейного программирования, для решения которой предлагается алгоритм оптимизации режимов технологического процесса, основанного на применении метода множителей Лагранжа. Анализ результатов решения задачи оптимального управления процессом получения пропиленгликоля показал, что при поддержании полученных нами оптимальных значений управляющих параметров количество получаемого пропиленгликоля увеличивается по сравнению с реальным на 3,5 %.

**Annotation.** On the basis of comprehensive investigation of technological process of propylene glycol production, the article formulated physically motivated mathematical statement for optimum control for hydrator's block. It has been established that by nature it is a problem of nonlinear programming. To solve it article puts forward an algorithm of optimization modes of technological process. This algorithm is based on the application of Lagrange multipliers method. The analysis of the results of the problem solution for optimum control of process has shown that by maintenance of the optimum values of control parameters obtained by us the quantity of propylene glycol increases in comparison with the real by 3,5 percent.

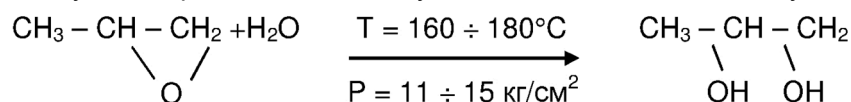
**Ключевые слова:** пропиленгликоль, гидратор, антифриз, удельный вес, оптимизации режимов.

**Keywords:** propylene glycol, hydrator, anti-freeze, specific gravity, optimization.

Известно, что пропиленгликоль широко применяется в качестве основного продукта для получения жидкого антифриза, рабочей жидкости в гидравлических системах, для получения полуэфирных смол, а также может быть использован в производстве лаков, красок и компонентов, используемых в пищевой промышленности.

Технологический процесс производства пропилена, в основном проходит свои стадии в смесителе (С), обеспечивающего смещение окиси пропилена с паровым конденсатом, гидраторе (Г), где происходит гидратация окиси пропилена в пропиленгликоль, трех параллельно работающих корпусах выпарной установки, где осуществляется выпарка парового конденсата продукта и ректификационной колонне (Р).

В гидраторе получение пропиленгликоля осуществляется на основе следующей реакции:



Как видно из вышеприведенной формулы, реакция получения пропиленгликоля – гидратация окиси пропилена в нейтральной среде с добавлением щелочи находится в зависимости от температуры и давления в аппарате. Наряду с основной целью задачи, заключающейся в получении максимального количества пропиленгликоля, необходимо соблюсти регламентные пределы его удельного веса (плотности)  $0,981 \div 1,036 \text{ г/см}^3$ . В связи с этим, задача оптимального управления гидратором запишется в следующем виде:

$$y = f\left(P, T, \frac{F_1}{F_2}\right) \rightarrow \max_{u \in U} . \quad (1)$$

$$0,981 \leq g = G\left(P, T, \frac{F_1}{F_2}\right) \leq 1,036 . \quad (2)$$



А ограничения, накладываемые на параметры управления:

$$\begin{cases} 11 \leq P \leq 15 \text{ кг/см}^2 \\ 160 \leq T \leq 180^\circ \text{C} \\ 500 \leq F_2 \leq 1000 \text{ м}^3/\text{час} \\ 3500 \leq F_1 \leq 6500 \text{ м}^3/\text{час} \\ 4 \leq \frac{F_1}{F_2} \leq 6 \end{cases} \quad (3)$$

Здесь  $y$  и  $g$  – соответственно количество и плотность пропиленгликоля;  $P$  и  $T$  – давление и температура в гидраторе;  $F_2$  и  $F_1$  – количество оксипропилена и расход воды, подаваемой всмеситель.

Учитывая вышеуказанное, задачу оптимального управления гидратором словесно можно описать следующим образом: при заданном значении оксипропилена ( $F_2^0$ ) и удовлетворении ограничений (3) определить (установить) такие значения управляющих параметров температуры, давления и отношения  $\frac{F_1}{F_2}$  в гидраторе и смесителе, которые удовлетворяют ограничению (2) и обеспечивают максимум получения пропиленгликоля.

Предположим, что согласно выходным координатам технологического процесса производства пропиленгликоля, математические модели в общем виде представляются в виде следующих уравнений [1]:

$$y^* = B_0 + \sum_{i=1}^n B_i x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n B_{ij} x_i x_j ; \quad (4)$$

$$g^* = K_0 + \sum_{i=1}^n K_i x_i . \quad (5)$$

Здесь  $y^*$  и  $g^*$  – соответственно количество пропиленгликоля и плотность; вычисленные на основе моделей;  $K_0, B_0, K_i, B_{ij}$  ( $i, j = \overline{1, n}$ ) – соответственно свободные, линейные и коэффициенты взаимодействия модели;  $x_i$  ( $i = \overline{1, n}$ ) – входные параметры;  $n$  – число входных параметров.

Основываясь на выражениях (4) и (5) вышеприведенной математической постановки задачи оптимизации (1) ÷ (3), можно утверждать, что по своему характеру она является задачей нелинейного программирования. Поэтому, для решения данной задачи нами используется метод множителей Лагранжа [2].

Известно, что применение метода множителей Лагранжа возможно тогда, когда функция (4), характеризующая критерий задачи оптимального управления, является выпуклой. Согласно [3] необходимое условие выпуклости функции (4) состоит в том, что ее коэффициенты – квадратичные эффекты ( $B_{ij}$  ( $i, j = \overline{1, n}$ )) должны быть одинакового знака (положительного или отрицательного).

Для решения задачи выпуклого программирования (1) – (3) составим функцию Лагранжа в следующем виде:

$$\begin{aligned} L\left(P, T, \frac{F_1}{F_2}, \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_6\right) &= f_1\left(P, T, \frac{F_1}{F_2}\right) + \lambda_1\left(g_1\left(P, T, \frac{F_1}{F_2}\right) - 0,981\right) + \\ &+ \lambda_2\left(1,036 - g_2\left(P, T, \frac{F_1}{F_2}\right)\right) + \lambda_3(180 - T) + \lambda_4(T - 160) + \lambda_5(15 - P) + \\ &+ \lambda_6(P - 11). \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь,  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_6$  – множители Лагранжа.

Известно, что с помощью предложенного метода решения (6) находятся координаты седловой точки функции Лагранжа. Если для всех аргументов  $P, T, \frac{F_1}{F_2}$  и  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_6$  функции (6) удовлетворя-



ются нижеприведенные условия, то точка  $\left\{ P^0, T^0, \left(\frac{F_1}{F_2}\right)^0, \lambda_1^0, \lambda_2^0, \dots, \lambda_6^0 \right\}$  будет называться седловой точкой функции Лагранжа:

$$\begin{aligned} L\left(P, T, \frac{F_1}{F_2}, \lambda_1^0, \lambda_2^0, \dots, \lambda_6^0\right) &\leq L\left(P^0, T^0, \left(\frac{F_1}{F_2}\right)^0, \lambda_1^0, \lambda_2^0, \dots, \lambda_6^0\right) \leq \\ &\leq L\left(P^0, T^0, \left(\frac{F_1}{F_2}\right)^0, \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_6\right). \end{aligned} \tag{7}$$

На основе теоремы Куна-Таккера [4] сформулируем необходимые и достаточные условия существования седловой точки для функции Лагранжа:

$$\frac{\partial L_0}{\partial P} \leq 0; \tag{8}$$

$$P^0 \frac{\partial L_0}{\partial P} = 0; \tag{9}$$

$$\frac{\partial L_0}{\partial T} \leq 0; \tag{10}$$

$$T^0 \frac{\partial L_0}{\partial T} = 0; \tag{11}$$

$$\frac{\partial L_0}{\partial \lambda_i} \geq 0 \quad (i = \overline{1,6}); \tag{12}$$

$$\lambda_i^0 \frac{\partial L_0}{\partial \lambda_i} = 0 \quad (i = \overline{1,6}); \tag{13}$$

$$\lambda_i^0 \geq 0 \quad (i = \overline{1,6}). \tag{14}$$

Здесь  $\frac{\partial L_0}{\partial P}$ ,  $\frac{\partial L_0}{\partial T}$  и  $\frac{\partial L_0}{\partial \lambda_j}$  ( $j = \overline{1,6}$ ) – вычисленные значения частных производных функции Лагранжа.

Для решения поставленной задачи, вводя новые неотрицательные переменные  $g_j$  ( $j = \overline{1,2}$ ) и  $w_j$  ( $j = \overline{1,6}$ ), преобразуем неравенства (8), (10) и (12) в равенства вида:

$$\frac{\partial L_0}{\partial P} + g_1 = 0; \tag{15}$$

$$\frac{\partial L_0}{\partial T} + g_2 = 0; \tag{16}$$

$$\frac{\partial L_0}{\partial \lambda_1} - w_1 = 0 \quad (i = \overline{1,6}); \tag{17}$$

$$P^0 g_1 = 0; \tag{18}$$

$$T^0 g_2 = 0; \tag{19}$$

$$\lambda_i^0 w_i = 0 \quad (i = \overline{1,6}); \tag{20}$$

$$\lambda_i^0 \geq 0, \quad g_j \geq 0, \quad w_j \geq 0 \quad (i = \overline{1,2}, \quad j = \overline{1,6}). \tag{21}$$

Таким образом, для нахождения решения задачи выпуклого программирования (1) ÷ (3) необходимо определить неотрицательное решение системы линейных уравнений (15) ÷ (17) и удовлетво-



ряющее условиям (18) ÷ (20). Это решение можно найти с помощью метода искусственного базиса [4]. В то же время, решение линейных уравнений (18) ÷ (20) с учетом выражений (15) ÷ (17) и условию (21) сводятся к нахождению максимума функции:

$$F = -M \sum_i z_i. \tag{22}$$

Здесь  $z_i$  – искусственная переменная, а  $M$  – достаточно большое положительное число.

В нашем случае математическая модель расхода пропиленгликоля и его удельного веса соответственно описываются следующими уравнениями:

$$y = 54,465 - 1,060 T + 3,550 P + 40,751 \frac{F_1}{F_2} + 0,006 T^2 - 0,022 TP - 0,148 T \frac{F_1}{F_2} + 0,255 P^2 - 1,562 P \frac{F_1}{F_2} + 0,158 \left( \frac{F_1}{F_2} \right)^2. \tag{23}$$

$$g = 0,950 + 0,0002 T - 0,0007 P + 0,0044 \frac{F_1}{F_2}. \tag{24}$$

Здесь:

$$y = 70,18, \quad g = 0,9969, \quad T = 170 \text{ }^\circ\text{C}, \quad P = 12,5 \text{ атм},$$

$$F_2 = 900 \frac{\text{м}^3}{\text{час}}, \quad F_1 = 4100 \frac{\text{м}^3}{\text{час}}, \quad \frac{F_1}{F_2} = 4,556$$

Перед тем, как найти экстремум функции (23), удовлетворив условиям (2) ÷ (3), нами на основе математического анализа было установлено, что функция (23) является выпуклой. Тогда функция Лагранжа:

$$L\left(T, P, \frac{F_1}{F_2}, \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_6\right) = 54,465 - 1,060 T + 3,550 P + 40,751 \frac{F_1}{F_2} + 0,006 T^2 - 0,022 TP - 0,148 T \frac{F_1}{F_2} + 0,255 P^2 - 1,562 P \frac{F_1}{F_2} + 0,158 \left( \frac{F_1}{F_2} \right)^2 + \lambda_1 \left( 1,036 - \left( 0,950 + 0,0002 T - 0,0007 P + 0,0044 \frac{F_1}{F_2} \right) \right) + \lambda_2 \left( 0,950 + 0,0002 T - 0,0007 P + 0,0044 \frac{F_1}{F_2} - 0,981 \right) + \lambda_3 (180 - T) + \lambda_4 (T - 160) + \lambda_5 (15 - P) + \lambda_6 (P - 11).$$

И учитывая (15) ÷ (22), поставленная задача сводится к нахождению максимума функции  $F$  при удовлетворении нижеследующих условий:

$$\begin{cases} F = -Mz_1 - Mz_2 - Mz_3 \\ 0,012 T - 0,022 P - 0,0002 \lambda_1 + 0,0002 \lambda_2 - \lambda_3 + \lambda_4 + \vartheta_1 = 1,734 \\ -0,022 T + 0,510 P + 0,0007 \lambda_1 - 0,0007 \lambda_2 - \lambda_5 + \lambda_6 + \vartheta_2 = 3,566 \\ 0,0002 T - 0,0007 P + w_1 = 0,066 \\ 0,0002 T - 0,0007 P - w_2 + z_1 = 0,011 \\ T + w_3 = 180 \\ T - w_4 + z_2 = 160 \\ P + w_5 = 15 \\ P - w_6 + z_3 = 11 \\ \vartheta_1, \vartheta_2, w_1, w_2, w_3, w_4, w_5, w_6, z_1, z_2, z_3 \geq 0 \end{cases}$$

Результаты решения задачи оптимального управления технологическим процессом получения пропиленгликоля представлены в нижеприведенной таблице 1, из которой видно, что при поддержании полученных нами оптимальных значений управляющих параметров  $P, T, F_1 / F_2$  количество получаемого пропиленгликоля увеличивается по сравнению с реальным на 2,282 м<sup>3</sup>/час (3,5 %).



Таблица 1

Параметры	$T$	$P$	$\frac{F_1}{F_2}$	$y$	$g$
Реальные	170	12,5	4,556	70,18	0,9969
Оптимальные	160	11	4,556	72,462	0,9940

**Литература:**

1. Кафаров В.В. Методы кибернетики в химии и химической технологии. – М. : Химия, 1985. – 359 с.
2. Аоки М. Введение в методы оптимизации. Основы и приложения нелинейного программирования / Под ред. Б.Т. Поляка. – М. : Наука, 1977. – 344 с.
3. Эфендиев И.Р., Мустафаев И.А., Магераммова Т.М. // Известия высших учебных заведений Азербайджана. – 2002. – № 2. – С. 54.
4. Акулич И.Л. Математическое программирование в примерах и задачах. – М. : Высшая школа, 1986. – 319 с.

**References:**

1. Kafarov V.V. Methods of Cybernetics in Chemistry and Chemical Technology. – M. : Chemistry, 1985. – 359 p.
2. Aoki M. Introduction to optimization methods. Fundamentals and applications of non-linear programming / Ed. B.T. Polyak. – M. : Nauka, 1977. – 344 p.
3. Efendiyev I.R., Mustafaev I.A., Magermamova T.M. // Proceedings of higher educational institutions of Azerbaijan. – 2002. – № 2. – P. 54.
4. Akulich I.L. Mathematical programming in examples and problems. – M. : High School, 1986. – 319 p.





УДК 620.178.74:669.295:62-419

## ПОЛУЧЕНИЕ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6 В УСЛОВИЯХ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ

### PRODUCTION OF HIGH-STRENGTH LAYERED COMPOSIT MATERIALS FROM TEMPERATURE SUPERPLASTICITY

**Мухаметрахимов Миннауль Хидиятович**

кандидат технических наук, научный сотрудник,  
Институт проблем сверхпластичности металлов  
msia@mail.ru

**Mukhametrakhimov  
Minnaul Khidiyatovich**

Ph. D., Research Scientist,  
Institute for Metals Superplasticity Problem  
msia@mail.ru

**Аннотация.** Проведены эксперименты с использованием наноструктурных материалов в качестве упрочняющего элемента для изготовления трехслойных композитов с различными структурами (нанокристаллической – НК, микрокристаллической – МК и крупнозернистой – КЗ) из листового титанового сплава ВТ6 в условиях низкотемпературной сверхпластичности.

Установлено, что сохранение сочетания НК, МК и КЗ структур в слоях при пониженных температурах позволяет обеспечить в композитных материалах повышенные прочностные и пластические свойства и достигнуть высокого уровня конструкционной прочности. Анализ результатов механических испытаний слоистого композитного материала показал, что его механическое поведение существенно зависит от температуры сварки. С понижением температуры сварки давлением от 900 °С до 700 °С уровень прочности на сдвиг как основного материала, так и материала с ТФС, заметно, в среднем на 18 %, повышается.

**Ключевые слова:** низкотемпературная сверхпластичность, крупнозернистый, микрокристаллический и нанокристаллический титановый сплав, твердофазное соединение, слоистые композиты, прочность, пластичность, механические свойства, электронная микроскопия.

**Annotation.** Experiments have been carried out using nanostructured materials as a strengthening element to produce three-layer composites with different structures (nanocrystalline – NC, microcrystalline – MC and coarse-grained – GC) of the titanium alloy VT6 in the low temperature superplasticity conditions.

It is established that if the combination of the NC, MC, GC structures is retained in the lowered temperatures it allows for the composite materials to have higher strength and plasticity properties and to achieve a higher level of structural strength. The analysis of the results of the three-layer composite material mechanical tests has shown that mechanical behavior considerably depends on the welding temperature. As the pressure welding temperature is decreased from 900 °C to 700 °C the shear strength of both the base material and the SSB material is noticeably increased, on the average by 18 %.

**Keywords:** low temperature superplasticity, coarse-grained, microcrystalline and nanocrystalline titanium alloy, solidphase joining, multilayer composites, strength, plasticity, mechanical properties, electron microscopy.

## Введение

Развитие современного машиностроения невозможно без использования передовых конструкционных материалов, имеющих более высокие эксплуатационные свойства по сравнению с существующими материалами. В этой связи большой интерес представляют титановые сплавы.

Повышенные прочностные свойства имеют титановые сплавы с нанокристаллической (НК) структурой по сравнению с микрокристаллической (МК) и крупнозернистой (КЗ) структурами [1].

Однако изготовление крупногабаритных полуфабрикатов с НК структурой представляет отдельную научную и технологическую проблему, кроме того, по достижении в сплаве такой структуры происходит повышение уровня прочности и снижение пластичности.

Одним из способов преодоления этих проблем является создание композитов, имеющих хорошую технологичную прочность и пластичность титановых сплавов.

В настоящее время разработчики авиатехники перестраивают всю материаловедческую концепцию строительства самолетов, активно привлекая и используя композиционные материалы на основе исключительно прочных титановых сплавов.

Сварка давлением конструкционных материалов по сравнению с обычной сваркой плавлением является прогрессивной технологией их соединения при создании различных тонкостенных и полых конструкций [2], поскольку она обеспечивает более высокое качество сварного соединения. При этом качество соединения существенно зависит от режимов сварки – температуры и давления.

Исследования, выполненные в последние годы в ИПСМ РАН, показали, что сварка давлением в условиях сверхпластичности существенно уменьшает время, необходимое для образования качественного твердофазного соединения, в сравнении с классической диффузионной сваркой [2]



Создавая различное по структуре сочетание слоев, можно управлять характером разрушения материала и тем самым повышать конструкционную прочность по сравнению с монолитным материалом [3, 4].

В работе [5] показана возможность использования подобных композитов и приведены результаты испытаний на усталость модели слоистой лопатки. Анализируя характер и механизм разрушения слоистой лопатки, можно отметить, что разрушение начинается под действием главных напряжений, развиваясь по нормали к ним. В частности, было отмечено, что при достижении менее прочного, но более пластичного слоя, в таком слоистом композите наблюдается резкий рост пластических деформаций, что оказывает тормозящее действие на развитие трещины, которая при этом меняет траекторию распространения. Это повторяется при последующем прохождении более прочных или пластичных слоев.

Применение такой конструкции («слоистой, как бронезилет») в перспективных двигателях большой двухконтурности позволяет создавать легкие и прочные колеса вентиляторов, в которых, например, ударная трещина, даже и возникнув в одном из слоев, не получит развития во всей лопатке, поскольку каждый из слоев реагирует на внешние воздействия совершенно самостоятельно. Однако проблема сдвиговой прочности титановых композитов остается открытой.

В представленной работе на основе экспериментальных результатов предложен новый методологический подход к выбору технологических параметров применения наноструктурных материалов в качестве упрочняющего элемента для изготовления трехслойных композитов с различными структурами (НК, МК и КЗ) из листового титанового сплава ВТ6 в условиях низкотемпературной сверхпластичности и оценка сдвиговой прочности композита в зоне твердофазного соединения (ТФС).

**Материал и методика исследования**

Материалом для исследования был выбран промышленный двухфазный титановый сплав ВТ6 стандартного химического состава по ГОСТ 19807-91. Исходные листовые заготовки сплава имели МК структуру со средним размером зерен 3–5 мкм. Титановый сплав с крупнозернистой КЗ структурой получен отжигом на воздухе при температуре 1000 °С в течение 60 минут и средний размер β-превращенных зерен составил более 300 мкм. Упрочняющий элемент получен изотермической прокаткой объемной заготовки, предварительно подвергнутой всесторонней ковке [6]. Упрочняющий элемент содержит структурные элементы с геометрическими размерами не более 0,2 мкм, и количество большеугловых разориентировок было не менее 50 %, что позволяло аттестовать материал как наноструктурированные.

Механические свойства основного материала с различными структурами приведены в таблице 1.

**Таблица 1** – Результаты механических испытаний основного материала из титанового сплава ВТ6 на сдвиговую прочность при комнатной температуре

№	Материал ВТ6	τ, МПа	Примечание
1	НК	664	В исходных состояниях
2	МК	542	
3	КЗ	485	

Соединение листов с различными структурными состояниями, собранных в пакет, выполняли в штамповом блоке (рис. 1), включающем силовые плиты и крепежные элементы.



**Рисунок 1** – Общий вид инструментальной оснастки для сварки давлением листовых заготовок титанового сплава ВТ6 посредством давления газа через гибкую мембрану

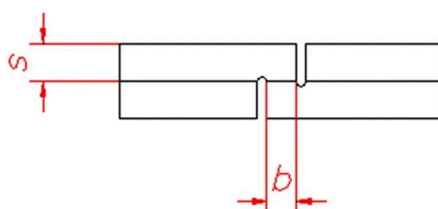


Полученную таким образом сборку стягивали силовыми элементами штампа, а затем устанавливали в вакуумную печь СНВЭ-1,3.1/16-ИЗ-УХЛЧ.1. Диффузионную сварку (сварку давлением) осуществляли при различных температурах, начиная от 700 до 900 °С в течение 120 мин. с приложением давления (давление 5 МПа и 4 МПа соответственно) из штуцера через гибкую мембрану на свариваемые образцы. Глубину вакуума в процессе эксперимента поддерживали не хуже  $2,0 \times 10^{-3}$  Па. Качество ТФС оценивали по механическим испытаниям на сдвиг по методике, подробно представленной в [7], а также металлографически с помощью сканирующего электронного микроскопа «TESCAN MIRA3 LMU» по относительной объемной доле (протяженности) пор в поперечном сечении зоны соединения. Относительную протяженность пор ( $L_p$ ) в зоне твердофазного соединения оценивали по формуле:

$$L_p = L_{pi} / L_o ,$$

где  $L_{pi}$  – суммарная протяженность пор в плоскости шлифа,  $L_o$  – длина исследуемого участка вдоль линии соединения в плоскости шлифа.

Для испытаний на сдвиг из двухслойных пакетов вырезали специальные образцы, эскиз которых приведен на рисунке 2. Согласно методике [7] при толщине листовых заготовок  $s = 0,8$  мм ширину нахлеста в образцах ( $b$ ) выбирали равной 0,5 мм. Испытания проводили при комнатной температуре на универсальном динамометре фирмы «Instron» модели 5982 со скоростью деформирования 1 мм/мин, при этом поверхность соединения была параллельна оси растяжения.

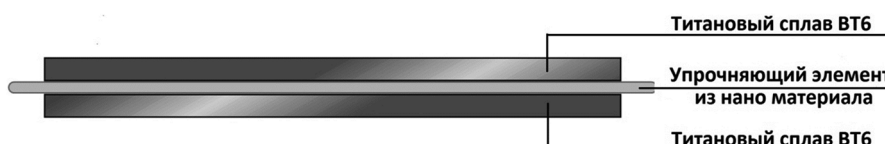


**Рисунок 2** – Поперечное сечение образца для испытаний на сдвиговую прочность

### Результаты и их обсуждение

Для исследований был изготовлен слоистый композитный материал двух типов: 1 – состоял из листовых заготовок ВТ6 с МК и НК структурой и 2 – состоял из листовых заготовок ВТ6 с КЗ и НК структурой.

На рисунке 3. показана схема получения слоистого композитного материала с различными структурами с применением упрочняющего элемента с НК структурой.



**Рисунок 3** – Схема получения слоистого композитного материала с различными структурами с применением упрочняющего элемента с НК структурой

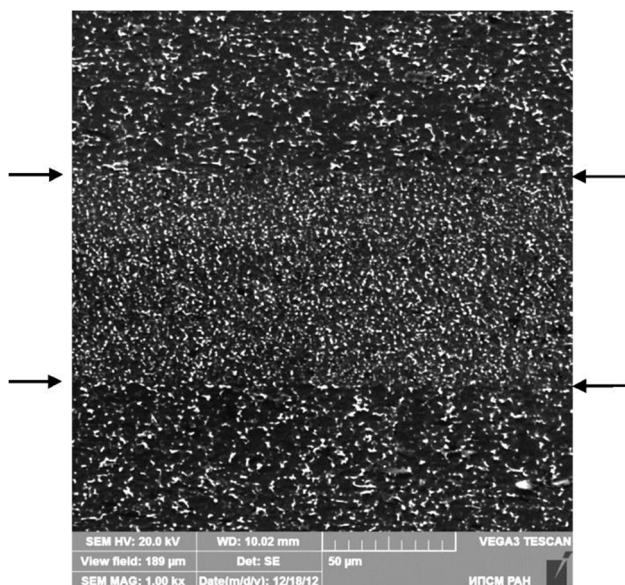
В результате твердофазного соединения получается слоистый композит первого типа, в котором содержатся две зоны раздела металлов – между титановым сплавом ВТ6 с МК и НК структурами (зона МК+НК), а также между НК и МК структурами (зона НК+МК) (рис. 4).

Второй тип слоистого композита также содержит две зоны раздела металлов – между титановым сплавом ВТ6 с КЗ и НК структурами (зона КЗ+НК), а также между НК и КЗ структурами (зона НК+КЗ) (рис. 5).

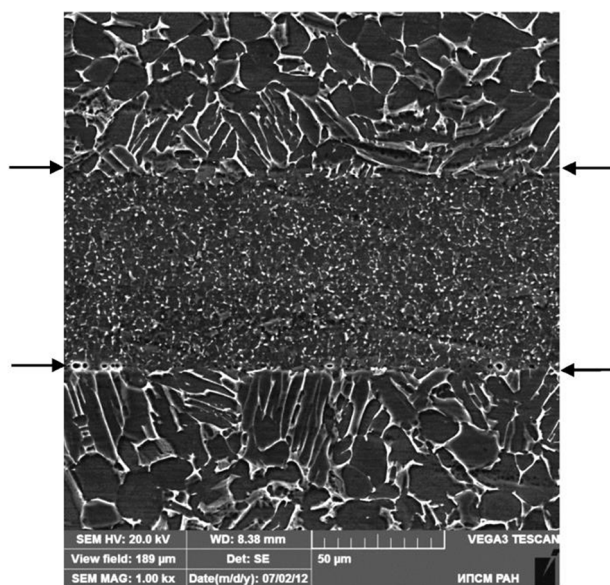
После сварки давлением в композитном материале наблюдается разнорзернистость, обусловленная большим различием размера зерен в соединяемых листовых заготовках и прослойке.

Для сравнительного анализа был изготовлен слоистый композит МК+НК+МК при температуре 900 °С (рис. 6).

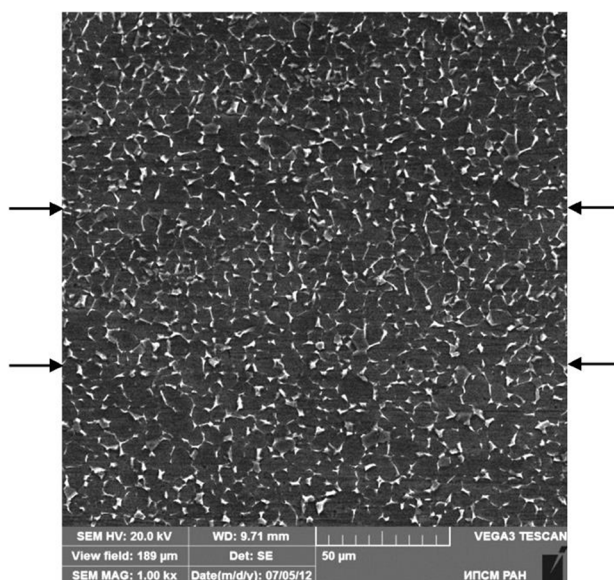
С повышением температуры сварки до температуры 900 °С в течение 2 часов микроструктура прослойки укрупнилась до микрокристаллических размеров (рис. 6). Металлографические исследования показали, что средний размер зерен вырос в соединенных образцах в среднем от 1,2 мкм до 5,0 мкм при повышении температуры процесса ТФС от 700 до 900 °С соответственно. Относительная протяженность пор в зоне ТФС после сварки при температуре 700 °С составила 0,18 и с увеличением температуры сварки до 900 °С уменьшилась до 0,04 [8].



**Рисунок 4** – Микроструктура зоны ТФС после сварки давлением при температуре 700 °С титанового сплава ВТ6 с МК структурой с применением упрочняющего элемента с НК структурой



**Рисунок 5** – Микроструктура зоны ТФС после сварки давлением при температуре 750 °С титанового сплава ВТ6 с КЗ структурой с применением упрочняющего элемента с НК структурой



**Рисунок 6** – Микроструктура зоны ТФС после сварки давлением при температуре 900 °С титанового сплава ВТ6 с МК структурой с применением упрочняющего элемента с НК структурой

Анализ результатов механических испытаний слоистого композитного материала показал, что его механическое поведение существенно зависит от температуры сварки. С понижением температуры сварки давлением от 900 °С до 700 °С уровень прочности на сдвиг как основного материала, так и материала с ТФС, заметно, в среднем на 18 %, повышается. По сравнению с основным НК материалом прочность композита составляет 95 % при 700 °С, 88 % при 750 °С и 78 % при температуре 900 °С. Сохранение сочетания НК, МК и КЗ структуры в слоях при пониженных температурах позволяет обеспечить в композитных материалах повышенные прочностные и пластические свойства и достигнуть высокого уровня конструкционной прочности [9].

Следует отметить, что прочность полученного слоистого композита обуславливается свойствами НК структуры. По сравнению с основным МК материалом прочность композита выше на 16 % при 700 °С, и на 7 % при 750 °С, и на 4 % при температуре 900 °С, т.е. при 700 и 750 °С НК прослойка повышает прочность композита по сравнению с основным материалом. По сравнению с основным КЗ материалом прочность композита выше на 25 % при температуре 700 °С, на 17 % при температуре 750 °С, т.е. НК прослойка повышает прочность композита по сравнению с основным материалом [10].



Результаты механических испытаний ТФС композитного материала из титанового сплава ВТ6 на сдвиговую прочность при комнатной температуре после сварки давлением при температурах (700–900 °С) приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты механических испытаний ТФС композитного материала из титанового сплава ВТ6 на сдвиговую прочность при комнатной температуре

№	Т <sub>сварки</sub> , °С	Р, МПа	τ, МПа	Примечание
1	900	4	518	Сварка между МК+НК+МК
2	750	5	582	Сварка между МК+НК+МК
3			566	Сварка между КЗ+НК+КЗ
4	700	5	628	Сварка между МК+НК+МК
5			604	Сварка между КЗ+НК+КЗ

Получение слоистого композита с повышенными прочностными свойствами может быть достигнуто путем уменьшения температуры сварки давлением для сохранения НК структуры, но при этом необходимо увеличить давление.

Вывод: Таким образом, показана возможность применения НК материалов в качестве упрочняющего элемента для изготовления трехслойных композитов с различными структурами из листового титанового сплава ВТ6. Сохранение сочетания НК, МК и КЗ структуры в слоях при пониженных температурах позволяет обеспечить в композитных материалах повышенные прочностные и пластические свойства и достигнуть высокого уровня конструкционной прочности.

*The present work was accomplished according to the state assignment of IMSP RAS.*

#### Литература:

1. Соединение в твердом состоянии нанокристаллических титановых сплавов / Р.Я. Лутфуллин [и др.] // Перспективные материалы. – 2003. – № 4. – С. 21–25.
2. Средний размер зерен в титановом сплаве ВТ6 и выбор рациональной схемы интегрального процесса сверхпластической формовки сварки давлением / А.А. Круглов [и др.] // Перспективные материалы. – 2005. – № 6. – С. 79–85.
3. Райт Е.С., Левит А.П. В кн.: Композиционные материалы с металлической матрицей. Т. 4 / Пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1978. – С. 49–110.
4. Соколовская Е.М., Гузей Л.С. Физикохимия композитных материалов. – М.: МГУ, 1978. – 255 с.
5. Петухов А.П. Свободная от недостатков предшественников // Двигатель. – 2005. – № 5 (41). – С. 14–15.
6. Kaibyshev O.A., Salishchev G.A., Galejev R.M., Lutfullin R.Ya. and Valiakhmetov O.R. Patent PCT/US97/18642, WO 9817836, 30.04.1998.
7. Казачков И.В. Бердин В.К. Методика оценки качества диффузионного соединения тонколистовых металлических материалов // Заводская лаборатория. – 1989. – Т. 55. – № 7. – С. 82–84.
8. Круглов А.А., Мухаметрахимов М.Х., Саркеева А.А. Влияние пор на механические свойства слоистого материала из титанового сплава ВТ6 // Письма о материалах. – 2013. – Т. 3. – Вып. 1. – С. 12–15.
9. Круглов А.А., Мухаметрахимов М.Х. Сварка давлением титанового сплава ВТ6 в условиях низкотемпературной сверхпластичности // Письма о материалах. – 2012. – Т. 2. – С. 161–165.
10. Низкотемпературная сверхпластичность и изготовление полых конструкций из титанового сплава ВТ6 / Р.Я. Лутфуллин [и др.] // Письма о материалах. – 2015. – Вып. 5. – Т. 2. – С. 185–188.

#### References:

1. Connection in a firm condition of nanocrystal titanic alloys / R.Ya. Lutfullin [etc.] // Perspective materials. – 2003. – № 4. – P. 21–25.
2. The average size of grains in titanic BT6 alloy and the choice of the rational scheme of integrated process of superplastic molding of welding by pressure / A.A. Kruglov [etc.] // Perspective materials. – 2005. – № 6. – P. 79–85.
3. Wright E.S., Levitte A.P. In prince: Composite materials with a metal matrix. T. 4 / Translation from English. – М.: Mechanical engineering, 1978. – P. 49–110.
4. Sokolovskaya E.M., Guzey L.S. Fizikokhimiya of composite materials. – М.: MSU, 1978. – 255 p.
5. Petukhov A.P. Free from shortcomings of predecessors // Engine. – 2005. – № 5 (41). – P. 14–15.
6. Kaibyshev O.A., Salishchev G.A., Galejev R.M., Lutfullin R.Ya. and Valiakhmetov O.R. Patent PCT/US97/18642, WO 9817836, 30.04.1998.
7. Kazachkov I.V., Berdin V.K. Metodik of assessment of quality of diffusive compound of thin-sheet metal materials // Factory laboratory. – 1989. – V. 55. – № 7. – P. 82–84.
8. Kruglov A.A., Mukhametrakhimov M.H., Sarkeev A.A. Influence of a time on mechanical properties of layered material from titanic BT6 alloy // Letter about materials. – 2013. – V. 3. – Issue 1. – P. 12–15.
9. Kruglov A.A., Mukhametrakhimov M.H. Welding by pressure of titanic BT6 alloy in the conditions of low-temperature superplasticity // Letter about materials. – 2012. – V. 2. – P. 161–165.
10. Low-temperature superplasticity and production of hollow designs from titanic BT6 alloy / R.Ya. Lutfullin [etc.] // Letters on materials. – 2015. – Issue 5. – V. 2. – P. 185–188.



УДК 669.621.3

## ПОЛУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ ИЗОТРОПНОЙ СТАЛИ ДЛЯ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ МАШИН

### OBTAINING OF ELECTROTECHNICAL ISOTROPIC STEEL FOR RAPID MACHINES

**Окорокова Ольга Вячеславовна**

аспирантка,  
Липецкий государственный технический университет,  
Металлургический институт  
ol4ek88@mail.ru

**Цыганов Игорь Анатольевич**

кандидат технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой физического металловедения,  
Липецкий государственный технический университет,  
Металлургический институт

**Okorokova Olga Vyacheslavovna**

Graduate Student,  
Lipetsk state technical university,  
Metallurgical institute  
ol4ek88@mail.ru

**Tsyganov Igor Anatolyevich**

Candidate of Technical Sciences,  
Associate Professor,  
Head of the department of  
physical metallurgical science,  
Lipetsk state technical university,  
Metallurgical institute

**Аннотация.** В данной статье предложена обработка изотропной электротехнической стали. Проанализированы изменения свойств, представлены результаты по основным параметрам, влияющим на свойства электротехнических полос для высокочастотных машин.

**Annotation.** In this paper we propose processing of isotropic electrical steel. The changes in properties are analyzed, the results are presented for the main parameters that affect the properties of electrical bands for high-frequency machines.

**Ключевые слова:** удельные потери, магнитная индукция, текстура, размер зерна.

**Keywords:** specific losses, magnetic induction, texture, grain size.

Основным требованием, предъявляемыми к магнитным свойствам готовой высоколегированной электротехнической изотропной стали (ЭИС) с содержанием Si до 3 %, является обеспечение минимальных удельных магнитных потерь при высокой магнитной индукции и низкой анизотропии этих характеристик [1]. Высокочастотные машины работают при частоте 400–10000 Гц. Основные характеристики магнитных свойств – удельные магнитные потери, магнитная индукция. Наиболее важное значение имеют удельные потери, так как при работе происходит нагрев магнитопровода, перемагничивающегося с высокой частотой. Поэтому необходимо ограничивать амплитуду колебаний магнитной индукции. При увеличении частоты поля магнитная проницаемость уменьшается, а удельные потери увеличиваются вследствие увеличения потерь на вихревые токи.

Требования к ЭИС для высокочастотных машин:

1. Высокое электросопротивление материала (высокое содержанием Si, Al).
2. Минимально возможную толщину полосы для определенного диапазона частот.
3. Оптимальный размер зерна после заключительного отжига.
4. Достаточно высокую долю кубической компоненты в текстуре холоднокатаной стали.
5. Высокая доля кубической компоненты.

Для получения стали, удовлетворяющей вышеперечисленным требованиям, необходимо провести однократную холодную прокатку со степенью деформации более 85 % без промежуточного отжига после стандартной обработки. Такая деформационная обработка позволяет получить оптимальный размер зерна после обезуглероживающе-рекристаллизационного отжига, подавляет рост доли ребровой и октаэдрических ориентировок, обеспечивает получение кубической ориентировки до 40 %. Такие изменения прослеживаются для стали химического состава, соответствующего составу стали 4-ой группы легирования (табл. 1).

**Таблица 1** – Химический состав ЭИС 4 группы легирования

Химический состав по элементам, %										
C	Mn	Si	Al	P	S	Cr	Ni	Cu	Ti	N
0,005	0,26	3,01	0,47	0,007	0,009	0,01	0,01	0,04	0,003	0,004

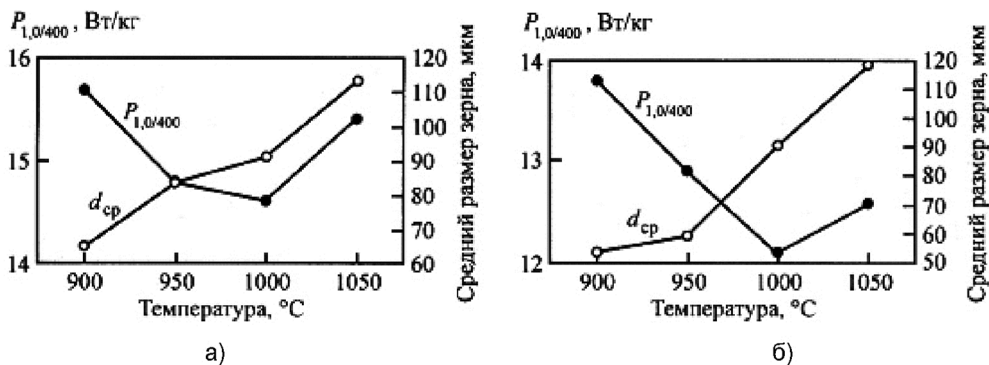
После рекристаллизационного отжига при одинаковых параметрах наблюдается некоторое различие в свойствах полос толщиной 0,27 мм и 0,18 мм. С повышением степени деформации отмечается тенденция к увеличению кубической компоненты (табл. 2) [2].



**Таблица 2** – Текстурные составляющие холоднокатаной ЭИС с разными степенями обжатия

Толщина, мм	Степень обжатия, %	Место съемки, мм	Составляющие текстуры, %					
			{200}	{112}	{220}	{310}	{222}	{321}
0,27	89,2	0,27 (поверхность)	36,3	19,5	0,8	1,2	38,8	3,4
0,18	92,8	0,18 (поверхность)	39,0	17,7	0,4	0,6	39,9	2,4

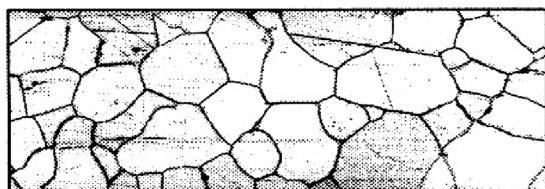
Размер зерна в готовой стали при данных толщинах составляет примерно 90 мкм. Изменение удельных потерь показано на рисунке 1.



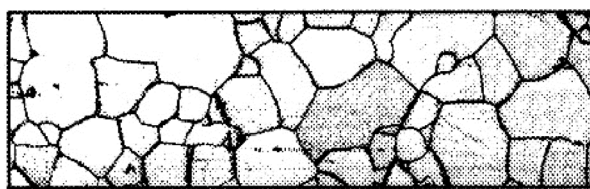
**Рисунок 1** – Зависимость удельных магнитных потерь ( $P_{1,0/400}$ ) и среднего размера зерна для высокочастотных машин от температуры отжига [3]: а – 0,27 мм; б – 0,18 мм

Отметим, что для толщины 0,18 мм наблюдается резкое уменьшение магнитных потерь при стремительном росте зерна. Проанализировав рисунок 1, стоит сказать, что данная обработка позволяет улучшить свойства изотропной стали 4 группы легирования по сравнению с приведенными в ГОСТе 21427-2-83. Для толщины 0,27 мм удельные потери уменьшаются на 5,4 единицы, а значение магнитной индукции увеличивается на 0,6 единиц и составляет 1,53 Тл.

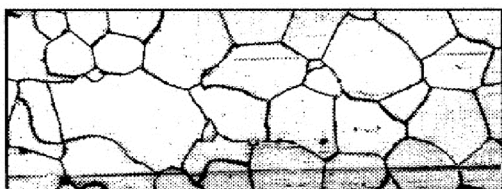
Металлографический анализ ЭИС в толщине 0,27 и 0,18 мм позволил установить величину оптимального размера зерна готовой стали, обеспечивающего получение минимальных удельных магнитных потерь  $P_{1,0/400}$ . Размер зерна готовой ЭИС в толщине 0,27 и 0,18 мм для высокочастотных машин должен составлять примерно 90 мкм.



а) 950 °C ( $d = 85$  мкм,  $P_{1,0/400} = 14,9$  Вт/кг)



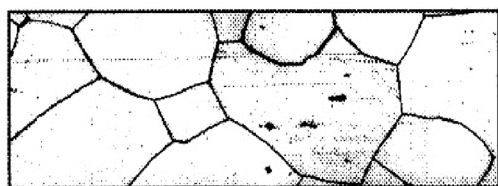
г) 950 °C ( $d = 59$  мкм,  $P_{1,0/400} = 12,9$  Вт/кг)



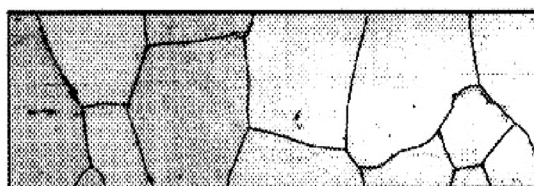
б) 1000 °C ( $d = 92$  мкм,  $P_{1,0/400} = 14,6$  Вт/кг)



д) 1000 °C ( $d = 90$  мкм,  $P_{1,0/400} = 12,1$  Вт/кг)



в) 1050 °C ( $d = 113$  мкм,  $P_{1,0/400} = 15,4$  Вт/кг)



е) 1050 °C ( $d = 120$  мкм,  $P_{1,0/400} = 12,6$  Вт/кг)

**Рисунок 2** – Микроструктура ЭИС (3,01 % Si) толщиной 0,27 и 0,18 мм после отжига в лабораторной печи



Таким образом, параметры и способы обработки позволяют получить ЭИС с улучшенными свойствами.

#### Литература:

1. Поляков М.Ю., Бахтин С.В. Опыт производства высококачественных электротехнических сталей на Новолипецком металлургическом комбинате и основные направления развития производства с учетом требований мирового рынка // Каталог статей «Черная металлургия: Состояние и перспективы. Институту «Черметинформация» – 70 лет». – М. : ОАО «Черметинформация», 2013. – С. 218–229.
2. Милютин В.А. Влияние сильного магнитного поля на эволюцию структуры и кристаллографической текстуры в процессе отжига деформированных и аморфных ферромагнитных металлических сплавов : дис. ... канд. тех. наук (01.04.07) / ИФМ УрО РАН. – Екатеринбург, 2017. – 139 с.
3. Освоение технологии производства новых электротехнических изотропных сталей в ОАО НЛМК / А.Е. Чеглов [и др.] // Сталь. – 2015. – № 10. – С. 62–67.

#### References:

1. Polyakov M.Yu., Bakhtin S.V. Experience of production high-quality electrotechnical staly on Novolipetsk Steel and the main directions of development of production taking into account requirements of the world market//the Catalogue of articles «Ferrous metallurgy: State and prospects. To Chermetininformation institute – 70 years». – M. : JSC Chermetininformation, 2013. – P. 218–229.
2. Milyutin V.A. Influence of strong magnetic field on evolution of structure and crystallographic texture in the course of annealing of the deformed and amorphous ferromagnetic metal alloys : yew. ... Cand. Tech. Sci. (01.04.07) / IFM UrO RAHN. – Yekaterinburg, 2017. – 139 p.
3. Development of the production technology new electrotechnical isotropic staly in JSC NLMK / A.E. Cheglov [etc.] // Steel. – 2015. – № 10. – P. 62–67.





УДК 664

## МЕТОДЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПЫЛЕУЛАВЛИВАЮЩЕГО АППАРАТА МОКРОГО ТИПА В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМАХ ОЧИСТКИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЫБРОСОВ ОТ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ

### METHODS OF APPLICATION OF A WET DUST COLLECTOR IN TECHNOLOGICAL SCHEMES FOR CLEANING INDUSTRIAL EMISSIONS FROM FINE PARTICLES

#### Рахмонов Тойир Зойирович

доктор технических наук, доцент,  
главный специалист по механике,  
отдел проектирования технологических объектов  
и систем сбора,  
ООО «Лукойл-Узбекистан Оперейтинг Компани»  
trahmonov@lukoil-international.com

#### Rahmonov Toyir Zoyirovich

Doctor of Technical Sciences,  
Associate Professor,  
Chief mechanical specialist,  
Process Facilities and Gathering  
System Design Section,  
LUKOIL Uzbekistan Operating Company LLC  
trahmonov@lukoil-international.com

**Аннотация.** Приводятся результаты исследования эффективности очистки мелкодисперсных частиц, вновь разработанного пылеулавливающего аппарата с подвижной насадкой отличающейся конструкцией ввода газа. Установлено, что аппарат может служить для эффективной очистки субмикронных частиц промышленных выбросов в сочетании методами конденсационного укрупнения частиц и впрыска воды в газоток высокотемпературного запыленного газа. Предложены технологические схемы с новым пылеулавливающим аппаратом и устройствами повышения эффективности очистки аэрозолей в зависимости от дисперсного состава частиц и температуры запыленного газа.

**Annotation.** The results of research of cleaning efficiency of fine particles, the newly developed dust-collecting apparatus with a movable nozzle design different input gas. It is established that the device can be used for effective cleaning of submicron particles of industrial emissions in the combined methods of condensing and coarsening of particles injected into the high-temperature flue gas dust-laden water.

Technological schemes are proposed with a new dust collection unit and the devices improve the efficiency of aerosol cleaning, depending on the composition of the particles of the particulate and dusty gas temperature.

**Ключевые слова:** запыленный газ, субмикронные частицы, пылеулавливающий аппарат, эффективность очистки, метод конденсационной укрупнения частиц, технологическая схема, дисперсность частиц, высокотемпературный газ.

**Keywords:** dusty gas, submicron particles, dust collecting device, cleaning efficiency, condensation particle coarsening method, technology system, particle size distribution, the high temperature gas.

З ащита воздушного бассейна от загрязнений промышленными выбросами является в настоящее время одной из важнейших проблем, затрагивающей в той или иной степени все страны мира. Поэтому вопросам газоочистки сейчас уделяется исключительно большое внимание, и глубокие практические и теоретические исследования проводятся во всех индустриально развитых странах [1, с. 5].

Одними из наиболее распространенных техногенных загрязнителей атмосферного воздуха являются различного рода аэрозоли, содержащиеся в отходящих вентиляционных и промышленных газах [2]. В связи с этим очевидна необходимость пылеулавливания во всех технологических процессах, при которых происходит пылевыделение.

От надежности и эффективности работы пылеулавливающего оборудования зависят, в основном, потери самых ценных, в большинстве случаев тонкодисперсных фракций продуктов, а также загрязненность и запыленность воздуха в цехах, на предприятиях и на большой территории окружающего их пространства.

Для правильного выбора пылеулавливающего аппарата необходимы, прежде всего, сведения о дисперсном составе пыли.

Дисперсный состав пылей определяют экспериментально. Для этого чаще всего используют приборы, называемые импакторами. Результаты определения дисперсного состава пыли обычно представляют в виде зависимости массовых фракций частиц от их размера.

Представленная в предыдущих главах совокупность теоретических и экспериментальных данных однозначно показывает, что разработаны нами прямоточный пылеулавливающий аппарат с U-образным патрубком ввода газа является наиболее эффективным устройством для улавливания мелкодисперсных аэрозолей, способный функционировать с влажными слипающимися кристаллизующимися аэрозолями. Процесс улавливания в аппарате проходит с использованием инерционно-турбулентного механизма и имеет место турбулентная коагулирующая частица, повышающая общую эффективность улавливания аэрозолей. Однако как показывает эксплуатационный опыт, зачастую этого эффекта оказывается недоста-



точно для получения необходимой степени улавливания аэрозолей с размером менее 1 мкм. В этом случае применяют методы дополнительного воздействия, к которым относятся:

1. Конденсационное укрупнение частиц путем ввода водяного пара в поток газа.
2. Введение в орошающую жидкость поверхностно-активных веществ.
3. Использование тепла газов для получения высокотемпературного энергоносителя.

Метод конденсационного укрупнения частиц является известным методом [3], позволяющим повысить эффективность аппаратов мокрой очистки. Однако, вследствие относительно неэффективной утилизации водяного пара, данная технология неэкономична, приводит к увеличению эксплуатационных расходов, за исключением тех случаев, когда есть возможность использовать дешевый отработанный пар низкого давления.

Второй метод, исследованный в работе [4] не приводит к заметному росту эффективности улавливания субмикронных частиц. Добавление поверхностно-активных веществ в небольшом количестве можно использовать для глубокого улавливания субмикронных частиц, когда требуется относительно небольшое повышение эффективности.

Утилизация тепла газов для нагрева орошающей жидкости или получение пара с последующим использованием для повышения эффективности очистки газов, на наш взгляд является перспективным методом. При этом энергозатраты, связанные с очисткой по методу использования первичного водяного пара, очевидно, будут низкими.

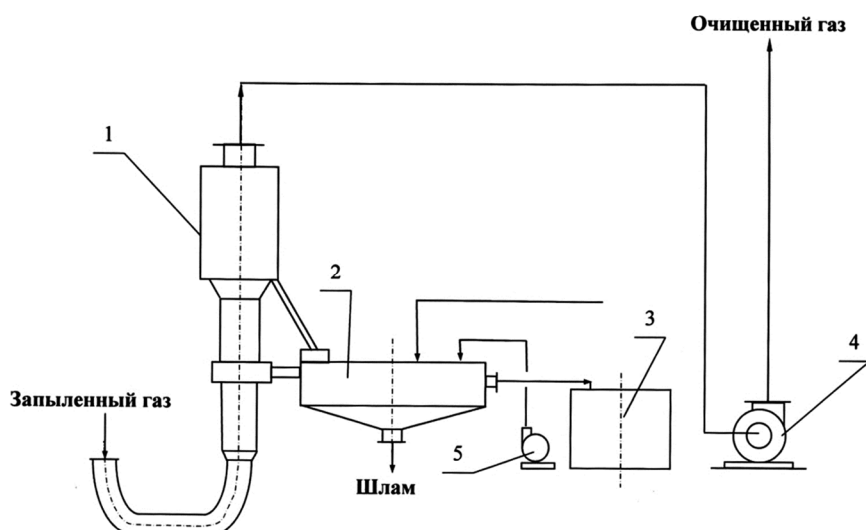
С целью исследования данного метода применительно к прямоточному аппарату с U-образным патрубком ввода газа использовали следующие способы:

1. Применение нагретой воды для орошения.
2. Непосредственно впрыском воды в газоход при помощи форсунки тонкого распыла, для увлажнения и укрупнения мелкодисперсных аэрозолей.

Нами разработаны 3 варианта технологической схемы пылеулавливания с применением аппарата с подвижной насадкой [5] в зависимости от температуры запыленного газа и дисперсного состава частиц, а также с учетом влияние на эффективность вышеуказанных методов дополнительных воздействий.

*Вариант 1.* Описание технологической схемы очистки запыленных газов при дисперсном составе частиц пыли более 1,6 мкм и температуре менее 100 °С.

Запыленный газ по газоходу под действием разряжения (рис. 1), создаваемого вентилятором (4) поступает в пылеулавливающий аппарат с U-образным вводом газа (1).



**Рисунок 1** – Технологическая схема очистки газа при  $d > 1 \text{ мкм}$ ,  $t < 100 \text{ °С}$ :

- 1 – пылеулавливающий аппарат; 2 – шламосборник; 3 – емкость осветленной воды;  
4 – воздуходувка; 5 – центробежный насос

Аппарат с подвижной насадкой (1) в прямоточную самоорошающуюся комплектуется системой отделения шлама, выполняемой в двух вариантах:

- 1) с гравитационным осаждением в шламосборнике;
- 2) с отделением шлама в самоочищающемся фильтре.

На рисунке 1 показан шламосборник (2) из верхней части которого жидкость поступает в кольцевую камеру пылеулавливающего аппарата, инжeksiруется в рабочую зону и после отделения в сепарационной части аппарата, вновь сливается в шламосборник (2).

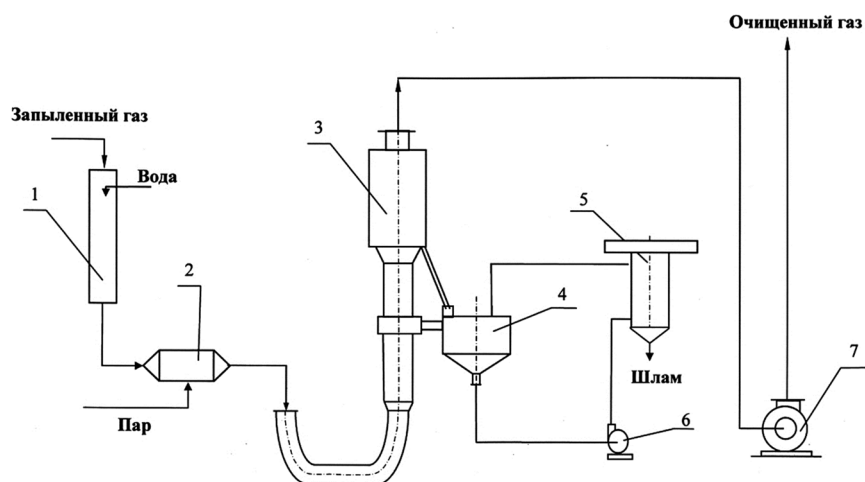


Выгрузка шлама осуществляется на неработающей установке. Для этого в промежуточную емкость (3) сливается жидкость из верхней части шламосборника. Шлам (в виде ила) выгружается из нижнего люка шламосборника. Затем жидкость из емкости (3) закачивается насосом (4) в шламосборник, который заполняется водой до требуемого уровня из подпиточной линии, и установка включается в работу.

**Вариант 2.** Описание технологической схемы очистки газов при дисперсном составе частиц менее 1 мкм и температуре газа менее 100 °С.

Запыленный газ от источника пылевыделения (рис. 2) по газоходу поступает в форсуночный увлажнитель газа (1). Далее газ поступает в парораспределитель (2), где в газовый поток вводится насыщенный пар. Затем газ поступает в пылеулавливающий аппарат с U-образным вводом газа (3), где происходит мокрая очистка от аэрозоля.

По систему шламоотделения циркуляция жидкости и поступление ее в аппарат осуществляется через промежуточную емкость (4). Шламосодержащая жидкость из емкости (4) периодически подается насосом (6) на самоочищающийся фильтр (5), где происходит отделение шлама. Осветленная жидкость возвращается в емкость (4).



**Рисунок 2** – Технологической схемы очистки газов при  $d \leq 1 \text{ мкм}$ ,  $t > 100 \text{ °С}$ :

1 – увлажнитель газа; 2 – парораспределитель; 3 – пылеулавливающий аппарат; 4 – шламосборник; 5 – самоочищающийся фильтр; 6 – центробежный насос; 7 – воздуходувка

**Вариант 3.** Описание технологической схемы очистки газов при дисперсном составе пыли частиц менее 1 мкм и температуре более 100 °С.

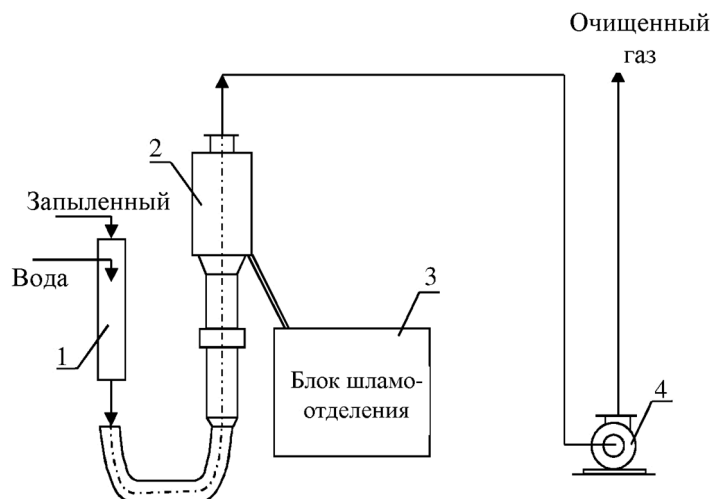
Установка (рис. 3) для очистки аспирационного воздуха, установленная после пылевых камер состоит из пылеулавливающего аппарата (2), блока шламоотделителя (3) и вентилятора, работающих на разрежение (4). Запыленный газ, содержащий субмикронные аэрозоли, проходит камеру адиабатического увлажнения и охлаждения (1), где за счет форсуночного впрыска воды температура газа снижается до значений ниже 70 °С. Частично охлажденный и увлажненный до насыщения газ поступает в аппарат с витающей насадкой с U-образным патрубком ввода газа, где происходит интенсивное перемешивание газа с жидкостью и очистка от аэрозолей. Отделения шлама от орошающей жидкости происходит в блоке шламоотделения.

Выбросы от источника пылеобразования, содержащие пыль, сажу, и масляный аэрозоль (рис. 3), проходят камеру адиабатического охлаждения (1) за счет форсуночного впрыска воды температура газа снижается до значений ниже 100 °С. Частично охлажденный и увлажненный газ поступает в аппарат с U-образным вводом газа (2), где происходит очистка от аэрозолей.

Отделение шлама от орошающей жидкости происходит в блоке шламоотделения (3), который может быть выполнен по 2-му варианту (см. рис. 1. и рис. 2). Задержанная в аппарате твердые частицы и слипающаяся (масляная) аэрозоль, скапливается и удаляется с поверхности жидкости в системе шламоотделения. Транспортировка газа через систему осуществляется вентилятором высокого давления (4).

Для определения эффективности очистки промышленных газовых выбросов в аппарате с подвижной насадкой и подбора технологической схемы в зависимости от конкретных параметров источника загрязнения, нами проведены исследования в промышленной установке на литейном производстве центрального ремонтно-механического завода Алмалыкского горно-металлургического комбината.

Исследование по определению эффективности очистки проводили при скоростях газа в рабочей зоне аппарата  $16 \div 20 \text{ м/с}$ , при плотности орошения  $7,4 - 14 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$ .



**Рисунок 3** – Технологическая схема очистки газа при  $d > 1 \text{ мкм}$ ,  $t > 100 \text{ }^\circ\text{C}$ :  
 1 – камера адиабатического увлажнения и охлаждения; 2 – пылеулавливающий аппарат;  
 3 – блок шламоотделения; 4 – воздуходувка

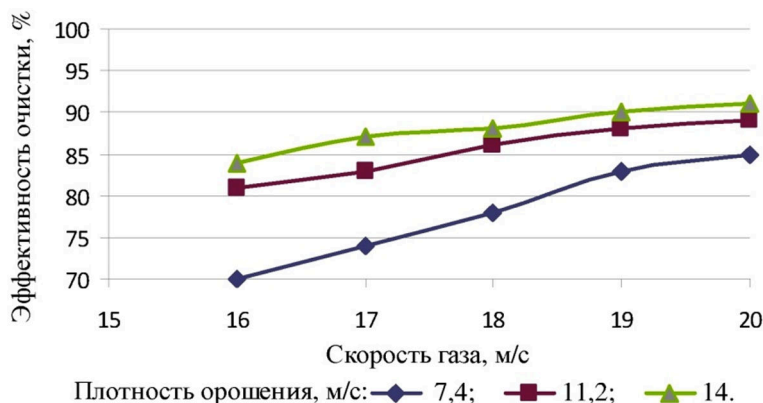
Перед испытанием определяли содержание и дисперсность частиц очищаемого газа по методике, приведенной в [4]. Установлено, что концентрация частиц колеблется от  $3 \text{ г/м}^3$  до  $4,2 \text{ г/м}^3$  в зависимости от стадии работы источника пылеобразования. Результаты определения дисперсного состава частиц показывают (табл. 1), что доля частиц менее  $1 \text{ мкм}$  находится в пределах 21–32 %. Среднее значение фракционного состава частиц очищаемого газа приводится в таблице 1.

**Таблица 1** – Фракционный состав частиц запыленного газа литейного производства центрального ремонтно-механического завода АГМК

Диаметр частиц, мкм	> 7	7–5	5–3,2	3,2–2,8	2,8–2,2	2,2–1,2	1,2–0,8	< 0,8
Содержание масс, %	3,9	7,5	9,3	13,8	9,6	18,8	17,9	19,2

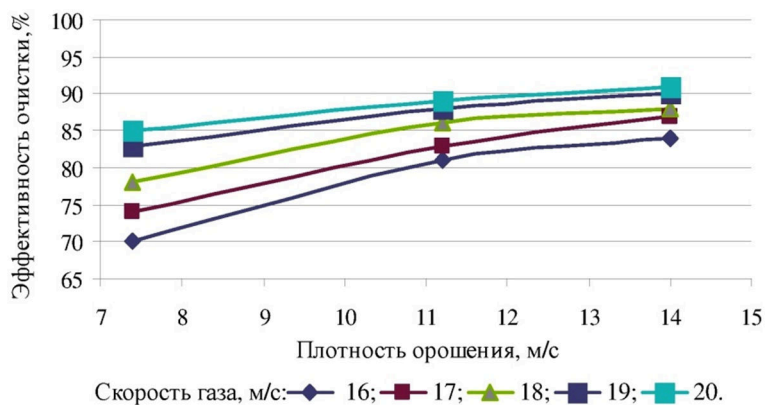
В эксперименте использовали кольцевые насадки размером  $40 \times 40 \text{ мм}$  с весом 35 гр.

Результаты опытов эффективности пылеулавливания от скорости газа без впрыска воды проиллюстрированы на рисунке 4. Как видно из графика, увеличение скорости газа приводит к росту эффективности пылеулавливания. Причем при скоростях более  $18 \text{ м/с}$  увеличение эффективности наблюдается более заметно. Например, при скорости  $16 \text{ м/с}$  и плотности орошения  $7,4 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$  эффективность достигла 70 % при скорости  $20 \text{ м/с}$ , плотности орошения эффективность составила 85 %.



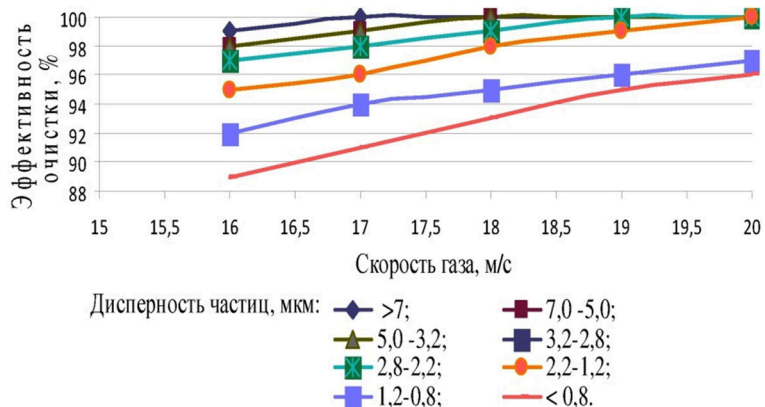
**Рисунок 4** – Зависимость эффективности очистки от скорости газа при различных значениях плотности орошения и  $H_{cm} = 200 \text{ мм}$  (без впрыска воды)

Зависимость эффективности пылеулавливания от плотности орошения (рис. 5) показывает, что увеличение плотности орошения приводит также к увеличению степени очистки. При этом наиболее высокое значение эффективности достигается при плотности орошения  $14 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$ .



**Рисунок 5** – Зависимость эффективности очистки от плотности орошения при различных значениях скорости газа и  $H_{cm} = 200$  мм (без впрыска воды)

Дальнейшие исследования проводили с впрыском воды в газопод пыльного газа при оптимальных рабочих параметрах процесса. При этом определяли фракционную эффективность очистки, установив импактор до и после аппарата. Полученные результаты в виде графической зависимости приводятся на рисунке 6. Как видно из графика, эффективность очистки возрастает с ростом скорости и достигает значения 96 % при улавливании частиц субмикронного размера (менее 0,8 мкм).



**Рисунок 6** – Зависимость эффективности пылеулавливания от скорости газа при различных значениях дисперсного состава частиц,  $H_{cm} = 200$  мм и  $L = 14 \cdot 10^{-3}$  м/с (с впрыском воды)

Таким образом, пылеулавливающий аппарат с подвижной насадкой и U-образным вводом газа, разработанный нами, в сочетании с впрыском воды в газопод пыльного газа может служить для эффективной очистки субмикронных частиц высокотемпературных промышленных выбросов.

Теоретические и практические результаты исследований, показывают, что при дисперсном составе более 1,0 мкм пылеулавливающий аппарат позволяет достигать высокую эффективность без применения дополнительного воздействия и можно применять технологическую схему, приведенную на рисунке 1.

Если в дисперсном составе частиц пыльного газа доля субмикронных частиц (частицы с фракционным размером менее 1 мкм) составляет более чем 20 % и температура пыльного газа менее 100 °С, экономически выгодно использовать метод конденсационного укрупнения в сочетании с предварительным увлажнением (насыщением) газа (рис. 2).

При содержании субмикронных частиц более 20 % и температуры более 100 °С использования метода впрыска воды в газопод пыльного газа позволяет достичь глубокой очистки газа от указанных частиц (рис. 3).

**Литература:**

1. Тимонин А.С. Инженерно-экологический справочник. Т. 1. – Калуга : Издательство Н.Ф. Бочкаревой, 2003. – С. 530.
2. Вальдберг А.Ю. Современные тенденции развития теории и практики пылеулавливания // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2007. – № 7. – С. 48–50.
3. Страус В. Промышленная очистка газов. – М. : Химия, 1981. – С. 616.



4. Рахмонов Т.З. Сепарация мелкодисперсных аэрозольных частиц и капель с использованием инерционно-турбулентных и центробежных эффектов осаждения : Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Т. : ТашГТУ, 2000. – С. 20.
5. Рахмонов Т.З., Салимов З.С., Мухаммедов Б.И., Рахмонов У.К., Юлдашев Н.Х. Установка для очистки запыленных газов // Государственная патентная ведомость Республики Узбекистан. Пат. № IAP 038039 от 12.12.2008 г.

**References:**

1. Timonin A.S. Engineering-ecological reference book. V. 1. – Kaluga : N.F. Bochkaryova's publishing house, 2003. – P. 530.
2. Valdberg A.Yu. Current trends of development of the theory and practice of a pyleulavlivaniye // Chemical and oil and gas mechanical engineering. – 2007. – № 7. – P. 48–50.
3. Straus V. Industrial purification of gases. – M. : Chemistry, 1981. – P. 616.
4. Rakhmonov T.Z. Separation of fine aerosol particles and drops with use of inertial and turbulent and centrifugal effects of sedimentation : Avtoref. yew. ... Cand. Tech. Sci. – Т. : TashGTU, 2000. – P. 20.
5. Rakhmonov T.Z., Salimov Z.S., Mukhammedov B.I., Rakhmonov U.K., Yuldashev N.H. Installation for purification of dusty gases // State patent sheet of the Republic of Uzbekistan. Stalemate. № IAP 038039 from 12/12/2008.



УДК 66.074.3

## ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ МАССООБМЕННЫХ ТАРЕЛОК КОЛОННЫХ АППАРАТОВ УСТАНОВОК ДЛЯ ОЧИСТКИ ПРИРОДНОГО ГАЗА

### INVESTIGATION OF HYDRODYNAMICS OF MASS EXCHANGE PLATES OF COLUMN APPARATUSES FOR NATURAL GAS PURIFICATION PLANTS

**Рахмонов Тойир Зойирович**

доктор технических наук, доцент,  
главный специалист по механике,  
отдел проектирования технологических объектов  
и систем сбора,  
ООО «Лукойл-Узбекистан Оперейтинг Компани»  
trahmonov@lukoil-international.com

**Rahmonov Toyir Zoyirovich**

Doctor of Technical Sciences,  
Associate Professor,  
Chief mechanical specialist,  
Process Facilities and Gathering  
System Design Section,  
LUKOIL Uzbekistan Operating Company LLC  
trahmonov@lukoil-international.com

**Аннотация.** В статье по результатам экспериментальных и промышленных исследований ситчатой тарелки с двумя зонами контакта со свободным сечением 20 % приводятся новые данные по газонаполнению барбатажного слоя, гидравлическому сопротивлению и каплеуносу в широком диапазоне изменения нагрузок по газу и жидкости; определена область устойчивой и эффективной работы исследованной конструкции массообменной тарелки, получены эмпирические уравнения для расчета оптимальных гидродинамических параметров и выполнено сравнение экспериментальных и расчетных данных, свидетельствующие адекватности полученных уравнений.

**Annotation.** In the article by results of pilot and industrial studies of a mesh plate with two zones of contact with the free section of 20 % new data on gas-filling of a bubbling layer, hydraulic resistance and a thaw ablation in the wide range of change of loadings on gas and liquid are obtained; the area of steady and effective work of the studied design of a mass-exchanged plate is defined, the empirical equations for calculation of optimum hydrodynamic parameters are received and the comparison of experimental and settlement data testifying adequacy of the received equations is executed.

**Ключевые слова:** природный газ, массообменные тарелка колонных аппаратов, очистка природного газа от CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, абсорбер, десорбер, эффективность очистки, подготовка природного газа.

**Keywords:** natural gas, mass exchange plates of column apparatuses, natural gas cleaning from CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, absorber, desorber, purification efficiency, natural gas preparation.

Начиная со второй половины XX века, природный газ становится наиболее эффективным экологически чистым природным топливом, а нефтегазодобывающие и перерабатывающие отрасли промышленности являются базовыми. От них практически зависит экономический потенциал страны. В основных направлениях энергетической стратегии Узбекистана до 2020 года предусматривается развитие этой базы, что обеспечит ввод новых производственных мощностей и модернизацию существующих предприятий.

При разработке оборудования для объектов в конструкциях технологических блоков должны учитываться новейшие прогрессивные технические решения, обеспечивающие высокую технологическую, экономическую, эргономическую и экологическую эффективность создаваемых технологических комплексов [1].

Технологические установки и аппараты, предназначенные для подготовки газа и извлечения конденсата на газоконденсатных месторождениях должны быть спроектированы с учетом влияния снижения пластового давления на их работу. В первую очередь имеются в виду изменения состава и количества сырья, снижение в составе конденсата тяжелых фракций, когда конденсат используется для производства какого-либо продукта: абсорбента, моторных топлив и т.д. При отсутствии таких данных в проект установок через определенный период вносятся соответствующие изменения.

Требования к качеству природного газа преследуют несколько целей, включая защиту от коррозии, исключение выпадения жидкой фазы в трубопроводах и влияние на характеристики горения.

Требования, связанные с предотвращением коррозии, ограничивают концентрации CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, меркаптанов и общей серы. В соответствии с требованиями нормативно-технической документации Узбекистана, в товарном газе, подаваемом в магистральные газопроводы, содержание сероводорода не должно превышать 7 мг/нм<sup>3</sup>, содержание двуокиси углерода не регламентируется. Поэтому при очистке газа от сероводорода двуокись углерода может удаляться не полностью и поступать в магистральный газопровод в таком количестве, чтобы низшая теплота сгорания транспортируемого газа составляла не менее 32,5 МДж/ст.м<sup>3</sup>. При селективном извлечении мощность установок очистки газа, определяемая по количеству поглотителя, во много раз меньше мощности установок с применением неселективных процессов.



В дисперсном газожидкостном потоке капли жидкости взвешены в газовой среде и является несущим [2]. В зависимости от размера капель и скорости потока степень увлечения частиц различна. Параметры движения капель жидкости в потоке газа, к которым принадлежат относительная скорость их, путь, проходимый в газовом потоке, определяют основной фактор процесса – эффективность сепарации.

Разработанная нами математическая модель и алгоритм расчета траектории капель в свободном сечении сепаратора с осевым завихрителем позволяют определять путь передвижения и время пребывания капель различного размера, что дает возможность целенаправленно проектировать конструктивные элементы, качественно предотвращающие унос капель из сепарационных зон.

Отмечено [2], что в турбулизованных системах газ в жидкости высокой интенсивности создаются на тарелках массообменных аппаратов. Поверхность контакта фаз газожидкостной системы определяется размерами фазовых ячеек и газосодержанием. Объем барботажного слоя  $V_c$ , м<sup>3</sup> определяется выражением:

$$V_c = HF_c, \tag{1}$$

где  $H$  – высота слоя, м;  $F_c$  – площадь сечения слоя, м<sup>2</sup>.

Количество взвешенных в потоке капель, при работе аппарата в интенсивных режимах, определяется технологическими показателями процесса – скоростью газа и плотностью орошения. Количество жидкости, находящееся в аппарате, в том случае, если нет ее накопления в аппарате за счет разности скоростей газа и жидкости, определяется из выражения:

$$G_x = V_{ап} \rho_g B, \tag{2}$$

где  $V_{ап}$  – объем аппарата, м<sup>3</sup>;  $\rho_g$  – плотность газа, кг/м<sup>3</sup>;  $B$  – удельное орошение, кг ж./кг газ.

Количество жидкости, проходящее через аппарат в единицу времени,  $q_{ж}$ , кг/с при плотности орошения  $L$ , м/с, определяется как

$$q_{ж} = L \cdot F_c \cdot \rho_{ж}, \tag{3}$$

где  $\rho_{ж}$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>

Количество газа  $q_g$ , кг/с при скорости  $U_{ср}$ , м/с выражается следующим образом:

$$q_g = U_{ср} F_c \rho_g. \tag{4}$$

Удельное орошение определяется выражением:

$$B = \frac{q_{ж}}{q_g} = \frac{L \rho_{ж}}{U_{ср} \rho_g}. \tag{5}$$

Общий объем жидкости в аппарате составляет

$$V_{ж} = \frac{G_x}{\rho_{ж}} = \frac{L F_c H}{U_{ср}}. \tag{6}$$

С учетом коэффициента скольжения  $i = \frac{W_K}{U_{ср}}$ , получим:

$$V_{ж} = \frac{L F_c H}{i U_{ср}}. \tag{7}$$

Используя выражение (6), выразим газосодержание через технологические параметры процесса:

$$\varphi = \frac{V_c - V_{ж}}{V_c} = 1 - \frac{V_{ж}}{V_c} = 1 - \frac{L}{i U_{ср}}. \tag{8}$$

В том случае, если часть жидкости, поступающей в газожидкостный слой, находится в состоянии барботажа, количество капель в системе определяется с учетом показателя относительного брызгоуноса  $e$  определяется по выражению

$$n_K = \frac{L e F_c H}{A i U_{ср} d_K^3}, \tag{9}$$

где  $A$  – коэффициент формы капель;  $d_K$  – диаметр капель жидкости, м.





В результате теоретических исследований определена взаимосвязь между количеством фазовых ячеек и газосодержанием двухфазного слоя в интенсивных барботажных режимах, создающихся на тарелках колонных аппаратов и систем с газовой дисперсной фазой.

Для оценки способности оборудования нести нагрузку по газу предложено [2] использовать  $F$ -фактор скорости, являющийся произведением фактической скорости газа в расчете на полное сечение колонны ( $U$ , м/с) на корень квадратный из фактической плотности газа ( $\rho_e$ , кг/м<sup>3</sup>) в колонном аппарате:

$$F = U\sqrt{\rho_e} . \tag{10}$$

Использование  $F$ -фактора скорости для оценки интенсивности работы контактных устройств газожидкостных разделителей (сепаратора и дегазатора) и массообменных колонных аппаратов (абсорбера и десорбера) позволяет применять результаты лабораторных исследований в промышленности [3].

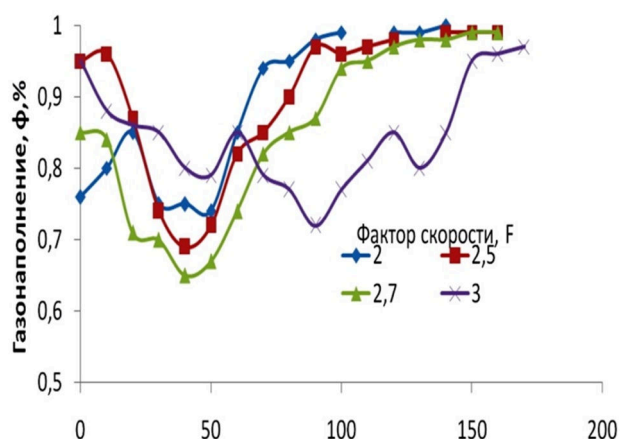
Нами приведены результаты лабораторных исследований гидродинамических параметров ситчатой тарелки с двумя зонами контакта фаз со свободным сечением 20 % с отверстиями на полотне тарелки  $d_{ome} = 9,4$  мм применительно к массообменным аппаратам – абсорберу и десорберу установки сероочистки природного газа [4]. Предлагаемая массообменная тарелка отличается большим диапазоном рабочих нагрузок по газу и жидкости, малым гидравлическим сопротивлением и более высокими показателями по массообменным характеристикам. Эти тарелки могут работать при значениях  $F$ -фактора 2 ÷ 3. Отметим, что эксплуатирующиеся на газоперерабатывающих заводах тарелки работают при значении  $F \leq 1$ .

Конструктивно тарелка представляет собой ситчатое полотно с центральным переливным устройством. При работе раствор амина движется сверху вниз и происходит барботаж в отверстиях под действием кинетической энергии газа. При переливе раствора создается «жидкостной занавес», что позволяет дополнительно контактировать жидкости с газом. Внутри переливного стакана установлен пеногаситель, изготовленный из уголков. Пеногаситель служит для отвода газа и тем самым способствует увеличению пропускной способности переливных устройств.

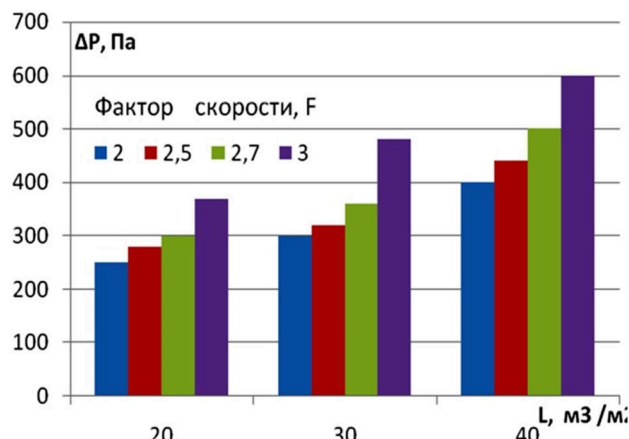
Опыты были проведены при скоростях газа в свободном сечении колонны от 0,8 до 2,5 м/с, что соответствует  $F$ -фактору 1,0 ÷ 2,9. Диапазон плотностей орошения меняли от 20 до 75 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>ч, что соответствует нагрузке на длину порога от 5,1 до 19,1 м<sup>3</sup>/м·ч.

При исследованиях определены газонаполнения по высоте барботажного слоя, брызгоунос и гидравлическое сопротивление тарелок в диапазоне рабочих нагрузок по газу и жидкости и диапазон устойчивой работы тарелки.

На рисунке 1, в качестве примера иллюстрируются закономерности изменения газонаполнения при различных значениях  $F$ -фактора скорости. По графикам виден рост газонаполнения при низких значениях плотности орошения, когда кинетическая энергия газа преобладает над потенциальной энергией жидкости и находится в пределах 0,7 ÷ 0,8. Полученные зависимости газонаполнения от рабочих параметров показывают, что рабочий режим тарелки со свободным сечением 20 % достигает до  $F = 2,84$ .



**Рисунок 1** – Зависимость газонаполнения от высоты газожидкостного слоя при плотности орошения  $L = 30$  м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>ч



**Рисунок 2** – Зависимость гидравлического сопротивления от фактора скорости газа

На каждом режиме проводились измерения перепада давления с U-образным дифференциальным манометром водяного заполнения. Из рисунка 2 видно, что с увеличением объемного расхода жидкости на единицу массообменной тарелки, т.е. плотности орошения, наблюдается заметный

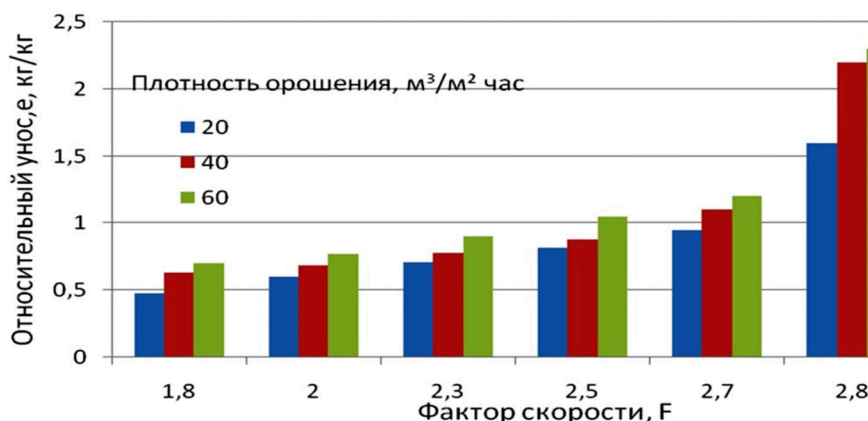


рост гидравлического сопротивления. При этом установлено, что увеличение скорости газа не приводит к резкому росту исследуемого параметра.

Для экспериментального определения уноса при работе в системе «воздух-вода» была использована колонна диаметром 300 мм, снабженная двумя ситчатыми тарелками с двумя зонами контакта, свободное сечение которых изменяли в диапазоне  $F_{ce} = 10 \div 20 \%$ . Толщина тарелок составляла 6 мм, диаметр отверстия – 9,4 мм, расстояние между тарелками – 500 мм.

Для улавливания капель, уносящихся через верхнюю часть колонны, использовали циклон, установленный на линии выхода воздуха. Унос выражали через отношение количества унесенной жидкости к количеству подаваемой, т.е. относительный унос, в кг/кг.

На рисунке 3 приведена зависимость относительного уноса капель с тарелки со свободным сечением 20 % от  $F$ -фактора скорости при различных плотностях орошения. С увеличением плотности орошения относительный унос и предельные скорости газа уменьшаются вследствие роста слоя жидкости на тарелке и более быстрого захлебывания аппарата. В условиях проведенных опытов предельные скорости газа составляли  $2,4 \div 2,6$  м/с ( $F = 2,7 \div 2,9$ ).



**Рисунок 3** – Зависимость удельного уноса  $e_{уд}$  от фактора скорости  $F_{ф}$  при различных значениях плотности орошения ( $F_{ce} = 20 \%$ )

В результате обработки экспериментальных данных нами получена зависимость, позволяющая определять относительный унос жидкости в зависимости от технологических параметров процесса и свободного сечения тарелки:

$$e = 0,75 \cdot 10^{-3} U^{1,8} L^{-1,3} F_{cu}^{-2,5} \quad (11)$$

Уравнение (11) справедливо для  $H_m = 500 \div 600$  мм,  $F_{ce} = 10 \div 20 \%$ ,  $L = 20 \div 75$  м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>ч,  $U = 0,8 \div 2,5$  м/с.

Для оценки возможности эффективного функционирования колонны при различных нагрузках по газу и жидкости обычно используют область ее устойчивой работы, которая зависит главным образом от типа и конструкции контактного устройства.

Диапазон устойчивой работы тарелок определяется сочетанием нагрузок по газу и жидкости. На рисунке 4 показана область устойчивой работы исследованной нами тарелки, соответственно, полученная путем обобщения значительного объема экспериментальных данных. График построен в координатах « $F$ -фактор скорости –  $L$  – плотности орошения».

Максимально допустимый  $F$ -фактор скорости газа в колонне (линия BC) определяется величиной уноса жидкости. Линия AD определяет минимально допустимые скорости газа, соответствующие 10 % провалу жидкости. Справа область устойчивой работы ограничена линией CD, которая соответствует максимальным нагрузкам по жидкости, соответствующим 85 % режима захлебывания. Линия AB определяет минимальные нагрузки по жидкости, при которых на тарелке обеспечивается устойчивый барботажный слой. Нагрузки по газу и жидкости, соответствующие координатам любой точки внутри области, обеспечивают устойчивое функционирование аппарата.

Из графика видно, что рабочий диапазон тарелки со свободным сечением 20 % по нагрузке: минимальная рабочая скорость газа 1,2 м/с ( $F_{min} = 1,36$ ) – максимальная рабочая скорость газа 2,5 м/с ( $F_{max} = 2,84$ ). Следовательно, диапазон изменения нагрузки по газу, при котором сохраняется работоспособность тарелки, равен  $F_{max} / F_{min} = 2,1$ . Нагрузка по жидкости достигает плотности орошения 75 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>ч, что соответствует нагрузке на длину порога 19,2 м<sup>3</sup>/м·ч.

Таким образом, в результате исследования определены оптимальные гидродинамические показатели и выявлена область устойчивой работы тарелки для проведения абсорбционных и десорбционных процессов с высокой интенсивностью протекания массообменных процессов в малогабаритных технологических аппаратах.

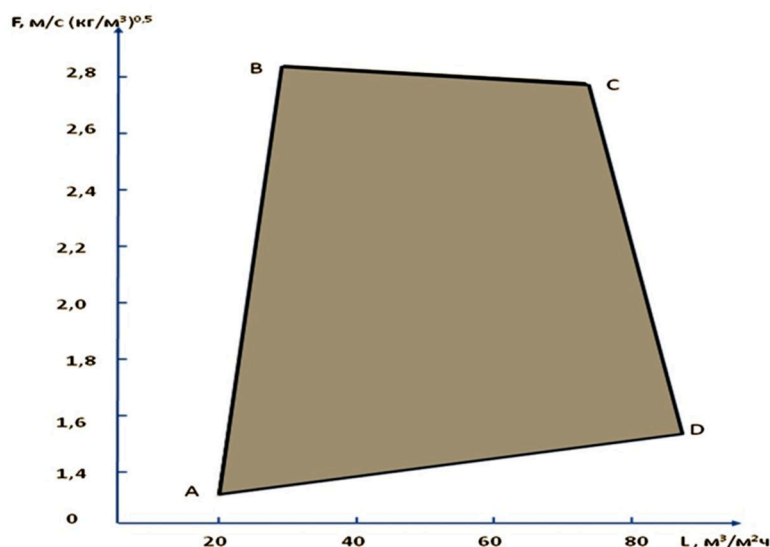


Рисунок 4 – Область устойчивой работы ситчатой тарелки с двумя зонами контакта со свободным сечением 20 %

Нами приведены исследование абсорбера сероочистной установки в промышленных условиях [5, 6], представляющий собой вертикальный тарельчатый колонный аппарат с модифицированными ситчатыми тарелками с двумя зонами контакта. В абсорбере сорбция осуществляется путем контакта газа с жидкостью в пленке и в барботажном слое. В верхней части абсорбера устанавливается каплеотделитель, состоящий из цилиндрических центробежных элементов с завихрителем.

Исследование скорости абсорбции H<sub>2</sub>S и CO<sub>2</sub> из природного газа водным раствором метилдиэтанолamina (МДЭА) проводили на 12-сероочистном блоке четвертого цеха Мубарекского ГПЗ (Узбекистан).

Эксперименты производили в промышленных условиях на абсорбере диаметром 2600 мм. В качестве массообменного устройства принята конструкция модифицированной ситчатой тарелки с двумя зонами контакта в количестве 18 шт. На каждой тарелке установлено 5 переливных устройств диаметром 400 мм; высота порога перелива принята 50 мм. Общая длина порогов перелива  $l = 6,28$  м. Максимальная расчетная нагрузка на перелив  $q = 63,1$  м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>ч. В переливах установлены пеногасящие устройства, увеличивающие пропускную способность тарелки при вспенивании жидкости.

При испытании модернизированного абсорбера фактор скорости варьировали в диапазоне  $F = 1 \div 2,4$ . Установлено, что с повышением фактора скорости  $F$  при постоянном значении удельного орошения коэффициент селективности извлечения сероводорода  $K_c$  растет, при  $F = 0,7$  содержание H<sub>2</sub>S в очищенном газе составляет 14 мг/м<sup>3</sup>, при  $F = 2,4$  содержание H<sub>2</sub>S составило 4,7 мг/м<sup>3</sup> газа. Это явление, на наш взгляд, объясняется тем, что при высоких скоростях увеличивается поверхность массообмена и время обновления поверхности контакта фаз и, как результат повышение эффективности селективной очистки.

Испытанный абсорбер по проекту имел производительность по газу 47 тыс. м<sup>3</sup>/ч. В результате замены массообменной тарелки, производительность абсорбера по газу достигает 65 тыс. м<sup>3</sup>/ч, и это позволила дополнительно переработать серосодержащий природный газ в объеме 144000 тыс. м<sup>3</sup>/год.

Таким образом показано, что модифицированный абсорбер с тарелками нового типа позволяет увеличить производительность аппарата в 1,4 раза относительно проектного уровня; эффект достигается за счет интенсификации процесса абсорбции при сохранении высоких показателей качества (не более 7 мг/м<sup>3</sup> H<sub>2</sub>S в очищенном газе) очистки природного газа.

В результате использования разработанных высокоинтенсивных контактных элементов и аппаратов в промышленных условиях в УДП «Мубарекский ГПЗ» и в УДП Газлинефтегаздобыча» достигнуто увеличение единичной мощности эксплуатируемых аппаратов, уменьшение габаритных размеров и металлоемкости проектируемого оборудования установок подготовки и очистки природного газа.

### Литература:

1. Салимов З.С., Рахмонов Т.З., Розиев Б.Р. Высокоэффективные аппараты для комплексной очистки природного газа. – Ташкент : ООО «Munis design group», 2015. – 194 с.
2. Рахмонов Т.З. Создание высокоэффективных аппаратов для комплексной очистки природного газа : Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Т. : ТашХТИ, 2015. – С. 75.
3. Рахмонов Т.З. Исследование факторов влияющих на эффектность очистки природного газа // Вестник ТашГТУ. – Ташкент, 2005. – № 2. – С. 110–113.



4. Рахмонов Т.З. Исследование гидродинамики массообменной тарелки абсорбера сероочистки // Химическая технология. Контроль и управление. – Ташкент, 2014. – № 1. – С. 28–32.
5. Rakhmonov T.Z. Creation of highly effective devices for purification of natural gas // International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. – India, Delhi, 2015. – № 4. – P. 472–476.
6. Рахмонов Т.З., Хурмаматов А.М. Исследование абсорбера сероочистной установки в промышленных условиях // Химическая промышленность. – СПб. : ТЕНЗА, 2012. – № 8. – С. 412–415.

#### References:

1. Salimov Z.S., Rakhmonov T.Z., Roziyev B.R. Highly effective devices for complex purification of natural gas. – Tashkent : LLC Munis design group, 2015. – 194 p.
2. Rakhmonov T.Z. Creation of highly effective devices for complex purification of natural gas : Avtoref. yew. ... Dr. Sci. Tech. – T. : TashHTI, 2015. – P. 75.
3. Rakhmonov T.Z. A research of factors of TashGTU influencing showiness of purification of natural gas // Messenger. – Tashkent, 2005. – № 2. – С. 110–113.
4. Rakhmonov T.Z. Research of hydrodynamics of a mass-exchanged plate of an absorber of desulphurization // Chemical technology. Control and management. – Tashkent, 2014. – № 1. – P. 28–32.
5. Rakhmonov T.Z. Creation of highly effective devices for purification of natural gas // International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. – India, Delhi, 2015. – № 4. – P. 472–476.
6. Rakhmonov T.Z., Hurmamatov of A.M. Issledovaniye of an absorber of seroochistny installation in industrial conditions // Chemical industry. – SPb. : TENZA, 2012. – № 8. – P. 412–415.



УДК 669.1

## РАЗРАБОТКА НОВЫХ СТАЛЕЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ УГОЛЬНЫХ ТЕПЛОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

### DEVELOPMENT OF NEW STEELS FOR INCREASE IN POWER EFFICIENCY OF COAL THERMAL POWER PLANTS

**Ткачёв Евгений Сергеевич**

аспирант,  
Белгородский государственный национальный  
исследовательский университет  
tkachev\_e@bsu.edu.ru

**Tkachyov Evgeny Sergeyevich**

Graduate Student,  
Belgorod state national research university  
tkachev\_e@bsu.edu.ru

**Аннотация.** Статья посвящена обзору теплоэнергетической отрасли с точки зрения повышения её энергоэффективности за счет разработки улучшенных сталей, применяемых в качестве конструкционного материала для изготовления труб и элементов, работающих в условиях больших температур и давления. На основе цикла исследовательских работ по этой тематике описано текущее состояние и перспективы развития высокохромистых теплотехнических сталей.

**Annotation.** Article is devoted to the review of heat power branch from the point of view of increase in its energy efficiency due to development of the pipes and elements working in the conditions of big temperatures and pressure improved staly, applied as constructional material to production. On the basis of a cycle of research works on this subject the current state and the prospects of development high-chromium heattechnical is described by steels.

**Ключевые слова:** энергетическая эффективность, теплоэнергетическая отрасль, новые стали, конструкционные материалы, изготовление труб, высокохромистые теплотехнические стали.

**Keywords:** power efficiency, heat power branch, new steels, constructional materials, production of pipes, high-chromium heattechnical steels.

#### Введение

В современном мире развитие технологий во многих отраслях промышленности ограничивается возможностями применяемых материалов.

Теплоэнергетика в широком смысле не относится к новым отраслям промышленности. Она берет начало в конце 19, начале 20 веков, с появлением потребности в электрификации производств и частного сектора. Преобразование природных ресурсов в электроэнергию перешло в нарастающий тренд, не спадающий и в настоящее время. Российская теплоэнергетика не является исключением, на рисунке 1 показано изменение требуемой мощности электроэнергии в России с 2002 по 2015 год.

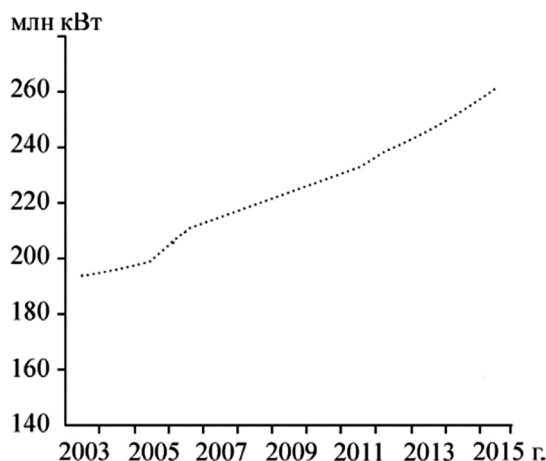


Рисунок 1 – Требуемые мощности электроэнергии в России по годам [1]

#### Состояние и перспективы современной теплоэнергетики

Несмотря на возникновение и развитие относительно экологически чистых источников энергии они покрывают лишь малую часть мирового спроса. Подавляющую долю электроэнергетики составляют тепловые электростанции, преобразующие энергию сжигания органического топлива, а именно, угля и газа. В качестве иллюстрации на рисунке 2 представлено разделение объемов выработки электроэнергии по видам топлива в мире.

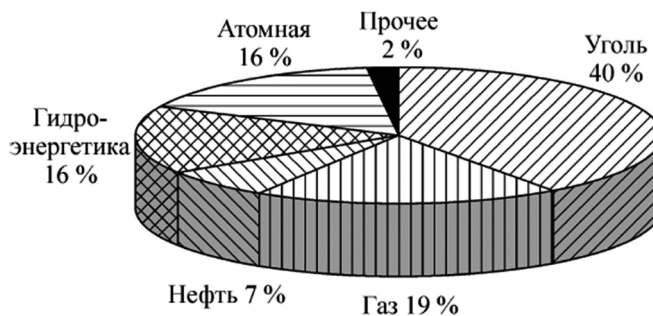


Рисунок 2 – Производство электроэнергии в мире по видам топлива [1]

Видно, что доля угольной электроэнергетики доминирует над прочими видами. И именно угольная теплоэнергетика, из всех приведенных отраслей теплоэнергетики, по её масштабам и негативно-му влиянию, является наиболее вредной для окружающей нас природной среды. Это тот сектор мировой энергетики, изменения в котором необходимы, чтобы избежать неприятных последствий глобального потепления. Перспективные энергетические технологии и оборудование должны разрабатываться так, чтобы их воздействие на природную среду было минимальным и соответствовало современным и планируемым экологическим нормам.

Существует несколько путей повышения экологических показателей угольных теплоэлектростанций. К ним относят улучшение процесса сжигания угля, использование различных фильтров, повышение коэффициента полезного действия (КПД) угольных энергоблоков. Из приведенных технологических решений особо следует выделить повышение КПД энергоблоков, т.к. помимо решения проблемы с санитарными нормами (увеличение КПД позволяет уменьшить количество сжигаемого топлива и вредных выбросов на единицу выработанной энергии) оно обеспечивает и экономическую выгоду. Большинство нынешних угольных теплоэлектростанций обладают КПД на уровне 35 %.

Выработка электроэнергии в угольных энергоблоках происходит за счет электрогенераторов, приводимых в движение паровыми турбинами. Давление пара на входе в турбину возникает за счет перегрева воды в паровом котле, где происходит сжигание топлива (угольной пыли). Отработанный пар поступает в конденсатор, где он охлаждается, превращается в воду, и затем снова подается в паровой котёл. Такая система представляет собой замкнутый цикл, КПД которого определяется по уравнению для теплового цикла Карно, известному многим ещё из курса средней школы:

$$\eta = \frac{T_H - T_X}{T_H},$$

где  $T_H$  – температура нагревателя (температура пара на входе в турбину), а  $T_X$  – температура холодильника (температура на выходе).

Отсюда становится понятным, что для повышения эффективности угольных энергоблоков необходимо повышать температуру пара на входе в турбину, т.е. производить более высокий нагрев пара в котле. Так, повышение температуры пара с 565 до ~600 °С позволяет увеличить КПД энергоблоков с 34–36 % до 44–46 %.

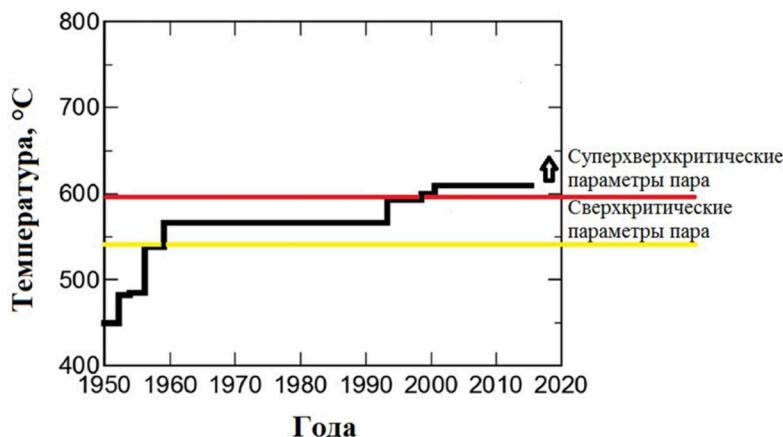


Рисунок 3 – Максимальная температура пара в пароперегревателях угольных теплоэлектростанций с 1950-х годов по настоящее время



Максимальные параметры пара (его температура и давление) ограничиваются жаропрочностью материала, из которого изготавливаются трубы, в которых происходит его нагрев. Под *жаропрочностью* понимается способность материала сопротивляться пластической деформации под нагрузкой при высоких температурах. Система трубчатых каналов, располагающихся в котле называется *пароперегревателем*. На рисунке 3 показано изменение максимальной температуры пара в пароперегревателях за последние 60 лет.

**Новые стали мартенситного класса для тепловой энергетики, общие представления**

Традиционным конструкционным материалом, используемым для изготовления труб пароперегревателя являются жаропрочные легированные стали. Их отличительная особенность заключается в комплексном легировании, обеспечивающем, помимо высокой жаропрочности, достаточные антикоррозионные свойства. Следует сказать, что эти стали существенно уступают жаропрочным сплавам на основе никеля и кобальта по жаропрочности, однако незаменимы по своим экономическим показателям, будучи на порядок дешевле указанных сплавов.

Основным механизмом пластической деформации металлов является перемещением линейных дефектов кристаллического строения, называемых дислокациями. При повышенной температуре процесс скольжения этих линейных дефектов внутри кристалла может сопровождаться их неконсервативным перемещением – *переползанием*. Включение механизма переползания при повышенной температуре обеспечивает дополнительную мобильность дислокаций и увеличивает скорость пластической деформации. Переползание дислокаций становится возможным из-за интенсификации диффузионных процессов при повышенной температуре. Постепенное деформирование материала под действием приложенных напряжений называют *ползучестью*. Из вышесказанного можно сделать вывод, что концепция легирования жаропрочных сталей должна быть направлена на две ключевых задачи:

1. Создание большого количества препятствий для движения дислокаций.
2. Подавление диффузии атомов при повышенных температурах.

К середине 20-го века в качестве конструкционных сталей для изготовления труб пароперегревателей широко распространение получили стали бейнитного и перлитного класса. После термической обработки структура этих сталей представляет собой полигональные зерна феррита с выделениями частиц карбидов внутри них. Химический состав этих сталей (P22; P23) представлен в таблице 1.

**Таблица 1** – Химический состав применяемых теплотехнических сталей и исследуемой композиции (% вес., остальное – Fe)

Сталь	C, %	Cr, %	W, %	Mo, %	V, %	Nb, %	Co, %	N, %	B, %
P22	0,05–0,15	1,9–2,6	–	0,87–1,13	0,2–0,3	–	–	0,05	0,0015–0,007
P23	0,04–0,10	1,9–2,6	1,54	0,05–0,30	0,2–0,3	0,02–0,08	–	0,05	0,0005–0,006
P911	0,09–0,13	8,5–9,5	0,8–1,1	0,9–1,1	0,18–0,25	0,04–0,09	–	0,05	0,0003–0,006
P92	0,07–0,10	8,5–9,5	1,5–2,0	0,3–0,6	0,15–0,25	0,03–0,07	–	0,05	0,001–0,006
Исследуемая сталь	0,1	9,05	1,56	0,58	0,2	0,05	2,86	0,007	0,012

В качестве барьеров для движущихся дислокаций в данных сталях выступают границы ферритных зерен и дисперсные карбиды. Вольфрам (W) и молибден (Mo) в этих сталях выступают в качестве элементов подавляющих диффузию.

Дальнейшее усовершенствование химического состава этих сталей привело к появлению 9 % Cr сталей мартенситного класса (P911; P92). Сталями мартенситного класса называют стали, в которых мартенситное превращение происходит при её охлаждении на воздухе. В этих сталях после термической обработки формируется сложная иерархическая структура, обусловленная мартенситным превращением (рис. 4). Жаропрочность 9 % Cr теплотехнических сталей обеспечивается сложным микроструктурным дизайном этих сталей, в которых мелкодисперсная структура мартенсита отпуска декорирована большим количеством наноразмерных частиц. Отличие этих сталей от традиционных теплотехнических сталей P22 и P23 заключается в существенно большей плотности межкристаллитных границ, и большей дисперсности частиц карбидов и карбонитридов.

Элементы угольных энергоблоков, изготавливаемые из этих сталей, вводятся в эксплуатацию на длительный срок (более 100 000 часов или 10 лет), в течение которого они подвергаются воздействию напряжений при повышенных температурах. Для выявления жаропрочных свойств проводят механические испытания, в которых к образцам прилагают растягивающие напряжения при повышенной температуре, и регистрируют изменения деформации от времени, такие испытания называют *испытаниями на ползучесть*. Основным показателем жаропрочности сталей является величина, называемая *пределом длительной прочности*. Предел длительной прочности – это напряжение, при котором за заданное время, при заданной температуре происходит разрушение материала. В таблице 2 приведены величины пределов длительной прочности при различных температурах и режимы термической обработки для применяемых теплотехнических сталей и исследуемой стали.

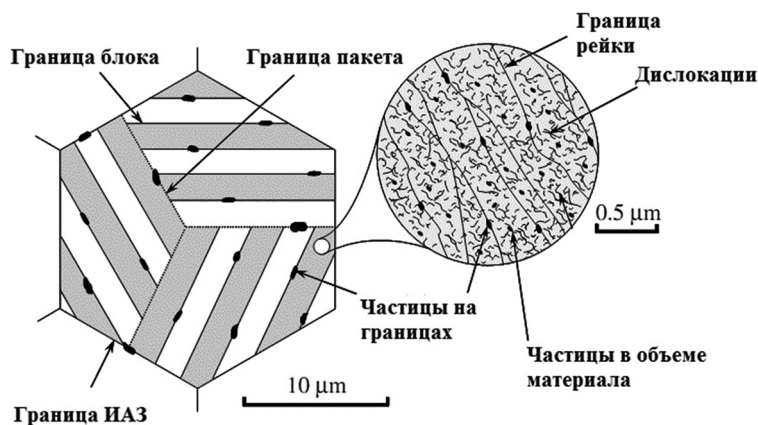


Рисунок 4 – Схематическое изображение структуры жаропрочных сталей мартенситного класса

Таблица 2 – Пределы длительной прочности на базе  $10^5$  часов, рассчитанные по параметру Ларсена-Миллера [2] и стандартные режимы термической обработки применяемых теплотехнических сталей и исследуемой композиции

Сталь	T = 550 °C	T = 600 °C	T = 620 °C	T = 650 °C	Термическая обработка
P22	88 МПа	52 МПа	< 10 МПа	Нет данных	Нормализация 900–960 °C + отпуск 680–750 °C
P23	140 МПа	70 МПа	< 30 МПа	Нет данных	Нормализация 1050 °C + отпуск 740 °C
P911	182 МПа	108 МПа	83 МПа	53 МПа	Закалка* 1040–1080 °C + отпуск 750–780 °C
P92	180 МПа	120 МПа	101 МПа	72 МПа	Закалка* 1040–1080 °C + отпуск 750–780 °C
Исследуемая сталь	Нет данных	Нет данных	Нет данных	80 МПа	Закалка* 1060 °C + отпуск 750 °C

\* Закалка для сталей этого класса происходит на воздухе, т.е. при нормализации.

Главным недостатком теплотехнических сталей мартенситного класса является заметное снижение сопротивления горячей пластической деформации при длительных выдержках. Это проявляется в виде перелома на кривых длительной прочности для этих сталей (рису. 5).

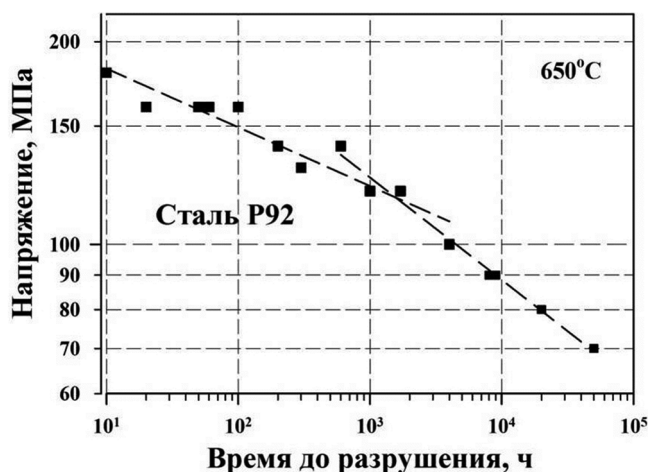


Рисунок 5 – Зависимость напряжения от времени до разрушения при температуре 650 °C для стали P92

Этот перегиб связан с деградацией микроструктуры при длительной выдержке при повышенной температуре, а именно с миграцией и слиянием малоугловых границ, уходом подавляющих диффузию элементов в частицы и укрупнением частиц.

В настоящее время реализуется несколько крупных научно-исследовательских проектов по освоению и разработке теплотехнических сталей мартенситного класса. Первоочередной задачей, решаемой при разработке новых, улучшенных составов 9 % Cr сталей является подбор легирования, которое бы обеспечило высокую стабильность структуры, образующейся после термической обработки. Среди самых многообещающих композиций сталей выделяются следующие:

- стали с дисперсным упрочнением частицами оксидов [3];





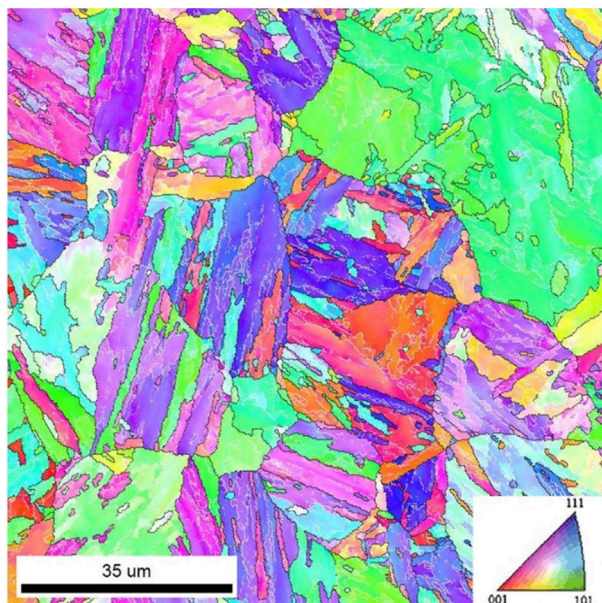
- стали упрочненные частицами Z-фазы и фазы Лавеса  $Fe_2(W,Mo)$  [4, 5];
- стали с повышенным содержанием бора [6–8].

Последние стали представляют повышенный интерес. Увеличение содержания бора в стали способствует стабилизации частиц специального карбида  $Cr_{23}C_6$ . Частицы этого карбида выделяются преимущественно по межкристаллитным границам и сдерживают их миграцию. Укрупнение частиц этого карбида при длительной выдержке при высокой температуре приводит к снижению тормозящих сил и интенсивной миграции границ, что негативно сказывается на сопротивлении пластической деформации стали.

### Влияние термической обработки и ползучести на структуру и свойства высокохромистых сталей с повышенным содержанием бора

На данный момент достаточно обширно изучено влияние повышенного содержания бора на характеристики ползучести [9–11]. Однако в литературе отсутствует подробное исследование процессов, развивающихся в этих сталях после термической обработки и в процессе ползучести. Цикл работ по исследованию влияния термической обработки и ползучести на микроструктуру и механические свойства 9 % Cr стали с повышенным содержанием бора [12–15] призван прояснить особенности микроструктурных изменений в этих сталях и проанализировать механизмы деградации жаропрочных свойств.

В работе [12] было проведено исследование структуры и механических свойств 9 % Cr стали с повышенным содержанием бора после отпуска при различных температурах. Эта работа позволила выявить отличия стали с таким легированием от стандартных сталей типа P92 и установить оптимальный режим термической обработки. Исследование показало, что после отпуска структура такой стали аналогична иерархической структуре сталей P911 и P92 (рис. 6), и состоит из пакетного мартенсита отпуска с несколько меньшей шириной мартенситных реек (~300 нм против ~330 нм в стали P92).



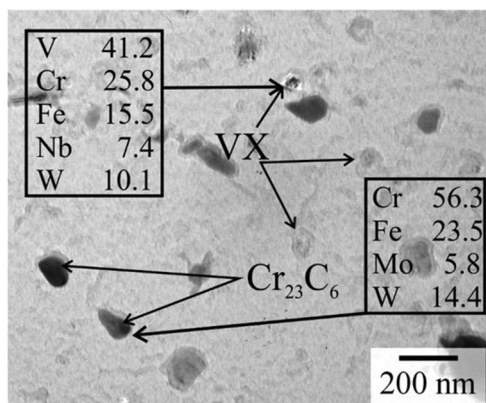
**Рисунок 6** – Изображение структуры исследуемой стали, полученное в растровом электронном микроскопе (EBSD-карта). Разным цветом обозначены участки поверхности с различной кристаллографической ориентировкой

Анализ фазового состава и морфологии частиц вторых фаз показал присутствие в структуре частиц карбидов  $Cr_{23}C_6$  и карбонитридов  $(Nb,V)(C,N)$  (рис. 7). Несмотря на одинаковый фазовый состав со сталями P911 и P92 было обнаружено существенное различие в размерах частиц  $Cr_{23}C_6$ . Так в стали P92 средний размер частиц  $Cr_{23}C_6$  составил 110 нм, а в исследуемой стали всего 66 нм. При сопоставимой объемной доле такая разница в размерах оказывает существенное влияние на дисперсионное упрочнение. Оптимальным режимом термической обработки была выбрана Закалка 1060 °C (1 час) + отпуск 750 °C (3 часа).

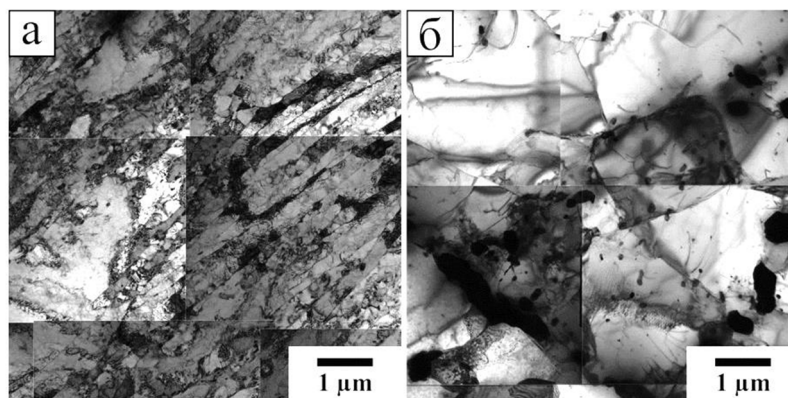
Дальнейшие работы [13–15] посвящены исследованию влияния ползучести на микроструктуру и механические свойства стали. Для этого были проведены испытания на ползучесть при температуре 650 °C и напряжениях 100–180 МПа. Установлено, что длительная ползучесть приводит к существенной деградации микроструктуры (рис. 8). Постепенное укрупнение частиц совместно с утечкой подавляющих диффузию элементов в образующиеся, и быстро укрупняющиеся в процессе ползучести, частицы фазы  $Fe_2(W,Mo)$  приводит к увеличению мобильности дислокаций и снижению сопротивления ползучести. Миграция границ приводит к формированию крупных полигональных субзерен со средним размером ~1,3 мкм. Крупные темные частицы на рисунке 8,б являются частицами фазы



$Fe_2(W,Mo)$ . Однако по сравнению со сталями P911 и P92 исследуемая сталь характеризуется замедленной кинетикой укрупнения частиц  $Cr_{23}C_6$ , что задерживает деградацию микроструктуры и объясняет повышенную жаропрочность данной стали [14].

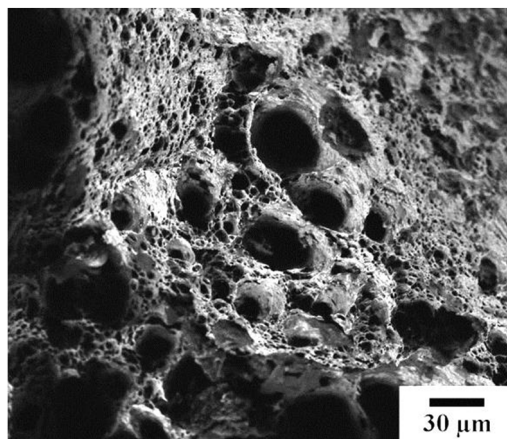


**Рисунок 7** – Изображение частиц различных фаз исследуемой стали после термической обработки, углеродная реплика, просвечивающая электронная микроскопия



**Рисунок 8** – Микроструктура исследуемой стали после термической обработки (а) и после испытаний на ползучесть при температуре 650°C в течение 17 863 часов (б), тонкие фольги, просвечивающая электронная микроскопия

Еще одним важным результатом исследований стал фрактографический анализ поверхности образцов, разрушенных после испытаний на ползучесть. На рисунке 9 видно, что поверхность разрушения имеет ямчатый рельеф, в котором различимы крупные ямки с частицами на дне этих ямок и большое количество мелких ямок. Такая морфология поверхности указывает на то, что разрушение исследуемой стали начинается с образования пор на крупных частицах. Этот негативный эффект влияния крупных частиц на разрушение стали можно подавить за счет увеличения дисперсности частиц вторых фаз, особенно частиц фазы  $Fe_2(W,Mo)$ .



**Рисунок 9** – Фрактографическое изображение поверхности образца разрушенного после испытаний на ползучесть в течение 4883 ч



### Заключение

Благодаря своим высоким характеристикам жаропрочности, сопротивлению коррозии и относительно низкой стоимости высокохромистые стали мартенситного класса хорошо зарекомендовали себя в качестве конструкционного материала для изготовления элементов паропроводов. Основным недостатком этих сталей является постепенная деградация структуры в процессе длительной эксплуатации, что сопровождается увеличением скорости ползучести и может привести к разрушению конструкции раньше расчетного времени. Для точного прогнозирования эксплуатационных характеристик этих сталей и разработки новых материалов с улучшенными свойствами необходимо исследование процессов, развивающихся в структуре сталей в процессе ползучести, и влияющих на механические свойства. Цикл работ по исследованию микроструктуры и механических свойств перспективной жаропрочной стали с повышенным содержанием бора позволил определить механические свойства и особенности её микроструктуры после термической обработки, выявить влияние ползучести на микроструктуру и провести фрактографический анализ поверхности образцов после разрушения. Полученные результаты представляют основу для дальнейшего изменения легирования сталей данного типа с целью повышения их жаропрочных свойств за счет предотвращения быстрого укрупнения частиц, особенно частиц фазы  $Fe_2(W,Mo)$ , и формированию оптимального микроструктурного дизайна, что позволит замедлить процесс деградации микроструктуры при ползучести. Мартенситные стали с повышенными характеристиками жаропрочности позволят увеличить КПД угольных теплоэлектростанций и снизить негативное влияние вредных выбросов в окружающую среду.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-00052.*

### Литература:

1. Саломатов В.В. Состояние и перспективы угольной и ядерной энергетик России // Теплофизика и аэромеханика. – 2009. – Т. 16. – №. 4. – С. 531–544.
2. Garofalo F. Fundamentals of creep and creep rupture in metals, MacMillan. – New York : NY, 1965.
3. Ramar A. et al. Analysis of high temperature deformation mechanism in ODS EUROFER 97 alloy // Journal of Nuclear Materials. – 2008. – V. 382. – №. 2. – P. 210–216.
4. Hald J., Danielsen H.K. Z-phase strengthened martensitic 9–12 % Cr steels // Proceedings of 3rd Symposium on Heat Resistant Steels and Alloys for High Efficiency USC Power Plants, National Institute for Materials Science, Tsukuba, Japan. – 2009. – P. 2–6.
5. Yamamoto K. et al. Design of Laves phase strengthened ferritic heat resisting steels in the Fe–Cr–Nb (–Ni) system // Materials Science and Engineering: A. – 2002. – V. 329. – P. 249–254.
6. Klueh R.L., Nelson A.T. Ferritic/martensitic steels for next-generation reactors // Journal of Nuclear Materials. – 2007. – V. 371. – №. 1. – P. 37–52.
7. Dudova N., Mishnev R., Kaibyshev R. Effect of tempering on microstructure and mechanical properties of boron containing 10 % Cr steel // ISIJ international. – 2011. – V. 51. – №. 11. – P. 1912–1918.
8. Abe F. et al. Stabilization of martensitic microstructure in advanced 9Cr steel during creep at high temperature // Materials Science and Engineering: A. – 2004. – V. 378. – № 1. – P. 299–303.
9. Mishnev R. et al. Microstructural aspects of superior creep resistance of a 10 % Cr martensitic steel // Materials Science and Engineering: A. – 2016. – V. 678. – P. 178–189.
10. Abe F. Effect of boron on creep deformation behavior and microstructure evolution in 9 % Cr steel at 650 °C // International Journal of Materials Research. – 2008. – V. 99. – №. 4. – P. 387–394.
11. Abe F. Effect of boron on microstructure and creep strength of advanced ferritic power plant steels // Procedia Engineering. – 2011. – V. 10. – P. 94–99.
12. Fedorova I. et al. Tempering behavior of a low nitrogen boron-added 9 % Cr steel // Materials Science and Engineering: A. – 2016. – V. 662. – P. 443–455.
13. Ткачев Е.С., Беляков А.Н. Стабильность дислокационной структуры жаропрочной стали 10х9к3в2мфбр в процессе ползучести при температуре 650 °C // Вестник Тамбовского университета. – 2016. – Т. 21. – № 3.
14. Kaibyshev R. et al. Effect of Ni and Mn on the creep behaviour of 9–10 % Cr Steels with low N and high B // Transactions of the Indian Institute of Metals. – 2016. – V. 69. – №. 2. – С. 203–210.
15. Fedoseeva A. et al. Effect of alloying on interfacial energy of precipitation/matrix in high-chromium martensitic steels // Journal of Materials Science. – 2017. – V. 52. – № 8. – P. 4197–4209.

### References:

1. Salomatov V.V. State and prospects coal and nuclear power engineering specialist of Russia // Thermophysics and aeromechanics. – 2009. – V. 16. – № 4. – P. 531–544.
2. Garofalo F. Fundamentals of creep and creep rupture in metals, MacMillan. – New York : NY, 1965.
3. Ramar A. et al. Analysis of high temperature deformation mechanism in ODS EUROFER 97 alloy // Journal of Nuclear Materials. – 2008. – V. 382. – №. 2. – P. 210–216.
4. Hald J., Danielsen H.K. Z-phase strengthened martensitic 9–12 % Cr steels // Proceedings of 3rd Symposium on Heat Resistant Steels and Alloys for High Efficiency USC Power Plants, National Institute for Materials Science, Tsukuba, Japan. – 2009. – P. 2–6.



5. Yamamoto K. et al. Design of Laves phase strengthened ferritic heat resisting steels in the Fe–Cr–Nb (–Ni) system // *Materials Science and Engineering: A*. – 2002. – V. 329. – P. 249–254.
6. Klueh R.L., Nelson A.T. Ferritic/martensitic steels for next-generation reactors // *Journal of Nuclear Materials*. – 2007. – V. 371. – № 1. – P. 37–52.
7. Dudova N., Mishnev R., Kaibyshev R. Effect of tempering on microstructure and mechanical properties of boron containing 10 % Cr steel // *ISIJ international*. – 2011. – V. 51. – № 11. – P. 1912–1918.
8. Abe F. et al. Stabilization of martensitic microstructure in advanced 9Cr steel during creep at high temperature // *Materials Science and Engineering: A*. – 2004. – V. 378. – № 1. – P. 299–303.
9. Mishnev R. et al. Microstructural aspects of superior creep resistance of a 10 % Cr martensitic steel // *Materials Science and Engineering: A*. – 2016. – V. 678. – P. 178–189.
10. Abe F. Effect of boron on creep deformation behavior and microstructure evolution in 9 % Cr steel at 650 °C // *International Journal of Materials Research*. – 2008. – V. 99. – № 4. – P. 387–394.
11. Abe F. Effect of boron on microstructure and creep strength of advanced ferritic power plant steels // *Procedia Engineering*. – 2011. – V. 10. – P. 94–99.
12. Fedorova I. et al. Tempering behavior of a low nitrogen boron-added 9 % Cr steel // *Materials Science and Engineering: A*. – 2016. – V. 662. – P. 443–455.
13. Tkachyov E.S., A.N. Stabilnost's White hares of dislocation structure of heat resisting steel 10kh9k3v2mfbr in the course of creep at a temperature of 650 °C // *Bulletin of the Tambov university*. – 2016. – V. 21. – № 3.
14. Kaibyshev R. et al. Effect of Ni and Mn on the creep behaviour of 9–10 % Cr Steels with low N and high B // *Transactions of the Indian Institute of Metals*. – 2016. – V. 69. – № 2. – C. 203–210.
15. Fedoseeva A. et al. Effect of alloying on interfacial energy of precipitation/matrix in high-chromium martensitic steels // *Journal of Materials Science*. – 2017. – V. 52. – № 8. – P. 4197–4209.



УДК 621.77

## ЭКОЛОГИЧНАЯ СХЕМА ПОДГОТОВКИ ПРОКАТА ДЛЯ КРЕПЕЖНЫХ ИЗДЕЛИЙ

### ENVIRONMENTAL SCHEME OF PREPARATION OF THE ROLLER FOR FIXING PRODUCTS

**Филиппов Алексей Александрович**

кандидат технических наук, доцент,  
Нижегородский государственный технический университет  
им. Р.Е. Алексеева

**Пачурин Герман Васильевич**

доктор технических наук, профессор,  
Нижегородский государственный технический университет  
им. Р.Е. Алексеева  
pachuringv@mail.ru

**Кузьмин Александр Николаевич**

магистрант,  
Нижегородский государственный технический университет  
им. Р.Е. Алексеева

**Аннотация.** В современных конкурентных условиях для повышения уровня качества проката для изготовления крепежных изделий необходимо изыскивать дополнительные резервы на всех этапах его передела. Для волочильного производства сокращение операций подготовки калиброванного проката за счет исключения энергоемких и трудозатратных операций отжига на зернистый перлит, рекристаллизационного отжига и устранения дефектов поверхности проката представляет собой актуальную задачу. В работе предложена экологичная схема подготовки проката к холодной высадке металлоизделий.

**Ключевые слова:** прокат, волочение, качество поверхности, структура, механические свойства.

**Filippov Alexey Alexandrovich**

Candidate of Technical Sciences,  
Associate Professor,  
Nizhny Novgorod State Technical University  
named of R.E. Alekseeva

**Pachurin German Vasilievich**

Doctor of Technical Sciences, Professor,  
Nizhny Novgorod State Technical University  
named of R.E. Alekseeva  
pachuringv@mail.ru

**Kuzmin Alexander Nikolaevich**

graduate student,  
Nizhny Novgorod State Technical University  
named of R.E. Alekseeva

**Annotation.** In modern competitive conditions, to increase the level of quality of rolled products for the manufacture of fasteners, it is necessary to seek additional reserves at all stages of its redistribution. For drawing production, the reduction of preparation operations for calibrated rolled products by eliminating energy-intensive and labor-intensive annealing operations on granular perlite, recrystallization annealing, and elimination of defects in the surface of rolled products is an urgent task. In work the ecological scheme of preparation of hire to cold landing of hardware is offered.

**Keywords:** rolling, drawing, surface quality, structure, mechanical properties.

## Введение

При истощении природных ресурсов и ухудшении экологической обстановки [1–3] достаточно остро встают вопросы ресурсо – и энергосбережения [4, 5] в процессе изготовления калиброванного проката при одновременном улучшении его качества и конкурентоспособности [6, 7]. Важнейшим фактором в этом направлении при подготовке проката под холодную высадку является повышение эффективности технологических процессов путем снижения как затрат металла, так и энергозатрат [8–11].

Калиброванный прокат с требуемым уровнем физико-механических характеристик можно получать или за счет использования новых материалов, или за счет новых технологических процессов [12, 13]. К металлопрокату для холодной штамповки предъявляются высокие требования в отношении прочностных и пластических характеристик, испытаниям на осадку, а также специальных функциональных характеристик. Таким образом, потребность в снижении трудозатрат, экономии энергоресурсов и решения все возрастающих острых экологических проблем является весьма актуальной [14, 15].

Комплекс характеристик проката перед высадкой зависит от структуры и механических свойств [16, 17], формируемых во время волочения металла через фильеру. К технологическим свойствам проката относится способность его выдерживать испытание на осадку без появления трещин и надрывов поверхности [18]. Оптимальной является осадка до  $1/3 H$  и менее. Однако полученные результаты не будут характеризовать всю партию контролируемого проката.

Эффективность волочильного производства ограничена рассогласованием скоростей процессов на различных этапах. Производство проката включает в себя операции подготовки к волочению, первичной холодной деформации, промежуточной термообработки в печах с защитной атмосферой, повторной хо-



лодной деформации и заключительной термообработки. Нагрев ТВЧ длится не более 6 мин (при дальнейшем медленном охлаждении в колдцах до 6 часов), в то время как в электрических или газовых печах от 10 до 36 часов. При этом важно обеспечить функциональное управление свойствами металлопроката за счет изменения дисперсности зерна, количества и морфологии фазовых составляющих.

Наиболее распространенной операцией подготовки стального проката к высадке является отжиг на зернистый перлит в колпаковых печах, не всегда обеспечивающий равномерность свойств по всей длине мотка, а в структуре металлопроката встречаются следы пластинчатого перлита.

В ответственных метизных изделиях, например, для болтов газотранспортных магистралей, не должно быть поверхностных дефектов (обезуглероженный слой, риски задиры и т.п.) [19–21]. Поэтому у горячекатаного проката удаляются недопустимые дефекты поверхности дорогостоящей операцией обточки и вредной операцией травления, что приводит к удорожанию готовых изделий.

В предлагаемом техническом решении термический отжиг производится в виде индукционного нагрева. Это исключает образование обезуглероженного слоя и обеспечивает высокую стабильность поддержания температурного режима. Индукционный нагрев обеспечивает производительность, экономичность, автоматизацию производства, отсутствие выбросов вредных веществ в атмосферу, повышение качества нагреваемого проката.

#### Методика исследований

В работе исследовалась сталь 38ХА со стандартным химическим составом, приведенным в таблице 1. Сталь 38ХА широко зарекомендовала себя при изготовлении упрочняемых крепёжных болтов в различных отраслях народного хозяйства.

**Таблица 1** – Химический состав исследуемой стали 38ХА

№ п/п	Технологическая схема	Диаметр проката, мм	Содержание элементов, %					
			C	Mn	Si	P	S	Cr
1	1	12,0	0,39	0,62	0,18	0,009	0,015	0,87
2	2	14,0	0,40	0,64	0,19	0,021	0,017	0,9

Ниже представлена действующая технологическая схема обработки горячекатаного проката с диаметра 12,0 мм на 9,65 мм: отжиг на зернистый перлит (печи с защитной атмосферой – 750 °С, выдержка 24 ч); травление окалины; волочение с диаметра 12,0 мм на 11,0 мм (деформация 16,0 %); отжиг (печи с защитной атмосферой – 670 °С, выдержка 12 ч); травление окалины; волочение с диаметра 11,0 мм до 10,2 мм (деформация 14,0 %); обточка с диаметра 10,2 мм на 9,97 мм; волочение с диаметра 9,97 мм на 9,65 мм (деформация 6,0 %); покрытие смазочным материалом.

С целью удаления поверхностных дефектов и обезуглероженного слоя производится обточка проката, в результате которой в стружку уходит более 55 кг с каждой тонны металла (около 5,5 %). В случае удаления плотного слоя окалины после отжига в печах операцией травлением необходимо дополнительное время, появляются экологически вредные остаточные травильные растворы, требующие дорогостоящей утилизации.

Авторами исследованы 2 схемы подготовки проката:

1. Травление проката диаметром 12,0 мм; волочение на диаметр 11,0 мм (деформация 15,9 %); отжиг с нагревом ТВЧ (760° ... 780 °С); травление; волочение с диаметра 11,0 мм на 9,65 мм (деформация 23 %); отжиг с нагревом ТВЧ (760° ... 780 °С); травление; волочение на диаметр 9,65 мм в пределах упругой деформации.

2. Травление проката диаметром 14,0 мм; волочение на диаметр 13,0 мм (деформация 13,7 %); отжиг с нагревом ТВЧ (760° ... 780 °С); травление; волочение на диаметр 12,00 мм (деформация 14,8 %); отжиг с нагревом ТВЧ (760° ... 780 °С); травление; волочение на диаметр 11,00 мм (деформация 15,9 %); отжиг с нагревом ТВЧ (760° ... 780 °С); травление; волочение на диаметр 9,65 мм (деформация 23 %).

Установлено, что механические характеристики из-за более высокой скорости охлаждения витков проката внешней стороны мотка по отношению к внутренним виткам распределены неравномерно по всей длине мотка горячекатаного проката. Микроструктура у внешних концов более мелкодисперсная. В то же время параметры пластичности и твердости у внешних и внутренних концов мотка практически одинаковые. Отжиг с нагревом ТВЧ обуславливает образование по всей длине проката более равномерной и менее мелкодисперсной микроструктуры, приводящей к повышению пластичности и снижению показателей прочности и твердости.

Увеличение числа отжигов с нагревом ТВЧ с последующим волочением в фильере обуславливает уменьшение дисперсности сорбитообразного перлита. После отжига проката диаметром 11,0 мм в структуре появляется мелкозернистый перлит. Четвертый отжиг проката диаметром 9,65 мм формирует равномерную микроструктуру мелкозернистого и точечного перлита с равномерно распреде-



ленным ферритом. Твердость не более НВ 194. После 3-го волочения эллипсность проката на окончательном диаметре 9,65 мм фактически отсутствует и образцы выдержали осадку до 1/3.

Ранее авторами [22] была запатентована схема (3) подготовки проката к высадке стальных метизных изделий. Однако она отличается от предлагаемой более длительным технологическим циклом, а, следовательно, более трудо- и энергозатратная.

Сравнение предлагаемой в работе технологической схемы (1) с действующей на производстве (2) и изложенной в работе [22] представлено ниже.

### Выводы

По результатам исследования предложенных схем подготовки проката стали 38ХА с использованием нагрева ТВЧ установлено, что волочение с оптимальными степенями деформации обжатием в три приема обеспечивает после отжига с нагревом ТВЧ отсутствие эллипсности и окалины на поверхности проката. Присутствовавший незначительный налет окислов удалялся в травильных ваннах в течение нескольких секунд.

Подготовленный по экологически более чистой схеме 2 прокат имеет равномерную мелкодисперсную структуру с отсутствием обезуглероженного слоя и обладает повышенной способностью к пластическому деформированию, что может сократить число переходов в процессе холодной высадки металлоизделий и увеличить ресурс высадочного инструмента.

### Литература:

1. Экологическая оценка процесса производства возобновляемых источников энергии / Е.Н. Соснина [и др.] // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 6. – С. 174–180.
2. Маслеева О.В., Воеводин А.Г., Пачурин Г.В. Тепловое воздействие альтернативных источников на окружающую среду // Современные наукоемкие технологии. – 2015. – № 3. – С. 51–54.
3. Маслеева О.В., Пачурин Г.В. Комплексная экологическая оценка жизненного цикла малой распределенной и возобновляемой энергетики // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2014. – № 8 – С. 81–86.
4. Pachurin G.V. Life of Plastically Deformed Corrosion-Resistant Steel // Russian Engineering Research. – 2012. – Vol. 32. – № 9–10. – P. 661–664.
5. Guslyakova G.P., Zhbannikov S.I., Pachurin G.V. Fatigue failure resistance of deformed structural steels // Materials Science. – 1993. – V. 28. – № 2. – P. 182–185.
6. Low-Cost Treatment of Rolled Products Used to Make Long High-Strength Bolts / A.A. Filippov [etc.] // Metallurgist. – 2016. – Vol. 59. – № 9–10. January. – P. 810–815.
7. The Factor of Structure and Mechanical Properties in the Production of Critical Fixing Hardware 38ХА / G.V. Pachurin [etc.] // Tribology in Industry. – 2016. – Vol. 38. – № 3. – P. 385–391.
8. Пачурин Г.В., Гуцин А.Н., Власов В.А. Долговечность листовых низкоуглеродистых сталей на воздухе и в коррозионной среде // Вопросы материаловедения. – № 3 (67). – 2011. – С. 125–133.
9. Филиппов А. А., Пачурин Г.В., Чиненков С.В. Формирование структурно-механических свойств стальных заготовок для упрочненных болтов : монография / НГТУ. – Н. Новгород, 2012. – 151 с.
10. Пачурин Г.В., Гуслякова Г.П. Эффект наклепа на долговечность металлов при разных температурах // Физико-химическая механика материалов. – 1981. – № 5. – С. 127.
11. Пачурин Г.В., Гуцин А.Н. Повышение эксплуатационной долговечности металлоизделий технологическими методами // Вестник машиностроения. – 2007. – № 6. – С. 62–65.
12. Pachurin G.V., Vlasov V.A. Mechanical properties of sheet structural steels at operating temperatures // Metal Science and Heat Treatment. – 2014. – V. 56. – № 3-4. – P. 219–223.
13. Pachurin G.V. Ruggedness of structural material and working life of metal components // Steel in Translation. – 2008. – V. 38. – № 3. – P. 217–220.
14. Pachurin G.V., Filippov A.A. Economical preparation of 40X steel for cold upsetting of bolts // Russian Engineering Research. – 2008. – V. 28. – № 7. – P. 670–673.
15. Пачурин Г.В., Филиппов А.А. Ресурсосберегающая и экологичная обработка поверхности металлопроката перед холодной высадкой // Экология промышленности России. – август 2008. – С. 13–15.
16. Влияние поверхностного и структурного состояния на качество проката для болтов / А.А. Филиппов [и др.] // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 10–1. – С. 77–82.
17. Пачурин Г.В., Кузьмин Н.А. Эксплуатационные свойства штампуемых листовых сталей // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2014. – № 5–1. – С. 31–36.
18. Филиппов А.А., Пачурин Г.В. Изготовление калиброванного проката под холодную высадку крепежных изделий из стали 38ХА без обточки поверхностных дефектов // Заготовительные производства в машиностроении. – 2009. – № 1. – С. 32–36.
19. Филиппов А.А., Пачурин Г.В. Разработка конкурентоспособных технологий подготовки хромистых сталей под холодную высадку высокопрочных крепежных изделий // Заготовительные производства в машиностроении. – 2008. – № 10. – С. 28–32.
20. Сравнение технологических методов подготовки структурно-механических свойств поверхности проката для высадки метизов с целью снижения воздействия на работников опасных и вредных факторов / А.А. Филиппов [и др.] // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 10–1. – С. 88–96.



21. Филиппов А.А., Пачурин Г.В., Кузьмин Н.А. Снижение опасных и вредных факторов при очистке поверхности сортового проката // *Современные наукоемкие технологии*. – 2016. – № 2–1. – С. 38–43.
22. Подготовка структуры при электротермообработке сталей, применяемых для высадки высокопрочных крепежных изделий / М.В. Бобылев [и др.] // *Сталь*. – 1996. – № 11. – С. 54–58.

### References:

1. Ecological assessment of process of production of renewables / E.N. Sosnina [etc.] // *Modern problems of science and education*. – 2013. – № 6. – P. 174–180.
2. Masleeva O.V., Voyevodin A.G., Pachurin G. V. Thermal impact of alternative sources on the environment // *Modern high technologies*. – 2015. – № 3. – P. 51–54.
3. Masleeva O.V., Pachurin G.V. Complex ecological assessment of life cycle of the small-scale distributed and renewable power generation//the International magazine of applied and basic researches. – 2014. – № 8 – P. 81–86.
4. Pachurin G.V. Life of Plastically Deformed Corrosion-Resistant Steel // *Russian Engineering Research*. – 2012. – Vol. 32. – № 9–10. – P. 661–664.
5. Guslyakova G.P., Zhbannikov S.I., Pachurin G.V. Fatigue failure resistance of deformed structural steels // *Materials Science*. – 1993. – V. 28. – № 2. – P. 182–185.
6. Low-Cost Treatment of Rolled Products Used to Make Long High-Strength Bolts / A.A. Filippov [etc.] // *Metalurgist*. – 2016. – Vol. 59. – № 9–10. January. – P. 810–815.
7. The Factor of Structure and Mechanical Properties in the Production of Critical Fixing Hardware 38XA / G.V. Pachurin [etc.] // *Tribology in Industry*. – 2016. – Vol. 38. – № 3. – P. 385–391.
8. Pachurin G.V., Gushchin A.N., Vlasov V.A. Dolgovechnost sheet low-carbon staly on air and in the corrosion environment // *materials science Questions*. – № 3 (67). – 2011. – P. 125–133.
9. Filippov A.A., Pachurin G.V., Chinenkov S.V. Formation of structural and mechanical properties of steel preparations for the strengthened bolts: monograph / NGTU. – N. Novgorod, 2012. – 151 p.
10. Pachurin G.V., Guslyakova G.P. Effekt of a peening on durability of metals at different temperatures // *Physical and chemical mechanics of materials*. – 1981. – № 5. – P. 127.
11. Pachurin G.V., Gushchin A.N. Increase in operational durability of hardware by technological methods // *Messenger of mechanical engineering*. – 2007. – № 6. – P. 62–65.
12. Pachurin G.V., Vlasov V.A. Mechanical properties of sheet structural steels at operating temperatures // *Metal Science and Heat Treatment*. – 2014. – V. 56. – № 3–4. – P. 219–223.
13. Pachurin G.V. Ruggedness of structural material and working life of metal components // *Steel in Translation*. – 2008. – V. 38. – № 3. – P. 217–220.
14. Pachurin G.V., Filippov A.A. Economical preparation of 40X steel for cold upsetting of bolts // *Russian Engineering Research*. – 2008. – V. 28. – № 7. – P. 670–673.
15. Pachurin G.V., Filippov A.A. Resource-saving and eco-friendly processing of a surface of metal rolling before cold disembarkation // *Ecology of the industry of Russia*. – August, 2008. – P. 13–15.
16. Influence of a superficial and structural state on quality of a hire for bolts / A.A. Filippov [etc.] // *Basic researches*. – 2015. – № 10–1. – P. 77–82.
17. Pachurin G.V., Kuzmin N.A. Operational properties stamped sheet staly // *International magazine of applied and basic researches*. – 2014. – № 5–1. – P. 31–36.
18. Filippov A.A., Pachurin G.V. Production of the calibrated hire under cold disembarkation of fasteners from steel 38XA without turning of superficial defect // *Procuring productions in mechanical engineering*. – 2009. – № 1. – P. 32–36.
19. Filippov A.A., Pachurin G.V. Development of competitive technologies of preparation chromic staly under cold disembarkation of vysokoprochny fasteners // *Procuring productions in mechanical engineering*. – 2008. – № 10. – P. 28–32.
20. Comparison of technological methods of preparation of structural and mechanical properties of a surface of a hire for disembarkation of a hardware for the purpose of decrease in impact on workers of dangerous and harmful factors / A.A. Filippov [etc.] // *Basic researches*. – 2016. – № 10–1. – P. 88–96.
21. Filippov A.A., Pachurin G.V., Kuzmin N.A. Decrease in dangerous and harmful factors when cleaning a surface of high-quality rolled metal // *Modern high technologies*. – 2016. – № 2–1. – P. 38–43.
22. Preparation of structure at electric heat-treatment staly, the high-strength fasteners used to disembarkation / M.V. Bobyliov [etc.] // *Steel*. – 1996. – № 11. – P. 54–58.





УДК 697.34

## ОСНОВНЫЕ ТРУДНОСТИ, СВЯЗАННЫЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГИБКИХ ТЕПЛОИЗОЛИРОВАННЫХ ТРУБ БЕСКАНАЛЬНОЙ ПРОКЛАДКИ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ

### MAJOR OBSTACLES TO FLEXIBLE PIPE SYSTEMS FOR DIRECTLY BURIED HOT WATER NETWORKS

**Чичерин Станислав Викторович**

инженер,  
Акционерное общество  
«Омские распределительные тепловые сети»  
man\_csv@hotmail.com

**Chicherin Stanislav Viktorovich**  
engineer,  
Omsk RTS, JSC, Heating networks  
man\_csv@hotmail.com

**Аннотация.** С учетом расширяющегося применения в России предварительно изолированных труб из полимерных материалов и большого интереса, проявляемого к ним специалистами проектных, строительных и эксплуатационных организаций, ниже предлагается выделить и предложить решение основных проблем, связанных с новой технологией. Производилось изучение каталогов, рекомендаций и альбомов технических решений; оценивалось их влияние на надежность и стоимость готовой тепловой сети. Выделено два критически важных момента. Максимальное внимание должно уделяться местам соединения отдельных труб. Практика показала, что фитинг – это самое слабое место, его надо зафиксировать. Устройство неподвижных опор следует предусмотреть в местах присоединения гибких трубопроводов к стальным трубопроводам на вводах в здания и сооружения со стороны стальных трубопроводов, чтобы вес стальных труб и арматуры не создавал дополнительные нагрузки на гибкие трубопроводы. Способность распространять огонь ограничивает применение трубы при прокладке теплопроводов в подвалах зданий, технических подпольях, тоннелях и проходных каналах. В 2007 году Московская объединенная энергетическая компания приступила к реализации широкомасштабного инвестиционного проекта по перекладке 4 500 км тепловых сетей с применением гибких труб из сшитого полиэтилена и гофрированной нержавеющей стали; для регионов Агентством стратегических инициатив разработан механизм предоставления целевого замещающего финансирования. Ограниченный предел прочности на сжатие изоляционного материала диктует ограничения по максимальному заглублению укладываемых труб, особенно в тех случаях, когда требуется изменение направления трассы трубопровода. Акцент сделан на возможности участия в пилотных проектах модернизации теплосетей с участием государства.

**Ключевые слова:** централизованный, теплоснабжение, трубопровод, предизолированный, полимерный, проблема.

**Annotation.** The investigation described in this paper was aimed at developing and demonstrating a proposal on how best to apply the plastic service pipe concept for district heating. A special module was used to evaluate the realistic drafting and design behaviour and its effects on network energy performance and economy. The study was divided into three groups of issues with common characteristics in regards to its type, age and scale. A linear regression was used to calculate the relationship between the heating set point and environmental factors. The weak spots in plastic piping systems generally occur at the joints, since these are often made in situ. It is recommended to provide anchor points not to mess everything up. Fire-retardant or fire-resistant properties are required in pipes which are, for instance, used as pipes inside buildings. District heating pipes made of plastic have become popular in the last twenty years in all situations where steel pipes can be replaced. The durability of plastic pipes is not a real issue because it has been shown that the expected life of PB pipes and PEx pipes is more than 40 years. Municipalities are likely to be in business again.

**Keywords:** district heating, pipe, preinsulated, bonded, plastic, problem.

## **В**ведение

Повышенная аварийность российских систем теплоснабжения, которая наблюдается в настоящее время, обусловлена применением в 1980–1990-х годах канальной прокладки трубопроводов и использованием недолговечных теплоизоляционных материалов. Плохая гидроизоляция и гидрофобизация волокнистых материалов при длительной эксплуатации не защищают теплоизоляцию от увлажнения [1], а стальные теплопроводы – от коррозии [2]. Повышение надежности эксплуатации тепловых сетей может быть достигнуто посредством применения более коррозионностойких труб (из нержавеющей стали) или антикоррозионных труб (из пластика), нанесения пенополиуретановой (ППУ) теплоизоляции и полиэтиленовой гидрозащитной оболочки в заводских условиях [3]. Искаженное медийное пространство, отсутствие серьезных исследований заставляет ориентироваться лишь на рекомендации заинтересованной стороны – производителей.



### Цель исследования

С учетом расширяющегося применения в России предварительно изолированных труб из полимерных материалов и большого интереса, проявляемого к ним специалистами проектных, строительных и эксплуатационных организаций, ниже предлагается выделить и предложить решение основных проблем, связанных с новой технологией.

### Материалы и методы исследования

Достоверность представляемых результатов может быть обеспечена применяемым методологическим аппаратом. Были использованы имеющиеся у автора сведения практического характера, полученные в процессе работы с проектной и нормативной документацией. Производилось изучение каталогов, рекомендаций и альбомов технических решений; оценивалось их влияние на надежность и стоимость готовой тепловой сети. Другим материалом исследования послужили библиографические источники, выходные данные которых приводятся ниже в виде цитирования. Выделено три критически важных момента:

- 1) повороты трассы на 90° и менее;
- 2) высокая стоимость;
- 3) допустимая глубина заложения.

Несмотря на существование нескольких крупных производителей, вся информация ниже приведена применительно к трубам для сетей ГВС и отопления семейства ИЗОПРОФЛЕКС производства ООО «Группа ПОЛИМЕРТЕПЛО». Такое решение позволяет упростить восприятие материала; кроме того, именно эта продукция наиболее популярна на рынке и пользуется большей известностью среди специалистов.

### Результаты исследования и их обсуждение

В настоящее время нормативным документом для подобной продукции является Свод Правил [4] однако его действие распространяется лишь на сети с максимальной температурой воды 75 °С и постоянным рабочим давлением до 1,0 МПа, прокладываемые бесканально.

1. Повороты трассы на 90° и менее. Поворот на 90° вправо или влево желателен осуществлять с радиусом изгиба трубопроводов в полтора-два раза больше минимального радиуса изгиба. Вариант поворота на 90° с минимальным радиусом изгиба осуществляется с дополнительным изгибом трубопроводов и приводится в каталогах на продукцию ООО «Группа ПОЛИМЕРТЕПЛО».

2. Высокая стоимость. В Западной Европе такие конструкции успешно применяются с середины 60-х годов [5]. В 2007 году «Московская объединенная энергетическая компания» (МОЭК) приступила к реализации широкомасштабного инвестиционного проекта по перекладке 4 500 км тепловых сетей с применением гибких труб из сшитого полиэтилена и гофрированной нержавеющей стали. К моменту написания статьи в Москве примерно 13 % трубопроводов переложено с использованием труб из сшитого полиэтилена, где расчетный срок службы таких теплопроводов составляет 50 лет [6].

У теплоснабжающих организаций в регионах есть деньги на перекладку максимум 1 % сетей, это те скудные средства, которые выделяются на ремонт. Но если сегодня они переложат километр из сотни – завтра обязательно потечет на другом. Чтобы специалисты оценили все достоинства полимерных труб, нужно в каждом городе перекладывать хотя бы один теплосетевой куст полностью – это 10–15 километров. А денег хватает только на 1–2 километра [7]. Регионам остается надеяться на внимание первых лиц государства. Владимир Путин в ходе рабочего визита в Красноярск посетил выставку проектов Агентства стратегических инициатив, где осмотрел экспозицию Группы ПОЛИМЕРТЕПЛО. Представленный компанией проект «Модернизация теплосетевой инфраструктуры регионов РФ с использованием энергоэффективных полимерных труб» в феврале 2016 года был утвержден наблюдательным советом Агентства стратегических инициатив (АСИ). В ближайшее время должен быть разработан механизм предоставления целевого замещающего финансирования, в первую очередь государственными институтами развития. Финансирование в форме долгосрочных кредитов будет выделяться под уже построенные и введенные в эксплуатацию тепловые сети. АСИ совместно с Министерством регионального развития определило пул регионов, где уже в 2016 году предполагается реализовать пилотные проекты модернизации теплосетей по схеме «трубы в кредит» с участием государства. Это Ярославская, Тамбовская, Омская и Челябинская области, Приморский край и Республика Хакасия.

Следует понимать принципиальную невозможность использования термина «погонный метр трубы» для тепловых сетей бесканальной прокладки, т.к. в него входит лишь стоимость мерного отрезка от бухты гибкой трубы (самого простого, исходя из процесса производства, элемента трубопровода), и не включается стоимость более дорогих фасонных элементов, запорной арматуры и других компонентов, без которых невозможно обеспечить работоспособность системы. Руководствуясь ценой на погонный метр, следует учитывать и неминуемые расходы, необходимые на перевозку материалов на место монтажа, а также стоимость финансирования, распределенную по времени, т.к. цена на погонный метр ничего не говорит о возможности снизить затраты за счет предварительной или, наоборот, отсроченной оплаты. Таким образом, для того чтобы дать реальную оценку стоимости проекта, следует руководствоваться лишь окончательными коммерческими предложениями производителей и официальных дилеров, сделанными на базе монтажных схем или эскизов.



3. Допустимая глубина заложения при бесканальной прокладке. Техническими условиями на трубы ИЗОПРОФЛЕКС предусмотрено испытание их поперечного сечения на сжатие: кольцевая жесткость, контролируемая по ТУ 2248-021-40270293-2 2005, составляет  $15,0 \text{ кН/м}^2$ . Исследование показало, что временная нагрузка от подвижного транспорта, должна быть принята в соответствии со СНиП 2.05.03-84 в виде нагрузки типа НГ-60, т.е. нормативной нагрузки, состоящей из одиночной, типичной на строительной площадке, машины на гусеничном ходу весом 583 кН (60 тс). Равномерно распределенное давление, создаваемое техникой такого рода на инженерные коммуникации, уменьшается с величины порядка  $60 \text{ кН/м}^2$  на объекты, находящиеся на глубине 0,5 м, до  $3,9 \text{ кН/м}^2$  – на глубине 8 м, что путем интерполяции позволяет сделать вывод о минимальной допустимой глубине заложения 2,6–2,7 м при бесканальной прокладке либо необходимости использовать бетонные разгрузочные плиты при проведении строительно-монтажных работ.

Использование технологии реконструкции наружных сетей ГВС с применением коррозионно-стойких трубопроводов нового поколения в г. Омске является безусловной новацией, предпочтительной для снижения эксплуатационных затрат и потерь тепловой энергии при ее транспортировке от ЦТП до конечных потребителей. Муниципальным предприятием города Омска «Тепловая компания», на балансе которого находятся омские ЦТП, в рамках инвестиционной программы в сфере теплоснабжения на 2015 – 2030 годы, утвержденной приказом Региональной энергетической комиссии Омской области от 30.10.2014 N229/60 (ред. от 30.11.2015), предлагается замена более 15 тыс. метров коммуникаций от ЦТП-504, 305, 601, 602 в зоне действия ТЭЦ-5 и ТПНС-688, 652, 615 в зоне действия Кировской районной котельной (КРК).

### Заключение

Практическая значимость состоит в освещении важных моментов, связанных с применением новой технологии: например, поворотов на  $90^\circ$ ; предложено и решение проблемы: выполнение дополнительного изгиба. На некоторой доле от общего числа сетей нельзя использовать современные технологии: например, использование трубопроводов из сшитого полиэтилена и стальных трубопроводов в ППУ-изоляции в подвалах зданий и в коллекторах запрещено [8]. Ограниченный предел прочности на сжатие изоляционного материала диктует ограничения по максимальному заглублению укладываемых труб, особенно в тех случаях, когда требуется изменение направления трассы трубопровода [9]. Акцент сделан на возможности участия в пилотных проектах модернизации теплосетей с участием государства.

### Литература:

1. Чичерин С.В. Процесс образования и развития электрохимической коррозии трубопроводов // Энергосбережение и водоподготовка. – 2017. – № 2 (106). – С. 46–47.
2. Чичерин С.В. Повышение надежности тепловой сети путем применения труб повышенной коррозионной стойкости // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2016. – № 6 (58). – С. 34–36.
3. Умеркин Г.Х. Надежность систем теплоснабжения : дисс. ... д-ра техн. наук. – 2003. – 52 с.
4. СП 41-107-2004 Проектирование и монтаж подземных трубопроводов горячего водоснабжения из труб ПЭ-С с тепловой изоляцией из пенополиуретана в полиэтиленовой оболочке
5. Бухин В.Е. Предварительно изолированные трубопроводы для систем централизованного теплоснабжения // Теплоэнергетика. – 2002. – № 4. – С. 24–29.
6. Петраков Г.П. Срок службы пластиковых труб в пенополиуретановой изоляции, применяемых для систем теплоснабжения // Инженерно-строительный журнал. – 2012. – Т. 29. – № 3. – С. 54–62. doi: 10.5862/MCE.29.7
7. Рубан О. Труба на полвека // Эксперт. – 2012. – №11 (794).
8. Виньков А. Нас считали немножко сдвинутыми // Эксперт. – 2011. – № 42 (775).
9. Бухин В.Е. Трубопроводы из полимерных материалов для тепловых сетей // Теплоэнергетика (Москва). – 2004. – № 4. – С. 43–49.

### References:

1. Chicherin S.V. The process of formation and development of electrochemical corrosion of the heat distribution pipe system // Energysaving and Watertreatment. – 2017. – № 2 (106). – P. 46–47.
2. Chicherin S.V. Enhancement of the district heating network performance by means of upgrading the corrosion resistance of a piping system // Pipeline transport: theory and practice. – 2016. – № 6 (58). – P. 34–36.
3. Umerkin G.Kh. The reliability of heat supply systems : Thesis for the degree of Doctor of Technical Sciences. – 2003. – 52 p.
4. 41-107-2004 SP Design and assembly of underground heating water pipelines made of PE-X pipes with foamed polyurethane thermal insulation in polyethylene jacket
5. Bukhin V.E. Preinsulated pipelines for district heat supply systems // Thermal engineering. – 2002. – V. 49. – №. 4. – P. 24–29.
6. Petrakov G.P. The service life of plastic pipe in the polyurethane foam insulation, used for heating systems // Magazine of Civil Engineering. – 2012. – № 3. – P. 54–62. doi: 10.5862/MCE.29.7
7. Ruban O. Tube for half a century // Expert. – 2012. – № 11.
8. Vinkov A. We were felt a little shifted // The Expert. – 2011. – № 42.
9. Bukhin V.E. Polymeric pipelines for heat supply networks // Thermal engineering. – 2004. – №. 4. – С. 43–49.



УДК 620.91:621.472

## ПОЛУЧЕНИЕ ХОЛОДА ИЗ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ. РАЗРАБОТКА ГЕЛИОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ТЕРМОТРАНСФОРМАТОРОВ ЦИКЛИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

### RECEIVING COLD FROM SOLAR ENERGY. DEVELOPMENT OF HELIOPOWER THERMOTRANSFORMERS OF CYCLIC ACTION

**Шипулина Ю.В.**Астраханский государственный технический университет  
id.yug2016@gmail.com**Руденко А.М.**

Астраханский государственный технический университет

**Ермачков А.А.**

Астраханский государственный технический университет

**Власов В.А.**

Астраханский государственный технический университет

**Григорьев М.И.**

Астраханский государственный технический университет

**Аннотация.** Рассматриваются принципы преобразования энергии солнечной радиации в термотрансформаторах сорбционного типа для получения теплоты и холода. Приведены принципы работы термотрансформаторов «сухой» абсорбции на рабочей паре хлорид кальция – аммиак и адсорбционного типа на рабочей паре – активированный уголь – аммиак. Повышение эффективности работы таких установок достигается за счет применения сорбентов из щелочноземельных металлов с примесями графита, использования новых технологий получения селективных покрытий реакторов и разработкой новых технических решений экспериментальных образцов аппаратов и самих термотрансформаторов. Полученные экспериментальные характеристики доказывают эффективность получения охлаждающего эффекта при прямом солнечном облучении гелиоприемного аппарата термотрансформатора.

**Ключевые слова:** солнечная энергетика, термотрансформаторы, «сухая» абсорбция, сорбенты, адсорбаты, эффект охлаждения.

**Shipulina Yu.V.**Astrakhan state technical university  
id.yug2016@gmail.com**Rudenko A.M.**

Astrakhan state technical university

**Ermachkov A.A.**

Astrakhan state technical university

**Vlasov V. A.**

Astrakhan state technical university

**Grigoriev M.I.**

Astrakhan state technical university

**Annotation.** The principles of transformation of energy of solar radiation in thermotransformers of sorption type for obtaining warmth and cold are considered. The principles of operation of thermotransformers of Sukhoi of absorption are given in working couple calcium chloride – ammonia and the adsorptive type on working couple – absorbent carbon – ammonia. Increase in overall performance of such installations is reached due to application of sorbents from shchelochnozemelny metals with impurity of graphite, use of new technologies of receiving selective coverings of reactors and development of new technical solutions of experimental samples of devices and thermotransformers. The received experimental characteristics prove efficiency of obtaining the cooling effect at direct solar radiation of the helioreception device of the thermotransformer.

**Keywords:** solar power, thermotransformers, «dry» absorption, sorbents, adsorbates, effect of cooling.

Энергетической программы развития экономики России до 2020 г. предусматривается широкое внедрение нетрадиционных, возобновляемых источников энергии: солнечной, геотермальной, приливной, ветровой, а также биомассы для различных систем народного хозяйства.

Следует отметить, что особый интерес представляет использование в южных регионах страны энергии солнечной радиации для получения теплоты и холода.

Наиболее благоприятные климатические зоны эксплуатации гелиоэнергетических установок в России являются Нижнее Поволжье (Астраханская и Волгоградская области), Кавказский регион, Краснодарский, Ростовский и Ставропольские края, Хакасия, Забайкальский край и Дальний Восток.

Тепловую энергию от Солнца получают или через теплоноситель при помощи прямого воздействия на коллекторные устройства, или фокусированием солнечных лучей через гелиостаты на объекты нагрева, концентрируя через зеркальные отражатели или линзы Френеля на различные адаптирующие поверхности и т.п. Эту тепловую энергию используют для получения технической горячей воды в системах отопления, водоснабжения, технологических процессах и т.д. [1].

А вот получение холода из энергии солнечной радиации является задачей весьма не простой [2].



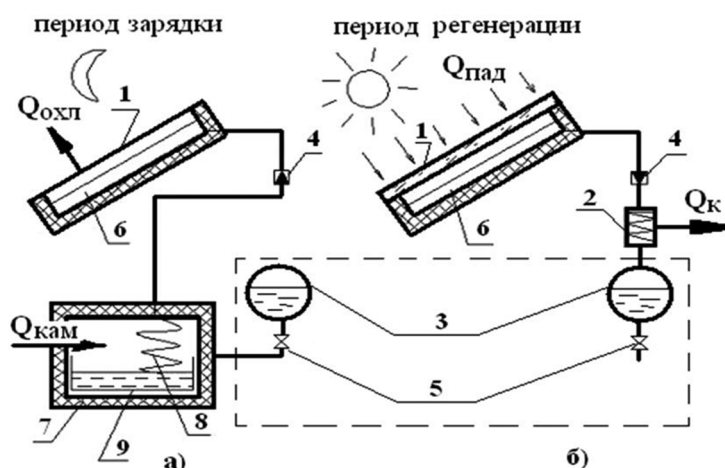
Анализ существующих способов и методов получения холода с точки зрения улучшения экологии, снижения использования традиционного топлива (угля, жидкого топлива, газа и т.д.), уменьшения эксплуатационных затрат и т.п. с помощью солнечной энергии позволяет выделить сорбционный способ преобразования через термотрансформаторы как наиболее перспективный [3].

В настоящее время у нас в стране и за рубежом разработаны и эксплуатируются абсорбционные бромистолитиевые термотрансформаторы большой, средней и малой холодопроизводительности, применяемые в основном для охлаждения воды на ТЭЦ, кондиционирования воздуха в жилых помещениях, хранения пищевых продуктов и медикаментов.

Опыт создания абсорбционных гелиоэнергетических термотрансформаторов выявил специфическую особенность их проектирования: необходимость учета количества энергии солнечной радиации, падающей на квадратный метр земной поверхности, продолжительности солнцестояния в сезоне предполагаемой эксплуатации, метеорологических параметров движения солнца по небосводу. Исходя из этого, в установках предусматривают сильно развитые поверхности гелиоприемной части (солнечные коллекторы, генераторы, генератор-абсорберы) ориентированные в строго определенном направлении с оптимальным углом наклона к горизонту, меняющимся при движении солнца. Более высокая температура обогрева генератора гелиоэнергетического термотрансформатора повышает ее эффективность (КПД), но в то же время усложняет конструкцию гелиоприемной части и удорожает стоимость.

В настоящее время интенсивно развиваются гелиоэнергетические термотрансформаторы циклического действия: «сухой» абсорбции и адсорбционного типа, которые показывают хорошие характеристики в реестре малых гелиоэнергетических холодильных установок для использования в быту.

В основе работы гелиоэнергетического термотрансформатора циклического действия лежат известные обратимые экзотермические сорбционные процессы, периодически протекающие в аппаратах установки за счет суточных изменений температуры и давления (рис. 1).



**Рисунок 1** – Принцип работы гелиоэнергетических сорбционных термотрансформаторов циклического действия: 1 – генератор-адсорбер; 2 – конденсатор; 3 – ресивер; 4 – обратные клапана; 5 – дросселирующий (запорный) вентиль; 6 – реактор; 7 – охлаждающая камера; 8 – испаритель; 9 – аккумулятор холода; а – режим работы ночью (теплота подводиться в охлаждаемой камере  $Q_{кам}$ , а отводиться в генераторе адсорбере  $Q_{охл}$ ); б – режим работы днем теплота подводиться в генераторе – адсорбере к реактору  $Q_{пад}$ , а отводиться в конденсаторе  $Q_{к}$ )

Днем – высокие температуры и давления, за счет энергии солнечной радиации, позволяют осуществлять протекания процессов десорбции (выделение паров хладагента из сорбента) и конденсации (сжижение паров хладагента и накопления конденсата в ресивере) – это, так называемый процесс регенерации. Ночью – низкие температуры и давление (за счет ночной температуры окружающей среды и сорбционных процессов) позволяют осуществлять процессы испарения из жидкого состояния хладагента и поглощения его сорбентом – это, так называемый процесс – «сухой» абсорбции или адсорбции в зависимости от применяемого сорбента.

В термотрансформаторах «сухой» абсорбции могут использоваться различные соли:  $SrBr_2$ ,  $CaBr_2$ ,  $MnCl_2$ ,  $CdCl_2$ , и  $BaCl_2$  но наибольшее применение нашли соли щелочноземельных металлов  $CaCl_2$  и  $SrCl_2$ , а хладагентом – аммиак [3]. В адсорбционных термотрансформаторах в качестве сорбентов используется активированный уголь АС, силикагель, цеолит, а хладагентом является аммиак, метанол, вода [4].

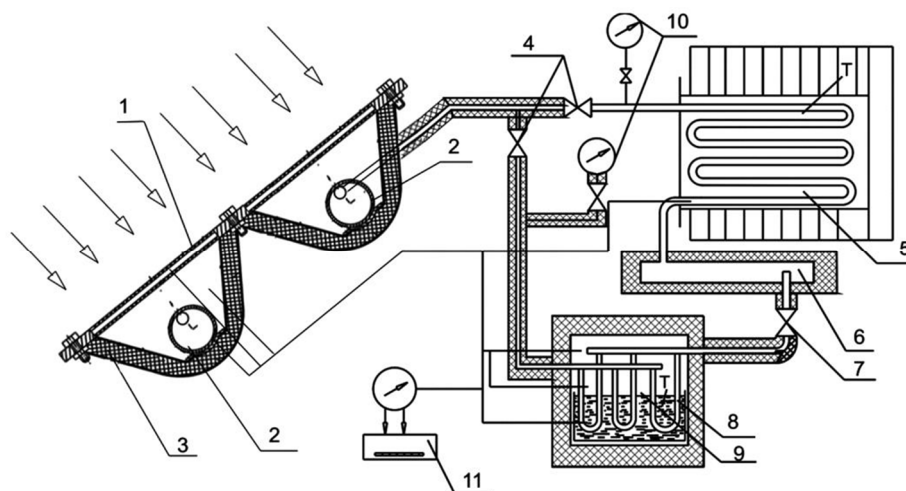
Наибольшее применение в гелиоэнергетических термотрансформаторах получила рабочая пара  $CaCl_2$  – аммиак. Один моль сухой соли  $CaCl_2$  при охлаждении способен поглотить 1, 2, 4 или 8 молей  $NH_3$ . При этом соответственно образуются моно-, ди-, тетра- или октоаммиакаты хлористого кальция. Соль хлористого стронция, например, может образовывать только моно-, ди- и октоаммиакаты. Существование комплексного образования таких соединений зависит и определяется только температурой.



В сорбционных термотрансформаторах химико-физические процессы в реакторах генератора-абсорбера проходят на стадии образования окто- или тетрааммиакатов, потому что образование диаммиаката требует подвода или отвода значительно большей тепловой энергии до достижения необходимых параметров температуры. Комплекс октоаммиаката ( $\text{CaCl}_2 \cdot 8\text{NH}_3$ ) существует при  $-95$ – $100$  °С, комплекс тетрааммиаката ( $\text{CaCl}_2 \cdot 4\text{NH}_3$ ) существует при  $-105$ – $110$  °С, комплекс диаммиаката ( $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{NH}_3$ ) существует при  $-115$ – $120$  °С, а при прогреве соли до  $125$ – $130$  °С она становится сухой [3]. Соль  $\text{SrCl}_2$  имеет более низкие температуры существования комплексов, да к тому же переход сразу из диаммиаката в октоаммиакат, значительно снижает количество подводимой тепловой энергии. Однако использование  $\text{CaCl}_2$  определяется более низкой стоимостью и более высокой удельной сорбционной способностью – на 1 кг сухой соли приходится 1,22 кг аммиака.

Несмотря на хорошие сорбционные качества щелочноземельных солей, теплофизические характеристики их (теплопроводность, теплоемкость, температуропроводность) остаются низкими. Это особенно плохо сказывается на протекании физико-химических реакций в реакторах генератора-абсорбера гелиоэнергетического термотрансформатора (неравномерный подвод и отвод тепловой энергии, большая насыпная масса соли, изменение объемных параметров при формировании стадий комплексных соединений, неравномерность распределения внутри реактора тепловых потоков энергии и температурных параметров). Поэтому поиски перспективных сорбентов, комплексных добавок к уже известным сорбентам, являются прогрессивными тенденциями в вопросе повышения эффективности работы таких термотрансформаторов.

В Астраханском государственном техническом университете на протяжении ряда лет ведутся разработки и испытания сорбционных термотрансформаторов циклического действия. Экспериментальная установка последней конструкции представлена на рисунке 2. Гелиоэнергетический термотрансформатор представляет установку состоящую из следующих основных аппаратов: генератора-адсорбера 1 совмещенного исполнения, выполненного заодно с плоскими концентраторами солнечной энергии 2, трехкратно фокусирующими на цилиндрическую поверхность реактора 3 генератора-адсорбера энергию солнечной радиации; конденсатор 4 воздушного или водяного охлаждения; ресивер 5 – накопитель конденсата; испаритель 6, встроенный в охлаждаемую камеру 7; обратные клапаны 8, 9; запорный вентиль 10 – осуществляющий подачу холодильного агента в испаритель.



**Рисунок 2** – Схема конструкции экспериментального гелиоэнергетического термотрансформатора «сухой» абсорбции

Как было сказано выше, только ночью осуществляется процесс охлаждения, причем температура на стенках испарителя при испарении, например, аммиака может достигать отрицательных значений, что не только охлаждает воздух в изолированном пространстве камеры 11, но и приводит к замораживанию воды в ванночки 12, установленной в холодильном контуре. Лед, полученный в ночное время, является аккумулятором холода днем, поддерживая низкую температуру.

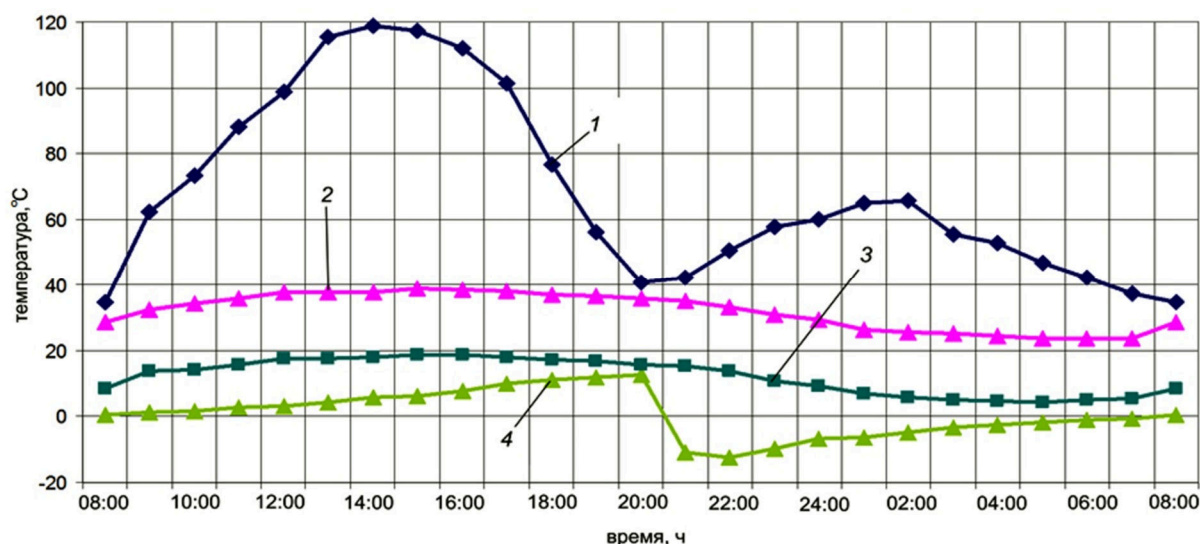
Экспериментальные исследования по повышению эффективности термотрансформаторов. В зависимости от заправки реактора генератора-адсорбера сорбентом в термотрансформаторе могут протекать химико-физические реакции: «сухая» абсорбция – десорбция (термотрансформаторы «сухой» абсорбции) С целью улучшения теплофизических свойств сорбентов в работах проводились исследования по применению графитовых добавок в соединениях солей  $\text{CaCl}_2$  и  $\text{SrCl}_2$  [4]. Графит на порядок выше имеет коэффициент теплопроводности ( $\lambda_{\text{солиCaCl}_2} = 0,05 \text{ Вт/м}^2$ ;  $\lambda_{\text{графит}} = 18,3 \text{ Вт/м}^2$ ). Порошок графита – мелкозернистый материал, хорошо перемешивающийся и проникающий между кри-



сталлами аммиакатов, он ведет себя в смесях как металл, не вступая ни в какие реакции с жидкостями. Результаты исследований показали, что коэффициент теплопроводности с увеличением добавок графита в соли возрастает у  $\text{CaCl}_2$  приблизительно в 4 раза по сравнению с чистой солью, тогда как у  $\text{SrCl}_2$  лишь в 1,3 раза. Это можно объяснить структурой данных солей:  $\text{CaCl}_2$  – сыпучий мелкодисперсный белый порошок, тогда как  $\text{SrCl}_2$  имеет игольчатую структуру. При утрамбовке солей уже не наблюдается такого разброса в полученных данных, т.к. у  $\text{SrCl}_2$  разрушаются иглы, что обеспечивает плотность прилегания частиц соли друг к другу. Вторым направлением повышения эффективности работы реакторов генератора-абсорбера гелиоэнергетического термотрансформатора является разработка технологии нанесения специальных селективных покрытий на инсолирующие поверхности, в частности на реактор генератора-адсорбера. Разработано было несколько видов селективных покрытий, защищенных патентами РФ (№ 2137861, № 2287613, № 2365676) [5–7]. В основе получения этих покрытий лежат методы черного хроматирования цинка, черного оксидирования стали, осаждения черных антикоррозионных покрытий на сталь. Полученные при этом электролиты помимо известных веществ, имеют соединения с новыми структурными формулами. Такие комплексные соединения позволяют не только улучшить инсолирующие свойства поверхностей, но и эксплуатационные и эстетические. Такие покрытия позволяют увеличить эффективность работы поверхностей по сравнению с простым окрашиванием матовой черной краской в 1,8–2 раза.

Третьим направлением улучшения работы термотрансформаторов является усовершенствование конструкций как реакторов генераторов-абсорберов, так и самих установок. Разработано несколько оригинальных конструкций реакторов (Патенты РФ № 21379911 и № 2263859). В основе разработок лежат подвижные элементы деталей, компенсирующие объемные изменения сорбента при образовании и распаде аммиакатов, которые могут достигать 3-х кратных размеров, и металлические конструктивные фрагменты, улучшающие подвод и отвод тепловой энергии во внутренние слои сорбента, а также капсульный способ зарядки реактора армированными гильзами, включающими в себя подвижные винтообразные детали из сплава с памятью формы. Разработана также новая конструкция автономного гелиоэнергетического холодильника (Патент РФ № 2315923). Отличительной особенностью гелиоэнергетического холодильника является горизонтально расположенные на различных уровнях относительно Земли реакторы имеющие два входа и выхода хладагента, один хладопроводящий неизолированный коллектор-конденсатор и дополнительный ресивер, автоматизированная работа осуществляется тремя терморегулирующими вентилями и перепускными трубками соединяющие испаритель и ресивера по температурным перепадам в генераторе-абсорбере.

Экспериментальные испытания термотрансформатора. Испытания подобной рисунку 2 схеме конструкции гелиоэнергетического термотрансформатора были проведены летом на открытом полигоне в условиях климата Астраханского региона. На рисунке 3 представлены графики изменения среднестатистических значений температур в аппаратах установки в течении суток.



**Рисунок 3** – График изменения среднестатистических значений температур гелиоэнергетического термотрансформатора «сухой» абсорбции и параметров окружающей среды в течении суток:

1 – поверхность генератора-абсорбера; 2 – наружного воздуха; 3 – в холодильной камере; 4 – в испарителе

Из графика видно, что максимальная температура поверхности реакторов генератора-абсорбера может достигать 118–120 °C (это проявляется примерно в 12 часов солнечного времени); в ночное время нагрев реакторов может достигать 68–70 °C, что может использоваться для нагрева



теплоносителя. Таким образом, теплоту в гелиоэнергетическом термотрансформаторе можно поддерживать практически круглые сутки. Охлаждающий эффект может быть достигнут только в ночное время, как видно из графика в условиях Астрахани с 21–22 часов при этом температура сначала резко падает до минус 15 °С, а затем медленно расчет растет сохраняя отрицательные параметры в течение всего ночного времени.

В последние годы изучалась работа сорбционных термотрансформаторов адсорбционного типа циклического действия. Изучалась работа на рабочей паре – АС (активированный уголь) – аммиак и АС-метанол. В отличие от установок «сухой» абсорбции термотрансформаторы адсорбционного типа на аммиаке имеют несколько меньший термодинамический коэффициент преобразования солнечной энергии в охлаждение, для их работы необходимо создавать выше температуру обогрева реактора, а при работе на метаноле, необходимо поддерживать в установке вакуум. Пожалуй, действительным достоинством этих термотрансформаторов является: неизменность объема сухого и насыщенного хладагентом сорбента в рабочем цикле, низкая коррозионная активность сорбента и меньшие весовые характеристики при работе на вакууме.

Таким образом, по результатам рассмотренного материала можно сделать следующие выводы:

- в Астраханском государственном техническом университете разработана прочная фундаментальная база для разработки, совершенствования и внедрения в различные отрасли производства гелиоэнергетических термотрансформаторов циклического действия: «сухой» абсорбции и адсорбционного типа;
- исследованы теплофизические параметры различных рабочих пар (сорбент-хладагент) на основе щелочноземельных солей с примесями порошкового графита и активированных углей с такими хладагентами как аммиак, метанол и получены новые селективные покрытия на различных адаптирующих поверхностях;
- разработаны новые конструкции элементов гелиоэнергетических термотрансформаторов и схемные решения самих новых конструкций установок;
- изготовлен экспериментальный образец гелиоэнергетического термотрансформатора и проведены испытания его работы на рабочей паре  $\text{CaCl}_2$  с примесью графита – аммиак, доказывающие положительный эффект получения теплоты и холода в условиях южного региона страны.

#### Литература:

1. Руденко М.Ф. Теоретические основы проектирования экологически безопасной гелиоэнергетической техники для производства теплоты / М.Ф. Руденко, Б.Ж. Туркпенбаева, Ю.В. Чивиленко; АктГУ им. Ш. Есенова. – Актау, 2008. – 165с.
2. Руденко М.Ф. Гелиоэнергетические термотрансформаторы «сухой» абсорбции циклического действия / М.Ф. Руденко, Ю.В. Шипулина; Астрахан. гос. техн. ун-т. – Астрахань : Изд-во АГТУ, 2013. – 172 с.
3. Чивиленко Ю.В. Повышение эффективности экологически безопасных гелиоэнергетических холодильных установок циклического действия / Ю.В. Чивиленко, Б.Ж. Туркпенбаева, М.Ф. Руденко // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2008. – № 6. – С. 17–20.
4. Каримов М.Ш. Повышение эффективности работы гелиоэнергетического термотрансформатора адсорбционного типа // М.Ш. Каримов, М.Ф. Руденко, Ю.В. Шипулина // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2016. – № 3. – С. 31–35.
5. Патент РФ № 2365676 Электролит для осаждения черных антикоррозионных оксидных покрытий на сталь. 27.08.2009 Бюл. № 24.
6. Патент РФ № 2263859 Реактор генератора-абсорбера гелиоохлаждающей установки (варианты) 10.11.2005 Бюл. № 31.
7. Патент РФ № 2315923 Гелиоэнергетический холодильник 27.01.2008. Бюл. № 3.

#### References:

1. Rudenko M.F. Theoretical bases of design of ecologically safe heliower equipment for production of warmth / M.F. Rudenko, B.Zh. Turkpenbayeva, Yu.V. Chivilenko; AktGU of Sh. Esenov. – Aktau, 2008. – 165 p.
2. Rudenko M.F. Heliower thermotransformers of Sukhoi of absorption of cyclic action / M.F. Rudenko, Yu.V. Shipulina; Astrakhan. state. techn. un-t. – Astrakhan : AGTU publishing house, 2013. – 172 p.
3. Chivilenko Yu.V. Increase in efficiency of ecologically safe heliower refrigeration units of cyclic action / Yu.V. Chivilenko, B.Zh. Turkpenbayeva, M.F. Rudenko // Chemical and oil and gas mechanical engineering. – 2008. – № 6. – P. 17–20.
4. Karimov M.Sh. Increase in overall performance of the heliower thermotransformer of the adsorptive type // M.Sh. Karimov, M.F. Rudenko, Yu.V. Shipulina // Chemical and oil and gas mechanical engineering. – 2016. – № 3. – P. 31–35.
5. The patent of the Russian Federation № 2365676 Electrolyte for sedimentation of black anticorrosive oxidic coverings on steel. 8/27/2009. Bulletin № 24.
6. The patent of the Russian Federation № 2263859 Reactor of the Generator Absorber of the Heliorefrigeration Unit (options) 11/10/2005. Bulletin № 31.
7. Patent of the Russian Federation № 2315923 Heliower refrigerator 1/27/2008. Bulletin № 3.





УДК 621.891: 622.67

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ НАНОСТРУКТУРНЫХ ФРИКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ТОРМОЗНЫХ СИСТЕМ

### INVESTIGATION OF TRIBOTECHNICAL EFFICIENCY OF NANOSTRUCTURED FRICTION MATERIALS FOR BRAKE SYSTEMS

**Юсубов Фикрет Фахраддин**

аспирант,  
Азербайджанский Государственный Университет  
Нефти и Промышленности  
fikratyusub@gmail.com

**Yusubov Fikrat Fakhraddin**

Ph. D. Student,  
Azerbaijan State Oil and Industry University  
fikratyusub@gmail.com

**Аннотация.** В настоящей работе представлены трибологические свойства нанокompозитных материалов различной структуры; а также изучены влияние модификаторов, наполнители на показателях качества композиционных материалов.

**Annotation.** In this work tribological properties of various nanocomposite materials were investigated; the effects of modifiers, fillers on properties of composite materials has been studied.

**Ключевые слова:** нанокompозиты, фрикционных материалов, трение, износ, тормозные колодки.

**Keywords:** nanocomposites, friction materials, friction, wear, brake blocks.

**В** настоящее время с целью повышения качественных показателей в тормозных системах пар трения были исследованы различные типы материалов. Однако, для фрикционных узлов работающих в тяжелых условиях потери физико-механических свойств и износ были всегда характерными.

Надежность и эффективность таких оборудований сильно зависит от качества фрикционного материала. Это определяет сохранение фрикционных свойств пар трения от различных влияний. При торможении способность фрикционных материалов в момент приема статических и динамически нагрузок образующаяся теплота приводит к износу и деструкции рабочей поверхности. По этой причине наряду со стойкостью материалов к температуре и износу сохранение при высоких температурах коэффициента трения является важнейшим факторам [1]. Развитие нанотехнологии создало условия для одновременного выполнения всех этих требований.

Применение наночастиц при изготовлении новых материалов наряду с влиянием на структуру материалов а также последовательность распределения добавок в матрице и закономерности их построения создают условия для изменения физико-механических свойств. Естественно в зависимости от характера структуры для этих материалов могут быть получены различные результаты в трибо-механически деятельности. В тормозных системах фрикционные материалы являются основным рабочим элементом. Так как качества материала в целом влияет на рабочую способность оборудования. При изменении в широком диапазоне скорости скольжения контактирующие пары должны обеспечивать стабильное давления, температуру и коэффициент трения. Кроме того, учитывая возможность возгорания ответная реакция на воздействие атмосферы должна быть низкой, износные и другие механические показатели должны иметь устойчивые характеристики [2].

При исследовании трибо-термического износа нанокompозитных материалов синтезированных металлургическим способом на основе порошка  $Fe-Al_2O_3$  выявлено что адгезивный износ присходит при низких нагрузках, а абразивный износ присходит при высоких нагрузках. Причем независимо от вида материала износ на поверхности образца был очень низким [3].

В таблице 1 показано влияние различных наполнителей на показатели качества различных нанокompозиционных материалов на основе металлов. Нужно отметить что допущенные незначительные различия при изготовлении материала могут привести изменению показателей качества. Выше отмеченные нанокompозиты на основе железного порошка в зависимости от времени синтеза и температуры проводят к различным степеням износа.

Если время синтеза будет одинаковым а температура низкой то процент износа будит высоким что можно объяснить изменениями происходящими в структуре [4].

В последнее время, при помощи различных наполнителей наноразмеров были получены твердые композиционные материалы на основе полимеров что открыло путь к исследованию этих материалов области трибологии [6].

Износная интенсивности пар трения зависит от свойства материалов технологии обработки поверхности и качества, а также от условий эксплуатации- нагрузки, температуры, смазки и др. [7].



Таблица 1 – Влияние наполнителей на свойства металлических нанокompозитов [5]

Матрица / Наполнители		Показателей
Ag	Au	Улучшение каталитической активности
Ni	ЧСЦ, ЦСИ	Повышенная твердость и прочность
Cu	Nb	Улучшенная микротвердость
Al	AlN	Более высокое сжатие сопротивление и предел натяжения
Al	SiC	Улучшенные модули твердости и упругости
УН	Sb, SnSb0,5	Улучшения в Li + свойства интеркаляции
Cu	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Улучшенная микротвердость
УН	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Улучшенная электрическая проводимость

Примечание: ЧСЦ – Частично стабилизированный диоксид циркония; ЦСИ – Цирконий-стабилизированный иттрий; КВ – Углеродная нанотрубка.

Улучшение показателей качества и что более важно для решения экологических проблем использование в качестве наполнителей природных волокон привело увеличению спроса нанокompозитных материалов. Проведение многочисленных исследований показало что, связь между волокнами и матрицей является одним из основным факторов влияющи на показатели трения и износа. Известно что, с увеличением нагрузки увеличивается степень износа материалов. Однако в случае композиционных материалов это может отличаться. Так как примененная нагрузка зависит от выбора матрицы и вида природного волокна по разному влияет на трение и износ [8].

Композиция Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ti(CN) свойства которой увеличена наночастицами TiCN при комнатной температуре и 500 °С на воздухе при исследовании действия трения против сплава Ni-Cr было обнаружено что в зависимости от количества наночастиц наблюдается различие в механических показателях. При низких массовых процентах чистечек TiCN композиты более крепкие и сопротивление более высокое и наоборот если количество чистичек 20–40 кт. % эти показатели бывают низкими [9, 10]. Низкая температура синтеза не приводит к образованию плотных микроструктур и поэтому при трении чистички с лекостью отделяются и при скольжении на поверхности создаются условия абразивное износа. Также материалы состоящие из 20 кт. % наночастичек TiCN коэффициент трибо-окислительного трения значительно уменьшается.

В другом образце полученным способом горячего прессования в среде аргона имеющим в своем составе чистички SiC (40–200 nm) на основе Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> при исследовании трибологической деятельности показало что в полученной композиции твердость по Виккерсу увеличивается. Чистички SiC действуя на матрицу приводят к изменению микроструктуры композиции и как результат структурного именения при сухом трении степень износа материала чувствительно уменьшается. Во всех образцах износ связан с пластической деформацией [11].

При высоких температурах в результате трибо-окисления образованные оксиды смазки для материалов Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ti(CN) придают им хорошие смазочные свойства [12].

Наше исследования показало что, в зависимости от распределения наполнителя и модификаторов матрице приводит к значительным различиям показателей качества. Одновременно, взаимодействие просходящее между компонентами композиционных материала на раличных этапах происходят соответствующие изменения. Полученные результаты приводят к искоренению ряда недостатков буровых установок.

### Литература:

1. Александров М.П. Тормоза подъемно-транспортных машин. 3-е изд. – М. : Машиностроение, 1976. – 383 с.
2. Зельцерман И.М., Каминский Д.М., Онопо А.Д. Фрикционные муфты и тормоза гусеничных машин. – М. : Машиностроение, 1965. – 240 с.
3. Zishan Husain Khan. Recent Trends in Nanomaterials: Synthesis and Properties, Chapter 2 // Wear Behavior of Composites and Nanocomposites: A New Approach, Springer Singapore. – 2017. – P. 45–47.
4. Малыгин А.А. Физика поверхности и нанотехнология: взаимосвязь и перспективы // Соросовский образовательный журнал. – 2004. – Т. 8. – № 1. –С. 7–21.
5. Pedro Henrique Cury Camargo, Kestur Gundappa Satyanarayana, Fernando Wypych. Nanocomposites: Synthesis, Structure, Properties and New Application Opportunities (Review Article) // Materials Research. – Vol. 12. – № 1. –SciELO. – 2009. – P. 13.
6. B.M. Caruta, Nanomaterials: New Research, Nova Science Publishers, Inc. New York, 2005. – P. 412.
7. А.Ә. Quliyev, A.V. Şerifova. Kompozisiya materialları. – ADNSU nəşri. Bakı, 2016. – 105 səh.
8. Emad Omrani, Pradeep L. Menezes, Pradeep K. Rohatgi. State of the art on tribological behavior of polymer matrix composites reinforced with natural fibers in the green materials world // Engineering Science and Technology, an International Journal. – № 19. – Elsevier B.V. – 2016. – P. 717–736.



9. Limpichaipanit A., Todd R.I. The relationship between microstructure, fracture and abrasive wear in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiC nanocomposites and microcomposites containing 5 and 10 % SiC // *Journal of the European Ceramic Society*. – Vol. 29 (13). – Elsevier. – 2009. – P. 2841–2848.

10. José L., Ortiz-Merino J.L., Todd R.I. Relationship between wear rate, surface pullout and microstructure during abrasive wear of alumina and alumina/SiC nanocomposites // *Acta Mater.* – Vol. 53 (12). – Elsevier. – 2005. – P. 3345–3357.

11. M. Parchovianský, J. Balko, P. Švančárek, J. Sedláček, J. Dusza, F. Lofaj, D. Galusek. Mechanical properties and sliding wear behaviour of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiC nanocomposites with 3–20 vol % SiC // *Journal of the European Ceramic Society*. – Vol. 37 (14). – Elsevier. – 2017. – P. 4297–4306.

12. Erdemir A. A crystal-chemical approach to lubrication by solid oxides // *Tribology Letters* 8. – J.C. Baltzer AG Science Publishers. – 2000. – P. 97–102.

### References:

1. Alexandrov M.P. Brakes of hoisting-and-transport machines. 3rd ed. – M. : Mechanical Engineering, 1976. – 383 p.

2. Zeltserman I.M., Kaminsky D.M., Onopko A.D. Friction clutches and brakes of tracked vehicles. – M. : Mechanical Engineering, 1965. – 240 p.

3. Zishan Husain Khan. Recent Trends in Nanomaterials: Synthesis and Properties, Chapter 2 // *Wear Behavior of Composites and Nanocomposites: A New Approach*, Springer Singapore. – 2017. – P. 45–47.

4. A.A. Malygin. Surface Physics and Nanotechnology: Interrelation and Prospects // *Sorosovsky Educational Journal*. – 2004. – V. 8. – № 1. – P. 7–21.

5. Pedro Henrique Cury Camargo, Kestur Gundappa Satyanarayana, Fernando Wypych. Nanocomposites: Synthesis, Structure, Properties and New Application Opportunities (Review Article) // *Materials Research*. – Vol. 12. – № 1. – SciELO. – 2009. – P. 13.

B.M. Caruta, *Nanomaterials: New Research*, Nova Science Publishers, Inc. New York, 2005. – P. 412.

7. A.Ə. Quliyev, A.V. Şərifova. Kompozisiya materialları. – ADNSU nəşri. Bakı, 2016. – 105 səh.

8. Emad Omrani, Pradeep L. Menezes, Pradeep K. Rohatgi. State of the art on tribological behavior of polymer matrix composites reinforced with natural fibers in the green materials world // *Engineering Science and Technology, an International Journal*. – № 19. – Elsevier B.V. – 2016. – P. 717–736.

9. Limpichaipanit A., Todd R.I. The relationship between microstructure, fracture and abrasive wear in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiC nanocomposites and microcomposites containing 5 and 10 % SiC // *Journal of the European Ceramic Society*. – Vol. 29 (13). – Elsevier. – 2009. – P. 2841–2848.

10. José L., Ortiz-Merino J.L., Todd R.I. Relationship between wear rate, surface pullout and microstructure during abrasive wear of alumina and alumina/SiC nanocomposites // *Acta Mater.* – Vol. 53 (12). – Elsevier. – 2005. – P. 3345–3357.

11. M. Parchovianský, J. Balko, P. Švančárek, J. Sedláček, J. Dusza, F. Lofaj, D. Galusek. Mechanical properties and sliding wear behaviour of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiC nanocomposites with 3–20 vol % SiC // *Journal of the European Ceramic Society*. – Vol. 37 (14). – Elsevier. – 2017. – P. 4297–4306.

12. Erdemir A. A crystal-chemical approach to lubrication by solid oxides // *Tribology Letters* 8. – J.C. Baltzer AG Science Publishers. – 2000. – P. 97–102.



УДК 621.398

## ОСВОЕНИЕ ЧАСТНОГО СЕКТОРА ПО ТЕХНОЛОГИИ FTTH

### DEVELOPMENT OF THE PRIVATE SECTOR ON FTTH TECHNOLOGY

**Ялакаева Милана Анатольевна**

магистрант,  
Астраханский государственный технический университет  
m.yalakaeva94@yandex.ru

**Yalakaeva Milana Anatolievna**

Master of Science,  
Astrakhan state technical university  
m.yalakaeva94@yandex.ru

**Аннотация.** В статье ставится задача рассмотреть и построить стратегию по освоению частного сектора на примере технологии FTTH с наиболее выгодным преобразованием. На основе проведенного исследования автором предлагается использовать несколько методов построения распределенных систем, а так же представлены приблизительные расчеты рентабельности данного проекта.

**Annotation.** The article aims to consider and build a strategy for developing the private sector using the example of FTTH technology with the most profitable transformation. Based on the study, the author proposes to use several methods for constructing distributed systems, as well as approximate calculations of the profitability of this project.

**Ключевые слова:** FTTH, малоэтажные застройки, проектирование, ВОЛС.

**Keywords:** FTTH, low-rise buildings, design, fiber optic communication lines.

#### **В**ведение

FTTH – термин самый молодой и обширный, изначально идея родилась в Северной Америке, где большинство платежеспособного населения проживает в частных секторах. Расстояния между такими домами приблизительно 50 метров, так что сделать «разводку» видео и интернет – услуг на все дома в районе проживания коаксиальным кабелем трудно. Почему? Затухание сигнала велико, а ставить много ретрансляторов – не очень оправдано, так как ретранслятор будет обслуживать только ближайших соседей, т.е. 10–15 домов, 10–15 семей.

Нужно было более эффективное решение – меньше затухание сигнала, меньше активных/усилительных приборов в сети. А лучше было вообще обойтись без усилителей, потому что обслужить 100 усилителей разбросанных по площади 10-15 квадратных километров – слишком большая «головная боль». Да и где поставить эти усилители? Дома-то частные и земля под ними – частная. Разрешит ли хозяин ставить аппаратуру на его территории? – Скорее всего что нет или за дополнительные деньги, или же компании-провайдеру придется выкупать землю под «точку» где ставят «усилители». Можно повесить аппаратуру на телефонных столбах, вместе с кабелем, но и это не лучший выход, так как аппаратура тогда должна быть «всепогодной», а это деньги, как разовые вложения, так и дороговизна обслуживания.

При всем этом основным «двигателем» FTTH идеи вначале было кабельное ТВ. Кабельное ТВ с огромным количеством каналов (80 и более) было распространено на Западе задолго до Интернета. Именно для доставки КТВ в частные дома оптоволокно давало огромное преимущество перед коаксиальным кабелем. В момент рождения FTTH Интернет не являлся основной движущей силой FTTH-идеи [2].

#### **Проектирование FTTH**

Как всем известно, технология FTTH предусматривает отдельное волокно от узла до дома и в данный момент является актуальной для каблирования района малоэтажных застроек.

Проектирование сетей для частного сектора отличается от такового для многоэтажных домов тем, что очень привязано к местности. В городской местности можно не задумываться о прокладке кабеля от одного дома к другому, с частным сектором всё по-другому:

- большое количество деревьев, лесополосы;
- нехватка или повреждение столбов.

Проектирование сетей FTTH во многом индивидуально. Опять же, расположение столбов могут идти как с одной, так и с двух сторон дороги, а сама дорога может быть либо оживлённой, либо нет, это значит, что проектирование FTTH возможно только после тщательного обследования местности.

Стратегия «Коврового покрытия местности», когда подключается всё подряд, не применима для частного сектора ни в каком виде. Для того чтобы впусую не закопать сотни тысяч, придётся выбирать, куда идти в первую очередь, куда во вторую, а куда не идти вовсе. Конечно же, бывает так, что подключить коттеджный посёлок оказывается выгодней, чем улицу в городе, но это скорее исключение. Ориентировать в подключении можно на следующую последовательность:

1. Частные дома в черте города. Традиционно у людей в городе более высокий достаток по сравнению с жителями сельской местности, что сказывается на потреблении услуг связи. Также в городе нет проблем с местом для узла и договорённостями с владельцами столбов. Да и близость к офису и складу позволяет выполнять все работы гораздо быстрее.



Однако нужно обратить внимание на то, какой это частный сектор: старый или с домами, построенными недавно. Конечно же, в первую очередь подключаются новые дома.

2. «Богатые» коттеджные посёлки. Такие посёлки строятся с нуля и в основном при строительстве учитываются все удобства владельцев, в том числе и услуги связи.

3. Деревни, прилегающие к городу. Они мало чем отличаются от городского частного сектора, хотя процент проникновения там несколько ниже.

4. Частный сектор посёлков и деревень с многоэтажными домами. Тут действует тот же принцип, что и в частном секторе города. Чем выше население, тем больше людей с достатком проживает в населённом пункте.

5. Деревни, стоящие особняком и без многоэтажных домов, подключаются в последнюю очередь или не подключаются вовсе. Обычно в них живёт консервативное население, которому интернет либо не нужен вовсе. Транспортные проблемы и отсутствие места для размещения узла, создают дополнительные трудности (возрастает цена на подключение).

Список составлен на основе максимально возможного проникновения по убыванию. Увы, практика иногда отличается от теории, поэтому бывает так, что какому-то коттеджному посёлку приходится уступить очередь из-за отсутствия места для узла или удалённости.

Теперь посчитаем, во сколько в среднем обойдётся нам абонент по пассивной части сети. Учитывая, что улица около 40 домов длиной приблизительно один километр, прибавим 300м-500м на путь «улица-узел». Итого получится длина 1,5 км. магистрального кабеля. Как мы уже говорили, столбы стоят у каждого дома (хотя обычно соотношение не 1 : 1, а 1 : 1,5, 1 : 2, т.е. один столб «обслуживает» полтора дома), следовательно, у нас будет 40 столбов. Длина абонентского кабеля приблизительно 70 м, таким образом, получаем следующую таблицу (материалы рассчитаны на 30 абонентов):

Элемент сети	Количество	Стоимость единицы, руб.	Общая стоимость, руб	Цена/абонент, руб.
Магистральный кабель ИК/Т-М4П-32А-8кН	1500 м.	43	64500	5370
Абонентский кабель ОПЦ-4А-4кН	2100 м.	15,5	32550	
Муфта GJS-5002	5 шт.	1600	8000	
УПМК	5 шт.	550	2750	
Узел крепления УК-Н-01	80 шт.	100	8000	
Зажим для монтажной ленты	80 шт.	12	960	
Монтажная лента	60 м.	36,4	2184	
Абонентская оптическая розетка	30 шт.	31	930	
SC-адаптер	92 шт.	13,2	1215	
SC-пигтейл	122 шт	18	2196	
Кросс ШКОС-1U-32SC	1 шт	700	700	
Анкерный зажим РА-05 (3-7)	80 шт.	145	11600	
Антивандалный ящик Е-29	1 шт.	2300	2300	
		<b>Сумма</b>	<b>161100</b>	

Сумма которая у нас получилась в итоге не окончательная, в данную сумму не включены расходы на неучтенную «мелочь» и «прочее», поэтому сумму увеличим еще на 20 %, получим сумму около 6500 рублей на одного абонента. Итого по материалам у нас выходит 6500 + 3410 почти 10000 рублей. Плюс оплата труда работников. В среднем такое подключение обойдётся в 3 тыс. на абонента. Данная сумма является приблизительной (исходя из средних цен на товар). Строительство можно значительно удешевить, материалы приобрести со скидкой или вовремя попасть под акцию, у каждого провайдера свои расценки на труд, но ориентироваться на данную сумму можно.

Одним из главных достоинств технологии PON является возможность использования всего одного волокна до точки ветвления. В FTTH ситуация обстоит немного иначе – кабель изначально должен быть максимальной волоконности. Это значит, что чем дальше от узла находится группа частных домохозяйств, обслуживаемая этим кабелем, тем значительно дороже цена каблирования. В городской местности данной ситуации практически нет, потому что на границе с частным сектором всегда есть многоэтажные дома, именно там можно поместить узел. В связи с этим возникает вопрос: что лучше использовать в качестве магистрали: оптический кабель или радиорелейную линию?

Бесспорно, оптика гораздо лучше, но не всегда есть возможность её применить, да и не всегда это выгодно экономически.

Например, для каблирования частного сектора из п.5 с 48 потенциальными клиентам, который находится в 4 км от узла нужно 60 руб/м за оптику \* 4000 м + 260 руб за узел \* 100 количество



узлов =  $240000 + 26000 = 266000$  руб. Из расчетов видно, что данная сумма получилась достаточно большая, кроме того нужно учитывать, что за 100 условных столбов придётся платить арендную плату и оплачивать труд работников. Допустим один столб стоит 50 рублей, то всё равно получается 5 тыс. руб/мес.

Дальше решим этот вопрос немного иначе, предположим, что в данной местности есть место для размещения нашего оборудования. Теперь картина обстоит немного иначе, использовать уже можно кабель минимальной волоконности, к примеру ОПЦ-4А-4кН. Стоимость 4000 м. будет приблизительно 60 тыс. руб. Итого получается около 90 тыс. за материалы.

Для примера воспользуемся Proxim QV 8000, стоимость которого – те же 90 тыс. руб, выдаёт она скорость не менее 150 Мбит/с, это оптимальная скорость для 48 клиентов. Стоимость установки Proxim QV 8000 значительно ниже, чем прокладка оптоволокну, включая ежемесячные расходы (аренда крыши и плата за спектр) так же будут ниже.

Исходя из расчетов, можно сделать вывод, что использовать многоволоконный кабель как магистраль практически бессмысленно, а кабель минимальной волоконности выигрывает в случае, когда расстояние меньше 3–4 км.

Далее рассмотрим тарифы в сетях FTTH. Вроде бы технически ничего не запрещает сделать такие же тарифы, как и в городе. С другой стороны, сеть развёрнута не в городе, следовательно цена возрастает.

Далее сформируем тарифную линейку, основополагающим принципом которого будет максимально быстрый и гарантированный возврат инвестиций, в этом случае тарифы будут зависеть от выбранного способа подключения:

1. Подключение по себестоимости. Для таких клиентов можно сформировать тариф с минимально возможной абонентской платой. Они сразу же окупят затраты на себя и в дальнейшем будут приносить чистую прибыль. Хотя, чтобы как-то поощрить таких абонентов за их выбор, следует добавить в тариф определенные опции, которых не будет в других категориях.

Пример: Антивирус или услугу родительского контроля, так же можно сделать скорость доступа выше, чем у всех остальных тарифных планов.

2. Подключение с рассрочкой основного платежа. Как уже было сказано, такое подключение не сильно отличается от первого. Для таких абонентов можно урезать «основной» тариф на период выплаты подключения, к примеру, на 20 %.

3. Бесплатное подключение. Это именно тот случай, когда о дополнительных опциях и услугах речь идти уже не может. Тарифный план нужно сформировать настолько дорогим, насколько это возможно, иначе занижать скорость относительно основного тарифа. Так же, следует заключить хотя бы годовой контракт для гарантированно возврата части затрат.

Отдельное внимание следует уделить в формировании услуг.

Пример: обычный доступ в сеть, связка интернет + телевидение и т.д.

Не всегда стандартное решение является востребованным, нужно попытаться сформировать пакетное предложение, цена которого незначительно дороже чистого интернета, но смогло бы выманить у абонентов дополнительные денежные взносы.

### Заключение

В статье мы рассмотрели общие вопросы построения сетей FTTH. В результате проведенного анализа выявлено, что существующие технологии FTTH обладают должным уровнем надежности.

Предложены варианты построения распределенных систем технологии FTTH в малоэтажных застройках. Если правильно выбрать стратегию освоения частного сектора, то данный проект можно сделать вполне рентабельным, несмотря на то, что дело это затратное, долгое и напряжённое. Есть большая угроза провала со стороны конкурентов в виде сотовых компаний с 3G и LTE, а также местные со своим радиодоступом сильно попортят ситуацию.

### Литература:

1. Гроднев И.И. Инженерно-технический справочник по электросвязи: Кабельные и воздушные линии связи / И.И. Гроднев, А.Н. Гумеля, М.А. Климов и др. Издание 3-е, перераб. и доп. – М. : Связь, 2010.
2. Слепов Н.Н. Волоконно-оптическая техника. Современное состояние и новые перспективы / Под редакцией С.А. Дмитриева, Н.Н. Слепова. – М. : Техносфера, 2005.

### References:

1. Grodnev I.I. Technical reference book on telecommunication: Cable and aerial communication lines / I.I. Grodnev, A.N. Hummel, M.A. Klimov, etc. Edition 3rd, reslave. and additional. – M. : Communication, 2010.
2. Slepov N.N. Fiber-optical equipment. The current state and new prospects / Under S.A. Dmitriyev, N.N. Slepov's edition. – M. : Technosphere, 2005.

**ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ  
В НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ**

**\*\*\*\*\***

**ELECTRIC EQUIPMENT  
IN OIL AND GAS BRANCH**







УДК 621.313.33

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СРЕДЫ ANSOFT MAXWELL НА ЭТАПЕ ИССЛЕДОВАНИЯ 3D МОДЕЛИ АКСИАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

### USING THE ANSOFT MAXWELL ENVIRONMENT IN THE EXPLORATION PHASE, THE 3D MODEL OF THE AXIAL ELECTRIC MOTOR

#### Автайкин Илья Николаевич

кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры электротехники и электрических машин,  
Кубанский государственный технологический университет  
glubokovodnik@yandex.ru

#### Квон Алексей Михайлович

кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры электротехники и электрических машин,  
Кубанский государственный технологический университет  
alexinasofi@yandex.ru

**Аннотация.** В работе рассматриваются возможности среды Ansoft Maxwell на этапе исследования разработанной математической модели аксиального асинхронного электродвигателя с массивным ротором. Модель создана для 3D магнитостатики.

**Ключевые слова:** математическое моделирование; аксиальный асинхронный электродвигатель; среда Ansoft Maxwell; исследование в 3D магнитостатике.

#### Avtaykin Ilya Nikolaevich

Ph.D. (Tech.), Associate Professor,  
Department of electrical engineering  
and electrical machines,  
Kuban state technological University  
glubokovodnik@yandex.ru

#### Kvon Aleksei Mikhailovich

Ph.D. (Tech.), Associate Professor,  
Department of electrical engineering  
and electrical machines,  
Kuban state technological University,  
alexinasofi@yandex.ru

**Annotation.** The paper considers the possibilities of Ansoft Maxwell environment at the stage of research of the developed mathematical model of the axial asynchronous motor with a massive rotor. The model is designed for 3D magnetostatics.

**Keywords:** mathematical modelling; the axial induction motor; Ansoft Maxwell environment; research in 3D magnetostatics.

А синхронные электрические машины широко применяются в нефтегазовой отрасли. Они входят в состав электропривода буров, центробежных насосов, станков-качалок, лебедок. Условия работы электродвигателей в этих установках тяжелые. Это связано режимом работы, который является либо длительным, либо сопровождается частыми пусками и остановками. Высокая влажность, а часто и работа в жидкой высокотемпературной среде (насосы) приводит к резкому сокращению срока службы. Для создания надежных и эффективных конструкций электрических машин необходимо проводить математическое моделирование и исследование, совершенствовать существующие конструкции и разрабатывать новые.

Аксиальные машины обладают рядом преимуществ по сравнению с классическими асинхронными. В работе [1] рассмотрена методика формирования модели аксиального электродвигателя в среде Ansoft Maxwell для трехмерной магнитостатики. В первую очередь – это уменьшенные торцевые габариты, меньшая стоимость за счет экономии стали, улучшенные условия охлаждения. В [2] определены рациональные параметры аксиальной электрической машины.

На этапе исследования созданной в [1] математической 3D модели на примере аксиального асинхронного электродвигателя с массивным ротором в среде **Ansoft Maxwell** необходимо осуществить генерацию сетки конечных элементов, которая состоит из следующих шагов:

1. **Ansoft Maxwell** генерирует начальную сеть, которая включает установки аппроксимации.
2. Если требуется уплотнение сетки разбиения, **Ansoft Maxwell** выполняет это, используя рассчитанные в материале параметры.
3. Задается режим разбиения, и степень уплотнения сетки.
4. Используя полученную сетку разбиения, **Ansoft Maxwell** вычисляет методом конечных элементов электромагнитные поля, которые существуют внутри структуры. Тетраэдры в этом режиме имеют меньшие размеры (рис. 1).
5. **Ansoft Maxwell** генерирует другое решение, используя уплотненную сетку.
6. **Ansoft Maxwell** повторно вычисляет ошибку, и итеративный процесс (решение – анализ ошибок – адаптивное усовершенствование) повторяется, пока критерии сходимости не удовлетворены или не выполнено максимальное число адаптивных проходов.

Чтобы добавить установку на решение проекта необходимо определить тип анализа, настройки анализа и настройки сходимости.

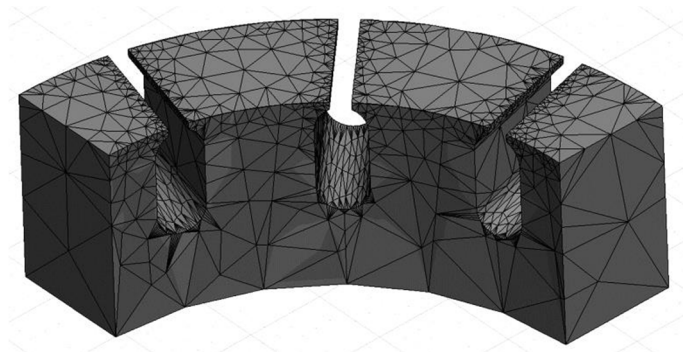


Рисунок 1

После того как анализ закончен доступны следующие результаты вычислений:

- матрица индуктивностей катушек фаз;
- осевая сила притяжения ротора к статору;
- электромагнитный момент относительно оси Z.

**Ansoft Maxwell** предлагает пользователю широкий набор инструментов визуализации результатов расчета магнитного поля. Так, например, распределение магнитной индукции на поверхности и в сечениях аксиального асинхронного электродвигателя с массивным ротором можно отразить с помощью контурных зон (рис. 2), а распределение магнитного потока в виде силовых линий (рис. 3).

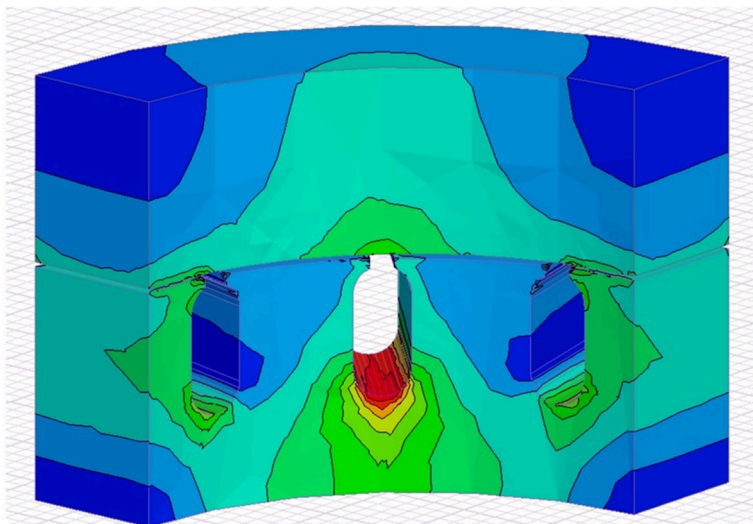


Рисунок 2

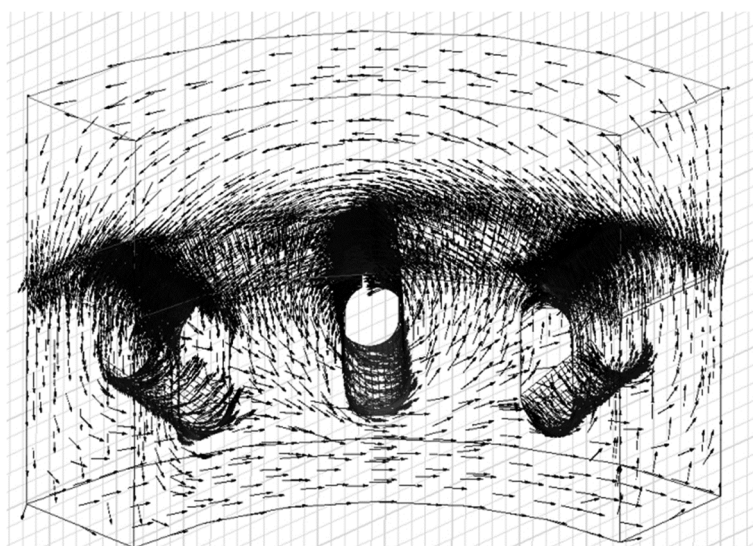


Рисунок 3



Численную информацию о величине рассматриваемого параметра в точке, или вдоль какой либо линии можно получить в виде графика зависимости (рис. 4). В данном случае приведена зависимость распределения магнитной индукции вдоль окружности статора.

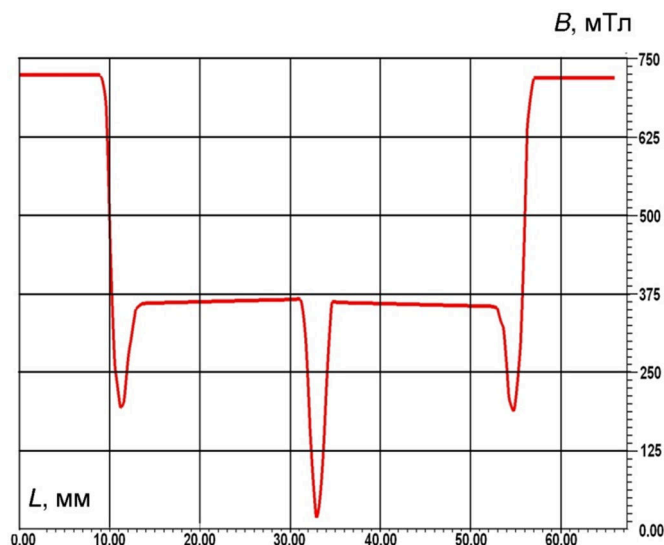


Рисунок 4

Для представленной конструкции аксиального асинхронного электродвигателя с массивным ротором, используя встроенный в **Ansoft Maxwell** калькулятор, возможно вычисление магнитного потока через любое сечение сформированной математической модели, магнитодвижущей силы катушки, электрических потерь в обмотках и других характеристик.

Таким образом, пакет моделирования **Ansoft Maxwell** позволяет эффективно его использовать для математического моделирования и проведения численных экспериментов электрических машин и электромагнитных устройств.

#### Литература:

1. Автайкин И.Н., Квон А.М., Барчо Р.А. Методика формирования модели аксиального электродвигателя в среде Ansoft Maxwell для трехмерной магнитостатики // Технические и технологические системы. Материалы восьмой международной научной конференции «ТТС-16» (24–26 ноября 2016 года) / ФГБОУ ВО «КубГТУ», КВВАУЛ им. А.К. Серова; под общей редакцией Б.Х. Гайтова. – Краснодар : Издательский Дом – Юг, 2016. – 300 с. – С. 27–31.
2. Автайкин И.Н., Квон А.М., Косолапов А.В. Определение рациональных параметров аксиальной электрической машины для электроприводов установок перерабатывающей промышленности // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. – Краснодар : изд-во «Кубанский государственный технологический университет». – 2017. – № 1 (355). – С. 67–70.

#### References:

1. Avtaykin I.N., Kwon A.M., Barcho R.A. Metodika of formation of model of the axial electric motor in the environment of Ansoft Maxwell for three-dimensional magnetostatics // Technical and technological systems. Materials of the eighth international scientific TTS-16 conference (on November 24–26, 2016) / FGBOU VO «KubGTU», KVVAUL of A.K. Serov; under the general editorial B.H. Gaytova. – Krasnodar : Publishing house – South, 2016. – 300 p. – P. 27–31.
2. Avtaykin I.N., Kwon A.M., Kosolapov A.V. Determination of rational parameters of the axial electrical machine for electric drives of installations of processing industry // News of higher educational institutions. Food technology. – Krasnodar : publishing house «The Kuban state technological university». – 2017. – № 1 (355). – P. 67–70.



УДК 621.313.33

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ МАГНИТОПРОВОДА АКСИАЛЬНОЙ АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ

### DETERMINATION OF THE MAIN GEOMETRIC DIMENSIONS OF THE MAGNETIC CIRCUIT OF THE AXIAL INDUCTION MACHINES

**Автайкин Илья Николаевич**

кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры электротехники и электрических машин,  
Кубанский государственный технологический университет  
glubokovodnik@yandex.ru

**Квон Алексей Михайлович**

кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры электротехники и электрических машин,  
Кубанский государственный технологический университет  
alexndinasofi@yandex.ru

**Аннотация.** В работе производится расчет основных геометрических соотношений и размеров магнитной системы аксиальной асинхронной машины. В основе расчета лежат основные положения, применяемые при проектировании классических электрических машин.

**Ключевые слова:** аксиальная асинхронная машина; магнитопровод; расчет основных геометрических размеров.

**Avtaykin Ilya Nikolaevich**

Ph.D. (Tech.), Associate Professor,  
Department of electrical engineering  
and electrical machines,  
Kuban state technological University  
glubokovodnik@yandex.ru

**Kvon Aleksei Mikhailovich**

Ph.D. (Tech.), Associate Professor,  
Department of electrical engineering  
and electrical machines,  
Kuban state technological University,  
alexndinasofi@yandex.ru

**Annotation.** In work calculation of the basic geometrical ratios and the sizes of magnetic system of the axial asynchronous machine is made. The calculation is based on the basic provisions used in the design of classical electrical machines.

**Keywords:** axial asynchronous machine; the magnetic circuit; calculating the main geometrical dimensions.

Применение аксиальных асинхронных машин в нефтегазовой отрасли позволит повысить эффективность технологических процессов при сепарировании нефтяных фракций, воды и других компонентов, уменьшить габаритные продольные размеры агрегатов, улучшить охлаждение агрегатов на базе аксиальных машин.

При проектировании электрических машин большое внимание уделяется проблеме уменьшения их габаритов и веса [1]. Техничко-экономические показатели аксиальных асинхронных машин [2] существенно зависят от отношения  $n = D_H/D_B$  наружного –  $D_H$  и внутреннего –  $D_B$  диаметров магнитопроводов этих машин (рис. 1).

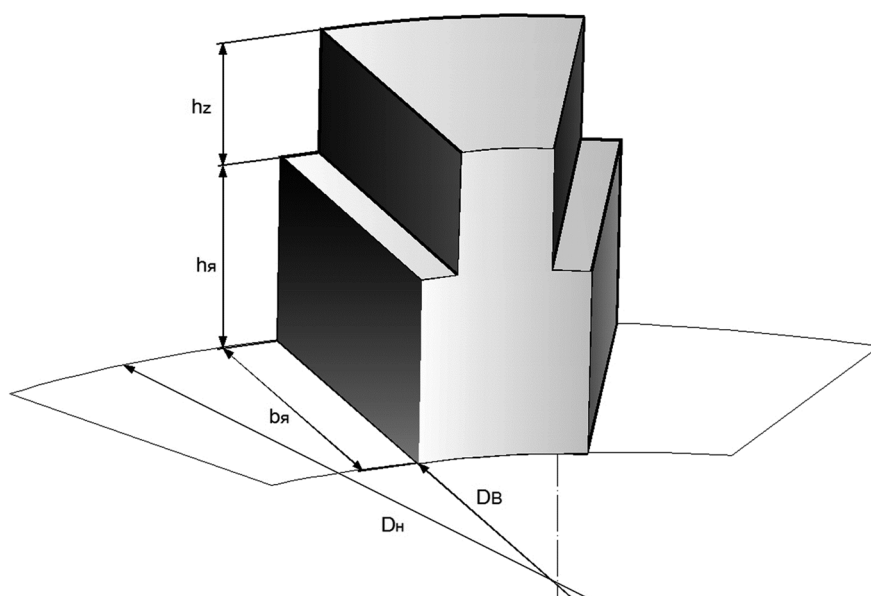


Рисунок 1 – Фрагмент магнитопровода ААД



Для определения геометрических размеров магнитной части аксиальных асинхронных машин, при разных значениях соотношения между внутренним и наружным диаметрами, задаемся объемом стали магнитопровода серийно выпускаемого радиального асинхронного двигателя мощностью  $P = 7,5$  кВт с числом пар полюсов  $p = 2$ .

Объем пространства занимаемый магнитопроводом статора или ротора определяется вычитанием из общего объема гладкого цилиндра (без пазов) объема пространства занимаемого пазами.

$$V_{\text{маг}} = V_{\text{ц}} - Z_1 \cdot V_{\text{п}}, \tag{1}$$

где  $V_{\text{ц}}$  – объема гладкого цилиндра (без пазов);  $V_{\text{п}}$  – объем пространства занимаемый одним пазом.

Объем пространства занимаемый одним пазом:

$$V_{\text{п}} = S_{\delta} \cdot (h_z + h_{\text{я}}), \tag{2}$$

где  $S_{\delta}$  – площадь воздушного зазора выраженная относительно  $D_{\text{в}}$ ;  $h_z$  – высота зубца или глубина паза, задаётся в начале проектирования;  $h_{\text{я}}$  – высота ярма магнитопровода.

Площадь воздушного зазора, выраженная относительно внутреннего диаметра магнитопровода

$$S_{\delta} = \pi \cdot \frac{[D_{\text{н}}^2 - D_{\text{в}}^2]}{4} = \frac{\pi}{4} [(n \cdot D_{\text{в}})^2 - D_{\text{в}}^2] = \frac{\pi}{4} \cdot D_{\text{в}}^2 \cdot [n^2 - 1], \tag{3}$$

где  $n$  – соотношение между наружным и внутренним диаметрами.

Выразим высоту ярма относительно внутреннего диаметра магнитопровода

$$h_{\text{я}} = \frac{S_{\text{я}}}{b_{\text{я}}} = \frac{\frac{S_{\delta}}{\sigma}}{\frac{D_{\text{в}}}{2} \cdot [n-1]} = \frac{\pi \cdot D_{\text{в}} \cdot [n^2 - 1]}{[n-1] 2\sigma}, \tag{4}$$

где  $S_{\text{я}}$ ,  $b_{\text{я}}$  – площадь поперечного сечения и ширина ярма соответственно.

Площадь поперечного сечения ярма выбирается исходя из соображения допустимого насыщения ярма. Поэтому ее величина зависит от площади воздушного зазора машины. Принято соотношение, равное соотношению серийно выпускаемого радиального асинхронного двигателя:

$$\sigma = \frac{S_{\delta}}{S_{\text{я}}} = 9.$$

Ширина ярма, равная длине паза и зубца

$$b_{\text{я}} = l_z = l_{\text{п}} = \frac{D_{\text{н}} - D_{\text{в}}}{2} = \frac{D_{\text{в}}}{2} \cdot [n - 1]. \tag{5}$$

Объем цилиндра статора без пазов, выраженный через внутренний диаметр магнитопровода

$$V_{\text{ц}} = S_{\delta} \cdot (h_z + h_{\text{я}}) = \frac{\pi}{4} \cdot D_{\text{в}}^2 \cdot [n^2 - 1] \cdot \left( 2h_z + \frac{\pi \cdot D_{\text{в}} \cdot [n^2 - 1]}{36 \cdot [n - 1]} \right). \tag{6}$$

Объем пространства занимаемый пазами:

$$V_{\text{п}} = Z \cdot S_{\text{п}} \cdot l_z,$$

где  $Z$  – количество пазов (зубцов);  $S_{\text{п}}$  – площадь поперечного сечения паза.

Объем пространства занимаемый пазами, выраженный через внутренний диаметр магнитопровода:

$$V_{\text{п}} = Z \cdot S_{\text{п}} \cdot \frac{D_{\text{в}}}{2} \cdot [n - 1]. \tag{7}$$

Для нахождения  $D_{\text{в}}$ , при заданном объеме стали магнитопровода, и соотношении  $n$ , с учетом уравнений (1), (2) и (3), получим:

$$V_{\text{ц}} - V_{\text{п}} - V_{\text{маг}} = 0. \tag{8}$$

$$\frac{\pi}{4} \cdot D_{\text{в}}^2 \cdot [n^2 - 1] \cdot \left( 2h_z + \frac{\pi \cdot D_{\text{в}} \cdot [n^2 - 1]}{36 \cdot [n - 1]} \right) - Z \cdot S_{\text{п}} \cdot \frac{D_{\text{в}}}{2} \cdot [n - 1] - V_{\text{маг}} = \tag{9}$$

При подстановке в уравнение значений  $n$ ,  $Z$ ,  $S_{\text{п}}$ ,  $V_{\text{маг}}$  получаются степенные уравнения третьего порядка. Отыскание корней и расчет основных параметров производился с помощью алгоритма реализованного в среде автоматизированного проектирования MathCad 15.



Результаты расчетов сведены в таблицу 1.

**Таблица 1** – Основные геометрические размеры магнитопровода

Параметры магнитопровода	Соотношения $n = D_H/D_B$						
	1,5	2	2,5	3	5	8	10
$D_H$ , мм	409,22	378,71	371,03	368,86	370,35	374,32	376,14
$D_B$ , мм	272,81	189,35	148,41	122,95	74,07	46,79	37,61
$L_{\delta_{cp}}$ , мм	1071	892,32	815,93	772,54	698,09	661,48	649,93
$S_{я}$ , мм <sup>2</sup>	2043,08	2362,26	2539,47	2655,95	2891,61	3029	3076
$S_{\delta}$ , мм <sup>2</sup>	73068	84483	90821	95000	103415	108330	110012
$h_{я}$ , мм	29,955	24,950	22,814	21,6	19,510	18,495	18,172
$t_{ZH}$ , мм	26,783	24,786	24,283	24,142	24,239	24,499	24,618
$t_{ZB}$ , мм	17,855	12,393	9,713	8,047	4,847	3,062	2,461
$V_{маг}$ , мм <sup>3</sup>	3183248	3183248	3183248	3183248	3183248	3183248	3183248

Вышеприведенные геометрические размеры магнитопровода необходимы для описания математической модели и ее дальнейшего исследования на микро-уровне, например в среде моделирования *Ansoft Maxwell*, для расчета параметров на макро-уровне моделирования, а также при технологической подготовке производства. Полученные параметры позволят провести анализ магнитного поля машины с последующим расчетом электромагнитного момента между статором и ротором и других электромагнитных и механических характеристик аксиальной асинхронной машины.

#### Литература:

1. Гайтов Б.Х., Автайкин И.Н., Квон А.М. и др. Влияние геометрических радиальных соотношений аксиальной электрической машины на ее габаритные характеристики и электромагнитный момент // Энергосбережение и водоподготовка. – М. : изд-во: ООО ЭНИВ. – 2013. – № 4 (84). – С. 47–49.
2. Автайкин И.Н., Квон А.М., Косолапов А.В. Определение рациональных параметров аксиальной электрической машины для электроприводов установок перерабатывающей промышленности // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. – Краснодар : изд-во «Кубанский государственный технологический университет». – 2017. – № 1 (355). – С. 67–70.

#### References:

1. Gaytov B.H., Avtaykin I.N., Kwon A.M., etc. Influence of geometrical radial ratios of the axial electrical machine on her dimensional characteristics and electromagnetic moment // Energy saving and water treatment. – M. : publishing house: LLC ENIV. – 2013. – № 4 (84). – P. 47–49.
2. Avtaykin I.N., Kwon A.M., Kosolapov A.V. Determination of rational parameters of the axial electrical machine for electric drives of installations of processing industry // News of higher educational institutions. Food technology. – Krasnodar : publishing house «The Kuban state technological university». – 2017. – № 1 (355). – P. 67–70.



УДК 004.056, 004.75

## РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМИ КОММУТИРУЕМЫМИ ЦЕПЯМИ НА БАЗЕ ПРОГРАММИРУЕМЫХ КОНТРОЛЛЕРОВ

### DEVELOPMENT OF A CONTROL SYSTEM FOR COMPLEX COMMUTATED CIRCUITS BASED ON PROGRAMMABLE CONTROLLERS

**Алиева Латифа Абдулмабудовна**

кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры инженерии систем управления,  
Азербайджанский Государственный Университет  
Нефти и Промышленности  
letife\_elxan@mail.ru

**Маилов Рауф Ариф оглы**

кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры инженерии систем управления,  
Азербайджанский Государственный Университет  
Нефти и Промышленности  
mayilov.rauf@mail.ru

**Аннотация.** В статье рассмотрены методы разработки системы управления сложными коммутируемыми цепями на основе применения программируемых контроллеров.

**Ключевые слова:** системы управления, быстродействующих микропроцессорных, контроллер, кабель, коммутация цепи.

**Aliyeva Latifa Abdulmabudovna**

Ph. D., Associate Professor of  
engineering control systems,  
Azerbaijan State University of  
Oil and Industry  
letife\_elxan@mail.ru

**Mayilov Rauf Arif**

Ph. D., Associate Professor of  
engineering control systems,  
Azerbaijan State University of  
Oil and Industry  
mayilov.rauf@mail.ru

**Annotation.** The article considers methods for developing a control system for complex commutated circuits based on the use of programmable controllers.

**Keywords:** control system, high-speed microprocessor, controller, cable, commutation circuit.

Основной проблемой при управлении сложными коммутируемыми цепями (СКЦ) является проектирование системы управления, которая в последнее годы, как правило, реализуется на базе быстродействующих микропроцессорных комплектов или программируемых контроллеров (ПК).

Изменение архитектуры микропроцессорного устройства за счет переноса адресаций периферийных устройств в поле микропрограммной памяти и упрощение процедуры системного обмена может дать значительный выигрыш в быстродействии.

При организации последовательности алгоритмов выполнения различных функций, некоторые из них, например, функции защиты, сигнализации индикации, не требуют непрерывного контроля со стороны центрального процессора и могут быть обеспечены путем организации запросов на прерывание и таким образом снизить число программ, находящихся непрерывно в обращении, что также значительно повышает быстродействие, но при этом некоторые функции (компарирования и выработки сигналов запросов на прерывание) передаются периферийным устройствам, выполняющим функции адаптеров.

Быстродействие также можно увеличить путем снижения частоты обращения к программной памяти за счет повышения уровня языка программирования, т.е. использования макрокоманд, что можно легко выполнить на микропроцессорах с микропрограммным управлением.

Таким образом, путями повышения быстродействия, обеспечивающего возможность построения полупрограммируемых устройств СУ СКЦ являются:

1. Использование микропроцессорных устройств с микропрограммным управлением и усовершенствованной структурой.
2. Организации специальной системы последовательности выполнения различных функций управления (системы обслуживания).
3. Передача некоторой части функций периферийным устройствам.
4. Совершенствование алгоритма управления СКЦ.
5. Упрощение процедуры системного обмена между периферийными устройствами и центральным процессором УУ.
6. Реализация языка программирования сверхвысокого уровня (с помощью макрокоманд).

Структурная схема предложенной системы управления (СУ), которая включает следующие блоки: арифметический расширитель, таймер, распределитель, аналого-цифровой преобразователь, устройство ввода-вывода информации, датчики контролируемых параметров.

Наличие аппаратных средств в указанной структуре позволяет избегать функциональных преобразований, требующих излишних затрат. Для управления СКЦ применение программируемых контроллеров



даёт возможность организовать основные функции системы управления (СУ) программными методами, а также снизить материальные затраты и уменьшить габаритные показатели системы управления.

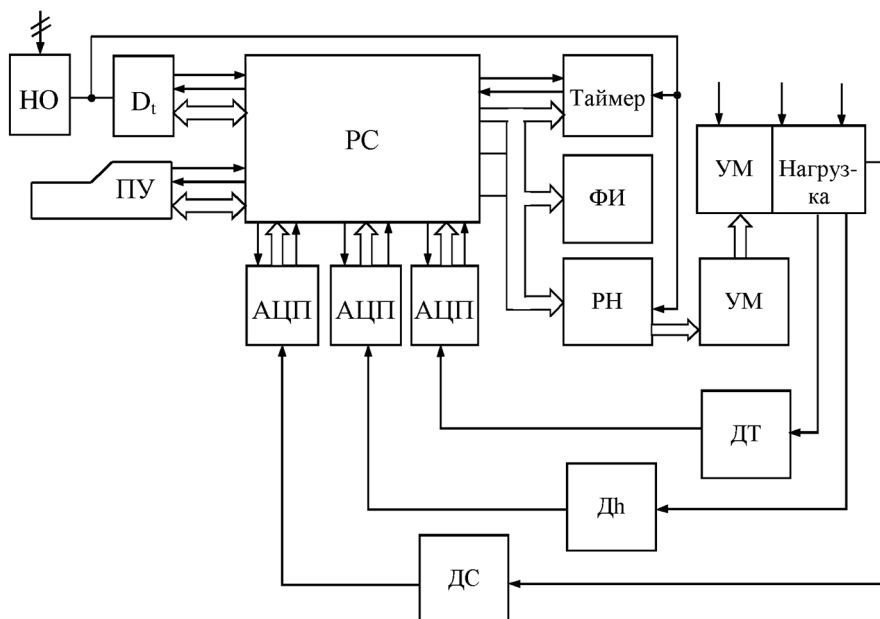


Рисунок 1 – Структура микропроцессорной системы управления

Для выполнения различных функций системы управления независимо от состава схемы и структурной схемы сложной коммутируемой цепи, отличительной особенностью процесса проектирования СУ СКЦ является то, что задание на проектирование последнего даётся обычно не в виде технических требований к УУ, а в виде технического описания СКЦ и выполняемой ею функции. Фактически технические требования в части определения функции, выполняемой СУ, формулируется в виде требования обеспечить выполнение целевой функции СКЦ путём управления коммутирующими элементами последней.

При такой постановке задачи, несмотря на то, что обеспечивается возможность широкого подхода к способам реализации функции управления, с другой стороны затрудняется выбор оптимального решения и разработки СУ СКЦ. Последнее усугубляется при решении поставленной задачи обеспечения полфункциональности СУ СКЦ. Рекомендуемой методикой и практикой разработки радиоэлектронной аппаратуры является путь параллельного проектирования и сравнения между собой различных вариантов реализации. Эта методика, связанная с большим объёмом работы и при разработке таких сложных устройств, как полфункциональные СУ, неприменима из-за большого числа вариантов возможного решения каждой из функций выполняемой УУ и значительного объёма работы по каждому варианту [1, 2].

Учитывая вышеуказанное, предлагается поэтапный метод последовательного решения задачи разработки СУ СКЦ, включающего в себя следующие этапы:

I этап – проводится анализ структуры заданной СКЦ и на основе целевой функции определяются требования к разрабатываемому СУ, выявляются основные и дополнительные требования к функциям, реализуемым СУ и составляется их математическое описание.

II этап – составляется структурная схема СУ в соответствии с описанием основной (или основных) функций, после чего в разработанную схему вводятся узлы, обеспечивающие выполнение дополнительных функций.

Для выбранной структурной схемы производится предварительный выбор основной элементной базы для построения СУ. Здесь учитываются также специфические условия работы СУ, если они связаны с ограничением выбора, например, если система устанавливается на борту летательных или других движущихся объектов, то возможны ограничения состава допустимых к применению элементов – требования минимального электропотребления в системах с импульсной нагрузкой, требование устойчивости к помехам, в системах с высокой скоростью обработки воздействия, требование по быстродействию и т. д.

Учет этих требований значительно снижает число вариантов и упрощает выбор (иногда единственно возможного) варианта.

III этап – составляется алгоритм выполнения СУ основной и второстепенной функций и оценивается соответствие параметров последней основным требованиям. В случае расхождения между





параметрами УУ и требованиями производится доработка структуры, путём её совершенствования с целью обеспечения соответствия основным требованиям или же путём ввода в неё дополнительных узлов и распределения части выполняемых функций на эти узлы.

IV этап – производится схематическая проработка проектируемой системы. Проводится уточнение алгоритма работы и оценка параметров системы.

#### **Литература:**

1. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника. – М. : Высшая школа, 1991. – 622 с.
2. Ногин В.Н. Аналоговые электронные устройства. – М. : Радио и связь, 1992. – 300 с.
3. Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования : учеб. для вузов. – 4-е изд., перераб. и дополн. – М. : Изд-во МГТУ им. Баумана, 2009. – 430 с.
4. Волович Г.И. Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств. 2-е издание. – М. : Издательский дом «Додэка–XXI», 2005. – 528 с.

#### **References:**

1. Gusev V.G., Gusev Yu.M. Electronics. – M. : Higher School, 1991. – 622 p.
2. Nogin V.N. Analog electronic devices. – M. : Radio and Communication, 1992. – 300 p.
3. Norenkov I.P. Bases of the automated design: studies for higher education institutions. – 4 prod. – M. : MSTU publishing house of Bauman, 2009. – 430 p.
4. Volovich G.I. Circuitry of analog and analog-digital electronic devices. 2nd edition. – M. : Dodeka–XXI publishing house, 2005. – 528 p.



УДК 621.3

## МОДЕЛЬ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ С ПРОСТРАНСТВЕННО-ВЕКТОРНОЙ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ ДЛЯ ДВУХФАЗНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

### MODEL OF FREQUENCY CONVERTER WITH SPACE VECTOR PULSE WIDTH MODULATION FOR TWO-PHASE ELECTRIC DRIVE

**Белоусов Алексей Сергеевич**студент,  
Липецкий государственный технический университет**Мещеряков Виктор Николаевич**доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой электропривода,  
Липецкий государственный технический университет  
011bas962@gmail.com**Belousov Aleksei Sergeevich**Student,  
Lipetsk State Technical University**Meshcheryakov Victor Nikolayevich**Doctor of Technical Sciences, Professor,  
Head of the electric drive department,  
Lipetsk State Technical University  
011bas962@gmail.com

**Аннотация.** Данная статья посвящена разработке модели пространственно-векторной широтно-импульсной модуляции (ПВШИМ) двухфазного электропривода в программной среде Matlab Simulink. Структура данной модели основана на устройстве стандартного блока ПВШИМ преобразователя частоты для трехфазного двигателя из библиотеки SimPowerSystem, но предназначена для трехплечевых инверторов двухфазного преобразователя частоты.

**Ключевые слова:** пространственно-векторная широтно-импульсная модуляция, двухфазный электропривод, Matlab Simulink, трехплечевой инвертор.

**Annotation.** This article is devoted to the development of the model of frequency converter with Space Vector Pulse Width Modulation (SVPWM) for two-phase electric drive at the program Matlab Simulink. The model structure is based on conformation of standard block SVPWM of frequency converter for three-phase motor from SimPowerSystem library, but this model is designed for three-leg inverter in two-phase frequency converter.

**Keywords:** Space Vector Pulse Width Modulation, two-phase electric drive, Matlab Simulink, three-leg inverter.

Двухфазный асинхронный электродвигатель по сравнению с привычным трехфазным имеет одно яркое достоинство: способность запускаться под повышенной нагрузкой и поддерживать постоянный момент на низких скоростях [1]. Такое свойство может найти применение в тяжелой, например, транспортной, нефтегазовой или горнодобывающей промышленности [2], в тяговых электроприводах. Но данный вид двигателей мало изучен и не выпускается в промышленных масштабах. Одной из причин этого является сложность реализации преобразователей частоты, преобразующих трехфазную сеть в регулируемую двухфазную.

В настоящее время двухфазную сеть создают из двух однофазных, включенных по схеме Скотта, при этом по сравнению с трехфазной сетью увеличивается количество проводов и вспомогательного оборудования. Другой способ подключения двухфазного двигателя к промышленной сети заключается в смещении фаз относительно друг друга с помощью конденсатора, то есть, по сути использовании однофазного двигателя со вспомогательной обмоткой с конденсаторным пуском [1]. Но в этом случае привод предстает нерегулируемым и подходит для маломощных бытовых приборов, где активно используется.

Проектирование двухфазных преобразователей частоты и их систем управления начало развиваться с 1990-х гг. Основные тенденции описаны в [3]: разработка систем ШИМ, с прямым управлением моментом, независимых преобразователей частоты. Ранее автором были опубликованы работы, затрагивающие системы управления двухфазным преобразователем с релейным регулятором тока [4].

Самым популярным направлением является разработка и совершенствование системы управления с ПВШИМ, однако структура модели данной системы в Matlab Simulink в подобных статьях не расписывается. Цель данной работы – разработка модели преобразователя частоты с ПВШИМ для двухфазного двигателя, относительно которой можно осуществлять описанные усовершенствования и разрабатывать новые алгоритмы управления.

Отличие ПВШИМ заключается в том, что модуляции вычисляются не мгновенные значения напряжений, прикладываемые в данный момент к обмоткам, а моменты подключения обмоток к звену постоянного тока с целью формирования вектора напряжения. Для трехфазного электропривода возможны восемь таких векторов, шесть из которых образуют равносторонний шестиугольник, а два – нулевые. Каждый вектор напряжения реализуется собственной комбинацией ключей инвертора. Для двухфазного электропривода с трехплечевым инвертором шестиугольник ненулевых векторов напряжения перестает быть равносторонним и принимает форму, показанную в [5].



Система управления с ПВШИМ должна определять текущий сектор шестиугольника векторов и рассчитывать время приложения напряжения к каждой обмотке в каждом из секторов. В рассчитанный момент времени, в зависимости от текущего сектора должна подаваться определенная комбинация импульсов на ключи инвертора, наводящая соответствующий вектор напряжения.

Разработка модель ПВШИМ двухфазного электропривода осуществлялась на основе структуры блока SVPWM Generator библиотеки SimPowerSystem, реализующего ПВШИМ трехфазной системы, но в связи с изменением числа обмоток и неравенством углов секторов векторного шестиугольника внутренние подсистемы были изменены. Структура модели ПВШИМ и блока Amendment представлены на рисунке 1.

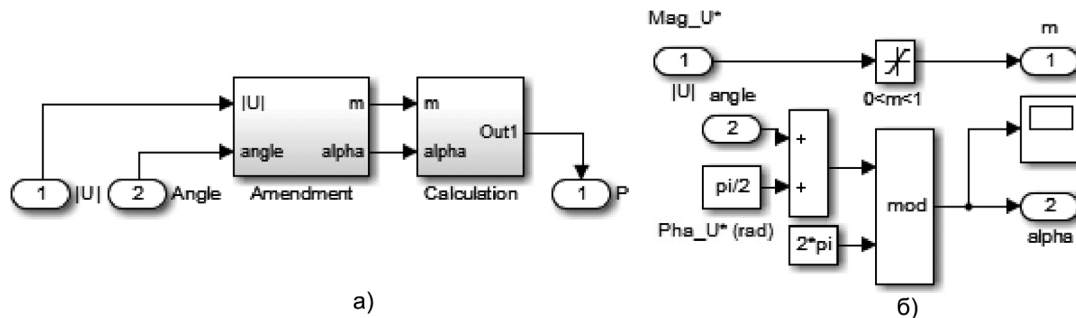


Рисунок 1 – Структуры блока ПВШИМ (а), подсистемы Amendment (б)

На вход ПВШИМ подаются модуль действующего напряжения и угол его отклонения от горизонтальной оси системы неподвижных координат  $\alpha\beta$ . Так как в Matlab оси  $\alpha\beta$  связаны с токами, а не с напряжениями, то к углу прибавляется  $90^\circ$ , что согласует системы отсчета.

Блок остатка от целочисленного деления mod обеспечивает обнуление угла при совершении вектором напряжения полного оборота. Структура подсистемы Calculation представлена на рисунке 2.

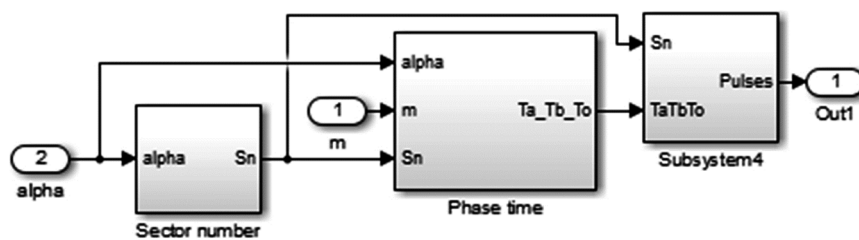


Рисунок 2 – Структура подсистемы Calculation

Каждая подсистема последовательно реализует определение текущего сектора (Sector number), расчет времени приложения векторов напряжений каждой фазы и нулевого вектора (Phase time), синтез управляющих импульсов в зависимости от сектора и требуемого вектора (Subsystem4). В «Sector number» угол сравнивается с верхней границей каждого сектора, при переходе в следующий сектор текущий номер увеличивается на единицу (рис. 3). В модели ПВШИМ трехфазной системы данный блок был устроен проще за счет равенства величин углов каждого сектора. Номер сектора подается на входы следующих подсистем.

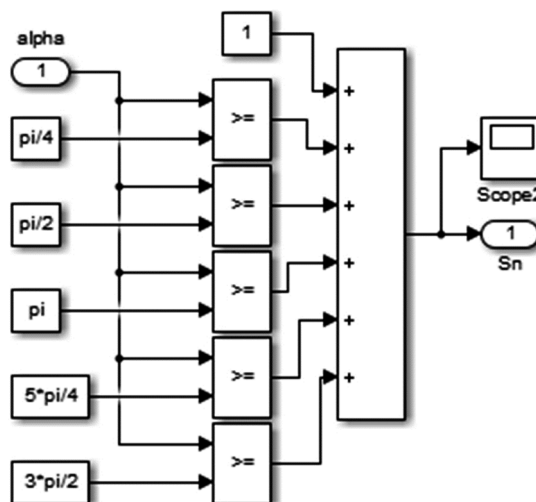


Рисунок 3 – Структура подсистемы Sector number



Длительность времени приложения векторов напряжений для трехфазной и для двухфазной систем определяется по-разному. В [6] приводится таблица 1 и формулы определения этого времени.

**Таблица 1** – Секторы шестиугольника векторов напряжения

Sector	U <sub>1</sub>	U <sub>2</sub>	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	θ <sub>1</sub>	θ <sub>2</sub>
1	U <sub>100</sub>	U <sub>101</sub>	1	√2	0	45
2	U <sub>001</sub>	U <sub>101</sub>	1	√2	90	45
3	U <sub>001</sub>	U <sub>011</sub>	1	1	90	180
4	U <sub>010</sub>	U <sub>011</sub>	√2	1	225	180
5	U <sub>010</sub>	U <sub>110</sub>	√2	1	225	270
6	U <sub>100</sub>	U <sub>110</sub>	1	1	0	270

Данная таблица описывает комбинации ключей для реализации требуемых векторов в каждом секторе, отношение величин подаваемых напряжений и углы начала и конца сектора. Формулы расчета времени:

$$T_1 = T_s \cdot \frac{V}{V_1} \cdot \frac{\sin(\theta_2 - \theta)}{\sin(\theta_2 - \theta_1)};$$

$$T_2 = T_s \cdot \frac{V}{V_2} \cdot \frac{\sin(\theta - \theta_1)}{\sin(\theta_2 - \theta_1)}, \tag{1}$$

где  $T_1, T_2$  – длительности времени приложения первого и второго векторов напряжения;  $V$  – модуль напряжения;  $V_1, V_2$  – поправочные коэффициенты напряжения;  $\theta$  – текущий угол вектора напряжения;  $\theta_1, \theta_2$  – углы начальной и конечной границ текущего сектора.

Получаем переменные  $T_1, T_2$  для каждого сектора.

Первый сектор:  $T_1 = T_s \cdot V \cdot (\cos\theta - \sin\theta)$ ,  $T_2 = T_s \cdot V \cdot \sin\theta$ .

Второй сектор:  $T_1 = -T_s \cdot V \cdot (\cos\theta - \sin\theta)$ ,  $T_2 = T_s \cdot V \cdot \cos\theta$ .

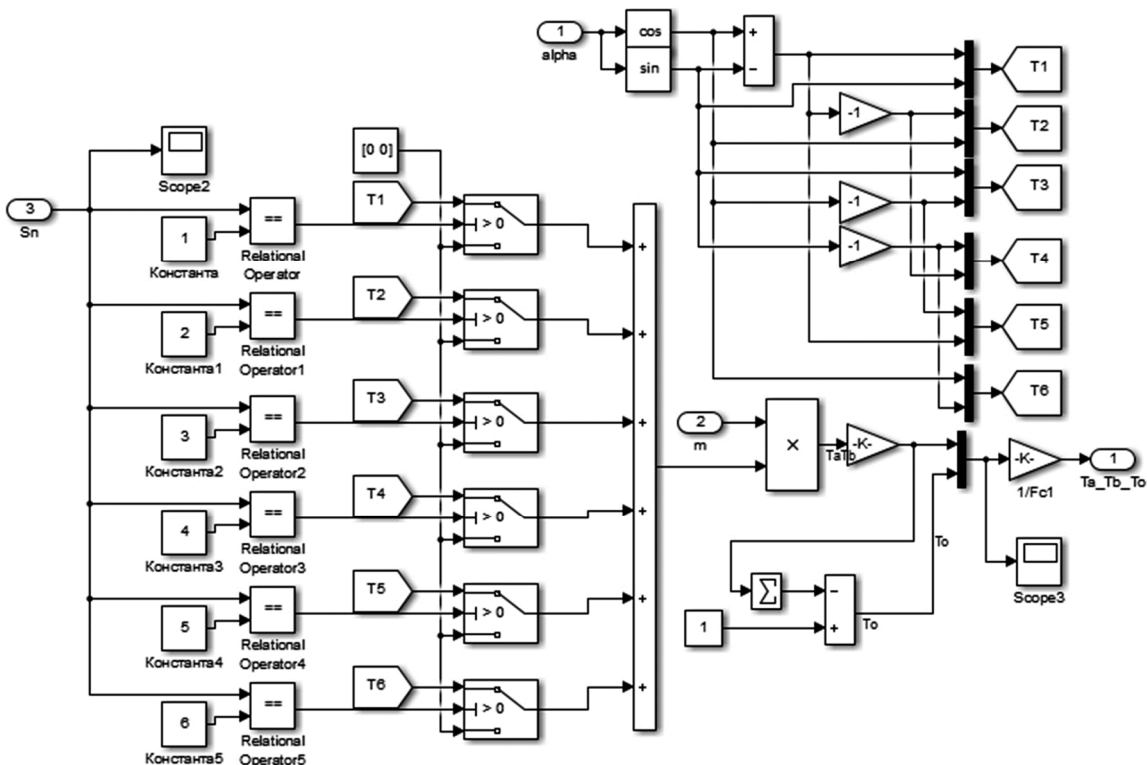
Третий сектор:  $T_1 = T_s \cdot V \cdot \sin\theta$ ,  $T_2 = -T_s \cdot V \cdot \cos\theta$ .

Четвертый сектор:  $T_1 = -T_s \cdot V \cdot \sin\theta$ ,  $T_2 = -T_s \cdot V \cdot (\cos\theta - \sin\theta)$ .

Пятый сектор:  $T_1 = -T_s \cdot V \cdot \cos\theta$ ,  $T_2 = T_s \cdot V \cdot (\cos\theta - \sin\theta)$ .

Шестой сектор:  $T_1 = T_s \cdot V \cdot \cos\theta$ ,  $T_2 = -T_s \cdot V \cdot \sin\theta$ .

На основе рассчитанных величин была составлена подсистема Phase time расчета величин времени, представленная на рисунке 4.



**Рисунок 4** – Подсистема Phase time



В зависимости от номера текущего сектора один из двухпозиционных переключателей пересылает рассчитанные значения величин  $T_1, T_2$ , а остальные – нули. Затем эти значения умножаются на действующее напряжение, и определяется время действия нулевого вектора  $T_0 = 1 - (T_1 + T_2)$ . Временные величины делятся на опорную частоту (4 кГц) и пересылаются в следующую систему. Подсистема (Subsystem4) расчета импульсов представлена на рисунке 5.

На основе сигналов  $T_1, T_2, T_0$  определяются границы участков за один период ШИМ, что представлено в подсистеме Timing (рис. 6, а). Опорный пилообразный сигнал сравнивается с таймингом (рис. 6, б), в результате чего определяется номер участка.

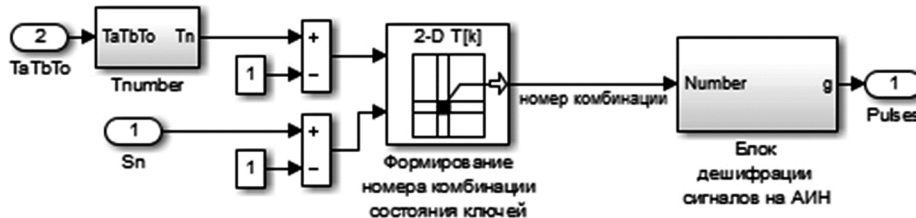


Рисунок 5 – Структура подсистемы Subsystem4

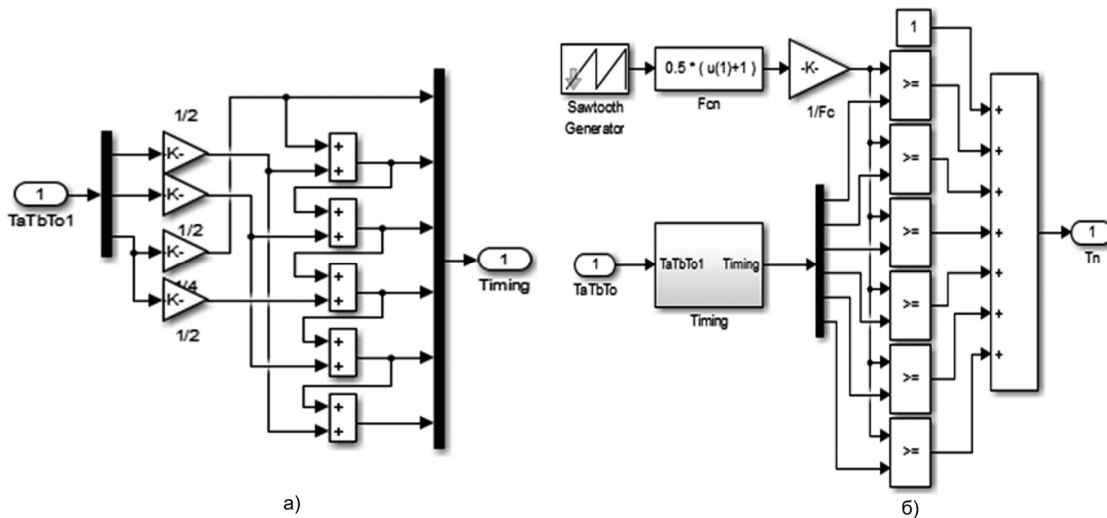


Рисунок 6 – Структура блока Timing одного периода ШИМ (а), структура блока Tnumber

На основе номеров секторов и номеров участков одного периода в блоке 2-D (рис. 5) определяется номер комбинации состояния ключей. Возможны 8 комбинаций, которые дешифрации сигналов (рис. 7) преобразуются в управляющие импульсы инвертора.

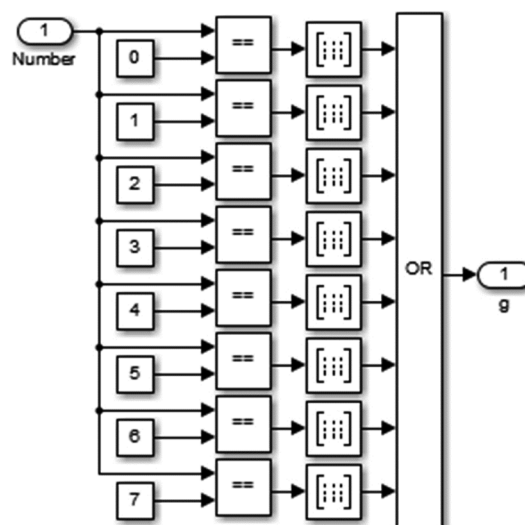


Рисунок 7 – Структура блока дешифрации сигналов инвертора



Модель двухфазного электропривода с ПВШИМ представлена на рисунке 8. При моделировании были получены графики токов и напряжений (рис. 9) и скорости с моментом (рис. 10).

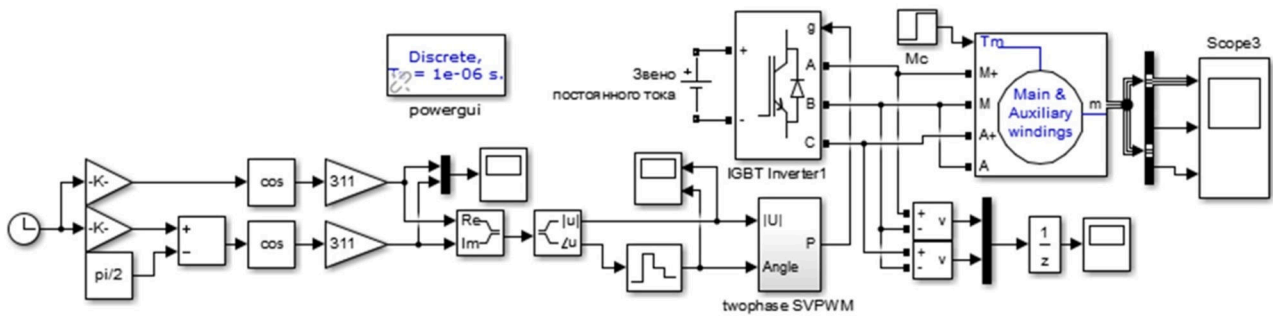


Рисунок 8 – Модель двухфазного электропривода с ПВШИМ

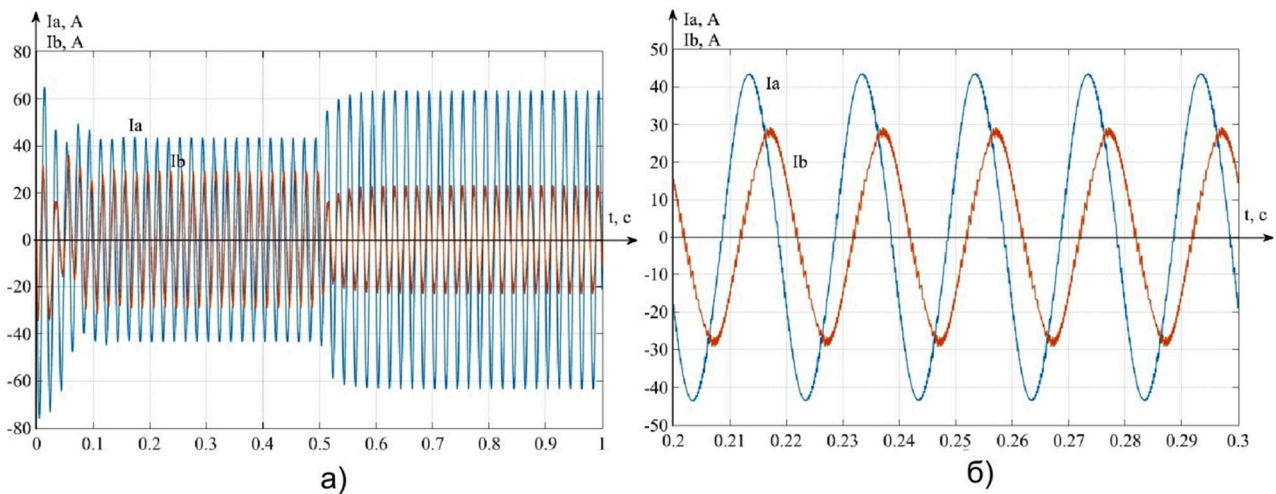


Рисунок 9 – Токи двухфазного электропривода с системой управления с ПВШИМ (а), токи подробно (б)

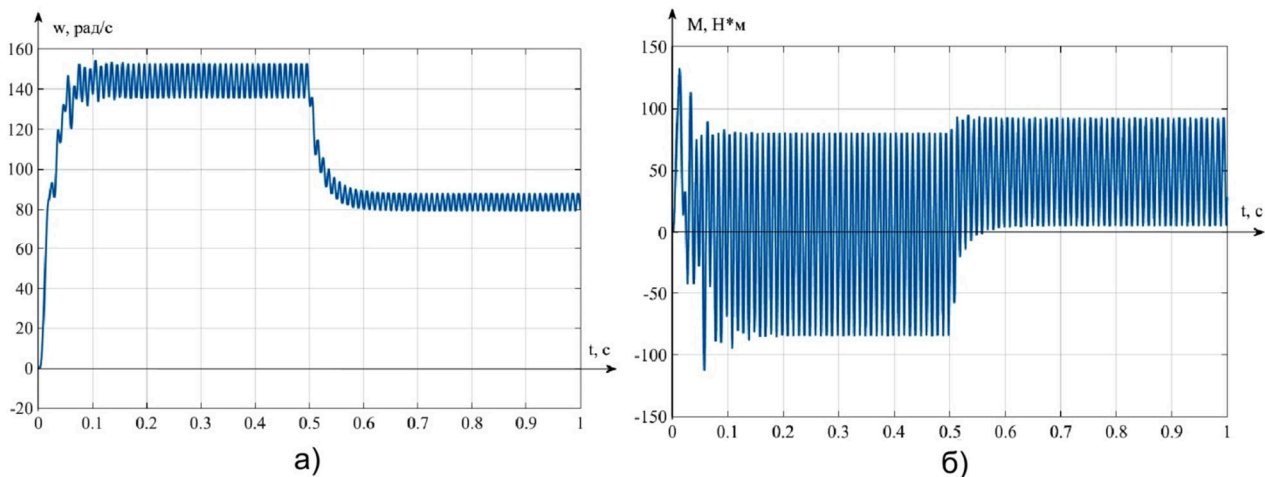


Рисунок 10 – Скорость двухфазного электропривода с ПВШИМ (а), электромагнитный момент (б)

Форма токов при пространственно-векторной ШИМ практически совпадает с идеальной синусоидальной, но сдвиг фаз составляет  $85^\circ$ , а не  $90^\circ$ , при приложении нагрузки фазы токов совпадают. В данной модели двухфазный электропривод выполняет свое основное достоинство – поддерживает нагрузку, значительно большую номинальной. Двигатель быстро разгоняется, однако скорость и момента имеют значительные колебания. Исправить этот недостаток возможно путем корректировки момента во внешнем контуре скорости. В данной же работе для упрощения моделирования электропривод был выполнен нерегулируемым и управлялся по заданию напряжения.

Модель самой ПВШИМ можно считать удовлетворительной, так как основная цель – наведение двухфазного тока на выходе инвертора в составе преобразователя частоты была выполнена. Модель



подходит для дальнейших исследований двухфазного электропривода, описанных в [5], [6], и разработки новых систем управления. А усовершенствованная система управления двухфазным электроприводом, в свою очередь, найдет применение в тяжелой промышленности.

### Литература:

1. Blalock T.J. The first polyphase system: a look back at two-phase power for AC distribution // IEEE Power and Energy Magazine. – 2004. – V. 2. – № 2. – С. 63–66.
2. Беспалов В.Я., Качалина Е.В. Сравнительные характеристики асинхронных двигателей с трехфазными и двухфазными обмотками для частотно-регулируемого электропривода // Электричество. – 2010. – № 7. – С. 45–48.
3. Белоусов А.С. Анализ исследования систем управления двухфазным электроприводом // Актуальные вопросы взаимодействия образования, науки и бизнеса: сборник статей Международной научно-практической конференции. – М. : Импульс, 2018. – С. 399–404.
4. Белоусов А.С., Кокорев А.В., Муравьев А.А. Алгоритм управления инвертором двухфазного тока // Современные сложные системы управления: HTCS'2017 Материалы XII междунар. науч.-практ. конф., 25–27 октября 2017 г. В 2 ч. Ч. 2. – Липецк : Изд-во Липецкого государственного технического университета, 2017. – С. 91–96.
5. Jang D.H. PWM methods for two-phase inverters // IEEE industry Applications magazine. – 2007. – V. 13. – № 2. – С. 50–61.
6. Martins D.C. et al. Drive for a symmetrical two-phase induction machine using vector modulation // IEEEJ Transactions on Industry Applications. – 2006. – V. 126. – № 7. – С. 835–840.

### References:

1. Blalock T.J. The first polyphase system: a look back at two-phase power for AC distribution // IEEE Power and Energy Magazine. – 2004. – V. 2. – № 2. – С. 63–66.
2. Bepalov V.Ya., Kachalina E.V. Comparative characteristics of asynchronous engines with three-phase and two-phase windings for the frequency and adjustable electric drive // Electricity. – 2010. – № 7. – P. 45–48.
3. Belousov A.S. Analysis of a research of control systems of the two-phase electric drive // Topical issues of interaction of education, science and business: collection of articles of the International scientific and practical conference. – M. : Impulse, 2018. – P. 399–404.
4. Belousov A.S., Kokorev AV., Muraviev A.A. Control algorithm of the inverter of two-phase current // Modern difficult control systems: HTCS'2017 Materials XII of the international scientific and practical conference, on October 25–27, 2017. In 2 part. P. 2. – Lipetsk : Publishing house of the Lipetsk state technical university, 2017. – P. 91–96.
5. Jang D.H. PWM methods for two-phase inverters // IEEE industry Applications magazine. – 2007. – V. 13. – № 2. – С. 50–61.
6. Martins D.C. et al. Drive for a symmetrical two-phase induction machine using vector modulation // IEEEJ Transactions on Industry Applications. – 2006. – V. 126. – № 7. – С. 835–840.



УДК 622.23.05:681.518.5

## СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ПОДСТАНЦИЙ

### SYSTEM OF AUTOMATIC CONTROL OF WORKING HOURS OF SUBSTATIONS

**Брейдо Иосиф Вульфович**

доктор технических наук,  
профессор кафедры автоматизации  
производственных процессов,  
Карагандинский государственный технический университет  
jbreido@mail.ru

**Котов Евгений Сергеевич**

магистр, старший преподаватель кафедры автоматизации  
производственных процессов,  
Карагандинский государственный технический университет  
kotov1988@mail.ru

**Сичкаренко Андрей Владимирович**

старший преподаватель кафедры автоматизации  
производственных процессов,  
Карагандинский государственный технический университет  
sichkarenko@gmail.com

**Аннотация.** Данная статья посвящена системе автоматического контроля режимов работы подстанций (САКРРП), осуществляющей автоматизированный контроль и визуализацию технологических параметров электрических подстанций, в том числе в нефтегазовой отрасли. Создание и внедрение системы контроля позволяет оперативно реагировать на аварийные ситуации, возникающие в процессе эксплуатации электрооборудования, отслеживать незапланированные простои электрооборудования, происходящие по различным причинам, а также производить предварительный расчет затрат на электроэнергию. САКРРП является универсальной системой, которую можно внедрять при различном количестве объектов (подстанций).

**Ключевые слова:** подстанция, мониторинг, электрооборудование, нефтегазовая отрасль, энергопотребление.

**Breydo Iosif Vulfovich**

Doctor of Engineering,  
professor of department of  
automation of productions,  
Karaganda state technical university  
jbreido@mail.ru

**Kotov Evgeny Sergeevich**

master, senior teacher of department of  
automation productions,  
Karaganda state technical university  
kotov1988@mail.ru

**Sichkarenko Andrey Vladimirovich**

senior teacher of department of  
automation of productions,  
Karaganda state technical university  
sichkarenko@gmail.com

**Annotation.** This article is devoted to the system of automatic control of working hours of substations (SACWHS) exercising the automated control and visualization of technological parameters of electric substations including in oil and gas branch. Creation and introduction of the control system allows to react quickly to the emergencies arising in use electric equipments, to monitor the unplanned idle times of electric equipment happening for various reasons and also to make predesign of costs of the electric power. SAKRRP is universal system which can be introduced at various quantity of objects (substations).

**Keywords:** substation, monitoring, electric equipment, oil and gas branch, energy consumption.

**В** настоящее время повсеместно внедряются системы автоматизации в различных отраслях промышленности, нефтегазовая промышленность не является исключением. Повышение энергоэффективности производства является одной из важнейших задач повышения эффективности производства, особенно в энергоемких отраслях горнодобывающей промышленности. Важную роль в этом процессе играет мониторинг электропотребления.

Создана система автоматического контроля режимов работы подстанций (САКРРП), которая осуществляет автоматизированный контроль и визуализацию технологических параметров высоковольтных электрических подстанций горного производства.

В функции САКРРП входят:

- мониторинг, тока, напряжения и потребляемой энергии, активной и реактивной мощности каждым фидером подстанции с выводом на экран оператора посредством SCADA-системы;
- индикация состояния фидеров подстанции (включена/выключена) и аварийных ситуаций (максимальная токовая защита, замыкание на землю), а также уровня и температуры трансформаторного масла, с возможностью архивирования в базу данных;
- отображение на экране оператора графиков тока, напряжения и потребляемой энергии за период (час, смена, день, месяц);

«САКРРП» состоит из двух подсистем. Первая подсистема расположена в местах сбора информации, вторая – в диспетчерском пункте.





Первая подсистема, расположенная в пункте сбора информации (электрические подстанции, ЯКНО), содержит радиомодем «Невод-5М», принимающий сигналы с контроллера FX3U-16MR/ES, и передающий его по радиоканалу в диспетчерский пункт. Вторая подсистема содержит радиомодем «Невод-5М», принимающий сигналы с подстанций и контроллер FX3U-16MR/ES, обрабатывающий сигналы и передающий их с помощью модуля FX3U-ENET в персональный компьютер по сети Ethernet для отображения SCADA-системой.

Радиомодем Невод-5 может быть применен для организации телеметрических сетей, как с простой, так и со сложной топологией. Радиомодем может быть ретранслятором, реализуются как простые сети типа «точка-точка», «звезда», так и более сложные типа «цепочка» и «дерево». Невод-5 – это универсальное средство передачи данных, отвечающее современным требованиям приборных сетей, обеспечивающее прозрачность передачи данных. Помехоустойчивый эфирный протокол, высокая чувствительность обеспечивают надежность радиообмена на больших расстояниях в любых погодных условиях. Во время работы не требуется управления работой радиомодема – все операции по передаче и приему информации радиомодем Невод-5 осуществляет автоматически [1].

Программируемые логические контроллеры FX3U производятся японской фирмы Mitsubishi Electric, выпускающей широкий спектр различного электрооборудования. Благодаря хорошим техническим характеристикам специализированные блоки и модули FX3U являются гибкой и экономичной платформой для задач управления производственными процессами, машиностроительного сектора, а также универсальным решением для других сфер производства [2].

Структурная схема САККРП представлена на рисунке 1. Как видно из нижеприведенной схемы, система САККРП является универсальной. Существует возможность увеличения числа исследуемых объектов, а также изменение количества опрашиваемых параметров, путем настройки программного обеспечения.

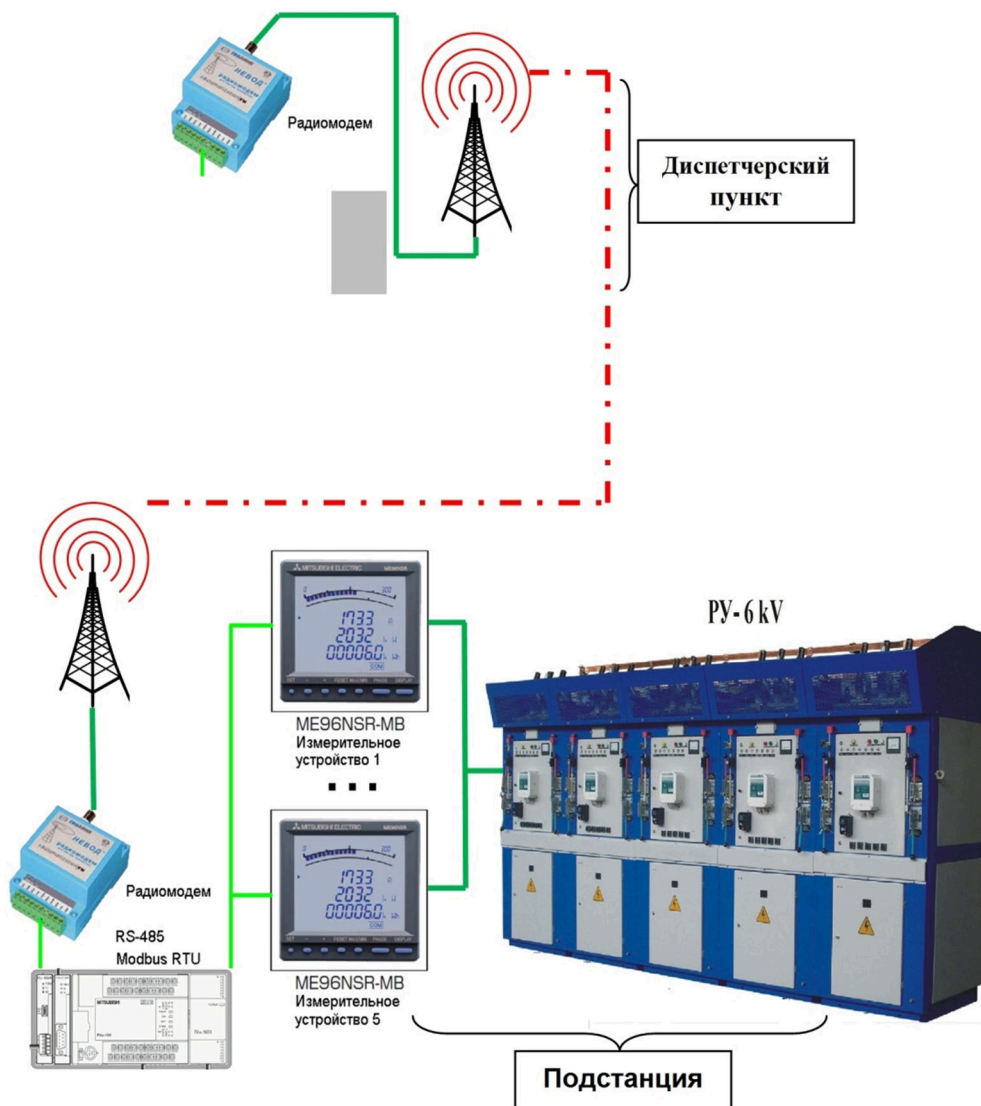


Рисунок 1 – Структурная схема САККРП



Внедрение системы обеспечило значительное увеличение эффективности мониторинга параметров электроэнергии и технологических защит подстанции. Анализ графиков потребляемой мощности, позволяет отслеживать эффективность использования подключённого оборудования на данном фидере. За счет объединения данных в единую картину на экране у диспетчеров повышается оперативность реагирования на любые нештатные ситуации, связанные с аварийными отключениями подстанций. В процессе испытаний опытного образца системы на высоковольтной подстанции в условиях угольного разреза установлено, что ее внедрение дает экономию 15 % от потребляемой энергии [3].

#### Литература:

1. Автоматизированная система мониторинга и управления территориально-распределенными модульными котельными / И.А. Елизаров [и др.] // III Международная научная конференция «Современные проблемы информатизации в системах моделирования, программирования и телекоммуникациях»; Тамбовский государственный технический университет. – Тамбов, 2009.
2. [http://es-electro.ru/market/goods/seriya\\_fx3u\\_\\_mr\\_mt/](http://es-electro.ru/market/goods/seriya_fx3u__mr_mt/) (30.03.2018).
3. Брейдо И.В., Сичкаренко А.В., Котов Е.С. Системы удаленного мониторинга режимов работы высоковольтных подстанций и горнодобывающего оборудования для угольных разрезов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – Новосибирск : институт горного дела СО РАН, 2016. – № 5. – С. 99–107.

#### References:

1. The automated system of monitoring and management of the territorial distributed modular boiler rooms / I.A. Yelizarov [etc.] // III International scientific conference «Modern Problems of Informatization in the Systems of Modeling, Programming and Telecommunications»; Tambov state technical university. – Tambov, 2009.
2. [http://es-electro.ru/market/goods/seriya\\_fx3u\\_\\_mr\\_mt/](http://es-electro.ru/market/goods/seriya_fx3u__mr_mt/) (30.03.2018).
3. Breydo I.V., Sichkarenko A.V., Kotov E.C. Systems of remote monitoring of working hours of high-voltage substations and mining equipment for coal mines//Physics and technology problems of development of minerals. – Novosibirsk : institute of mining of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science, 2016. – № 5. – P. 99–107.



УДК 621.313

## РЕГУЛИРОВОЧНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЕТРО-СОЛНЕЧНОГО ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ

### ADJUSTING CHARACTERISTICS OF A WIND-SOLAR GENERATOR FOR POWER SUPPLY OF OIL AND GAS FACILITIES

**Гайтов Багаудин Хамидович**

доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры электротехники и электрических машин,  
Кубанский государственный технологический университет  
kklllev1@mail.ru

**Артенян Коряун Завенович**

студент,  
Кубанский государственный технологический университет  
e-mailzevs4998@mail.ru

**Христофоров Михаил Сергеевич**

аспирант,  
Кубанский государственный технологический университет  
mkhristoforov87@mail.ru

**Шаршак Алексей Александрович**

студент,  
Кубанский государственный технологический университет  
vip.sharshak@mail.ru

**Аннотация.** В работе рассматриваются регулировочные характеристики ветро-солнечного генератора, используемого для электроснабжения маломощных объектов нефтегазовой отрасли.

**Ключевые слова:** ветро-солнечный генератор; двухвходовая электрическая машина; альтернативная энергетика.

**Gaitov Bogaudin Hamidovich**

Doctor of Technical Sciences, Professor,  
Professor of the Department of Electrical  
Engineering and Electrical Machines,  
Kuban State Technological University  
kklllev1@mail.ru

**Artenyan Koryun Zavenovich**

Student,  
Kuban State Technological University  
e-mailzevs4998@mail.ru

**Khristoforov Mikhail Sergeevich**

Graduate Student,  
Kuban State Technological University  
mkhristoforov87@mail.ru

**Sharshak Alexey Alexandrovich**

Student,  
Kuban State Technological University  
vip.sharshak@mail.ru

**Annotation.** In work the adjusting characteristics of the wind-solar generator used for power supply of low-power objects of oil and gas branch are considered.

**Keywords:** wind-solar generator; two-input electric machine; alternative energy.

В настоящее время стоит вопрос необходимости применения альтернативных источников электроэнергии для электроснабжения локальных удалённых объектов. В нефтегазовой отрасли основным потребителем является электропривод, поэтому к качеству электрической энергии предъявляются жёсткие требования. Однако существуют и объекты, для которых не требуется высокого качества электроэнергии и системы электроснабжения которых не синхронизированы с сетью. Для их питания целесообразно использование ветро-солнечного генератора [1–4].

Особенностью ВСГ является одновременное кинетической энергии ветра в механическую энергию вращения вала генератора и энергии Солнца в электрическую, посредством фотоэлектрических преобразователей (ФЭП). Ниже представлены основные регулировочные характеристики ВСГ – зависимости выходных величин (частоты, напряжения, тока нагрузки) от входных, полученные путём математического моделирования в среде MatLab [5]. Для получения зависимости напряжения на нагрузке от тока нагрузки при изменении напряжения на выходе ФЭП представленной на рис.4 была искусственно введена активно-индуктивная нагрузка на выходе ВСГ, что наиболее соответствует модели реального потребителя. Основными потребителями нефтегазовой отрасли, для электроснабжения которых предназначен ВСГ являются маломощные жилые и служебные помещения с бытовыми приборами.

Проанализировав графики, представленные на рис. 1–4 можно сформулировать следующие выводы:

1. Частота напряжения на выходе ВСГ не зависит от напряжения на выходе ФЭП и прямо пропорциональна скорости ветра.
2. Величина выходного напряжения прямо пропорциональна скорости ветра и напряжению на выходе ФЭП.
3. С увеличением тока нагрузки уменьшается уровень напряжения на выходе ВСГ.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Краснодарского края в рамках научного проекта № 16-48-230500 а(р).

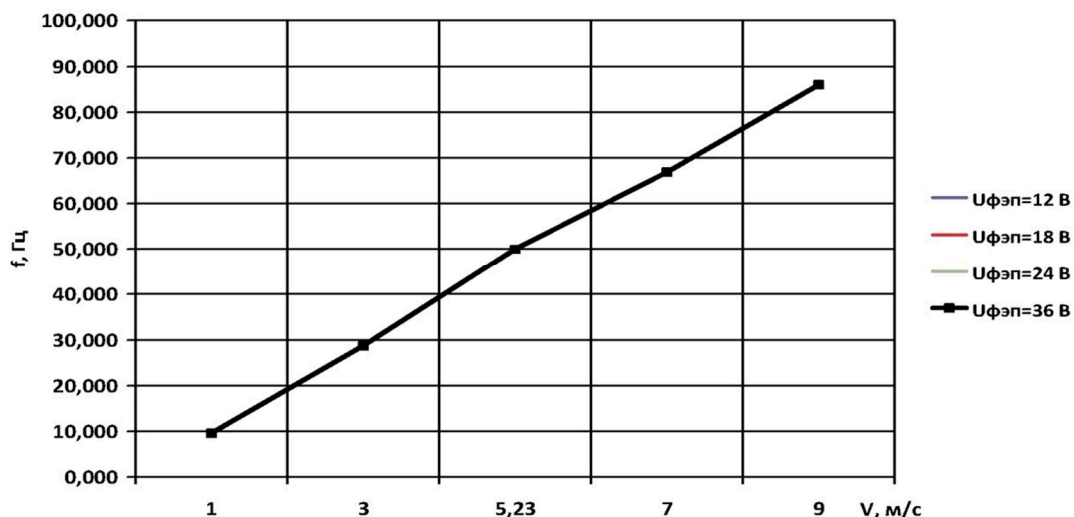


Рисунок 1 – Зависимость частоты выходного сигнала от скорости ветра при изменении напряжения на выходе ФЭП

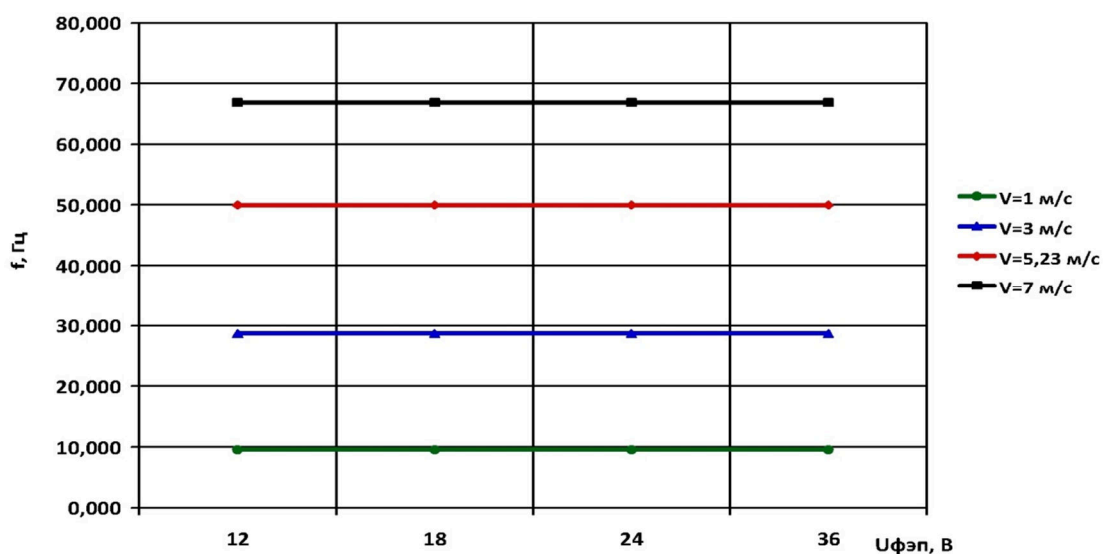


Рисунок 2 – Зависимость частоты выходного сигнала от напряжения на выходе ФЭП при изменении скорости ветра

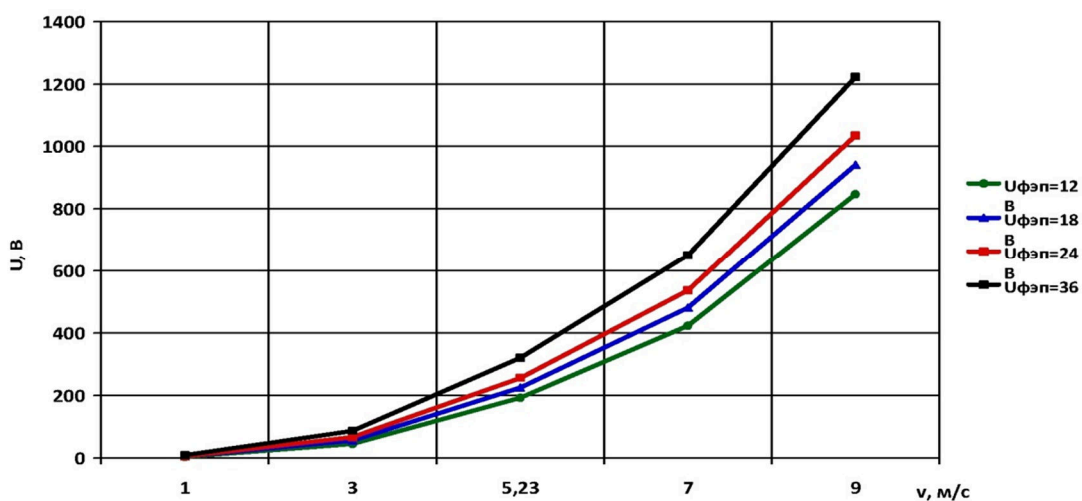
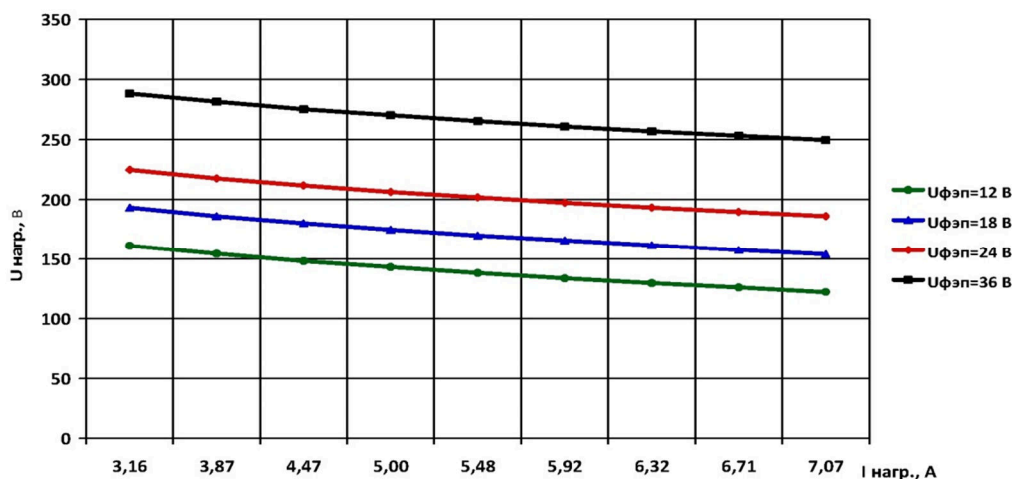


Рисунок 3 – Зависимость выходного напряжения от скорости ветра при изменении напряжения на выходе ФЭП



**Рисунок 4** – Зависимость напряжения на нагрузке от тока нагрузки при изменении напряжения на выходе ФЭП

**Литература:**

1. Пат. 2561504 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> H02K19/38, H02K19/00. Аксиальный двухходовый бесконтактный ветро-солнечный генератор / Б.Х. Гайтов, Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, Л.Е. Копелевич, А.В. Самородов; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный технологический университет» (ФГБОУ ВО «КубГТУ») (RU). – № 2014124436; заявл. 2014-06-16; опубл. 27.08.2015, Бюл. № 24. – 7 с.: ил.
2. Ветро-солнечный генератор для систем автономного электроснабжения / Б.Х. Гайтов [и др.] // Электричество. – 2018. – № 1. – С. 19–27.
3. Ветро-солнечный генератор / Б.Х. Гайтов [и др.] // Энергосбережение и водоподготовка. – 2017. – № 6 (110). – С. 25–30.
4. Ветро-солнечный генератор / Б.Х. Гайтов [и др.] // Материалы Международной конференции «Actual Issues of Mechanical Engineering» 2017 (AIME 2017). Серия книг «AER-Advances in Engineering Research». – Т. 133. – С. 343–349.
5. Гайтов Б.Х., Кашин А.Я., Схашок А.О. Математическая модель ветро-солнечного генератора для объектов нефтегазовой отрасли в среде MATLAB // Материалы Международной научно-практической конференции «Булатовские чтения» (31 марта 2017 г.). Сборник статей. В 5 т. Т. 5. – Краснодар : Издательский Дом – Юг, 2017. – С. 17–21.

**References:**

1. Patent 2561504 Russian Federation, MPK<sup>7</sup> H02K19/38, H02K19/00. Axial dvukhvhodovy contactless vetro-solar generator / B.H. Gaytov, Ya.M. Kashin, A.Ya. Kashin, L.E. Kopelevich, A.V. Samorodov; applicant and patent holder Federal state-funded educational institution of the higher education «Kuban state technological university» (FGBOU VO «KUBGTU») (RU). – No. 2014124436; decl. 2014-06-16; pub. 8/27/2015, Bulletin № 24. – 7 pages: silt.
2. Winds-solar generator for the systems of autonomous power supply / B.H. Gaytov [etc.] // Electricity. – 2018. – № 1. – P. 19–27.
3. Winds-solar generator / B.H. Gaytov [etc.] // Energy saving and water treatment. – 2017. – № 6 (110). – P. 25–30.
4. Winds-solar generator / B.H. Gaytov [etc.] // Materials of the International conference «Actual Issues of Mechanical Engineering» 2017 (AIME 2017). Series of books «AER-Advances in Engineering Research». – V. 133. – P. 343–349.
5. Gaytov B.H., Kashin A.Ya., Skhashok A.O. Mathematical model of the vetro-solar generator for objects of oil and gas branch in the environment of MATLAB // Materials of the International scientific and practical conference «Readings of Bulatov» (on March 31, 2017). Collection of articles. In 5 v. V. 5. – Krasnodar : Publishing house – South, 2017. – P. 17–21.



УДК 621.313

## ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПРИМЕНЕНИЯ УСТАНОВКИ ДЛЯ СЕПАРИРОВАНИЯ НЕФТИ СОВМЕЩЕННОЙ КОНСТРУКЦИИ

### TECHNICAL AND ECONOMIC INDICATORS OF APPLICATION OF A UNIT FOR OIL SEPARATION OF A COMBINED STRUCTURE

**Гайтов Багаудин Хамидович**

доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры электротехники и электрических машин,  
Кубанский государственный технологический университет  
kkllev1@mail.ru

**Артенян Корюн Завенович**

студент,  
Кубанский государственный технологический университет  
e-mailzevs4998@mail.ru

**Дюка Кирилл Владимирович**

студент,  
Кубанский государственный технологический университет  
kirillyduka@mail.ru

**Христофорова Ксения Сергеевна**

студентка,  
Армавирский механико-технологический институт,  
Кубанский государственный технологический университет  
senya19965@mail.ru

**Аннотация.** Данная статья посвящена обзору технико-экономических показателей применения установки для сепарирования нефти выполненной на базе двигателя-сепаратора.

**Ключевые слова:** сепаратор, сепарация нефти, энергосбережение.

**Gaitov Bogaudin Hamidovich**

Doctor of Technical Sciences, Professor,  
Professor of the Department of Electrical  
Engineering and Electrical Machines,  
Kuban State Technological University  
kkllev1@mail.ru

**Artenyan Koryun Zavenovich**

Student,  
Kuban State Technological University  
e-mailzevs4998@mail.ru

**Duka Kirill Vladimirovich**

Student,  
Kuban State Technological University  
kirillyduka@mail.ru

**Khristoforova Xenia Sergeevna**

Student,  
Kuban State Technological University  
senya19965@mail.ru

**Annotation.** This article is devoted to the review of technical and economic parameters of the application of an oil separation unit made on the basis of a separator engine.

**Keywords:** separator, oil separation, energy saving.

Экономия энергоресурсов – это та проблема над которой трудятся множество ученых, к их числу принадлежит и коллектив кафедры электротехники и электрических машин ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», исследующий возможные пути повышения энергоэффективности объектов нефтегазовой отрасли. Одним из таких решений стали способ и установка для сепарирования нефти [1, 2].

Установка для сепарирования нефти, представленная на рисунке 1 содержит: корпус 1 сепаратора, смонтированный в нем статор электродвигателя, состоящий из двух частей (цилиндрическая часть 2-1, аксиальная часть 2-2), с обмоткой 3 двух частей статора, вокруг лобовых частей которой установлены трубки 4, залитые компаундом 5, барабан сепаратора 6, являющийся одновременно ротором электродвигателя, жестко связанный с валом 7, подогревателя нефти 15, соединительных трубок 16 и 17. Вал 7 установлен в подшипниковых опорах 8 и 9. Барабан сепаратора 6 состоит из основания 10 с центральной трубкой, разделительных тарелок 11, крышки 12, тарелкодержателя 13, тяжелого кольца 14,. Соединительная трубка 16 соединяет подогреватель нефти 15 с входом трубок 4, а соединительная трубка 17 соединяет выход трубок 4 с внутренней частью барабана сепаратора 6.

При подаче питания на обмотку 3 цилиндрической 2-1 и аксиальной частей 2-2 статора возникает вращающееся магнитное поле, которое наводит вихревые токи в барабане 6, являющегося одновременно ротором электродвигателя. Взаимодействие вращающегося магнитного поля, созданного в частях статора 2-1 и 2-2, и магнитного поля, созданного вихревыми токами в барабане (массивном роторе) 6, приводит к возникновению вращающегося момента, в результате чего барабан 6 приходит во вращение, совместно с валом 7. Исходная нефть подается в подогреватель нефти 15, где частично происходит подогрев исходной нефти до определенной температуры. После подогревателя нефти 15, частично подогретая нефть по соединительной трубке 16 подается на вход трубок 4. Проходя по трубкам 4, нефть дополнительно подогревается за счет тепловыделения в обмотках 3 цилиндриче-



ской 2-1 и аксиальной 2-2 частей статора и в магнитопроводах цилиндрической 2-1 и аксиальной 2-2 частей статора. Подогреваясь в трубках 4 нефть, одновременно, охлаждает магнитопроводы цилиндрической 2-1 и аксиальной частей 2-2 статора и обмотку 3 двух частей статора 2. При выходе из трубок 4 нефть по соединительной трубке 17 подается в барабан (массивный ротор) 6, где она поступает через центральную трубку в днище барабана, а затем в каналы тарелкодержателя 13. Находясь в нижней части барабана 6, нефть дополнительно подогревается за счет тепловыделения в торцевой и цилиндрической частях барабана 6, приобретая тем самым необходимую для сепарирования температуру. Находясь в нижней части барабана 6 нефть подвергается воздействию электромагнитного поля, как с аксиальной, так и с цилиндрической частями статора, что способствует улучшению процесса сепарирования. Сам процесс сепарирования нефти происходит в разделительных тарелках 11. Продукты сепарирования (в т.ч. очищенная нефть) выводятся из барабана сепаратора.

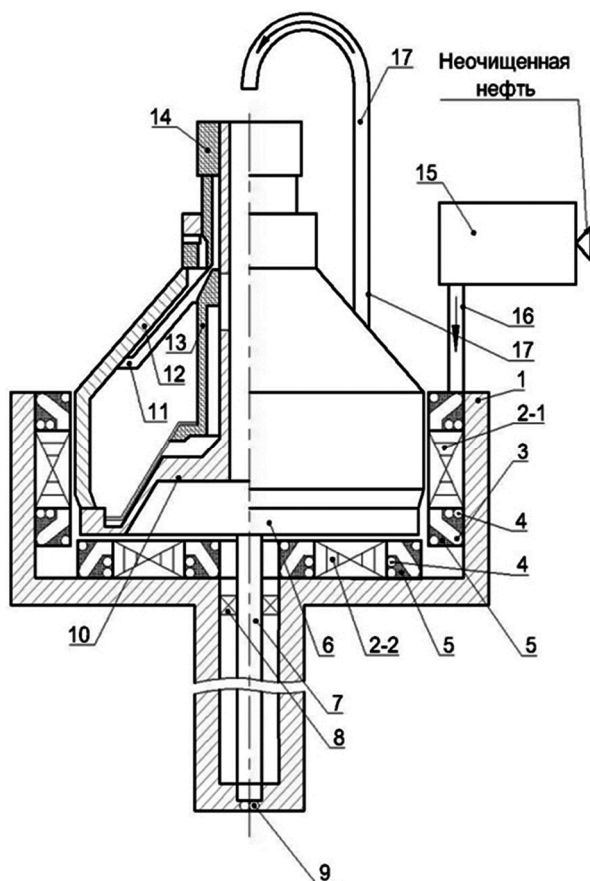


Рисунок 1 – Установка для сепарирования нефти

Так как, в отличие от классической схемы сепарирования, установка для сепарирования нефти осуществляет еще и подогрев нефти, то мы получаем экономию энергии, которая рассчитывается по следующим формулам.

Энергия, «передаваемая» нефти, протекающей через трубки, «обвивающие» обмотку статора:

$$\Delta W' = 3 \cdot I^2 \cdot R_{ст} \cdot T_{год} \cdot K_1, \tag{1}$$

где  $\Delta W'$  – энергия, «передаваемая» нефти обмоткой статора;  $R_{ст}$  – сопротивление обмотки статора;  $I$  – сила тока статора;  $T_{год}$  – число часов работы сепаратора в год;  $K_1$  – коэффициент теплопередачи через стенку трубки.

Энергия, передаваемая нефти, протекающей через трубки, «обвивающие» магнитопровод статора:

$$\Delta W_{серд} = 3 \cdot I^2 \cdot R_{ст} \cdot T_{год} \cdot K_1 \cdot K_2, \tag{2}$$

где  $\Delta W_{серд}$  – энергия, «передаваемая» нефти сердечником статора;  $K_2$  – коэффициент, учитывающий соотношение потерь электроэнергии в обмотке статора и в магнитопроводе статора.

Энергия, передаваемая нефти, протекающей через барабан сепаратора:

$$\Delta W_{бар} = 3 \cdot I_{бар}^2 \cdot R_{бар} \cdot K_3 \cdot T_{год}, \tag{3}$$



где  $\Delta W_{\text{бар}}$  – энергия, «передаваемая» нефти в барабане сепаратора ДС;  $I_{\text{бар}}$  – ток в барабане сепаратора совмещенной конструкции;  $R_{\text{бар}}$  – сопротивление барабана сепаратора совмещенной конструкции;  $K_3$  – коэффициент теплопередачи в барабане сепаратора. В [3] был произведен комплексный расчет возможной экономии энергоресурсов при применении установки для сепарирования нефти, которая может достигать 1,82 кВт·ч на тонну сепарируемого продукта.

#### Литература:

1. Пат. 2593626 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> B04B5/10, B03C5/02, B01D17/06, B01D43/00, B04B9/02. Установка для сепарирования нефти / Копелевич Л.Е.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный технологический университет» (ФГБОУ ВО «КубГТУ») (RU). – № 2015110414/05; заявл. 2015-03-23; опубл. 10.08.2016, Бюл. № 22. – 7 с.: ил.
2. Пат. 2585636 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> B01D17/06, B03C5/00, B01D43/00. Способ сепарирования нефти / Копелевич Л.Е.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный технологический университет» (ФГБОУ ВО «КубГТУ») (RU). – № 2015110413/05; заявл. 2015-03-23; опубл. 27.05.2016, Бюл. № 15. – 6 с.: ил.
3. Установка для сепарирования нефти / Б.Х. Гайтов [и др.] // Нефтяное хозяйство. – 2017. – № 7. – С. 90–92.

#### References:

1. Patent 2593626 Russian Federation, MPK<sup>7</sup> B04B5/10, B03C5/02, B01D17/06, B01D43/00, B04B9/02. Installation for separation Oil / Kopelevich L.E.; applicant and patent holder Federal state-funded educational institution of the higher education «Kuban state technological university» (FGBOU VO «KUBGTU») (RU). – № 2015110414/05; dec. 2015-03-23; pub. 8/10/2016, Bulletin № 22. – 7 p.
2. Patent 2585636 Rossiiskaya Federation, MPK<sup>7</sup> B01D17/06, B03C5/00, B01D43/00. Way of separation Oil / Kopelevich L.E.; applicant and patent holder Federal state-funded educational institution of the higher education «Kuban state technological university» (FGBOU VO «KUBGTU») (RU). – № 2015110413/05; dec. 2015-03-23; pub. 5/27/2016, Bulletin № 15. – 6 p.
3. Installation for oil separation / B.H. Gaytov [etc.] // Oil economy. – 2017. – № 7. – P. 90–92.





УДК 621.3

## СИСТЕМА ИМПУЛЬСНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДПТ С ОТДАЧЕЙ ЭНЕРГИИ В ТРЁХФАЗНУЮ СЕТЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

### SYSTEM OF DC MOTOR IMPULSE CONTROL CONTROL WITH RECUPERATION IN THREE-PHASE ALTERNATING CURRENT NETWORK

**Головин Андрей Юрьевич**

студент,  
Липецкий государственный технический университет  
coldsunrise94@yandex.ru

**Кокорев Антон Владимирович**

студент,  
Липецкий государственный технический университет  
kokoarevav@gmail.com

**Мещеряков Виктор Николаевич**

доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой электропривода,  
Липецкий государственный технический университет

**Аннотация.** В данной работе рассмотрен импульсный принцип управления двигателем постоянного тока. Данный принцип является перспективным и достаточно редко применяемым в современных системах управления, а значит редко является объектом изучения и исследования по средствам моделирования. Этому и посвящена данная работа.

**Ключевые слова:** импульсное управление, двигатель постоянного тока, рекуперация в сеть.

**Golovin Andrei Yurievich**

Student,  
Lipetsk State Technical University  
coldsunrise94@yandex.ru

**Kokorev Anton Vladimirovich**

Student,  
Lipetsk State Technical University  
kokoarevav@gmail.com

**Meshcheryakov Victor Nikolayevich**

Doctor of Technical Sciences, Professor,  
Head of the electric drive department;  
Lipetsk State Technical University

**Annotation.** This article is devoted to the prospects of DC motor control. This principle is quite promising and rare using in contemporary automation systems. That is why it is rare to examine and modeling by computer models.

**Keywords:** impulse control, direct current drive, recuperation.

Первостепенной задачей при моделировании любой системы управления является разгон двигателя. Базой для построения подобной системы является традиционная схема импульсного управления, представленная на рисунке 1. Принцип построения подобной системы описан в [1].

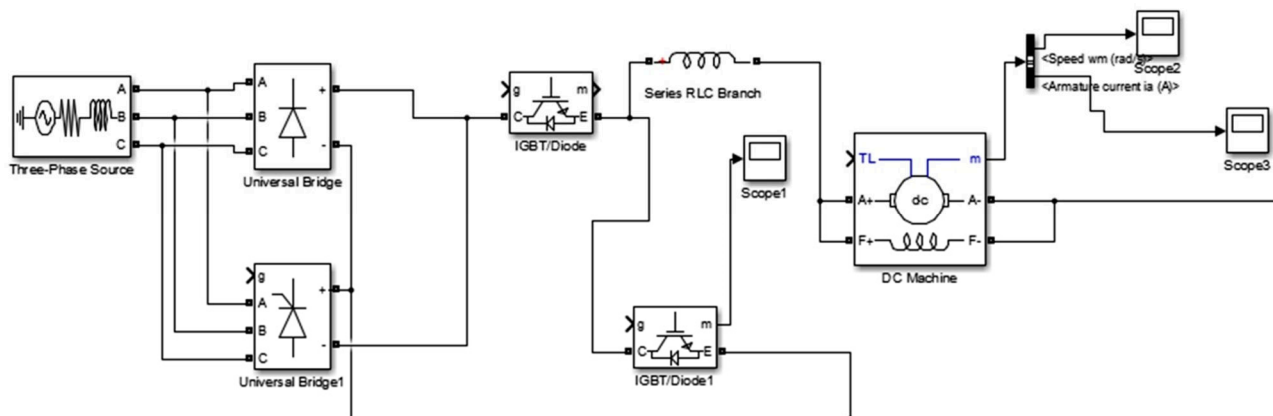


Рисунок 1 – Схема импульсного управления ДПТ

На данной схеме представлен 3х фазный источник питания, соединённый с диодной группой выпрямления и встречно подключённая транзисторная группа «назад» для обратной отдачи энергии в сеть. Последовательно включенный транзистор отвечает за непосредственное управление двигателем. Параллельно включенный транзистор предназначен для торможения, и включается только в периоды остановки. Начальная задача состояла в разгоне двигателя, для её решения была смоделирована система управления первым транзистором, представленная на рисунке 2. Принципы подобного управления и схожие системы для АД описаны в [2] и [3].

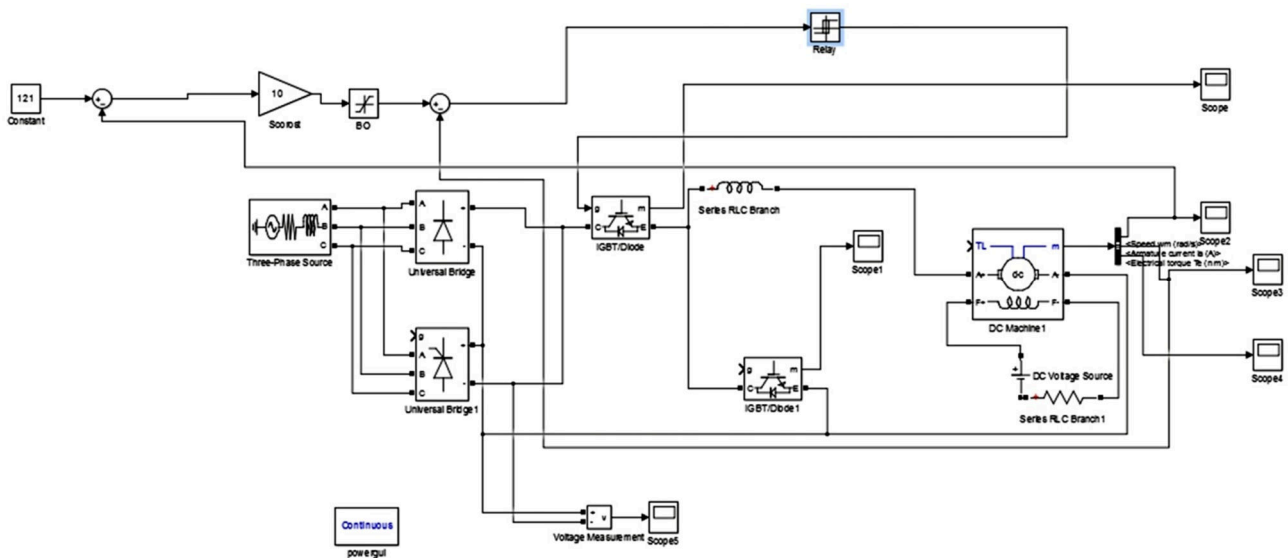


Рисунок 2 – Система управления пуском ДПТ

Здесь в качестве управляющего сигнала подаётся двухконтурный сигнал. На вход подаётся задание на скорость, регулятор скорости представлен П-регулятором и блоком ограничения БО . Регулятор тока представлен релейным регулятором, от работы которого и зависит коммутация ключа. Разгон двигателя представлен на рисунке 3.

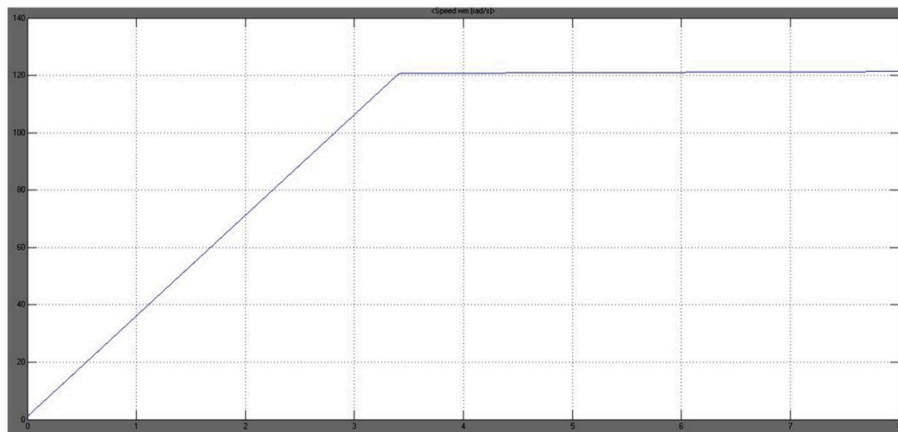


Рисунок 3 – График скорости двигателя

Непосредственно частоту коммутации можно оценить по рисунку 4, на котором представлен график тока.

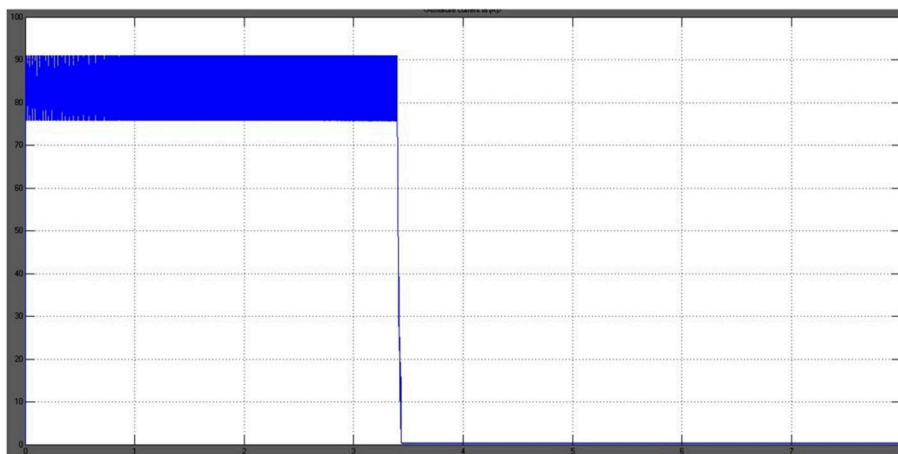
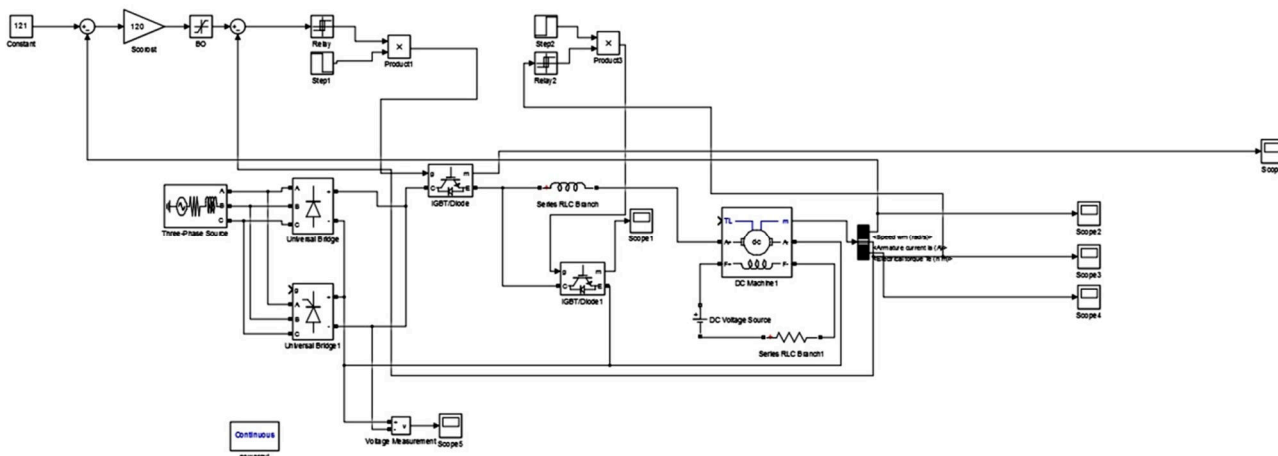


Рисунок 4 – График тока двигателя

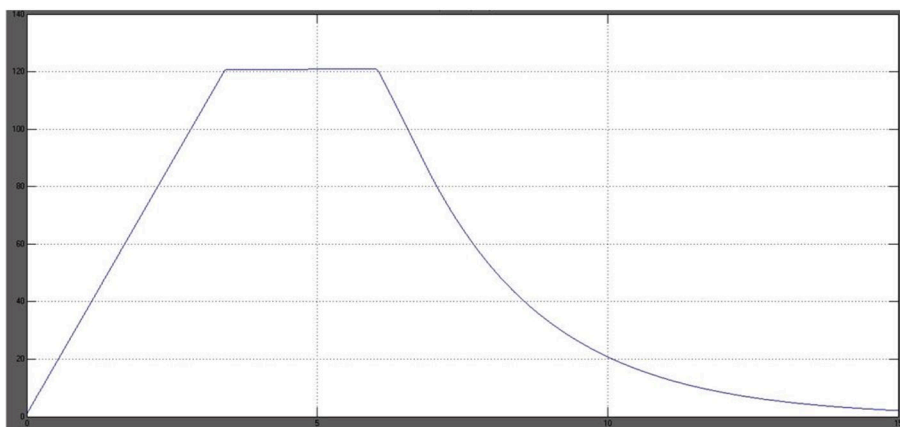


Следующим шагом для моделирования заявленной системы является составление сигнала управления транзистором торможения. Полученная схема представлена на рисунке 5.



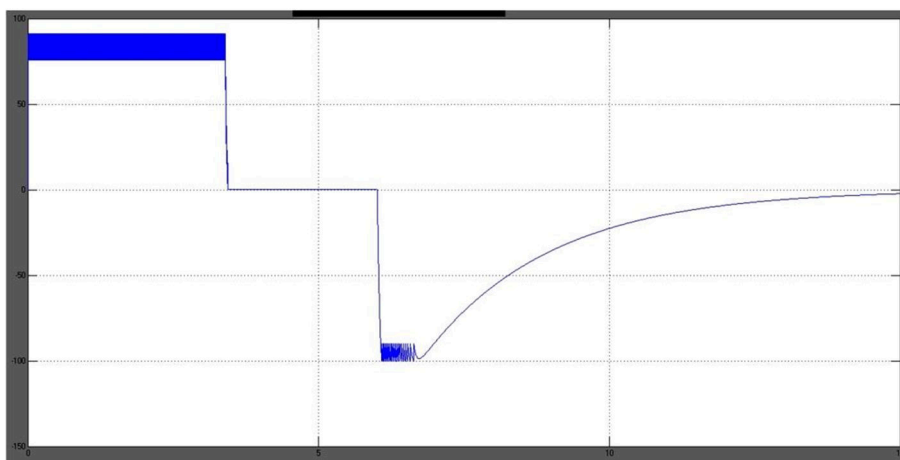
**Рисунок 5** – Схема торможения ДПТ на базе импульсного управления

Принцип данного управления состоит в подаче импульсов на тормозной транзистор через блок Relay, при соединении данного блока по обратной связи со значениями выходного тока. Выходной график скорости представлен на рисунке 6.



**Рисунок 6** – График изменения скорости двигателя при торможении

На рисунках 7 и 8 представлены соответствующие графики для тока и момента.



**Рисунок 7** – График изменения тока двигателя при торможении

Как показывают графики, на момент разгона срабатывает один из транзисторов, в момент торможения срабатывает другой транзистор. Устройство модели подразумевает отдачу энергии в



сеть через группу «назад». Однако в данной конфигурации передачу энергии осуществить не удалось. Напряжение циркулирующее по звену постоянного тока имеет неудовлетворительную форму (представлено на рисунке 9).

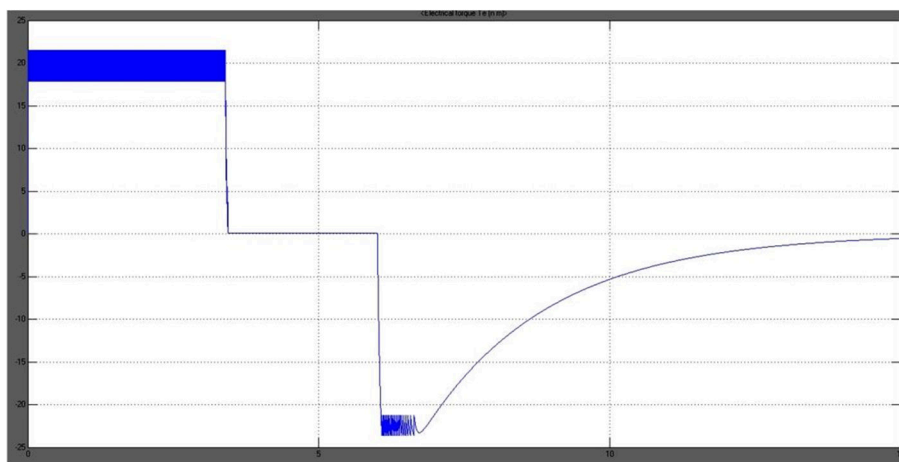


Рисунок 8 – График изменения момента двигателя при торможении

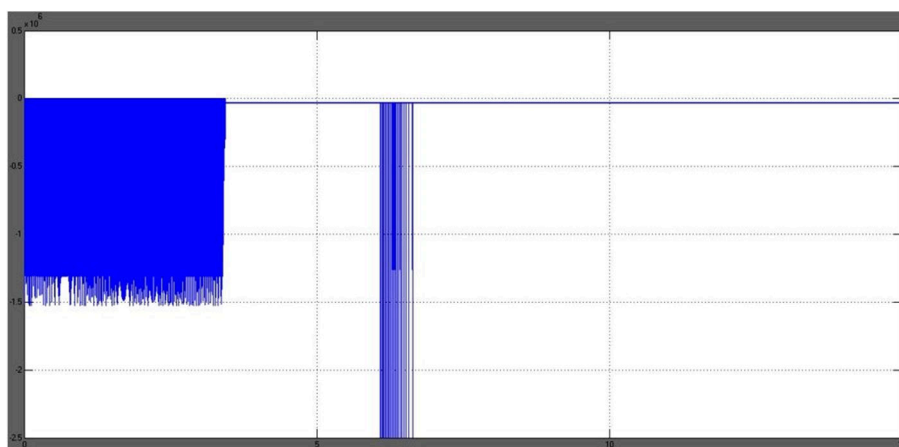


Рисунок 9 – Внешний вид напряжения, отдаваемого в сеть

В данной работе было произведено моделирование импульсной системы управления ДПТ с дальнейшим торможением через параллельно включенный транзистор. Полученные графики отражают возможность потенциального управления реальными системами по принципам импульсных транзисторов. Однако, анализ графика напряжения на группе «назад» демонстрирует большие значения перенапряжения, что говорит о необходимости дальнейшей работы с моделью. Основные предпосылки и преимущества упоминаются в [4]. Данная технология может в перспективе получить применение в нефтегазовой отрасли, как современный и перспективный способ управления двигателями, ведущий к снижению расхода энергии. Это имеет большое значение для столь энергоёмкого направления. Однако, разумеется, стоит отметить, что тема требует дальнейшей проработки в области моделирования.

**Литература:**

1. Евзеров И.Х., Горобец А.С., Мошкович Б.И.. Комплексные тиристорные электроприводы. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – С. 318.
2. Денисов В.А. Электроприводы переменного тока с частотным управлением // ТНТ. – Старый Оскол, 2013. – С. 164.
3. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. – М. : Издательский центр «Академия». – 2006. – С. 272.
4. Белов М.П. Инжиниринг электроприводов и систем. – М. : Академия, 2006. – С. 386.

**References:**

1. Evsveror I.H., Gorbanec A.S., Moshkovic B.I. Complex thyristor electric drive. – M. : Energoizdat, 1988. – P. 318.
2. Denisov V.A. AC electric drives with frequency control // TNT. – Stariy Oskol, 2013. – P. 164.
3. Sokolovsky G.G. AC electric drives with frequency control. – M. : Publishing center «Akademia», 2006. – P. 272.
4. Belov M.P. Engineering of electric drives and automation systems. – M. : Publishing center «Akademia», 2006. – P. 386.



УДК 622

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНАТКИ В ПРОЦЕССЕ ЕЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

### THE PREDICTION ERRORS OF THE GEOMETRIC PARAMETERS OF THE TOOLING DURING ITS DESIGN

**Гололобова Анна Андреевна**

старший преподаватель,  
Московский государственный технологический  
университет «Станкин»  
ann2187@mail.ru

**Гололобов Денис Владимирович**

старший преподаватель,  
Российский государственный университет нефти и газа  
(национальный исследовательский университет)  
имени И.М. Губкина  
dgololobov@mail.ru

**Аннотация.** В статье рассматриваются вопросы прогнозирования погрешностей при проектировании технологической оснастки. Описаны наиболее часто встречающиеся погрешности, примеры их появления. Изменение модели проектируемой оснастки с учетом погрешностей.

**Ключевые слова:** технологическая оснастка, станок с ЧПУ, проектируемая модель, погрешности геометрических параметров, импортозамещение, качество деталей.

**Gololobova Anna Andreevna**

Senior Teacher,  
Moscow state technological  
university «Stankin»  
ann2187@mail.ru

**Gololobov Denis Vladimirovich**

Senior Teacher,  
Russian state university of oil and gas  
(national research university) of  
a name of I.M. Gubkin  
dgololobov@mail.ru

**Annotation.** The article considers the issues of forecasting errors in the design of tooling. Describes the most common error, examples of their occurrence. Changing models of snap with respect to the error.

**Keywords:** industrial equipment, CNC machine, design model, the error of geometric parameters, import substitution, quality parts.

В рамках программы импортозамещения, возникает необходимость разработки технологических процессов изготовления деталей и узлов, замещающих оригинальные детали и узлы импортных комплектующих импортных машин в газонефтяной отрасли. Наряду с заменой парка оборудования на современные станки с ЧПУ, возникает необходимость разработки технологических процессов на новом уровне, и переработка существующих технологических процессов, а также проектирования нового инструмента под новые режимы резания современных станков и проектирование технологической оснастки на новом уровне проектных работ с использованием современных систем проектирования. При возникновении задачи проектирования технологической оснастки, производится стандартная процедура разработки конструкторской документации, составления конструкторских чертежей, спецификации, расчеты связанные с точностью и прочностью проектируемого изделия. Существуют различные подходы к проектированию технологической оснастки и ее расчету по заданным параметрам. Постановка задачи ведется исходя из необходимости решения технологической задачи на заданной операции. Современные методы твердотельного проектирования позволяют не только получить представление о проектируемом объекте в трехмерном отображении, но и производить необходимые расчеты. Один из таких расчетов, это точностной расчет. Результаты данного расчета определяют требования, предъявляемые к технологической оснастке и позволяют прогнозировать возможные отклонения, появляющиеся на этапах сборки приспособления. Основной задачей в оценке погрешностей технологической оснастки является определение тех поверхностей оснастки, которые выполняют ее служебное назначение.

Решение данной задачи может дать возможность сопоставления модели проектируемой оснастки с учетом допустимых погрешностей с реальной изготовленной и установленной оснасткой на операции механической обработки. Такой метод оценки точности может увеличить производительность процесса оценки точности обработки, что позволит оперативно принимать решение о переналадке и поднастройке станка на текущей операции, или принятие решения о замене или ремонте технологической оснастке на этапе ее эксплуатации.

Проектирование технологической оснастки можно вести различными методами, при этом современные системы проектирования позволяют получать трехмерную модель, с возможностью параметризации модели, сохранению матрицы данных по каждому элементу, входящему в технологическую оснастку, содержащую все необходимые данные о параметрах элемента. Примером для реше-



ния задачи проектирования может служить проектирование кондукторов, для операций сверления. Проектирование такого рода приспособлений имеет практическую значимость при сверлении отверстий, когда глубина сверления  $l$  много превышает значение диаметра сверления  $d$ . Примером такой технологической операции может служить операция вертикального сверления отверстия под установку запорного подшипника в секции долота (рис. 1).

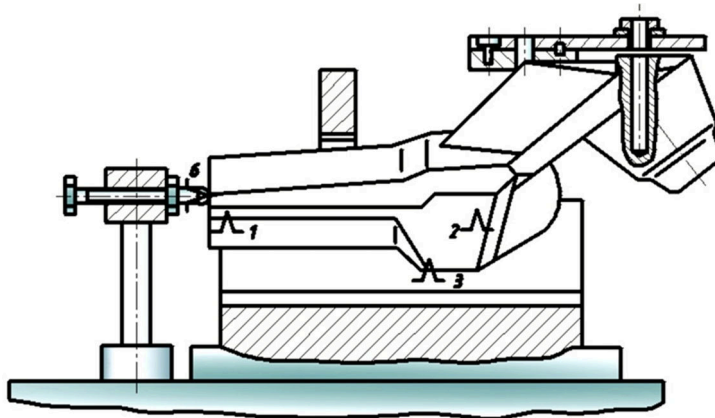


Рисунок 1 – Применение кондуктора на вертикально-сверлильной операции

Современное оснащение станков позволяют оснащать их различного рода системами контроля параметров, в основу которых положены контактные и бесконтактные методы контроля.

Опыт использования станочных приспособлений показывает, что отклонения заложенные при нормировании деталей, входящих в состав оснастки, в приспособлении в сборе, могут давать погрешности, которые при оценке точности, могут быть подвержены простому арифметическому сложению. Данный процесс имеет место быть с учетом условия использования обоснованных допусков на изготовление и износ деталей приспособления. При соблюдении этих условий арифметическая сумма погрешностей является допустимой и целесообразной [1].

Можно обозначить суммарную допускаемую погрешность, как  $a_\delta$ . В приспособлениях (кроме кондукторов)  $a_\delta$  не превышает значения  $a$ , где  $a$  – отклонение обрабатываемой поверхности относительно базы, т.е.  $a \geq a_\delta$ , для кондукторов  $a \leq a_\delta$  [2].

Количество факторов, влияющих на погрешность, может быть различным в обычных приспособлениях и кондукторах и могут колебаться в достаточно широких пределах. Кондукторы обычно имеют наибольшее количество факторов, которые могут влиять на точность обработки. Отклонение  $a$  может представлять собой многокритериальную функцию:  $a = f(a_u, a_n, a_h, a_s)$ , где  $a_u$  – погрешность, вызываемая погрешностью базирования и предельным отклонением размера изношенного центрирующего элемента приспособления,  $a_n$  – погрешность, вызываемая неточностью изготовления приспособления,  $a_h$  – погрешность, вызываемая неточностью настройки приспособления на станке перед работой,  $a_s$  – погрешность, вызываемая центрированием инструмента по втулке,  $a_\delta$  – допускаемая погрешность сменной кондукторной втулки (эксцентричность осей внутренних и наружных поверхностей) (рис. 2).

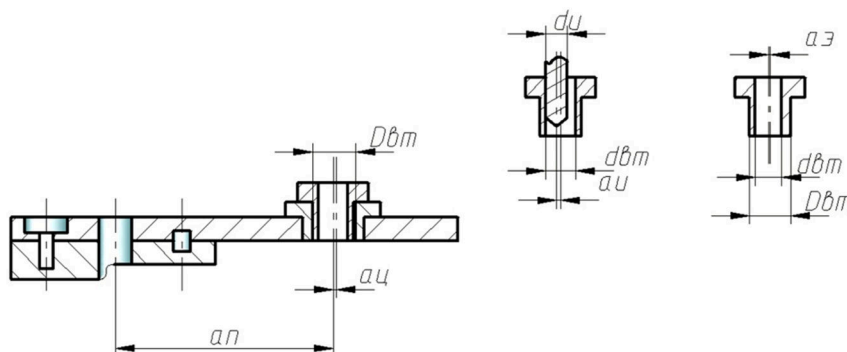


Рисунок 2 – Примеры возникновения погрешностей в проектируемом приспособлении

Отличительной особенностью кондукторов является погрешность, связанная с центрированием втулок и инструмента. Наибольшие погрешности имеют кондукторы, которые в своей конструкции



имеют сменные втулки, цилиндрические центрирующие элементы, различного рода подвижные элементы.

Большинство погрешностей задается справочной литературой, которая регламентирует в зависимости от величин номинальных размеров, определяется по таблицам, которые задают погрешности на изготовление и износ деталей. В силу того, современные методы проектирования позволяют создавать не только графическое отображение объекта (приспособление) в виде модели сборочной единицы, так же можно параметризовать как детали входящие в сборку, так и саму сборку.

Данные о параметризации хранятся в виде двумерных матриц, которые по указанным параметрам содержат необходимую информацию по элементам и сборке самого приспособления. Т.к. данные по погрешностям тоже представляют собой матрицы данных, то при работе с матрицами возможно получение параметров модели приспособления с внесенными погрешностями. Ввод матрицы данных данных обратно в модели деталей и сборки, дает возможность графического отображения модели с учетом погрешности.

Трехмерную модель можно перенести в двумерное отображение по необходимым видам и сечениям. Это даст возможность работать на уровне визуализации с моделью и реальной составляющей приспособления, установленного на станке, и произвести визуальное сравнение и оценку точности приспособления и его проектного отображения с учетом требуемой точности приспособления для текущей операции. Данная методика контроля позволит сократить время на подналадку станка и внесение поправки в работу управляющей программы.

### **Литература:**

1. Кершенбаум Я.М., Мархасин Э.Л., Ярошевский Ф.М. Технология производства нефтепромыслового оборудования. – М. : Государственное научно-техническое издательство нефтяной и горно-топливной литературы, 1948. – 598 с.
2. Олеров И.М. Допуски на изготовление и износ деталей станочных приспособлений. 2-е изд., перераб. – М. : Машиностроение, 1983. – 56 с.

### **References:**

1. Kershenbaum Ya.M., Markhasin E.L., Yaroshevsky F.M. Production technology of the oil-field equipment. – М. : State scientific and technical publishing house of oil and mountain and fuel literature, 1948. – 598 p.
2. Olerov I.M. Admissions on production and wear of details of machine devices. 2nd prod., reslave. – М. : Mechanical engineering, 1983. – 56 p.



УДК 622

## СТАТИЧЕСКАЯ ПОДНАСТРОЙКА СТАНКА С ЧПУ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

### STATIC POSSIBILITY FOR ADJUSTMENT OF THE CNC MACHINE WITH THE OPTICAL SYSTEM

**Гололобова Анна Андреевна**

старший преподаватель,  
Московский государственный технологический  
университет «Станкин»  
ann2187@mail.ru

**Гололобов Денис Владимирович**

старший преподаватель,  
Российский государственный университет нефти и газа  
(национальный исследовательский университет)  
имени И.М. Губкина  
dgololobov@mail.ru

**Аннотация.** В статье рассматриваются вопросы обработки деталей на станках с ЧПУ, возможные погрешности обработки, и процесс их поиска. Так же в статье освещаются вопросы, связанные с выявлением данных погрешностей с помощью оптических методов и корректировка данных погрешностей при обработке.

**Ключевые слова:** статическая поднастройка, погрешность, станок с ЧПУ, корректировка траектории, качество деталей.

**Gololobova Anna Andreevna**

Senior Teacher,  
Moscow state technological  
university «Stankin»  
ann2187@mail.ru

**Gololobov Denis Vladimirovich**

Senior Teacher,  
Russian state university of oil and gas  
(national research university) of  
a name of I.M. Gubkin  
dgololobov@mail.ru

**Annotation.** The article deals with the issues of machining parts on CNC machines, there's room for error processing, and the process of finding them. The article also highlights the issues associated with identifying data errors using optical methods and correction of data errors during processing.

**Keywords:** static possibility for adjustment, an error, a CNC machine, adjust the trajectory, the quality of the parts.

При обработке партии деталей основной задачей является настройка станка таким образом, чтобы обработка производилась с учетом стойкости инструмента, с минимальным количеством поднастроек. Первичная настройка станка отвечает за качество изготавливаемых деталей и формирование поля рассеивания размеров деталей в партии. На станках с ЧПУ данная задача сводится к определению поправочных коэффициентов в системе координат обрабатываемой детали и инструмента, которые непосредственно влияют на точность получаемых размеров в пределах точности работы самого станка.

Поскольку точность деталей характеризуется рядом показателей, таких как точность получаемых размеров, точность формы поверхностей, точность взаимного линейного и углового положения поверхностей, то с точки зрения ее достижения, необходимо найти такую технологическую систему, которая обеспечивала бы достижение точности сразу по всем показателям. Если это не удастся сделать, тогда заготовку приходится пропускать через ряд технологических систем, позволяющих последовательно решать данную задачу. В отличие от универсальных станков, которые при наладке технологической системы в статическом состоянии системы имеют возможность только задания исходных настроечных параметров, при этом сохраняя постоянство траектории движения инструмента, то станки с ЧПУ имеют более гибкое управление движением инструмента в процессе резания.

При решении задач, таких как проектирование технологической оснастки и разработка управляющей программы для станка с ЧПУ, проектные работы производятся в заданных системах координат, которые впоследствии привязываются к системе координат станка. В проектных задачах, на уровне трехмерных моделей закладывается идеальное состояние объектов и их положение в пространстве (рис. 1).

Схема реальной обработки обычно отличается от проектной, в связи с тем, что появляются неровности формы сопрягаемых поверхностей и погрешности взаимного расположения поверхностей, с одной стороны, а также погрешности линейных и угловых положений заготовки, приспособления и рабочих органов станка. В процессе обработки зачастую появляются нежелательные искажения формы обрабатываемой поверхности, связанные с появлением сил резания, внутренних деформаций, потери жесткости и температурных факторов.

При обработке на универсальных станках, траектории движения исполнительных органов станка выполняется по средствам перемещения подвижных частей станка по направляющим, при этом





эти перемещения имеют относительную простоту траекторий, и обработка сложных поверхностей детали осуществляется при помощи согласования движений или с использованием специальной оснастки. Согласно изложенному в главе 5 «Основы достижения качества деталей машин» в книге Балакшина Б.С. «Основы технологии машиностроения», точность детали характеризуется рядом показателей, следовательно, задача сводится к поиску технологической системы (ТС), которая обеспечивала бы достижение сразу по всем показателям [1]. Если не удастся подобрать такую ТС, то заготовку в процессе обработки приходится пропускать через ряд ТС, из которых одни будут обеспечивать выполнение одних показателей, а другие – других.

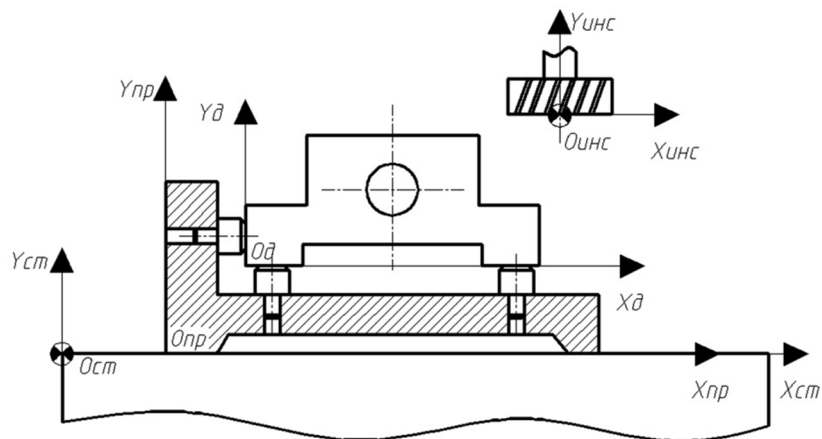


Рисунок 1 – Проектная схема обработки заготовки на операции фрезерования

В качестве примера можно рассмотреть данную задачу с точки зрения размерного анализа, по двум требованиям, таким как выдерживание размера высоты детали и взаимного расположения базовой плоскости и плоскости обработки (рис. 2).

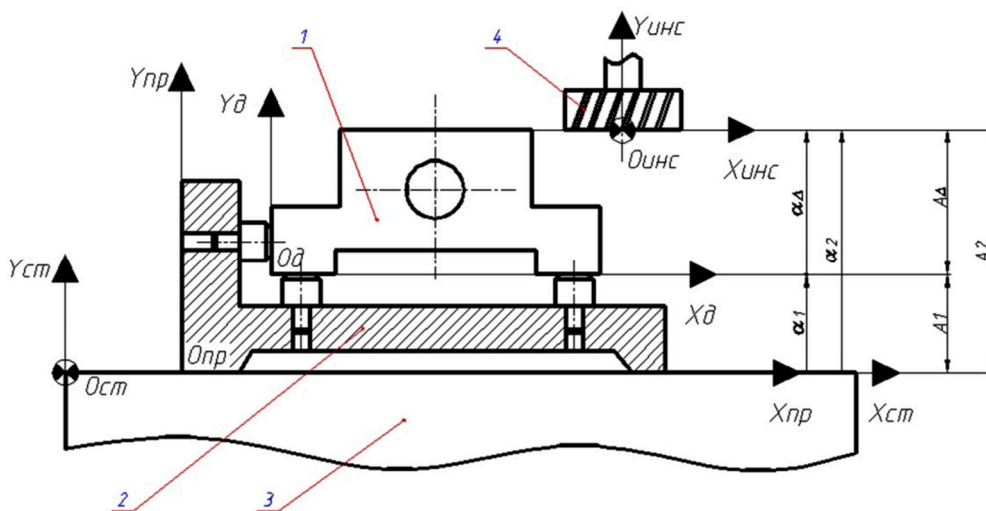


Рисунок 2 – Включение обрабатываемой заготовки в размерные цепи вертикально-фрезерного станка:  
 1 – обрабатываемая заготовка; 2 – приспособление; 3 – стол вертикально-фрезерного станка;  
 4 – фреза торцевая

Первая задача решается с помощью размерной цепи  $A_{\Delta} = -A_1 + A_2 = H_{дет}$ , а вторая задача с помощью размерной цепи  $\alpha_{\Delta} = -\alpha_1 + \alpha_2 = 0$ . При помощи размерной цепи  $A_{\Delta}$  получается размер детали  $H_{дет}$ , путем фрезерования верхней плоскости по отношению к базовой плоскости детали, при помощи размерной цепи  $\alpha_{\Delta}$  получается параллельность обрабатываемой плоскости, относительно базовой плоскости. Из рассмотренного примера видно, что расстояние и относительный поворот, т.е. звенья  $A_{\Delta}$  и  $\alpha_{\Delta}$  деталей, представляют собой замыкающие звенья размерных цепей технологической системы (ТС), в которые включаются обрабатываемые детали. Следовательно, погрешности, появляющиеся в кинематических и размерных цепях технологической системы и переносятся на обрабатываемые детали. В случае универсальных станков, задача достижения требуемой точности решается методом регулировки, путем введения в кинематические и размерные цепи технологической системы различ-



ного рода компенсирующих устройств, позволяющих вносить необходимые изменения в относительное расположение режущих кромок инструмента и обрабатываемой детали. Такие изменения могут вноситься периодически между обработкой отдельных объектов или между отдельными проходами, либо непрерывно в процессе обработки объекта, и в этом случае производятся автоматически.

С появлением станков с ЧПУ и с процессом их совершенствования, усложнения управляющей числовой части и использованием различных новых электродвигателей вспомогательного назначения, процесс регулирования и управления упрощается, т.к. не требует введения в кинематические и размерные цепи технологической системы дополнительных механических средств для достижения требуемой точности, а позволяет производить подналадку средствами самого станка. Данная задача может решаться различными путями, что обуславливается возможностями оборудования, такими как, степени подвижности исполнительных узлов станка и логики работы ЧПУ. Задачи по линейным составляющим решаются с помощью внесения в систему координат инструмента корректирующей поправки, которая компенсирует величину погрешности, возникающей при реальном отклонении положения заготовки на станке от проектной схемы. Погрешность второго рода, т.е. угловую можно компенсировать посредством разворота системы координат инструмента, относительно системы координат заготовки, или поворота системы координат приспособления, в случае если станок обладает такой степенью подвижности.

Пример фактического положения заготовки при установке на столе станка с отклонением от проектной схемы (рис. 3).

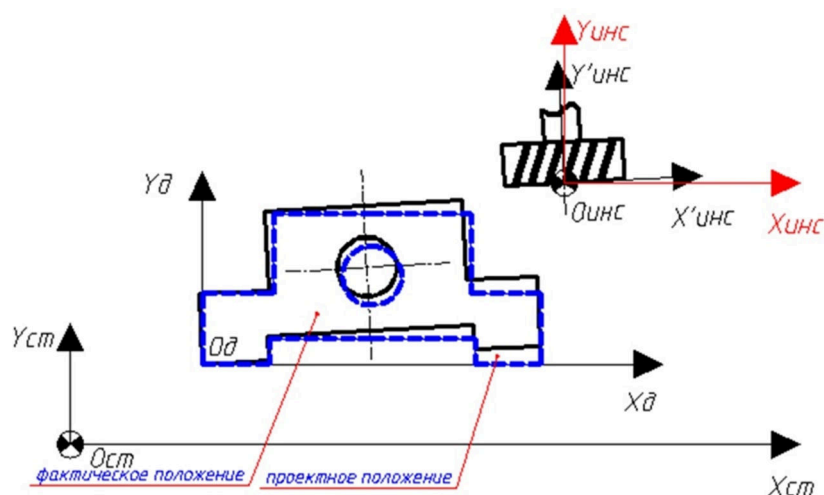


Рисунок 3 – Отклонение фактического положения заготовки от проектной схемы

Для внесения корректировок, для достижения точности обработки по угловому требованию, в систему координат инструмента необходимо ввести величину корректировки, это отображено в системе координат  $X'_{инс}Y'_{инс}$ , которая повернута на величину поправки по отношению к системе координат станка  $X_{ст}Y_{ст}$ , до совмещения режущей плоскости фрезы с плоскостью обработки, т.е. плоскость, в которой располагается траектория обработки должна быть параллельна плоскости обработки.

Для решения поставленной задачи, как в первом, так и во втором случаях, необходимо после установки и закрепления заготовки на столе станка, определить фактическое положение текущей заготовки и сравнить его с проектной схемой. Для этого необходимо ввести в систему станка измерительное устройство, которое будет фиксировать фактическое положение заготовки для внесения дальнейшей корректировки в схему обработки.

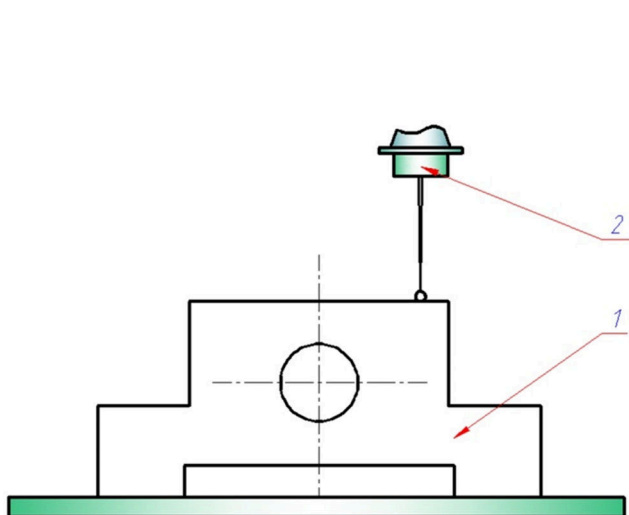
Измерительные системы, которые чаще всего используются в станках с ЧПУ, бывают двух видов: контактного и бесконтактного типа. Для систем первого типа (контактные) в шпиндель станка устанавливают различные измерительные головки, которые контактным путем могут снимать необходимые измерения с поверхностей заготовки. Такие системы чаще всего используются для контроля необходимых параметров заготовки получаемых на текущей технологической операции (рис. 4).

В данном типе устройств, щуп перемещается вдоль контролируемой поверхности, электромеханическим образом. В щупе располагается сенсорный датчик, который фиксирует показания положения поверхности при перемещении от точки к точке. Данная система представляет собой следящую систему, и за счет фиксации координат в пространстве станка, позволяет определить геометрические параметры поверхности. Так как данная система имеет механические узлы, то быстродействие получения информации от щупа относительно низкая.

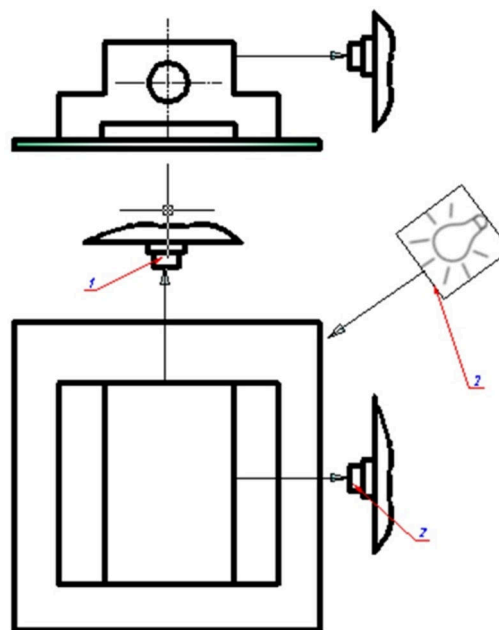
Второй тип устройств, относящиеся к бесконтактным, в основном являются оптическими систе-



мами, которые могут быть либо как отдельно установленные на станок, так и встроенные в исполнительные органы станка [2]. В качестве одной из таких систем может выступать оптическая система контроля. На рисунке 5 показана общая схема оптической системы, в которой используется система малогабаритных компьютерных камер, которые полностью автоматизируют процесс все необходимые расчеты, исключив при этом различные предварительные операции. Преимущество данной системы заключается, как в возможности использования проводной связи с компьютером, так и беспроводной связи, что позволяет использовать достаточно гибко такую систему.



**Рисунок 4** – Контактный метод контроля:  
1 – обрабатываемая (контролируемая) деталь;  
2 – измерительный щуп



**Рисунок 5** – Принципиальная схема оптической системы: 1 – камеры; 2 – источник света

В рассмотрении данного метода контроля попадает только та часть детали, на которую попадает световой поток. В качестве источника света используется монохроматический свет, т.е источник одной электромагнитной волны с определенной и строго постоянной длиной волны, воспринимаемой камерой. Изображение камер масштабируется, что регламентируется расстоянием от объекта до камеры, и может быть отторировано при помощи контрольной детали. Изображение, полученное камерой, фиксируется и заносится в память компьютера в виде двумерного массива, которое в дальнейшем сопоставляется с проектной моделью, т.к. количество камер две, что дает возможность произвести необходимые пересчеты и подналадки с использованием пространственной модели.

Использование такого устройства в составе станка с ЧПУ позволяет производить координатные бесконтактные измерения поверхностей объектов различной (в том числе сложной) формы с получением пространственной точечной модели. Последующее исследование характеристик полученных с устройства позволяет более точно определить порядковые значения погрешностей, а также выявить их источники и принять необходимые меры для коррекции характеристик в сторону улучшения посредством изменения положения режущей кромки инструмента по отношению к обрабатываемой поверхности.

**Литература:**

1. Балакшин Б.С. Основы технологии машиностроения : учебник. – 3-е изд., доп. – М. : Машиностроение, 1969. – 561 с.
2. <http://www.intuit.ru/studies/courses/46/46/lecture/1390?page=1>

**References:**

1. Balakshin B.S. Bases of technology of mechanical engineering : textbook. – 3rd prod., additional. – М. : Mechanical engineering, 1969. – 561 p.
2. <http://www.intuit.ru/studies/courses/46/46/lecture/1390?page=1>



УДК 62.83.52:62.503.56

**ОПТИМАЛЬНОЕ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ УПРАВЛЕНИЕ  
СРЕДНИМИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯМИ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА  
ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТОЯННОГО ТОКА С ЗАВИСЯЩИМ  
ОТ СКОРОСТИ МОМЕНТОМ СОПРОТИВЛЕНИЯ**

**TIME-OPTIMAL CONTROL THE AVERAGE DISPLACEMENT  
OF THE EXECUTIVE BODY OF DC MOTOR WITH DEPENDENT FROM  
THE SPEED POINT OF RESISTANCE**

**Добробаба Юрий Петрович**

кандидат технических наук, доцент,  
профессор кафедры электроснабжения  
промышленных предприятий,  
Кубанский государственный технологический университет  
itstimetoprivod@yahoo.com

**Прохоренко Никита Ярославович**

студент,  
Кубанский государственный технологический университет  
classyadvets@gmail.com

**Кошкин Гордей Анатольевич**

андидат технических наук,  
начальник цеха НКУ, ООО «Прогресс»

**Аннотация.** В статье рассмотрен электропривод постоянного тока с зависящим от скорости моментом сопротивления, управление средними перемещениями исполнительного органа которого осуществляются по оптимальной по быстродействию диаграмме.

**Ключевые слова:** электропривод; постоянный ток; перемещение; диаграмма перемещения; исполнительный орган.

**Dobrobaba Yury Petrovich**

Candidate of Technical Sciences,  
Associate Professor,  
Professor of Department of  
power supply industrial enterprises,  
Kuban state technological university  
itstimetoprivod@yahoo.com

**Prokhorenko Nikita Yaroslavovich**

Student,  
Kuban state technological university  
classyadvets@gmail.com

**Koshkin Gordey Anatolyevich**

Candidate of Technical Sciences,  
Foreman NKU, LLC Progress

**Annotation.** The article deals with DC electric drive with speed-dependent torque resistance control of the average displacement of the Executive body of which are carried out at the optimal speed diagram.

**Keywords:** electric drives; direct current; displacement; chart movement; the executive body.

В работах [1–9] решены задачи оптимального по быстродействию управления малыми и не большими перемещениями исполнительного органа электропривода постоянного тока с зависящим от скорости моментом сопротивления.

При решении задач управления малыми и небольшими перемещениями исполнительного органа электропривода постоянного тока с зависящим от скорости моментом сопротивления, использована следующая математическая модель силовой части электропривода [1, 6]:

$$\left. \begin{aligned} U(t) &= C_e \cdot \omega(t) + R_{я} \cdot I_{я}(t) + L_{я} \cdot I_{я}^{(1)}(t); \\ C_m \cdot I_{я}(t) &= M_{co} + K_c \cdot \omega(t) + J \cdot \omega^{(1)}(t); \\ \varphi^{(1)}(t) &= \omega(t), \end{aligned} \right\}$$

где  $U$  – напряжение, приложенное к якорной цепи электродвигателя, В;  $I_{я}$  – ток якорной цепи электродвигателя, А;  $\omega$  – угловая скорость исполнительного органа электропривода,  $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$ ;  $\varphi$  – угол поворота исполнительного органа электропривода, рад;  $M_{co}$  – постоянный по величине момент сопротивления электропривода, Н · м;  $K_c$  – коэффициент пропорциональности между скоростью и моментом сопротивления электропривода, Н · м · с/рад;  $C_e$  – коэффициент пропорциональности между угловой скоростью исполнительного органа электропривода и ЭДС электродвигателя,  $\frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}}$ ;  $R_{я}$  – сопротивление якорной цепи электродвигателя, Ом;  $L_{я}$  – индуктивность якорной цепи электродвигателя, Гн;  $C_m$  – коэффициент пропорциональности между током и моментом электродвигателя, В · с;  $J$  – момент инерции электропривода, кг · м<sup>2</sup>.

Малые перемещения в полном объеме описаны в монографии [5].



При небольших перемещениях исполнительного органа электропривода постоянного тока с зависящим от скорости моментом сопротивления используется ограничение по напряжению и максимальному значению тока. Оптимальная по быстродействию диаграмма при небольших перемещениях исполнительного органа электропривода постоянного тока с зависящим от скорости моментом сопротивления состоит из четырех этапов. На первом и четвертом этапах напряжение, приложенное к якорной цепи электродвигателя, равно максимально допустимому значению  $U_{\text{доп}}$ ; на втором этапе ток якорной цепи электродвигателя равен максимальному допустимому значению  $I_{\text{доп}}$ ; на третьем этапе напряжение равно максимально допустимому значению со знаком «минус»  $-U_{\text{доп}}$ .

В работе [7] представлена оптимальная по быстродействию первого вида диаграмма при больших перемещениях исполнительного органа электропривода постоянного тока с зависящим от скорости моментом сопротивления (характеристическое уравнение системы имеет два отрицательных неравных по величине корня и один нулевой корень). В работе [8] представлена оптимальная по быстродействию второго вида диаграмма при небольших перемещениях исполнительного органа электропривода постоянного тока с зависящим от скорости моментом сопротивления (характеристическое уравнение системы имеет два отрицательных равных по величине корня и один нулевой корень). В работе [9] представлена оптимальная по быстродействию третьего вида диаграмма при больших перемещениях исполнительного органа электропривода постоянного тока с зависящим от скорости моментом сопротивления (характеристическое уравнение системы имеет пару комплексных корней с отрицательной действительной частью и один нулевой корень).

Область существования приведенных диаграмм от первого граничного значения до второго граничного значения исполнительного органа электропривода. Для каждой диаграммы определены граничные значения. При дальнейшем увеличении задания по перемещению исполнительного органа электропривода постоянного тока с зависящим от скорости моментом сопротивления необходимо переходить к диаграмме для средних перемещений.

Разработаны три вида оптимальных по быстродействию диаграмм при средних перемещениях исполнительного органа электропривода постоянного тока с зависящим от скорости моментом сопротивления.

Оптимальная по быстродействию диаграмма для средних перемещений исполнительного органа электропривода постоянного тока с зависящим от скорости моментом сопротивления состоит из пяти этапов. На первом и пятом этапах напряжение, приложенное к якорной цепи электродвигателя, равно максимально допустимому значению  $U_{\text{доп}}$ ; на втором этапе ток якорной цепи электродвигателя равен максимальному допустимому значению  $I_{\text{доп}}$ ; на третьем этапе напряжение равно максимально допустимому значению со знаком «минус»  $-U_{\text{доп}}$ ; на четвертом этапе ток якорной цепи электродвигателя равен максимальному допустимому значению со знаком «минус»  $-I_{\text{доп}}$ . Для трёх видов оптимальной по быстродействию диаграммы при средних перемещениях исполнительного органа электропривода постоянного тока с зависящим от скорости моментом сопротивления разработано математическое обеспечение для определения длительностей этапов перемещений.

Найдены области существования для трёх видов оптимальных по быстродействию диаграмм при средних перемещениях исполнительного органа электропривода постоянного тока с зависящим от скорости моментом сопротивления.

Применение данной диаграммы повысит быстродействие электропривода постоянного тока с зависящим от скорости моментом сопротивления и, как следствие, производительность промышленных механизмов.

### Литература:

1. Добрабаба Ю.П. Оптимальное по быстродействию управление малыми перемещениями исполнительного органа электропривода постоянного тока с зависящим от скорости моментом сопротивления / Ю.П. Добрабаба, Г.А. Кошкин, Н.Я. Прохоренко // Технические и технологические системы : Материалы восьмой международной научной конференции «ТТС-16» (24–26 ноября 2016 года); ФГБОУ ВО «КубГТУ», КВВАУЛ им. А.К. Серова; под общей редакцией Б.Х. Гайтова. – Краснодар : Издательский Дом – Юг, 2016. – С. 109–114.
2. Добрабаба Ю.П. Определение параметров оптимальной по быстродействию первого вида диаграммы для малых перемещений исполнительного органа электропривода постоянного тока с зависящим от скорости моментом сопротивления [Электронный ресурс] / Ю.П. Добрабаба, Г.А. Кошкин, Н.Я. Прохоренко // Научные труды КубГТУ. – 2016. – № 12. – С. 84–97. – URL : <http://ntk.kubstu.ru/file/1221>
3. Добрабаба Ю.П. Определение параметров оптимальной по быстродействию второго вида диаграммы для малых перемещений исполнительного органа электропривода постоянного тока с зависящим от скорости моментом сопротивления [Электронный ресурс] / Ю.П. Добрабаба, Г.А. Кошкин, Н.Я. Прохоренко // Научные труды КубГТУ. – 2016. – № 13. – С. 165–178. – URL : <http://ntk.kubstu.ru/file/1265>
4. Добрабаба Ю.П. Определение параметров оптимальной по быстродействию третьего вида диаграммы для малых перемещений исполнительного органа электропривода постоянного тока с зависящим от скорости



моментом сопротивления [Электронный ресурс] / Ю.П. Добробаба, Г.А. Кошкин, Н.Я. Прохоренко // Научные труды КубГТУ. – 2016. – № 15. – С. 28–42. – URL : <http://ntk.kubstu.ru/file/1288>

5. Добробаба Ю.П. Разработка оптимальных по быстродействию диаграмм для малых перемещений исполнительного органа электропривода постоянного тока с зависящим от скорости моментом сопротивления: монография / Ю.П. Добробаба, Г.А. Кошкин, Н.Я. Прохоренко; Кубан. гос. технол. ун-т. – Краснодар : Изд. ФГБОУ ВО «КубГТУ», 2018. – 125 с.

6. Добробаба Ю.П. Оптимальное по быстродействию управление небольшими перемещениями исполнительного органа электропривода постоянного тока с зависящим от скорости моментом сопротивления / Ю.П. Добробаба, Г.А. Кошкин, Н.Я. Прохоренко // Технические и технологические системы : Материалы девятой международной научной конференции «ТТС-17» (22–24 ноября 2017 года); ФГБОУ ВО «КубГТУ», КВВАУЛ им. А.К. Серова; под общей редакцией Б.Х. Гайтова. – Краснодар : Издательский Дом – Юг, 2017. – С. 153–156.

7. Добробаба Ю.П. Определение параметров оптимальной по быстродействию первого вида диаграммы при небольших перемещениях исполнительного органа электропривода постоянного тока с зависящим от скорости моментом сопротивления [Электронный ресурс] / Ю.П. Добробаба, Г.А. Кошкин, Н.Я. Прохоренко // Научные труды КубГТУ. – 2017. – № 4. – С. 60–70. – URL : <http://ntk.kubstu.ru/file/1597>

8. Добробаба Ю.П. Определение параметров оптимальной по быстродействию второго вида диаграммы при небольших перемещениях исполнительного органа электропривода постоянного тока с зависящим от скорости моментом сопротивления [Электронный ресурс] / Ю.П. Добробаба, Г.А. Кошкин, Н.Я. Прохоренко // Научные труды КубГТУ. – 2017. – № 9. – С. 69–79. – URL : <http://ntk.kubstu.ru/file/1854>

9. Добробаба Ю.П. Определение параметров оптимальной по быстродействию третьего вида диаграммы при небольших перемещениях исполнительного органа электропривода постоянного тока с зависящим от скорости моментом сопротивления [Электронный ресурс] / Ю.П. Добробаба, Г.А. Кошкин, Н.Я. Прохоренко // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2017. – № 3. – С. 289–295.

## References:

1. Dobrobaba Yu.P. Management of small movements of executive body of the electric drive of a direct current, optimum on speed, with resistance moment depending on speed / Yu.P. Dobrobaba, G.A. Koshkin, N.Ya. Prokhorenko // Technical and technological systems : Materials of the eighth international scientific TTS-16 conference (on November 24–26, 2016); FGBOU VO «KUBGTU», KVVAUL of A.K. Serov; under the general editorial office B.H. Gaytov. – Krasnodar : Publishing house – South, 2016. – P. 109–114.

2. Dobrobaba Yu.P. Determination of parameters of the chart, optimum on speed of the first look, for small movements of executive body of the electric drive of a direct current with resistance moment depending on speed [An electronic resource] / Yu.P. Dobrobaba, G.A. Koshkin, N.Ya. Prokhorenko // Scientific works of KUBGTU. – 2016. – № 12. – P. 84–97. – URL : <http://ntk.kubstu.ru/file/1221>

3. Dobrobaba Yu.P. Determination of parameters of the chart, optimum on speed of the second look, for small movements of executive body of the electric drive of a direct current with resistance moment depending on speed [An electronic resource] / Yu.P. Dobrobaba, G.A. Koshkin, N.Ya. Prokhorenko // Scientific works of KUBGTU. – 2016. – № 13. – P. 165–178. – URL : <http://ntk.kubstu.ru/file/1265>

4. Dobrobaba Yu.P. Determination of parameters of the chart, optimum on speed of the third look, for small movements of executive body of the electric drive of a direct current with resistance moment depending on speed [An electronic resource] / Yu.P. Dobrobaba, G.A. Koshkin, N.Ya. Prokhorenko // Scientific works of KUBGTU. – 2016. – № 15. – P. 28–42. – URL : <http://ntk.kubstu.ru/file/1288>

5. Dobrobaba Yu.P. Development of charts, optimum on speed, for small movements of executive body of the electric drive of a direct current with resistance moment depending on speed: monograph / Yu.P. Dobrobaba, G.A. Koshkin, N.Ya. Prokhorenko; Kuban. state. tech. un-t. – Krasnodar : Prod. FGBOU VO «KUBGTU», 2018. – 125 p.

6. Dobrobaba Yu.P. Management of small movements of executive body of the electric drive of a direct current, optimum on speed, with resistance moment depending on speed / Yu.P. Dobrobaba, G.A. Koshkin, N.Ya. Prokhorenko // Technical and technological systems : Materials of the ninth international scientific TTS-17 conference (on November 22–24, 2017); FGBOU VO «KUBGTU», KVVAUL of A.K. Serov; under the general editorial office B.H. Gaytov. – Krasnodar : Publishing house – South, 2017. – P. 153–156.

7. Dobrobaba Yu.P. Determination of parameters of the chart, optimum on speed of the first view, at small movements of executive body of the electric drive of a direct current with resistance moment depending on speed [An electronic resource] / Yu.P. Dobrobaba, G.A. Koshkin, N.Ya. Prokhorenko // Scientific works of KUBGTU. – 2017. – № 4. – P. 60–70. – URL : <http://ntk.kubstu.ru/file/1597>

8. Dobrobaba Yu.P. Determination of parameters of the chart, optimum on speed of the second view, at small movements of executive body of the electric drive of a direct current with resistance moment depending on speed [An electronic resource] / Yu.P. Dobrobaba, G.A. Koshkin, N.Ya. Prokhorenko // Scientific works of KUBGTU. – 2017. – № 9. – P. 69–79. – URL : <http://ntk.kubstu.ru/file/1854>

9. Dobrobaba Yu.P. Determination of parameters of the chart, optimum on speed of the third view, at small movements of executive body of the electric drive of a direct current with resistance moment depending on speed [An electronic resource] / Yu.P. Dobrobaba, G.A. Koshkin, N.Ya. Prokhorenko // Science. Equipment. Technologies (politechnical messenger). – 2017. – № 3. – P. 289–295.



УДК 62.83.52:62.503.56

## ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНАЯ ВТОРОГО ВИДА ДИАГРАММА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА ПРЕЦИЗИОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТОЯННОГО ТОКА

### ENERGY EFFICIENT SECOND TYPE DIAGRAM FOR MOVEMENT OF EXECUTIVE BODY OF PRECISION DC ELECTRIC DRIVE

#### Добробаба Юрий Петрович

кандидат технических наук, доцент,  
профессор кафедры электроснабжения  
промышленных предприятий,  
Кубанский государственный технологический университет  
itstimetoprivod@yahoo.com

#### Кошкин Гордей Анатольевич

андидат технических наук,  
начальник цеха НКУ, ООО «Прогресс»

#### Синюк В.П.

Кубанский государственный технологический университет  
VITALI771@yandex.ru

**Аннотация.** В статье представлена энергоэффективная второго вида диаграмма перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока, состоящая из восьми этапов. Приведены алгоритмы, позволяющие определить параметры диаграмм, для различных случаев. Получена аналитическая зависимость электроэнергии, потребляемой якорной цепью электропривода, от заданного перемещения исполнительного органа электропривода и параметров его силовой части.

**Ключевые слова:** прецизионный электропривод, перемещение исполнительного органа электропривода, энергоэффективная диаграмма, электроэнергия.

#### Dobrobaba Yury Petrovich

Candidate of Technical Sciences,  
Associate Professor,  
Professor of Department of  
power supply industrial enterprises,  
Kuban state technological university  
itstimetoprivod@yahoo.com

#### Koshkin Gordey Anatolyevich

Candidate of Technical Sciences,  
Foreman NKU, LLC Progress

#### Sinyuk V.P.

Kuban state technological university  
VITALI771@yandex.ru

**Annotation.** In this article submitted energy efficient second type diagram for movement of executive body of precision dc electric drive, which consist of 10 stage. Algorithms for determining the parameters of the diagrams are given for different cases. The analytical dependences of electric power, consumed by anchor circuit, on specified movement of electric drive's executive body and its parameters are gotten.

**Keywords:** precision electric drive, movement of executive body of electric drive, energy efficient diagram, electric power.

Ранее в статьях [1–4] для оптимальных по быстродействию диаграмм определены аналитические зависимости электроэнергии, потребляемой якорной цепью электропривода за цикл. В результате исследования установлено, что электропривод совершая перемещения за минимально возможное время, потребляет значительное количество электроэнергии. Для технологического производства зачастую более актуален вопрос минимально возможного потребления электроэнергии. В данной работе представлена энергоэффективная диаграмма, которая обеспечит выполнение данного условия.

На рисунке 1 представлена энергоэффективная второго вида диаграмма перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока. На первом, пятом и восьмом этапах третья производная скорости исполнительного органа электропривода равна максимальному значению  $\omega_{\max}^{(3)}$ ; на третьем, шестом и десятом этапах третья производная скорости исполнительного органа электропривода равна максимальному значению со знаком минус  $-\omega_{\max}^{(3)}$ ; на втором, четвертом, седьмом и девятом этапах третья производная скорости исполнительного органа электропривода равна нулю.

Длительность первого и десятого этапов равна  $t_1$ ; длительность второго и девятого этапов равна  $t_4$ ; длительность третьего и восьмого этапов равна  $t_1 + t_2$ ; длительность четвертого и седьмого этапов равна  $t_3$ ; длительность пятого и шестого этапов равна  $t_2$ . На втором и девятом этапах вторая производная скорости исполнительного органа электропривода равна максимальному значению  $\omega_{\max}^{(2)}$ ; на четвертом и седьмом этапах вторая производная скорости исполнительного органа элек-



тропровода равна минимальному значению  $\omega_{\min}^{(2)}$ . В момент времени  $2t_1 + t_4$  первая производная скорости исполнительного органа электропривода достигает максимального значения  $\omega_{\max}^{(1)}$ ; в момент времени  $2t_1 + 4t_2 + 2t_3 + t_4$  первая производная скорости исполнительного органа электропривода достигает максимального значения со знаком минус  $-\omega_{\max}^{(1)}$ . В момент времени  $2t_1 + 2t_2 + t_3 + t_4$  скорость исполнительного органа электропривода достигает максимального значения  $\omega_{\max}$ . Угол поворота (перемещение) увеличивается от начального значения угла поворота  $\varphi_{\text{нач}}$  до конечного значения угла поворота  $\varphi_{\text{кон}}$ .

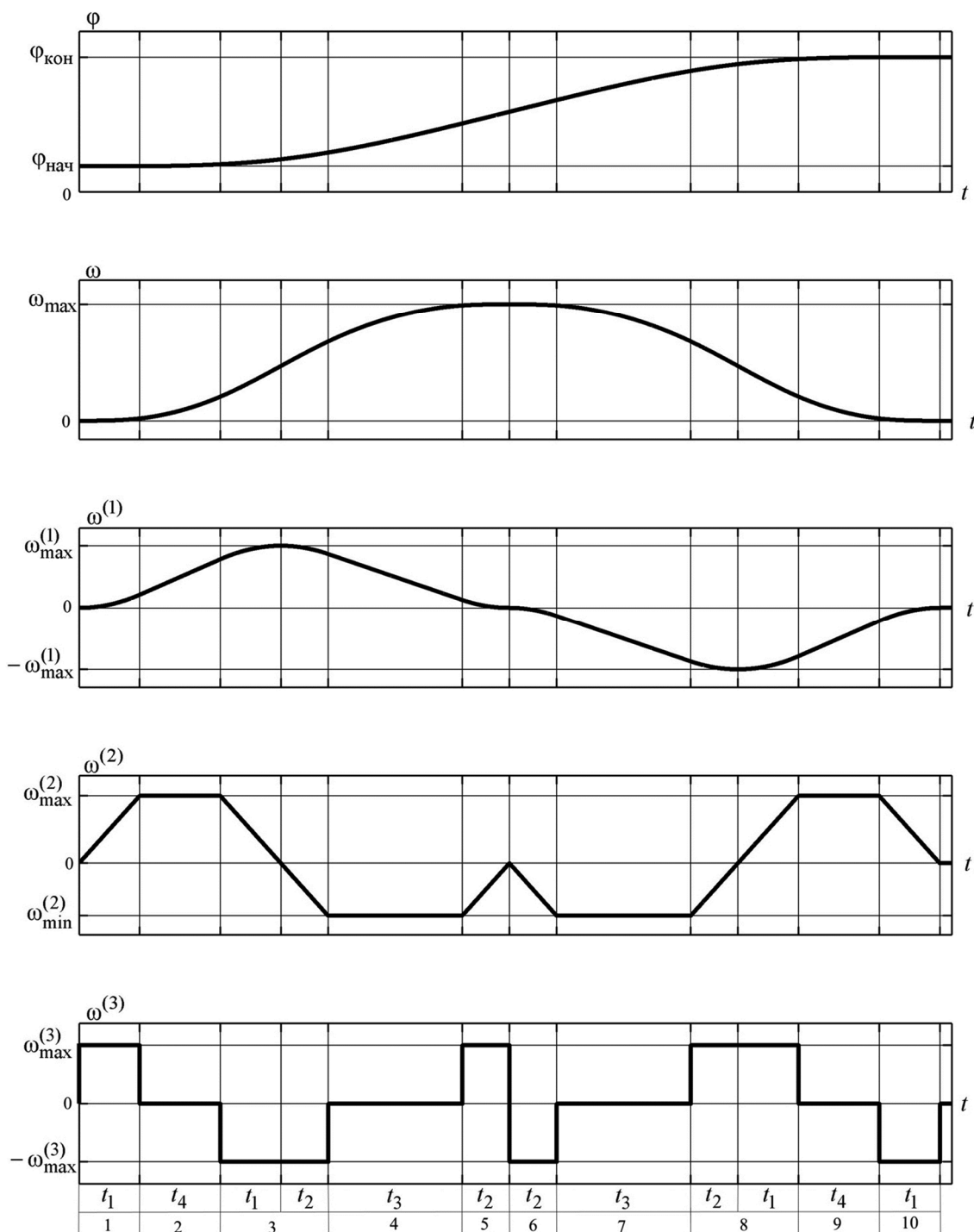


Рисунок 1 – Энергоэффективная второго вида диаграмма перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока





Для диаграммы справедливы соотношения:

$$\omega_{\max}^{(2)} = \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1; \tag{1}$$

$$\omega_{\max}^{(1)} = \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t_1 + t_4); \tag{2}$$

$$\omega_{\min}^{(2)} = -\omega_{\max}^{(3)} \cdot t_2; \tag{3}$$

$$\omega_{\max}^{(1)} = \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_2 \cdot (t_2 + t_3); \tag{4}$$

$$\omega_{\max} = \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t_1 + t_4) \cdot \left( t_1 + t_2 + \frac{1}{2}t_3 + \frac{1}{2}t_4 \right); \tag{5}$$

$$(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) = 2\omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t_1 + t_4) \cdot \left[ 2t_1t_2 + t_1t_3 + 2t_2^2 + 2t_2t_3 + \frac{1}{3}t_3^2 + t_2t_4 + \frac{1}{2}t_3t_4 + \frac{1}{6}t_4^2 \right]; \tag{6}$$

$$T_{\text{ц}} = 4t_1 + 4t_2 + 2t_3 + 2t_4. \tag{7}$$

Если  $\omega_{\max}^{(2)} = \omega_{\text{доп}}^{(2)}$  и  $\omega_{\max}^{(3)} = \omega_{\text{доп}}^{(3)}$ , то

$$\omega_{\text{доп}}^{(2)} = \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1; \tag{8}$$

$$\omega_{\max}^{(1)} = \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t_1 + t_4); \tag{9}$$

$$\omega_{\min}^{(2)} = -\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_2; \tag{10}$$

$$\omega_{\max}^{(1)} = \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_2 \cdot (t_2 + t_3); \tag{11}$$

$$\omega_{\max} = \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t_1 + t_4) \cdot \left( t_1 + t_2 + \frac{1}{2}t_3 + \frac{1}{2}t_4 \right); \tag{12}$$

$$(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) = 2\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t_1 + t_4) \cdot \left[ 2t_1t_2 + t_1t_3 + 2t_2^2 + 2t_2t_3 + \frac{1}{3}t_3^2 + t_2t_4 + \frac{1}{2}t_3t_4 + \frac{1}{6}t_4^2 \right]; \tag{13}$$

$$T_{\text{ц}} = 4t_1 + 4t_2 + 2t_3 + 2t_4; \tag{14}$$

$$t_1 = \frac{\omega_{\text{доп}}^{(2)}}{\omega_{\text{доп}}^{(3)}}; \tag{15}$$

$$t_2 = \frac{1}{2} \cdot \left[ \sqrt{\frac{3}{2} \cdot \frac{\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}}{\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t_1 + t_4)} + \frac{1}{4} \cdot \left( t_1 + \frac{1}{2}t_4 \right)^2} - \frac{3}{2} \cdot \left( t_1 + \frac{1}{2}t_4 \right) \right] - \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \left[ \sqrt{\frac{3}{2} \cdot \frac{\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}}{\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t_1 + t_4)} + \frac{1}{4} \cdot \left( t_1 + \frac{1}{2}t_4 \right)^2} - \frac{3}{2} \cdot \left( t_1 + \frac{1}{2}t_4 \right) \right]^2} \rightarrow -t_1 \cdot (t_1 + t_4); \tag{16}$$



$$t_3 = \frac{t_1^2}{t_2} + \frac{t_1 t_4}{t_2} - t_2. \tag{17}$$

Таким образом, если заданы значения длительности второго и девятого этапов  $t_4$ , то по выше приведённым формулам определяются все параметры энергоэффективной второго вида диаграммы перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока.

Если  $\omega_{\max}^{(2)} = \omega_{\text{доп}}^{(2)}$ ,  $\omega_{\max}^{(3)} = \omega_{\text{доп}}^{(3)}$  и  $t_1 = t_2$ , то

$$t_1 = t_2 = \frac{\omega_{\text{доп}}^{(2)}}{\omega_{\text{доп}}^{(3)}}; \tag{18}$$

$$t_3 = t_4; \tag{19}$$

$$t_3^3 + 5t_1 t_3^2 + 8t_1^2 t_3 + 4t_1^3 - \frac{\Phi_{\text{кон}} - \Phi_{\text{нач}}}{2\omega_{\text{доп}}^{(2)}} = 0. \tag{20}$$

Уравнение имеет аналитическое решение

$$t_3 = \sqrt[3]{\frac{1}{27}t_1^3 + \frac{\Phi_{\text{кон}} - \Phi_{\text{нач}}}{4\omega_{\text{доп}}^{(2)}}} + \sqrt{\frac{\Phi_{\text{кон}} - \Phi_{\text{нач}}}{2\omega_{\text{доп}}^{(2)}} \cdot \left[\frac{1}{27}t_1^3 + \frac{\Phi_{\text{кон}} - \Phi_{\text{нач}}}{8\omega_{\text{доп}}^{(2)}}\right]} + \sqrt[3]{\frac{1}{27}t_1^3 + \frac{\Phi_{\text{кон}} - \Phi_{\text{нач}}}{4\omega_{\text{доп}}^{(2)}}} - \sqrt{\frac{\Phi_{\text{кон}} - \Phi_{\text{нач}}}{2\omega_{\text{доп}}^{(2)}} \cdot \left[\frac{1}{27}t_1^3 + \frac{\Phi_{\text{кон}} - \Phi_{\text{нач}}}{8\omega_{\text{доп}}^{(2)}}\right]} - \frac{5}{3}t_1. \tag{21}$$

При этом достигается максимально возможное быстродействие.

Если  $\omega_{\max}^{(2)} = \omega_{\text{доп}}^{(2)}$ ,  $\omega_{\max}^{(3)} = \omega_{\text{доп}}^{(3)}$  и  $t_4 = 0$ , то

$$t_1 = \frac{\omega_{\text{доп}}^{(2)}}{\omega_{\text{доп}}^{(3)}}; \tag{22}$$

$$t_2 = \frac{1}{2} \cdot \left[ \sqrt{\frac{3}{2} \cdot \frac{\Phi_{\text{кон}} - \Phi_{\text{нач}}}{\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^2} + \frac{1}{4}t_1^2} - \frac{3}{2}t_1 \right] - \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \left[ \sqrt{\frac{3}{2} \cdot \frac{\Phi_{\text{кон}} - \Phi_{\text{нач}}}{\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^2} + \frac{1}{4}t_1^2} - \frac{3}{2}t_1 \right]^2 - t_1^2}; \tag{23}$$

$$t_3 = \frac{t_1^2}{t_2} - t_2. \tag{24}$$

Если  $\omega_{\max}^{(1)} = \omega_{\text{доп}}^{(1)}$ ,  $\omega_{\max}^{(2)} = \omega_{\text{доп}}^{(2)}$  и  $\omega_{\max}^{(3)} = \omega_{\text{доп}}^{(3)}$ , то

$$t_1 = \frac{\omega_{\text{доп}}^{(2)}}{\omega_{\text{доп}}^{(3)}}; \tag{25}$$

$$t_4 = \frac{\omega_{\text{доп}}^{(1)}}{\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1} - t_1; \tag{26}$$



$$t_2 = \frac{1}{2} \cdot \left[ \sqrt{\frac{3}{2} \cdot \frac{\Phi_{\text{кон}} - \Phi_{\text{нач}}}{\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t_1 + t_4)} + \frac{1}{4} \cdot \left(t_1 + \frac{1}{2}t_4\right)^2} - \frac{3}{2} \cdot \left(t_1 + \frac{1}{2}t_4\right) \right] -$$

$$- \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \left[ \sqrt{\frac{3}{2} \cdot \frac{\Phi_{\text{кон}} - \Phi_{\text{нач}}}{\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t_1 + t_4)} + \frac{1}{4} \cdot \left(t_1 + \frac{1}{2}t_4\right)^2} - \frac{3}{2} \cdot \left(t_1 + \frac{1}{2}t_4\right) \right]^2} \rightarrow$$

$$\rightarrow -t_1 \cdot (t_1 + t_4); \tag{27}$$

$$t_3 = \frac{t_1^2}{t_2} + \frac{t_1 t_4}{t_2} - t_2. \tag{28}$$

Если  $\omega_{\text{max}} = \omega_{\text{доп}}$ ,  $\omega_{\text{max}}^{(2)} = \omega_{\text{доп}}^{(2)}$  и  $\omega_{\text{max}}^{(3)} = \omega_{\text{доп}}^{(3)}$ , то

$$t_1 = \frac{\omega_{\text{доп}}^{(2)}}{\omega_{\text{доп}}^{(3)}}; \tag{29}$$

$$t_2 = \left[ \frac{\omega_{\text{доп}}}{\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t_1 + t_4)} - \left(t_1 + \frac{1}{2}t_4\right) \right] -$$

$$- \sqrt{\left[ \frac{\omega_{\text{доп}}}{\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t_1 + t_4)} - \left(t_1 + \frac{1}{2}t_4\right) \right]^2} - t_1 \cdot (t_1 + t_4); \tag{30}$$

$$t_3 = \frac{t_1^2}{t_2} + \frac{t_1 t_4}{t_2} - t_2. \tag{31}$$

Если  $\omega_{\text{max}}^{(2)} = \omega_{\text{доп}}^{(2)}$ ,  $\omega_{\text{max}}^{(3)} = \omega_{\text{доп}}^{(3)}$ ,  $t_1 = t_2$  и  $t_4 = 0$ , то

$$(\Phi_{\text{кон}} - \Phi_{\text{нач}}) = \Phi_{\text{гр.1}}.$$

При этом

$$t_1 = t_2 = \frac{\omega_{\text{доп}}^{(2)}}{\omega_{\text{доп}}^{(3)}}; \tag{32}$$

$$t_3 = 0; \tag{33}$$

$$\Phi_{\text{гр.1}} = 8 \cdot \frac{\left[\omega_{\text{доп}}^{(2)}\right]^4}{\left[\omega_{\text{доп}}^{(3)}\right]^3}. \tag{34}$$

Если  $\omega_{\text{max}}^{(1)} = \omega_{\text{доп}}^{(1)}$ ,  $\omega_{\text{max}}^{(2)} = \omega_{\text{доп}}^{(2)}$ ,  $\omega_{\text{max}}^{(3)} = \omega_{\text{доп}}^{(3)}$  и  $t_1 = t_2$ , то

$$(\Phi_{\text{кон}} - \Phi_{\text{нач}}) = \Phi_{\text{гр.2}}.$$

При этом

$$t_1 = t_2 = \frac{\omega_{\text{доп}}^{(2)}}{\omega_{\text{доп}}^{(3)}}; \tag{35}$$



$$t_3 = t_4 = \frac{\omega_{\text{доп}}^{(1)}}{\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1} - t_1; \tag{36}$$

$$\Phi_{\text{Гр.2}} = 2\omega_{\text{доп}}^{(1)} \cdot \left[ \frac{\omega_{\text{доп}}^{(1)}}{\omega_{\text{доп}}^{(2)}} + \frac{\omega_{\text{доп}}^{(2)}}{\omega_{\text{доп}}^{(3)}} \right]^2. \tag{37}$$

Если  $\omega_{\text{мах}} = \omega_{\text{доп}}$ ,  $\omega_{\text{мах}}^{(2)} = \omega_{\text{доп}}^{(2)}$ ,  $\omega_{\text{мах}}^{(3)} = \omega_{\text{доп}}^{(3)}$  и  $t_4 = 0$ , то

$$(\Phi_{\text{кон}} - \Phi_{\text{нач}}) = \Phi_{\text{Гр.1*}}.$$

При этом

$$t_1 = \frac{\omega_{\text{доп}}^{(2)}}{\omega_{\text{доп}}^{(3)}}; \tag{38}$$

$$t_2 = \left[ \frac{\omega_{\text{доп}}}{\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^2} - t_1 \right] - \sqrt{\left[ \frac{\omega_{\text{доп}}}{\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^2} - t_1 \right]^2 - t_1^2}; \tag{39}$$

$$t_3 = \frac{t_1^2}{t_2} - t_2; \tag{40}$$

$$\Phi_{\text{Гр.1*}} = 2\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^2 \cdot \left( 2t_1t_2 + t_1t_3 + 2t_2^2 + 2t_2t_3 + \frac{1}{3}t_3^2 \right). \tag{41}$$

Если  $\omega_{\text{мах}} = \omega_{\text{доп}}$ ,  $\omega_{\text{мах}}^{(1)} = \omega_{\text{доп}}^{(1)}$ ,  $\omega_{\text{мах}}^{(2)} = \omega_{\text{доп}}^{(2)}$  и  $\omega_{\text{мах}}^{(3)} = \omega_{\text{доп}}^{(3)}$ , то

$$(\Phi_{\text{кон}} - \Phi_{\text{нач}}) = \Phi_{\text{Гр.2*}}.$$

При этом

$$t_1 = \frac{\omega_{\text{доп}}^{(2)}}{\omega_{\text{доп}}^{(3)}}; \tag{42}$$

$$t_4 = \frac{\omega_{\text{доп}}^{(1)}}{\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1} - t_1; \tag{43}$$

$$t_2 = \left[ \frac{\omega_{\text{доп}}}{\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t_1 + t_4)} - \left( t_1 + \frac{1}{2}t_4 \right) \right] - \sqrt{\left[ \frac{\omega_{\text{доп}}}{\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t_1 + t_4)} - \left( t_1 + \frac{1}{2}t_4 \right) \right]^2 - t_1 \cdot (t_1 + t_4)}; \tag{44}$$

$$t_3 = \frac{t_1^2}{t_2} + \frac{t_1t_4}{t_2} - t_2; \tag{45}$$

$$\Phi_{\text{Гр.2*}} = 2\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t_1 + t_4) \cdot \left( 2t_1t_2 + t_1t_3 + 2t_2^2 + 2t_2t_3 + \frac{1}{3}t_3^2 + t_2t_4 + \frac{1}{2}t_3t_4 + \frac{1}{6}t_4^2 \right). \tag{46}$$

Электроэнергия, потребляемая якорной цепью электропривода за цикл, равна:



$$\begin{aligned}
 W = & \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{co} \cdot (\varphi_{кон} - \varphi_{нач}) + \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot M_{co}^2 \cdot T_{ц} + \\
 & + \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot J^2 \cdot \left[ \omega_{max}^{(3)} \right]^2 \cdot \left( \frac{23}{15} t_1^5 + 2 t_1^4 t_2 + \frac{23}{6} t_1^4 t_4 + 4 t_1^3 t_2 t_4 + 3 t_1^3 t_4^2 - \right. \\
 & \left. - \frac{2}{3} t_1^2 t_2^3 + 2 t_1^2 t_2 t_4^2 + \frac{2}{3} t_1^2 t_4^3 - \frac{2}{3} t_1 t_2^3 t_4 + \frac{1}{5} t_2^5 + \frac{1}{2} t_2^4 t_3 + t_2^3 t_3^2 + \frac{2}{3} t_2^2 t_3^3 \right), \quad (47)
 \end{aligned}$$

где  $C_e$  – коэффициент пропорциональности между угловой скоростью исполнительного органа электропривода и ЭДС электродвигателя,  $\frac{В \cdot с}{рад}$ ;  $C_M$  – коэффициент пропорциональности между током и электромагнитным моментом электродвигателя,  $В \cdot с$ ;  $M_{co}$  – момент сопротивления электропривода,  $Н \cdot м$ ;  $R_{я}$  – сопротивление якорной цепи электродвигателя, Ом;  $L_{я}$  – индуктивность якорной цепи электропривода, Гн;  $J$  – момент инерции электропривода,  $кг \cdot м^2$ .

В статье рассматривается электропривод, имеющие следующие параметры:

$$C_e = 1,25 \frac{В \cdot с}{рад}; C_M = 1,25 В \cdot с; R_{я} = 5 \text{ Ом}; L_{я} = 0,1 \text{ Гн}; J = 0,05 \text{ кг} \cdot м^2.$$

На допустимые значения угловой скорости и её первой, второй и третьей производных наложены ограничения:

$$\omega_{доп} = 160 \frac{рад}{с}; \omega_{доп}^{(1)} = 80 \frac{рад}{с^2}; \omega_{доп}^{(2)} = 400 \frac{рад}{с^3}; \omega_{доп}^{(3)} = 8000 \frac{рад}{с^4}.$$

При этом граничные значения угла поворота исполнительного органа электропривода постоянного тока равны:

$$\varphi_{гр.1} = 8 \cdot \frac{400^4}{8000^3} = 0,4 \text{ рад}.$$

$$\varphi_{гр.2} = 2 \cdot 80 \cdot \left[ \frac{80}{400} + \frac{400}{8000} \right]^2 = 10 \text{ рад}.$$

$$t_1 = \frac{400}{8000} = 0,05 \text{ с};$$

$$\begin{aligned}
 t_2 = & \left[ \frac{160}{8000 \cdot 0,05^2} - 0,05 \right] - \sqrt{\left[ \frac{160}{8000 \cdot 0,05^2} - 0,05 \right]^2 - 0,05^2} = \\
 & = 7,95 - 7,949842766 = 0,000157234 \text{ с};
 \end{aligned}$$

$$t_3 = \frac{0,05^2}{0,000157234} - 0,000157234 = 15,89971175 \text{ с};$$

$$\begin{aligned}
 \varphi_{гр.1*} = & 40 \cdot (0,0000157234 + 0,794985587 + 0,000000049 + \\
 & + 0,00499995 + 84,26694458) = 3402,677835 \text{ рад}.
 \end{aligned}$$

$$t_1 = \frac{400}{8000} = 0,05 \text{ с};$$



$$t_4 = \frac{80}{8000 \cdot 0,05} - 0,05 = 0,15 \text{ с};$$

$$t_2 = \left[ \frac{160}{8000 \cdot 0,05 \cdot 0,2} - 0,125 \right] - \sqrt{\left[ \frac{160}{8000 \cdot 0,05 \cdot 0,2} - 0,125 \right]^2} - 0,01 =$$

$$= 1,875 - 1,872331434 = 0,002668566 \text{ с};$$

$$t_3 = \frac{0,05^2}{0,002668566} + \frac{0,05 \cdot 0,15}{0,002668566} - 0,002668566 = 3,744662397 \text{ с};$$

$$\Phi_{гр.2*} = 160 \cdot (0,0002668566 + 0,187233119 + 0,000014242 +$$

$$+ 0,019985757 + 4,674165489 + 0,000400284 +$$

$$+ 0,280849679 + 0,00375) = 826,6664682 \text{ рад}.$$

Проведён численный эксперимент. При заданных значениях начального угла поворота  $\varphi_{нач}$  и конечного значения угла поворота  $\varphi_{кон}$  задавались различные значения длительности второго и девятого этапов  $t_4$  и определялись: все параметры серии энергоэффективных второго вида диаграмм перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока и значения электроэнергии, потребляемой якорной цепью электропривода за цикл. По результатам численного эксперимента построена зависимость электроэнергии, потребляемой якорной цепью электропривода за цикл, от длительности цикла. Из этой зависимости следует, что существует такое значение длительности второго и девятого этапов  $t_4$ , при котором якорная цепь электропривода потребляет минимально возможное значение электроэнергии за цикл.

**Литература:**

1. Дობробаба Ю.П., Кошкин Г.А., Синюк В.П. Определение энергетических характеристик прецизионного позиционного электропривода постоянного тока при малых перемещениях его исполнительного органа // Научные труды КубГТУ. – 2015. – № 13.
2. Дობробаба Ю.П., Кошкин Г.А., Синюк В.П. Определение энергетических характеристик прецизионного позиционного электропривода постоянного тока при небольших перемещениях его исполнительного органа // Научные труды КубГТУ. – 2015. – № 13.
3. Дობробаба Ю.П., Кошкин Г.А., Синюк В.П. Определение энергетических характеристик прецизионного позиционного электропривода постоянного тока при средних перемещениях его исполнительного органа // Научные труды КубГТУ. – 2016. – № 1.
4. Дობробаба Ю.П., Кошкин Г.А., Синюк В.П. Определение энергетических характеристик прецизионного позиционного электропривода постоянного тока при больших перемещениях его исполнительного органа // Научные труды КубГТУ. – 2016. – № 5.

**References:**

1. Dobrobaba Yu.P., Koshkin G.A., Sinyuk V.P. Definition of power characteristics of the precision position electric drive of a direct current at small movements of his executive body // Scientific works of KUBGTU. – 2015. – № 13.
2. Dobrobaba Yu.P., Koshkin G.A., Sinyuk V.P. Definition of power characteristics of the precision position electric drive of a direct current at small movements of his executive body // Scientific works of KUBGTU. – 2015. – № 13.
3. Dobrobab Yu.P., Koshkin G.A., Sinyuk V.P. Definition of power characteristics of the precision position electric drive of a direct current at average movements of his executive body // Scientific works of KUBGTU. – 2016. – № 1.
4. Dobrobaba Yu.P., Koshkin G.A., Sinyuk V.P. Definition of power characteristics of the precision position electric drive of a direct current at big movements of his executive body // Scientific works of KUBGTU. – 2016. – № 5.



УДК 62.83.52:62.503.56

## ОПТИМАЛЬНАЯ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ ДИАГРАММА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА ПРЕЦИЗИОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТОЯННОГО ТОКА С УПРУГИМ ВАЛОПРОВОДОМ С ОГРАНИЧЕНИЯМИ МАКСИМАЛЬНОГО И МИНИМАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЙ ТОКА И ПЯТОЙ ПРОИЗВОДНОЙ СКОРОСТИ

### TIME-OPTIMAL DIAGRAM OF MOVEMENT OF EXECUTIVE BODY OF THE DIRECT CURRENT DRIVE WITH ELASTIC SHAFTING WITH CONSTRAINS OF MAXIMUM AND MINIMUM CURRENT AND THE FIFTH DERIVATIVE OF THE SPEED

#### Добробаба Юрий Петрович

кандидат технических наук, доцент,  
профессор кафедры электроснабжения  
промышленных предприятий,  
Кубанский государственный технологический университет  
itstimetoprivod@yahoo.com

#### Кошкин Гордей Анатольевич

андидат технических наук,  
начальник цеха НКУ, ООО «Прогресс»

#### Громницкий Е.Е.

Кубанский государственный технологический университет  
Johngrom686@yandex.ru

**Аннотация.** Разработана оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока с упругим валопроводом с ограничениями максимального и минимального значений тока и пятой производной скорости. Для определения параметров оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока с упругим валопроводом с ограничениями максимального и минимального значений тока и пятой производной скорости составлен алгоритм. Установлена область существования оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока с упругим валопроводом с ограничениями максимального и минимального значений тока и пятой производной скорости. По результатам численного эксперимента построены зависимости длительности цикла перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода от заданного перемещения (угла поворота) при различных значениях пятой производной скорости.

**Ключевые слова:** упругий валопровод, оптимальное по быстродействию перемещение исполнительного органа прецизионного электропривода, ограничения по максимальному и минимальному значений тока.

#### Dobrobaba Yury Petrovich

Candidate of Technical Sciences,  
Associate Professor,  
Professor of Department of power supply  
industrial enterprises,  
Kuban state technological university  
itstimetoprivod@yahoo.com

#### Koshkin Gordey Anatolyevich

Candidate of Technical Sciences,  
Foreman NKU, LLC Progress

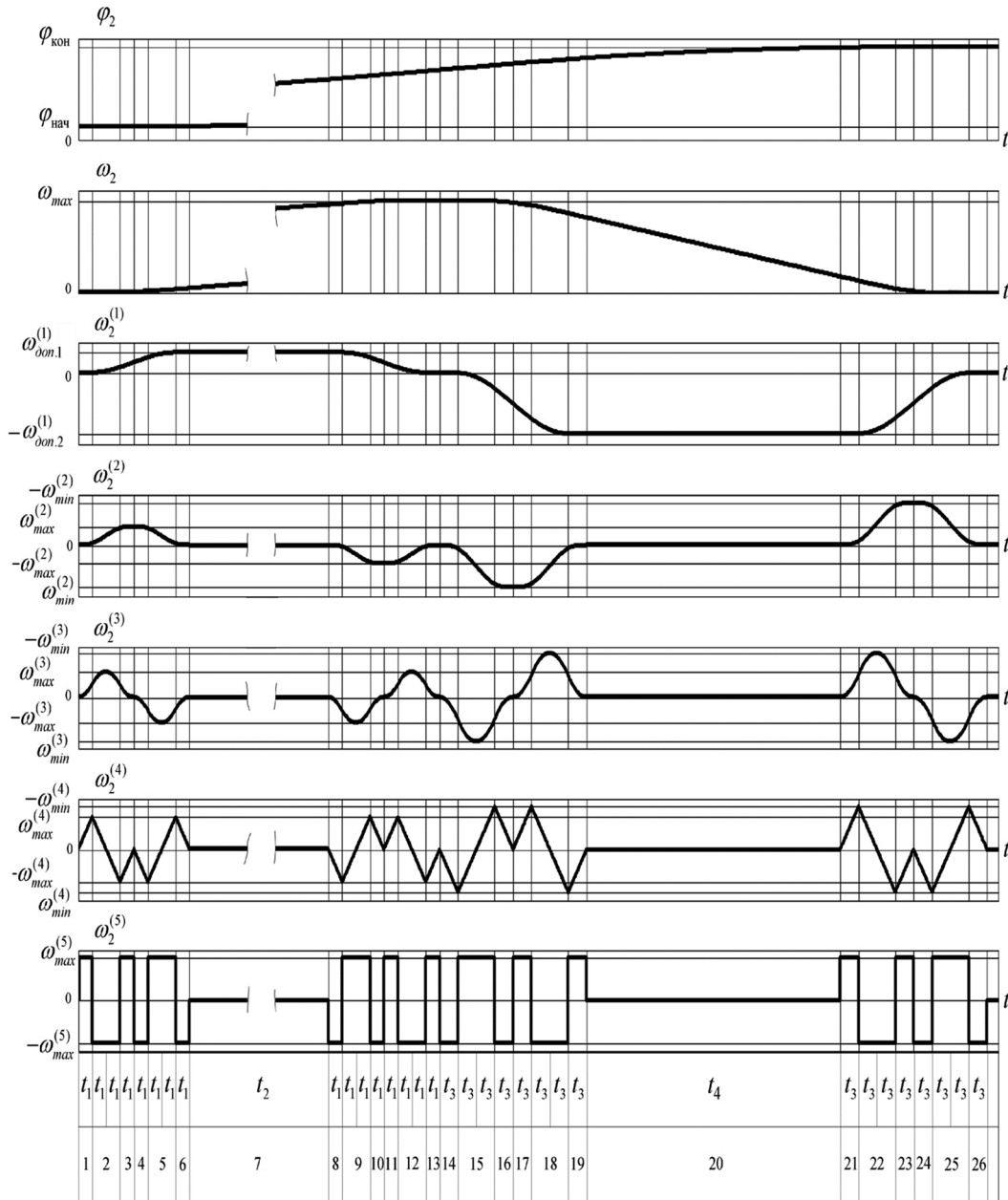
#### Gromnitsky E.E.

Kuban state technological university  
Johngrom686@yandex.ru

**Annotation.** The time-optimal diagram of movement of the executive body of the precision DC drive with elastic shafting with constrains of maximum and minimum current and the fifth derivative of the speed has designed. The algorithm has developed to determine the parameters of the time-optimal diagram of movement of the executive body of the precision DC drive with elastic shafting with constrains of maximum and minimum current and the fifth derivative of the speed. The region of existence of the time-optimal diagram of movement of the executive body of the precision DC drive with elastic shafting with constrains of maximum and minimum current and the fifth derivative of the speed has set. According to the results of the numerical experiment, the dependences of the duration of the cycle of movement of the executive body of the drive from prescribed displacement (rotation angle) for different values of the fifth derivative of the speed have plotted.

**Keywords:** elastic shafting, time-optimal diagram of movement of the executive body of the precision direct current motor, constrains of maximum and minimum current.

На рисунке 1 представлена оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока с упругим валопроводом с ограничениями максимального и минимального значений тока и пятой производной скорости, состоящая из двадцати шести этапов. Длительность первого, третьего, четвертого, шестого, восьмого, десятого, одиннадцатого и тринадцатого этапов равна  $t_1$ ; длительность второго, пятого, девятого и двенадцатого этапов равна  $2t_1$ ; длительность седьмого этапа равна  $t_2$ ; длительность



**Рисунок 1** – Оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа электропривода постоянного тока с упругим валопроводом с ограничениями максимального и минимального значений тока и пятой производной скорости

четырнадцатого, шестнадцатого, семнадцатого, девятнадцатого, двадцать первого, двадцать третьего, двадцать четвертого и двадцать шестого этапов равна  $t_3$ ; длительность пятнадцатого, восемнадцатого, двадцать второго и двадцать пятого этапов равна  $2t_3$ ; длительность двадцатого этапа равна  $t_4$ . На первом, третьем, пятом, девятом, одиннадцатом, тринадцатом, пятнадцатом, семнадцатом, девятнадцатом, двадцать первом, двадцать третьем и двадцать пятом этапах пятая производная угловой скорости исполнительного органа прецизионного электропривода  $\omega_2^{(5)}$  равна максимальному значению  $\omega_{max}^{(5)}$ ; на втором, четвертом, шестом, восьмом, десятом, двенадцатом, четырнадцатом, шестнадцатом, восемнадцатом, двадцать втором, двадцать четвертом, и двадцать шестом этапах пятая производная угловой скорости исполнительного органа прецизионного электропривода  $\omega_2^{(5)}$  равна максимальному значению со знаком «минус»  $-\omega_{max}^{(5)}$ ; на седьмом и двадцатом этапах пятая производная угловой скорости исполнитель-





ного органа электропривода  $\omega_2^{(5)}$  равна нулю. В моменты времени  $t_1$ ,  $7t_1$ ,  $(11t_1 + t_2)$ ,  $(13t_1 + t_2)$  четвертая производная угловой скорости исполнительного органа прецизионного электропривода  $\omega_2^{(4)}$  равна максимальному значению  $\omega_{max}^{(4)}$ ; в моменты времени  $3t_1$ ,  $5t_1$ ,  $(9t_1 + t_2)$ ,  $(15t_1 + t_2)$  четвертая производная угловой скорости исполнительного органа прецизионного электропривода  $\omega_2^{(4)}$  равна максимальному значению со знаком «минус»  $-\omega_{max}^{(4)}$ ; в моменты времени  $(16t_1 + t_2 + t_3)$ ,  $(16t_1 + t_2 + 7t_3)$ ,  $(16t_1 + t_2 + 11t_3 + t_4)$ ,  $(16t_1 + t_2 + 13t_3 + t_4)$  четвертая производная угловой скорости исполнительного органа прецизионного электропривода  $\omega_2^{(4)}$  равна минимальному значению  $\omega_{min}^{(4)}$ ; в моменты времени  $(16t_1 + t_2 + 3t_3)$ ,  $(16t_1 + t_2 + 5t_3)$ ,  $(16t_1 + t_2 + 9t_3 + t_4)$ ,  $(16t_1 + t_2 + 15t_3 + t_4)$  четвертая производная угловой скорости исполнительного органа прецизионного электропривода  $\omega_2^{(4)}$  равна минимальному значению со знаком «минус»  $-\omega_{min}^{(4)}$ ; на седьмом и двадцатом этапах четвертая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода  $\omega_2^{(4)}$  равна нулю. В моменты времени  $2t_1$  и  $(14t_1 + t_2)$  третья производная угловой скорости исполнительного органа электропривода  $\omega_2^{(3)}$  достигает максимального значения  $\omega_{max}^{(3)}$ ; в моменты времени  $6t_1$  и  $(10t_1 + t_2)$  третья производная угловой скорости исполнительного органа электропривода  $\omega_2^{(3)}$  достигает максимального значения со знаком «минус»  $-\omega_{max}^{(3)}$ ; в моменты времени  $(16t_1 + t_2 + 2t_3)$  и  $(16t_1 + t_2 + 14t_3 + t_4)$  третья производная угловой скорости исполнительного органа электропривода  $\omega_2^{(3)}$  достигает минимального значения  $\omega_{min}^{(3)}$ ; в моменты времени  $(16t_1 + t_2 + 6t_3)$  и  $(16t_1 + t_2 + 10t_3 + t_4)$  третья производная угловой скорости исполнительного органа электропривода  $\omega_2^{(3)}$  достигает минимального значения со знаком «минус»  $-\omega_{min}^{(3)}$ ; на седьмом и двадцатом этапах третья производная угловой скорости исполнительного органа электропривода  $\omega_2^{(3)}$  равна нулю. В момент времени  $4t_1$  вторая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода  $\omega_2^{(2)}$  достигает максимального значения  $\omega_{max}^{(2)}$ ; в момент времени  $(12t_1 + t_2)$  вторая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода  $\omega_2^{(2)}$  достигает максимального значения со знаком «минус»  $-\omega_{max}^{(2)}$ ; в момент времени  $(16t_1 + t_2 + 4t_3)$  вторая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода  $\omega_2^{(2)}$  достигает минимального значения  $\omega_{min}^{(2)}$ ; в момент времени  $(16t_1 + t_2 + 12t_3 + t_4)$  вторая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода  $\omega_2^{(2)}$  достигает минимального значения со знаком «минус»  $-\omega_{min}^{(2)}$ ; на седьмом и двадцатом этапах вторая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода  $\omega_2^{(2)}$  равна нулю. На седьмом этапе первая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода  $\omega_2^{(1)}$  равна первому максимально допустимому значению  $\omega_{доп.1}^{(1)}$  (ток якорной цепи электропривода  $I_{я}$  равен максимально допустимому значению  $I_{доп}$ ); на двадцатом этапе первая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода  $\omega_2^{(1)}$  равна второму максимально допустимому значению со знаком «минус»  $-\omega_{доп.2}^{(1)}$  (ток якорной цепи электропривода  $I_{я}$  равен максимально допустимому значению со знаком «минус»  $-I_{доп}$ ). В момент времени  $(16t_1 + t_2)$  угловая скорость исполнительного орга-



на электроприводе  $\omega_2$  достигает максимального значения  $\omega_{max}$ . За время цикла  $T_{ц} = (16t_1 + t_2 + 16t_3 + t_4)$  угол поворота исполнительного органа прецизионного электропривода увеличивается от начального значения угла поворота  $\varphi_{нач}$  до конечного значения  $\varphi_{кон}$ .

Для оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока с упругим валопроводом с ограничениями максимального и минимального значений тока и пятой производной скорости справедливы следующие соотношения:

$$\omega_{доп.1}^{(1)} = \frac{C_M I_{доп} - M_{со}}{J}; \tag{1}$$

$$\omega_{доп.2}^{(1)} = \frac{C_M I_{доп} + M_{со}}{J}; \tag{2}$$

$$t_1 = 4 \sqrt{\frac{1}{8} \frac{\omega_{доп.1}^{(1)}}{\omega_{max}^{(5)}}}; \tag{3}$$

$$t_2 = \frac{\omega_{max}}{\omega_{доп.1}^{(1)}} - 8t_1; \tag{4}$$

$$t_3 = 4 \sqrt{\frac{1}{8} \frac{\omega_{доп.2}^{(1)}}{\omega_{max}^{(5)}}}; \tag{5}$$

$$t_4 = \frac{\omega_{max}}{\omega_{доп.2}^{(1)}} - 8t_3; \tag{6}$$

$$\omega_{max} = \left\{ 16 \cdot (t_1 + t_3)^2 \cdot \left[ \frac{\omega_{доп.1}^{(1)} \cdot \omega_{доп.2}^{(1)}}{\omega_{доп.1}^{(1)} + \omega_{доп.2}^{(1)}} \right]^2 + 2 \cdot \frac{\omega_{доп.1}^{(1)} \cdot \omega_{доп.2}^{(1)}}{\omega_{доп.1}^{(1)} + \omega_{доп.2}^{(1)}} \cdot (\varphi_{кон} - \varphi_{нач}) \right\}^{\frac{1}{2}} - 4 \cdot (t_1 + t_3) \cdot \frac{\omega_{доп.1}^{(1)} \cdot \omega_{доп.2}^{(1)}}{\omega_{доп.1}^{(1)} + \omega_{доп.2}^{(1)}}, \tag{7}$$

где  $C_M$  – коэффициент пропорциональности между током якорной цепи электродвигателя и его моментом, В·с;  $I_{доп}$  – максимально допустимое значение тока якорной цепи, А;  $M_{со}$  – момент сопротивления электропривода, Н·м;

Область существования оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа электропривода постоянного тока с упругим валопроводом с ограничениями максимального и минимального значений тока и пятой производной скорости:

$$\varphi_{гр.2} \leq (\varphi_{кон} - \varphi_{нач}) \leq \varphi_{гр.3}, \tag{8}$$

где

$$\varphi_{гр.2} = 32 \omega_{доп.2}^{(1)} \cdot 4 \sqrt{\frac{1}{8} \cdot \frac{\omega_{доп.2}^{(1)}}{\omega_{max}^{(5)}}} \times \left[ 4 \sqrt{\frac{1}{8} \cdot \frac{\omega_{доп.1}^{(1)}}{\omega_{max}^{(5)}}} + \frac{\omega_{доп.2}^{(1)}}{\omega_{доп.1}^{(1)}} \cdot 4 \sqrt{\frac{1}{8} \cdot \frac{\omega_{доп.2}^{(1)}}{\omega_{max}^{(5)}}} + 2 \cdot 4 \sqrt{\frac{1}{8} \cdot \frac{\omega_{доп.2}^{(1)}}{\omega_{max}^{(5)}}} \right];$$



$$\varphi_{Гр.3} = \omega_{доп} \cdot \left[ \frac{1}{2} \cdot \frac{\omega_{доп}}{\omega_{доп.1}^{(1)}} + \frac{1}{2} \cdot \frac{\omega_{доп}}{\omega_{доп.2}^{(1)}} + 4 \cdot \sqrt[4]{\frac{1}{8} \cdot \frac{\omega_{доп.1}^{(1)}}{\omega_{max}^{(5)}}} + 4 \cdot \sqrt[4]{\frac{1}{8} \cdot \frac{\omega_{доп.2}^{(1)}}{\omega_{max}^{(5)}}} \right].$$

С целью определения зависимости длительности цикла перемещения исполнительного органа электропривода  $T_{ц}$  от заданного перемещения (угла поворота)  $(\varphi_{кон} - \varphi_{нач})$  при различных максимальных значениях пятой производной угловой скорости исполнительного органа электропривода  $\omega_{max}^{(5)}$  проведен численный эксперимент.

В работе рассматривается электропривод, имеющий следующие параметры:

$$C_e = 1,25 \frac{В \cdot с}{рад}; C_M = 1,25 В \cdot с; R_я = 5 Ом; L_я = 0,1 Гн; J = 0,05 кг \cdot м^2,$$

где  $C_e$  – коэффициент пропорциональности между угловой скоростью электродвигателя и его ЭДС;  $L_я$  – индуктивность якорной цепи электродвигателя.

На координаты электропривода накладываются ограничения: по максимально допустимому значению напряжения  $U_{доп} = 250 В$ ; по максимально допустимому значению тока  $I_{доп} = 8 А$ ; по максимально допустимому значению угловой скорости  $\omega_{доп} = 160 \frac{рад}{с}$ .

Момент сопротивления электропривода постоянного тока с упругим валопроводом равняется  $M_{со} = 5 Н \cdot м$ .

Определим максимально допустимые значения первой производной угловой скорости исполнительного органа электропривода:

$$\omega_{доп.1}^{(1)} = \frac{1,25 \cdot 8 - 5}{0,05} = 100 \frac{рад}{с^2};$$

$$\omega_{доп.2}^{(1)} = \frac{1,25 \cdot 8 + 5}{0,05} = 300 \frac{рад}{с^2}.$$

Первая серия численного эксперимента. Пятая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода равняется  $\omega_{max}^{(5)} = 512000000 \frac{рад}{с^6}$ .

$$\begin{aligned} \varphi_{Гр.2} &= 32 \cdot 300 \cdot \sqrt[4]{\frac{1}{8} \cdot \frac{300}{512000000}} \times \\ &\times \left[ \sqrt[4]{\frac{1}{8} \cdot \frac{100}{512000000}} + \frac{300}{100} \cdot \sqrt[4]{\frac{1}{8} \cdot \frac{300}{512000000}} + 2 \cdot \sqrt[4]{\frac{1}{8} \cdot \frac{300}{512000000}} \right] = \\ &= \frac{3}{2} \cdot \sqrt[4]{3} \cdot (5 \cdot \sqrt[4]{3} + 1) \approx 14,964 \text{ рад}; \\ \varphi_{Гр.3} &= 160 \cdot \left[ \frac{1}{2} \cdot \frac{160}{100} + \frac{1}{2} \cdot \frac{160}{300} + 4 \cdot \sqrt[4]{\frac{1}{8} \cdot \frac{100}{512000000}} + 4 \cdot \sqrt[4]{\frac{1}{8} \cdot \frac{300}{512000000}} \right] = \\ &= \left[ 170 \frac{2}{3} + 8 \cdot (\sqrt[4]{3} + 1) \right] \approx 189,195 \text{ рад}. \end{aligned}$$

В таблице 1 приведены результаты первой серии численного эксперимента.

При этом остальные параметры диаграмм перемещения исполнительного органа электропривода постоянного тока с упругим валопроводом имели постоянные значения:  $t_1 = 0,0125 с$ ;



$$t_3 = 0,0165c; \omega_{max}^{(4)} = 6400000 \frac{pad}{c^5}; \omega_{max}^{(3)} = 80000 \frac{pad}{c^4}; \omega_{max}^{(2)} = 2000 \frac{pad}{c^3}; \omega_{min}^{(4)} = -8422874 \frac{pad}{c^5};$$

$$\omega_{min}^{(3)} = -138564 \frac{pad}{c^4}; \omega_{min}^{(2)} = -4559 \frac{pad}{c^3}.$$

Таблица 1 – Результаты первой серии численного эксперимента

$\Delta\varphi$ , рад	$t_2$ , с	$t_4$ , с	$T_{ц}$ , с	$\omega_{max}$ , $\frac{рад}{с}$
14,964491	0,2948	0	0,7580	39,48
40	0,5926	0,0993	1,1551	69,26
65	0,8044	0,1699	1,4374	90,44
90	0,9783	0,2278	1,6693	107,83
115	1,1294	0,2782	1,8708	122,94
140	1,2649	0,3234	2,0515	136,49
165	1,3888	0,3646	2,2166	148,88
189,19525	1,5	0,4017	2,3649	160

Вторая серия численного эксперимента. Пятая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода равняется  $\omega_{max}^{(5)} = 32000000 \frac{pad}{c^6}$ .

$$\varphi_{гр.2} = 32 \cdot 300 \cdot \sqrt[4]{\frac{1}{8} \cdot \frac{300}{32000000}} \cdot \left[ \sqrt[4]{\frac{1}{8} \cdot \left[ \frac{100}{32000000} \right]} + \frac{300}{100} \cdot \sqrt[4]{\frac{1}{8} \cdot \frac{300}{32000000}} + \right.$$

$$\left. + 2 \cdot \sqrt[4]{\frac{1}{8} \cdot \frac{300}{32000000}} \right] = 6 \cdot \sqrt[4]{3} \cdot (5 \cdot \sqrt[4]{3} + 1) \approx 59,858 \text{ рад};$$

$$\varphi_{гр.3} = 160 \cdot \left[ \frac{1}{2} \cdot \frac{160}{100} + \frac{1}{2} \cdot \frac{160}{300} + 4 \cdot \sqrt[4]{\frac{1}{8} \cdot \frac{100}{32000000}} + 4 \cdot \sqrt[4]{\frac{1}{8} \cdot \frac{300}{32000000}} \right] \approx$$

$$\approx 207,724 \text{ рад}.$$

В таблице 2 приведены результаты второй серии численного эксперимента.

Таблица 2 – Результаты второй серии численного эксперимента

$\Delta\varphi$ , рад	$t_2$ , с	$t_4$ , с	$T_{ц}$ , с	$\omega_{max}$ , $\frac{рад}{с}$
59,858	0,5896	0	1,5161	78,96
85	0,7687	0,0597	1,7549	96,87
110	0,9225	0,1110	1,9599	112,25
135	1,0599	0,1567	2,1431	125,99
160	1,1852	0,1985	2,3101	138,52
185	1,3012	0,2372	2,4648	150,12
207,724	1,4	0,2701	2,5965	160

При этом остальные параметры диаграмм перемещения исполнительного органа электропривода постоянного тока с упругим валопроводом имели постоянные значения:  $t_1 = 0,025c$ ;

$$t_3 = 0,0329c; \omega_{max}^{(4)} = 800000 \frac{pad}{c^5}; \omega_{max}^{(3)} = 20000 \frac{pad}{c^4}; \omega_{max}^{(2)} = 1000 \frac{pad}{c^3}; \omega_{min}^{(4)} = -1052859 \frac{pad}{c^5};$$

$$\omega_{min}^{(3)} = -34641 \frac{pad}{c^4}; \omega_{min}^{(2)} = -2280 \frac{pad}{c^3}.$$



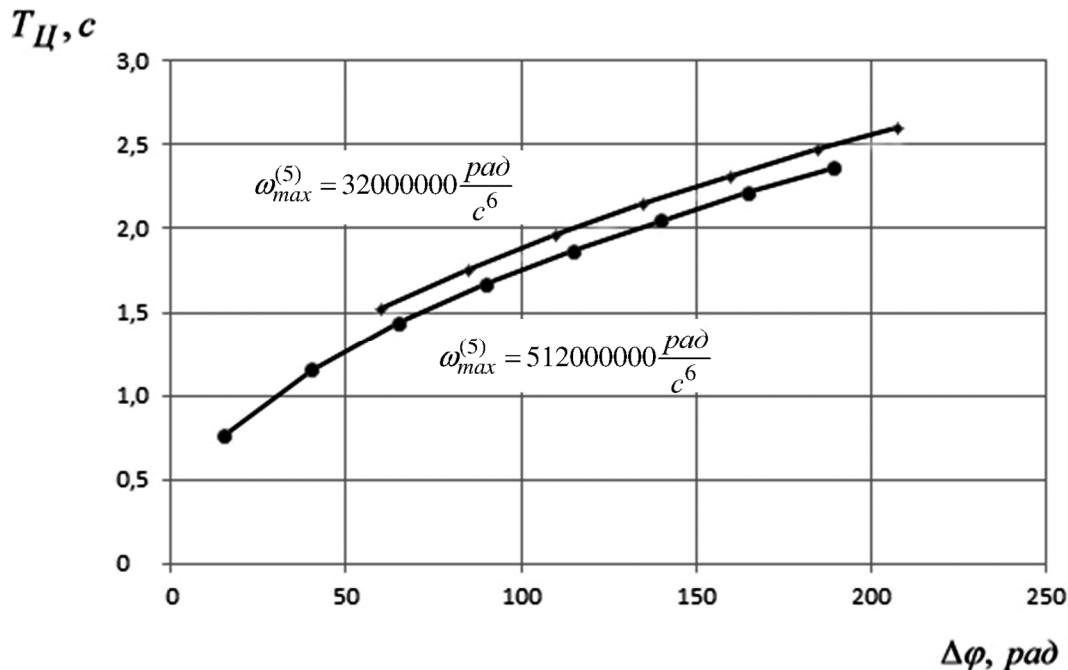
На рисунке 1 представлена оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа электропривода постоянного тока с упругим валопроводом с ограничениями максимального и минимального значений тока и пятой производной скорости, которая имеет следующие параметры:  $(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) = 90 \text{ рад}$ ;  $T_{\text{ц}} = 1,6693 \text{ с}$ ;  $t_1 = 0,0125 \text{ с}$ ;  $t_2 = 0,9783 \text{ с}$ ;  $t_3 = 0,0165 \text{ с}$ ;

$$t_4 = 0,2278 \text{ с}; \omega_{\text{max}}^{(5)} = 512000000 \frac{\text{рад}}{\text{с}^6}; \omega_{\text{max}}^{(4)} = 640000 \frac{\text{рад}}{\text{с}^5}; \omega_{\text{max}}^{(3)} = 80000 \frac{\text{рад}}{\text{с}^4}; \omega_{\text{max}}^{(2)} = 2000 \frac{\text{рад}}{\text{с}^3};$$

$$\omega_{\text{доп.1}}^{(1)} = 100 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}; \omega_{\text{max}} = 107,83 \frac{\text{рад}}{\text{с}}; \omega_{\text{min}}^{(4)} = -8422874 \frac{\text{рад}}{\text{с}^5}; \omega_{\text{min}}^{(3)} = -138564 \frac{\text{рад}}{\text{с}^4};$$

$$\omega_{\text{min}}^{(2)} = -4559 \frac{\text{рад}}{\text{с}^3}; \omega_{\text{доп.2}}^{(1)} = 300 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}.$$

На рисунке 2 на основании результатов проведённого численного эксперимента построены зависимости длительности цикла перемещения исполнительного органа электропривода  $T_{\text{ц}}$  от заданного перемещения (угла поворота)  $(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}})$  при различных максимальных значениях пятой производной угловой скорости исполнительного органа электропривода  $\omega_{\text{max}}^{(5)}$ .



**Рисунок 2** — Графики зависимости длительности цикла перемещения исполнительного органа электропривода  $T_{\text{ц}}$  от заданного перемещения (угла поворота)  $(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}})$  при различных максимальных значениях пятой производной угловой скорости исполнительного органа электропривода  $\omega_{\text{max}}^{(5)}$

**Выводы**

Предложена оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока с упругим валопроводом с ограничениями максимального и минимального значений тока и пятой производной скорости, состоящая из двадцати шести этапов.

Разработано математическое обеспечение для определения параметров оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока с упругим валопроводом с ограничениями максимального и минимального значений тока и пятой производной скорости.

Установлена область существования оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока с упругим валопроводом с ограничениями максимального и минимального значений тока и пятой производной скорости.



## Литература:

1. Добробаба Ю.П. Оптимальные по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока с упругим валопроводом / Ю.П. Добробаба, Г.А. Кошкин, Е.Е. Громницкий // Булатовские чтения : Материалы Международной научно-практической конференции (31 марта 2017 г.) : в 5 т. : сборник статей / под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. О.В. Савенок. – Краснодар : Издательский Дом – Юг. Т. 5: Электрооборудование в нефтегазовой отрасли. Гуманитарные науки. – 2017. – 294 с. С. 41–43.
2. Добробаба Ю.П. Оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока с упругим валопроводом с ограничением пятой производной скорости / Ю.П. Добробаба, Г.А. Кошкин, Е.Е. Громницкий // Булатовские чтения : Материалы Международной научно-практической конференции (31 марта 2017 г.) : в 5 т. : сборник статей / под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. О.В. Савенок. – Краснодар : Издательский Дом – Юг. Т. 5: Электрооборудование в нефтегазовой отрасли. Гуманитарные науки. – 2017. – 294 с. С. 44–47.
3. Добробаба Ю.П. Оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока с упругим валопроводом с ограничениями по первой и пятой производным скорости / Ю.П. Добробаба, Г.А. Кошкин, Е.Е. Громницкий // Булатовские чтения : Материалы Международной научно-практической конференции (31 марта 2017 г.) : в 5 т. : сборник статей / под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. О.В. Савенок. – Краснодар : Издательский Дом – Юг. Т. 5: Электрооборудование в нефтегазовой отрасли. Гуманитарные науки. – 2017. – 294 с. С. 48–51.
4. Добробаба Ю.П. Оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока с упругим валопроводом с ограничениями по скорости и ее первой и пятой производным скорости / Ю.П. Добробаба, Г.А. Кошкин, Е.Е. Громницкий // Булатовские чтения : Материалы Международной научно-практической конференции (31 марта 2017 г.) : в 5 т. : сборник статей / под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. О.В. Савенок. – Краснодар : Издательский Дом – Юг. Т. 5: Электрооборудование в нефтегазовой отрасли. Гуманитарные науки. – 2017. – 294 с. С. 52–55.
5. Добробаба Ю.П. Оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока с упругим валопроводом с ограничениями максимального значения тока и пятой производной скорости / Ю.П. Добробаба, Г.А. Кошкин, Е.Е. Громницкий // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар : КубГАУ, 2017. – № 10(134). – URL : <http://ej.kubagro.ru/2017/10/pdf/44.pdf>

## References:

1. Dobrobaba Yu.P. Charts of movement of executive body of the precision electric drive of a direct current, optimum on speed, with the elastic shaft line / Yu.P. Dobrobaba, G.A. Koshkin, E.E. Gromnitsky // Readings of Bulatov: Materials of the International scientific and practical conference (on March 31, 2017): in 5 v. : the collection of articles / under a general edition of the Dr.Sci.Tech., the prof. O.V. Savenok. – Krasnodar : Publishing house – South. V. 5: Electric equipment in oil and gas branch. Humanities. – 2017. – 294 p. P. 41–43.
2. Dobrobaba Yu.P. The chart of movement of executive body of the precision electric drive of a direct current, optimum on speed, with the elastic shaft line with restriction of the fifth derivative speed / Yu.P. Dobrobaba, G.A. Koshkin, E.E. Gromnitsky // Readings of Bulatov: Materials of the International scientific and practical conference (on March 31, 2017): in 5 v. : the collection of articles / under a general edition of the Dr.Sci.Tech., the prof. O.V. Savenok. – Krasnodar : Publishing house – South. V. 5: Electric equipment in oil and gas branch. Humanities. – 2017. – 294 p. P. 44–47.
3. Dobrobaba Yu.P. The chart of movement of executive body of the precision electric drive of a direct current, optimum on speed, with the elastic shaft line with restrictions on the first and fifth derivatives of speed / Yu.P. Dobrobaba, G.A. Koshkin, E.E. Gromnitsky // Readings of Bulatov: Materials of the International scientific and practical conference (on March 31, 2017): in 5 v. : the collection of articles / under a general edition of the Dr.Sci.Tech., the prof. O.V. Savenok. – Krasnodar : Publishing house – South. V. 5: Electric equipment in oil and gas branch. Humanities. – 2017. – 294 p. P. 48–51.
4. Dobrobaba Yu.P. The chart of movement of executive body of the precision electric drive of a direct current, optimum on speed, with the elastic shaft line with restrictions on speed and its first and fifth derivatives of speed / Yu.P. Dobrobaba, G.A. Koshkin, E.E. Gromnitsky // Readings of Bulatov: Materials of the International scientific and practical conference (on March 31, 2017): in 5 v.: the collection of articles / under a general edition of the Dr.Sci.Tech., the prof. O.V. Savenok. – Krasnodar: Publishing house – South. V. 5: Electric equipment in oil and gas branch. Humanities. – 2017. – 294 p. P. 52–55.
5. Dobrobaba Yu.P. The chart of movement of executive body of the precision electric drive of a direct current, optimum on speed, with the elastic shaft line with restrictions of the maximum value of current and the fifth derivative speed / Yu.P. Dobrobaba, G.A. Koshkin, E.E. Gromnitsky // Polythematic network online scientific magazine of the Kuban state agricultural university (The scientific magazine of KUBGAU) [An electronic resource]. – Krasnodar : KUBGAU, 2017. – № 10(134). – URL : <http://ej.kubagro.ru/2017/10/pdf/44.pdf>



УДК 62.83.52:62.503.56

## ОПТИМАЛЬНАЯ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ ДИАГРАММА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА ПРЕЦИЗИОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТОЯННОГО ТОКА С УПРУГИМ ВАЛОПРОВОДОМ С ОГРАНИЧЕНИЯМИ МАКСИМАЛЬНОГО И МИНИМАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЙ ТОКА, СКОРОСТИ И ЕЁ ПЯТОЙ ПРОИЗВОДНОЙ

### TIME-OPTIMAL DIAGRAM OF MOVEMENT OF EXECUTIVE BODY OF THE DIRECT CURRENT DRIVE WITH ELASTIC SHAFTING WITH CONSTRAINS OF MAXIMUM AND MINIMUM CURRENT AND THE FIFTH DERIVATIVE OF THE SPEED

#### Добробаба Юрий Петрович

кандидат технических наук, доцент,  
профессор кафедры электроснабжения  
промышленных предприятий,  
Кубанский государственный технологический университет  
itstimetoprivod@yahoo.com

#### Кошкин Гордей Анатольевич

андидат технических наук,  
начальник цеха НКУ, ООО «Прогресс»

#### Громницкий Е.Е.

Кубанский государственный технологический университет  
Johngrom686@yandex.ru

**Аннотация.** Создана оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока с упругим валопроводом с ограничениями максимального и минимального значений тока, скорости и ее пятой производной. Чтобы определить параметры оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока с упругим валопроводом с ограничениями максимального и минимального значений тока, скорости и ее пятой производной, разработан алгоритм. Установлена область существования оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока с упругим валопроводом с ограничениями максимального и минимального значений тока, скорости и ее пятой производной. Исходя из результатов численного эксперимента построены зависимости длительности цикла перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода от заданного перемещения (угла поворота) при различных значениях пятой производной скорости.

**Ключевые слова:** упругий валопровод, оптимальное по быстродействию перемещение исполнительного органа прецизионного электропривода, ограничение скорости.

#### Dobrobaba Yury Petrovich

Candidate of Technical Sciences,  
Associate Professor,  
Professor of Department of power supply  
industrial enterprises,  
Kuban state technological university  
itstimetoprivod@yahoo.com

#### Koshkin Gordey Anatolyevich

Candidate of Technical Sciences,  
Foreman NKU, LLC Progress

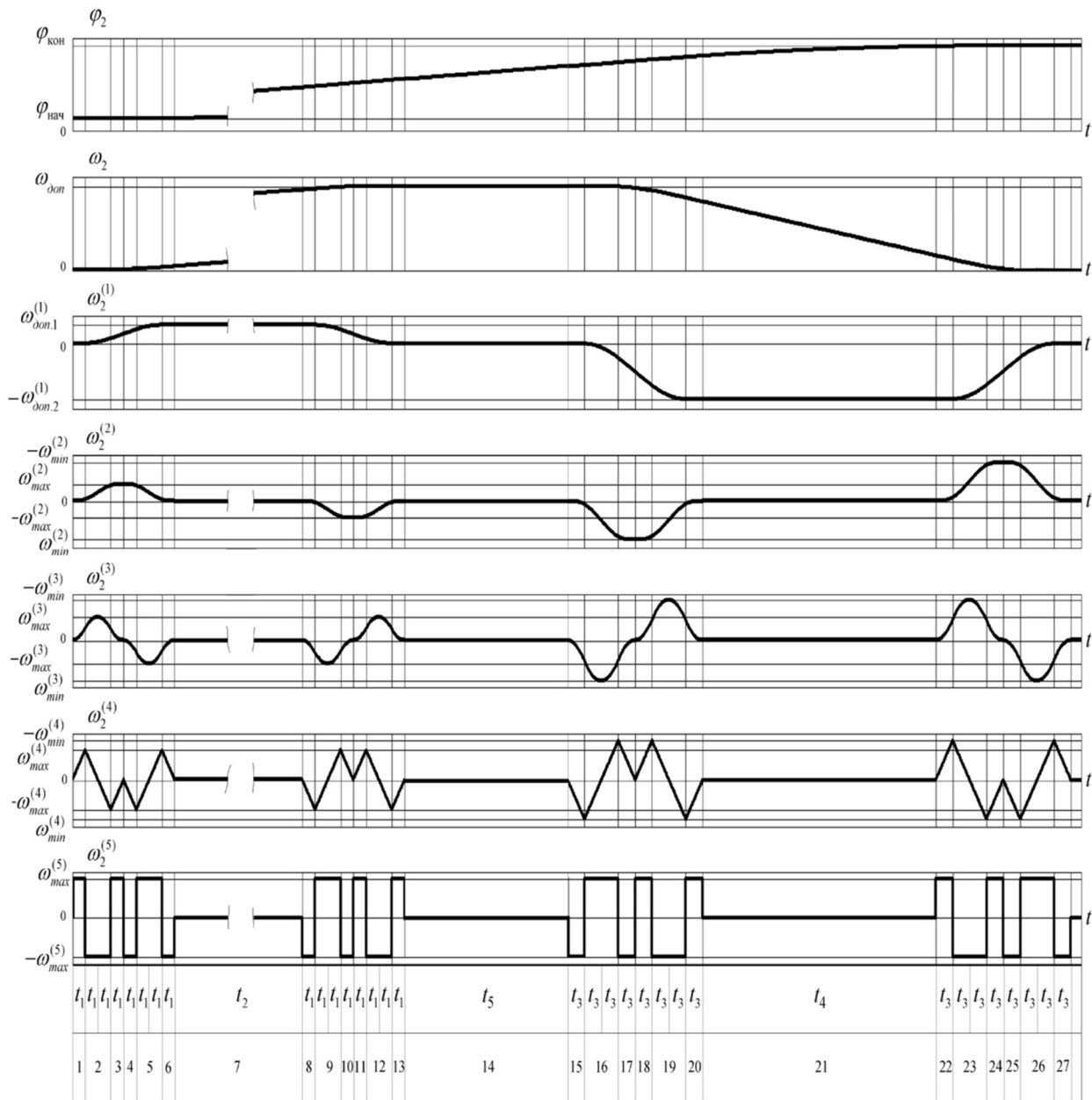
#### Gromnitsky E.E.

Kuban state technological university  
Johngrom686@yandex.ru

**Annotation.** The time-optimal diagram of movement of the executive body of the precision DC drive with elastic shafting with constrains of maximum and minimum current, speed and the fifth derivative of the speed has designed. The algorithm has developed to determine the parameters of the time-optimal diagram of movement of the executive body of the precision DC drive with elastic shafting with constrains of maximum and minimum current, speed and the fifth derivative of the speed. The region of existence of the time-optimal diagram of movement of the executive body of the precision DC drive with elastic shafting with constrains of maximum and minimum current, speed and the fifth derivative of the speed has set. According to the results of the numeral experiment, the dependences of the duration of the cycle of movement of the executive body of the drive from prescribed displacement (rotation angle) for different values of the fifth derivative of the speed have plotted.

**Keywords:** elastic shafting, time-optimal diagram of movement of the executive body of the precision direct current motor, constrain of the speed.

На рисунке 1 представлена оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока с упругим валопроводом с ограничениями максимального и минимального значений тока, скорости и ее пятой производной, состоящая из двадцати семи этапов. Длительность первого, третьего, четвертого, шестого, восьмого, десятого, одиннадцатого и тринадцатого этапов равна  $t_1$ ; длительность второго, пятого, девятого и двенадцатого этапов равна  $2t_1$ ; длительность седьмого этапа равна  $t_2$ ; длительность



**Рисунок 1** – Оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа электропривода постоянного тока с упругим валопроводом с ограничениями максимального и минимального значений тока, скорости и ее пятой производной

пятнадцатого, семнадцатого, восемнадцатого, двадцатого, двадцать второго, двадцать четвертого, двадцать пятого и двадцать седьмого этапов равна  $t_3$ ; длительность шестнадцатого, девятнадцатого, двадцать третьего и двадцать шестого этапов равна  $2t_3$ ; длительность двадцать первого этапа равна  $t_4$ ; длительность четырнадцатого этапа равна  $t_5$ .

На первом, третьем, пятом, девятом, одиннадцатом, тринадцатом, шестнадцатом, восемнадцатом, двадцатом, двадцать втором, двадцать четвертом и двадцать шестом этапах пятая производная угловой скорости исполнительного органа прецизионного электропривода  $\omega_2^{(5)}$  равна максимальному значению  $\omega_{max}^{(5)}$ ; на втором, четвертом, шестом, восьмом, десятом, двенадцатом, пятнадцатом, семнадцатом, девятнадцатом, двадцать третьем, двадцать пятом, и двадцать седьмом этапах пятая производная угловой скорости исполнительного органа прецизионного электропривода  $\omega_2^{(5)}$  равна максимальному значению со знаком «минус»  $-\omega_{max}^{(5)}$ ; на седьмом, четырнадцатом и двадцать первом





этапах пятая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода  $\omega_2^{(5)}$  равна нулю. В моменты времени  $t_1$ ,  $7t_1$ ,  $(11t_1 + t_2)$ ,  $(13t_1 + t_2)$  четвертая производная угловой скорости исполнительного органа прецизионного электропривода  $\omega_2^{(4)}$  равна максимальному значению  $\omega_{max}^{(4)}$ ; в моменты времени  $3t_1$ ,  $5t_1$ ,  $(9t_1 + t_2)$ ,  $(15t_1 + t_2)$  четвертая производная угловой скорости исполнительного органа прецизионного электропривода  $\omega_2^{(4)}$  равна максимальному значению со знаком «минус»  $-\omega_{max}^{(4)}$ ; в моменты времени  $(16t_1 + t_2 + t_3 + t_5)$ ,  $(16t_1 + t_2 + 7t_3 + t_5)$ ,  $(16t_1 + t_2 + 11t_3 + t_4 + t_5)$ ,  $(16t_1 + t_2 + 13t_3 + t_4 + t_5)$  четвертая производная угловой скорости исполнительного органа прецизионного электропривода  $\omega_2^{(4)}$  равна минимальному значению  $\omega_{min}^{(4)}$ ; в моменты времени  $(16t_1 + t_2 + 3t_3 + t_5)$ ,  $(16t_1 + t_2 + 5t_3 + t_5)$ ,  $(16t_1 + t_2 + 9t_3 + t_4 + t_5)$ ,  $(16t_1 + t_2 + 15t_3 + t_4 + t_5)$  четвертая производная угловой скорости исполнительного органа прецизионного электропривода  $\omega_2^{(4)}$  равна минимальному значению со знаком «минус»  $-\omega_{min}^{(4)}$ ; на седьмом, четырнадцатом и двадцатом первом этапах четвертая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода  $\omega_2^{(4)}$  равна нулю. В моменты времени  $2t_1$  и  $(14t_1 + t_2)$  третья производная угловой скорости исполнительного органа электропривода  $\omega_2^{(3)}$  достигает максимального значения  $\omega_{max}^{(3)}$ ; в моменты времени  $6t_1$  и  $(10t_1 + t_2)$  третья производная угловой скорости исполнительного органа электропривода  $\omega_2^{(3)}$  достигает максимального значения со знаком «минус»  $-\omega_{max}^{(3)}$ ; в моменты времени  $(16t_1 + t_2 + 2t_3 + t_5)$  и  $(16t_1 + t_2 + 14t_3 + t_4 + t_5)$  третья производная угловой скорости исполнительного органа электропривода  $\omega_2^{(3)}$  достигает минимального значения  $\omega_{min}^{(3)}$ ; в моменты времени  $(16t_1 + t_2 + 6t_3 + t_5)$  и  $(16t_1 + t_2 + 10t_3 + t_4 + t_5)$  третья производная угловой скорости исполнительного органа электропривода  $\omega_2^{(3)}$  достигает минимального значения со знаком «минус»  $-\omega_{min}^{(3)}$ ; на седьмом, четырнадцатом и двадцать первом этапах третья производная угловой скорости исполнительного органа электропривода  $\omega_2^{(3)}$  равна нулю. В момент времени  $4t_1$  вторая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода  $\omega_2^{(2)}$  достигает максимального значения  $\omega_{max}^{(2)}$ ; в момент времени  $(12t_1 + t_2)$  вторая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода  $\omega_2^{(2)}$  достигает максимального значения со знаком «минус»  $-\omega_{max}^{(2)}$ ; в момент времени  $(16t_1 + t_2 + 4t_3 + t_5)$  вторая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода  $\omega_2^{(2)}$  достигает минимального значения  $\omega_{min}^{(2)}$ ; в момент времени  $(16t_1 + t_2 + 12t_3 + t_4 + t_5)$  вторая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода  $\omega_2^{(2)}$  достигает минимального значения со знаком «минус»  $-\omega_{min}^{(2)}$ ; на седьмом, четырнадцатом и двадцать первом этапах вторая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода  $\omega_2^{(2)}$  равна нулю. На седьмом этапе первая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода  $\omega_2^{(1)}$  равна первому максимально допустимому значению  $\omega_{доп.1}^{(1)}$  (ток якорной цепи электропривода  $I_{я}$  равен максимально допустимому значению  $I_{доп}$ ); на двадцать первом этапе первая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода  $\omega_2^{(1)}$  равна второму максимально допустимому значению со знаком «минус»  $-\omega_{доп.2}^{(1)}$ . (ток якорной цепи электропривода  $I_{я}$  равен максимально допустимому значению со знаком «минус»  $-I_{доп}$ ), на четыр-



надцатом этапе первая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода  $\omega_2^{(1)}$  равна нулю. На четырнадцатом этапе угловая скорость исполнительного органа электропривода  $\omega_2$  равна максимально допустимому значению  $\omega_{\text{доп}}$ . За время цикла  $T_{\text{Ц}} = (16t_1 + t_2 + 16t_3 + t_4 + t_5)$  угол поворота исполнительного органа прецизионного электропривода увеличивается от начального значения угла поворота  $\varphi_{\text{нач}}$  до конечного значения  $\varphi_{\text{кон}}$ .

Для оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока с упругим валопроводом с ограничениями максимального и минимального значений тока, скорости и ее пятой производной справедливы следующие соотношения:

$$\omega_{\text{доп.1}}^{(1)} = \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{J}; \tag{1}$$

$$\omega_{\text{доп.2}}^{(1)} = \frac{C_M I_{\text{доп}} + M_{\text{со}}}{J}; \tag{2}$$

$$t_1 = 4 \sqrt{\frac{1}{8} \frac{\omega_{\text{доп.1}}^{(1)}}{\omega_{\text{max}}^{(5)}}}; \tag{3}$$

$$t_2 = \frac{\omega_{\text{max}}}{\omega_{\text{доп.1}}^{(1)}} - 8t_1; \tag{4}$$

$$t_3 = 4 \sqrt{\frac{1}{8} \frac{\omega_{\text{доп.2}}^{(1)}}{\omega_{\text{max}}^{(5)}}}; \tag{5}$$

$$t_4 = \frac{\omega_{\text{max}}}{\omega_{\text{доп.2}}^{(1)}} - 8t_3; \tag{6}$$

$$t_5 = \frac{\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}}{\omega_{\text{доп}}} - 8t_1 - \frac{1}{2}t_2 - 8t_3 - \frac{1}{2}t_4, \tag{7}$$

где  $C_M$  – коэффициент пропорциональности между током якорной цепи электродвигателя и его моментом, В·с;  $I_{\text{доп}}$  – максимально допустимое значение тока якорной цепи, А;  $M_{\text{со}}$  – момент сопротивления электропривода, Н·м;

Область существования оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа электропривода постоянного тока с упругим валопроводом с ограничениями максимального и минимального значений тока, скорости и ее пятой производной:

$$\varphi_{\text{Гр.3}} \leq (\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}), \tag{8}$$

где 
$$\varphi_{\text{Гр.3}} = \omega_{\text{доп}} \cdot \left[ \frac{1}{2} \cdot \frac{\omega_{\text{доп}}}{\omega_{\text{доп.1}}^{(1)}} + \frac{1}{2} \cdot \frac{\omega_{\text{доп}}}{\omega_{\text{доп.2}}^{(1)}} + 4 \cdot 4 \sqrt{\frac{1}{8} \cdot \frac{\omega_{\text{доп.1}}^{(1)}}{\omega_{\text{max}}^{(5)}}} + 4 \cdot 4 \sqrt{\frac{1}{8} \cdot \frac{\omega_{\text{доп.2}}^{(1)}}{\omega_{\text{max}}^{(5)}}} \right].$$

С целью определения зависимости длительности цикла перемещения исполнительного органа электропривода  $T_{\text{Ц}}$  от заданного перемещения (угла поворота)  $(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}})$  при различных максимальных значениях пятой производной угловой скорости исполнительного органа электропривода  $\omega_{\text{max}}^{(5)}$  проведен численный эксперимент.

В работе рассматривается электропривод, имеющий следующие параметры:

$$C_e = 1,25 \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}}; C_M = 1,25 \text{ В} \cdot \text{с}; R_{\text{я}} = 5 \text{ Ом}; L_{\text{я}} = 0,1 \text{ Гн}; J = 0,05 \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$



где  $C_e$  – коэффициент пропорциональности между угловой скоростью электродвигателя и его ЭДС;  $L_{я}$  – индуктивность якорной цепи электродвигателя.

На координаты электропривода накладываются ограничения: по максимально допустимому значению напряжения  $U_{доп} = 250 В$ ; по максимально допустимому значению тока  $I_{доп} = 8 А$ ; по максимально допустимому значению угловой скорости  $\omega_{доп} = 160 \frac{рад}{с}$ .

Момент сопротивления электропривода постоянного тока с упругим валопроводом равняется  $M_{со} = 5 Н \cdot м$ .

Определим максимально допустимые значения первой производной угловой скорости исполнительного органа электропривода:

$$\omega_{доп.1}^{(1)} = \frac{1,25 \cdot 8 - 5}{0,05} = 100 \frac{рад}{с^2};$$

$$\omega_{доп.2}^{(1)} = \frac{1,25 \cdot 8 + 5}{0,05} = 300 \frac{рад}{с^2}.$$

Первая серия численного эксперимента. Пятая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода равняется  $\omega_{max}^{(5)} = 512000000 \frac{рад}{с^6}$ .

$$\begin{aligned} \varphi_{гр.3} &= 160 \cdot \left[ \frac{1}{2} \cdot \frac{160}{100} + \frac{1}{2} \cdot \frac{160}{300} + 4 \cdot \sqrt[4]{\frac{1}{8} \cdot \frac{100}{512000000}} + 4 \cdot \sqrt[4]{\frac{1}{8} \cdot \frac{300}{512000000}} \right] = \\ &= \left[ 170 \frac{2}{3} + 8 \cdot (\sqrt[4]{3} + 1) \right] \approx 189,195 \text{ рад.} \end{aligned}$$

В таблице 1 приведены результаты первой серии численного эксперимента.

**Таблица 1** – Результаты первой серии численного эксперимента

$\Delta\varphi, \text{рад}$	$t_5, \text{с}$	$T_{ц}, \text{с}$
189,19525	0	2,3649
215	0,1613	2,5262
240	0,3175	2,6825
265	0,4738	2,8387
290	0,6300	2,9950
315	0,7863	3,1512
340	0,9425	3,3075

При этом остальные параметры диаграмм перемещения исполнительного органа электропривода постоянного тока с упругим валопроводом имели постоянные значения:  $t_1 = 0,0125с$ ;  $t_2 = 1,5с$ ;

$$t_3 = 0,0165с; \quad t_4 = 0,4017с; \quad \omega_{max}^{(4)} = 6400000 \frac{рад}{с^5}; \quad \omega_{max}^{(3)} = 80000 \frac{рад}{с^4}; \quad \omega_{max}^{(2)} = 2000 \frac{рад}{с^3};$$

$$\omega_{min}^{(4)} = -8422874 \frac{рад}{с^5}; \quad \omega_{min}^{(3)} = -138564 \frac{рад}{с^4}; \quad \omega_{min}^{(2)} = -4559 \frac{рад}{с^3}.$$

Вторая серия численного эксперимента. Пятая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода равняется  $\omega_{max}^{(5)} = 32000000 \frac{рад}{с^6}$ .

$$\begin{aligned} \varphi_{гр.3} &= 160 \cdot \left[ \frac{1}{2} \cdot \frac{160}{100} + \frac{1}{2} \cdot \frac{160}{300} + 4 \cdot \sqrt[4]{\frac{1}{8} \cdot \frac{100}{32000000}} + 4 \cdot \sqrt[4]{\frac{1}{8} \cdot \frac{300}{32000000}} \right] \approx \\ &\approx 207,724 \text{ рад.} \end{aligned}$$



В таблице 2 приведены результаты второй серии численного эксперимента.

Таблица 2 – Результаты второй серии численного эксперимента

$\Delta\varphi, \text{рад}$	$t_5, \text{с}$	$T_{\text{ц}}, \text{с}$
207,724	0	2,5965
215	0,0455	2,6420
240	0,2017	2,7983
265	0,3580	2,9545
290	0,5142	3,1108
315	0,6705	3,2670
340	0,8267	3,4233

При этом остальные параметры диаграмм перемещения исполнительного органа электропривода постоянного тока с упругим валопроводом имели постоянные значения:  $t_1 = 0,025 \text{ с}$ ;  $t_2 = 1,4 \text{ с}$ ;  $t_3 = 0,0329 \text{ с}$ ;  $t_4 = 0,2701 \text{ с}$ ;  $\omega_{\text{max}}^{(4)} = 800000 \frac{\text{рад}}{\text{с}^5}$ ;  $\omega_{\text{max}}^{(3)} = 20000 \frac{\text{рад}}{\text{с}^4}$ ;  $\omega_{\text{max}}^{(2)} = 1000 \frac{\text{рад}}{\text{с}^3}$ ;  $\omega_{\text{min}}^{(4)} = -1052859 \frac{\text{рад}}{\text{с}^5}$ ;  $\omega_{\text{min}}^{(3)} = -34641 \frac{\text{рад}}{\text{с}^4}$ ;  $\omega_{\text{min}}^{(2)} = -2280 \frac{\text{рад}}{\text{с}^3}$ .

На рисунке 1 представлена оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа электропривода постоянного тока с упругим валопроводом с ограничениями максимального и минимального значений тока, скорости и ее пятой производной, которая имеет следующие параметры:  $(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) = 240 \text{ рад}$ ;  $T_{\text{ц}} = 2,6825 \text{ с}$ ;  $t_1 = 0,0125 \text{ с}$ ;  $t_2 = 1,5 \text{ с}$ ;  $t_3 = 0,0165 \text{ с}$ ;  $t_4 = 0,4017 \text{ с}$ ;  $t_5 = 0,3175$ ;  $\omega_{\text{max}}^{(5)} = 512000000 \frac{\text{рад}}{\text{с}^6}$ ;  $\omega_{\text{max}}^{(4)} = 640000 \frac{\text{рад}}{\text{с}^5}$ ;  $\omega_{\text{max}}^{(3)} = 80000 \frac{\text{рад}}{\text{с}^4}$ ;  $\omega_{\text{max}}^{(2)} = 2000 \frac{\text{рад}}{\text{с}^3}$ ;  $\omega_{\text{доп.1}}^{(1)} = 100 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}$ ;  $\omega_{\text{доп}} = 160 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ ;  $\omega_{\text{min}}^{(4)} = -8422874 \frac{\text{рад}}{\text{с}^5}$ ;  $\omega_{\text{min}}^{(3)} = -138564 \frac{\text{рад}}{\text{с}^4}$ ;  $\omega_{\text{min}}^{(2)} = -4559 \frac{\text{рад}}{\text{с}^3}$ ;  $\omega_{\text{доп.2}}^{(1)} = 300 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}$ .

На рисунке 2 на основании результатов проведённого численного эксперимента построены зависимости длительности цикла перемещения исполнительного органа электропривода  $T_{\text{ц}}$  от заданного перемещения (угла поворота)  $(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}})$  при различных максимальных значениях пятой производной угловой скорости исполнительного органа электропривода  $\omega_{\text{max}}^{(5)}$ .

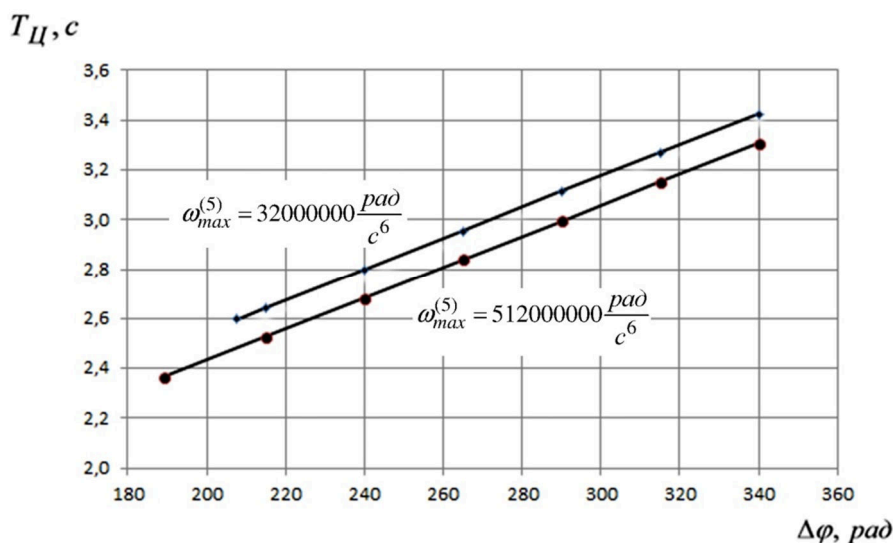


Рисунок 2 – Графики зависимости длительности цикла перемещения исполнительного органа электропривода  $T_{\text{ц}}$  от заданного перемещения (угла поворота)  $(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}})$  при различных максимальных значениях пятой производной угловой скорости исполнительного органа электропривода  $\omega_{\text{max}}^{(5)}$



### Выводы

Предложена оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока с упругим валопроводом с ограничениями максимального и минимального значений тока, скорости и ее пятой производной, состоящая из двадцати семи этапов.

Разработано математическое обеспечение для определения параметров оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока с упругим валопроводом с ограничениями максимального и минимального значений тока, скорости и ее пятой производной.

Установлена область существования оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока с упругим валопроводом с ограничениями максимального и минимального значений тока, скорости и ее пятой производной.

### Литература:

1. Добробаба Ю.П. Оптимальные по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока с упругим валопроводом / Ю.П. Добробаба, Г.А. Кошкин, Е.Е. Громницкий // Булатовские чтения : Материалы Международной научно-практической конференции (31 марта 2017 г.) : в 5 т. : сборник статей / под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. О.В. Савенко. – Краснодар : Издательский Дом – Юг. Т. 5: Электрооборудование в нефтегазовой отрасли. Гуманитарные науки. – 2017. – 294 с. С. 41–43.

2. Добробаба Ю.П. Оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока с упругим валопроводом с ограничением пятой производной скорости / Ю.П. Добробаба, Г.А. Кошкин, Е.Е. Громницкий // Булатовские чтения : Материалы Международной научно-практической конференции (31 марта 2017 г.) : в 5 т. : сборник статей / под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. О.В. Савенко. – Краснодар : Издательский Дом – Юг. Т. 5: Электрооборудование в нефтегазовой отрасли. Гуманитарные науки. – 2017. – 294 с. С. 44–47.

3. Добробаба Ю.П. Оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока с упругим валопроводом с ограничениями по первой и пятой производным скорости / Ю.П. Добробаба, Г.А. Кошкин, Е.Е. Громницкий // Булатовские чтения : Материалы Международной научно-практической конференции (31 марта 2017 г.) : в 5 т. : сборник статей / под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. О.В. Савенко. – Краснодар : Издательский Дом – Юг. Т. 5: Электрооборудование в нефтегазовой отрасли. Гуманитарные науки. – 2017. – 294 с. С. 48–51.

4. Добробаба Ю.П. Оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока с упругим валопроводом с ограничениями по скорости и ее первой и пятой производным скорости / Ю.П. Добробаба, Г.А. Кошкин, Е.Е. Громницкий // Булатовские чтения : Материалы Международной научно-практической конференции (31 марта 2017 г.) : в 5 т. : сборник статей / под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. О.В. Савенко. – Краснодар : Издательский Дом – Юг. Т. 5: Электрооборудование в нефтегазовой отрасли. Гуманитарные науки. – 2017. – 294 с. С. 52–55.

5. Добробаба Ю.П. Оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока с упругим валопроводом с ограничениями максимального значения тока и пятой производной скорости / Ю.П. Добробаба, Г.А. Кошкин, Е.Е. Громницкий // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар : КубГАУ, 2017. – № 10(134). – URL : <http://ej.kubagro.ru/2017/10/pdf/44.pdf>

### References:

1. Dobrobaba Yu.P. Charts of movement of executive body of the precision electric drive of a direct current, optimum on speed, with the elastic shaft line / Yu.P. Dobrobaba, G.A. Koshkin, E.E. Gromnitsky // Readings of Bulatov: Materials of the International scientific and practical conference (on March 31, 2017): in 5 v. : the collection of articles / under a general edition of the Dr.Sci.Tech., the prof. O.V. Savenok. – Krasnodar : Publishing house – South. V. 5: Electric equipment in oil and gas branch. Humanities. – 2017. – 294 p. P. 41–43.

2. Dobrobaba Yu.P. The chart of movement of executive body of the precision electric drive of a direct current, optimum on speed, with the elastic shaft line with restriction of the fifth derivative speed / Yu.P. Dobrobaba, G.A. Koshkin, E.E. Gromnitsky // Readings of Bulatov: Materials of the International scientific and practical conference (on March 31, 2017): in 5 v. : the collection of articles / under a general edition of the Dr.Sci.Tech., the prof. O.V. Savenok. – Krasnodar : Publishing house – South. V. 5: Electric equipment in oil and gas branch. Humanities. – 2017. – 294 p. P. 44–47.

3. Dobrobaba Yu.P. The chart of movement of executive body of the precision electric drive of a direct current, optimum on speed, with the elastic shaft line with restrictions on the first and fifth derivatives of speed / Yu.P. Dobrobaba, G.A. Koshkin, E.E. Gromnitsky // Readings of Bulatov: Materials of the International scientific and practical conference (on March 31, 2017): in 5 v. : the collection of articles / under a general edition of the Dr.Sci.Tech., the prof. O.V. Savenok. – Krasnodar : Publishing house – South. V. 5: Electric equipment in oil and gas branch. Humanities. – 2017. – 294 p. P. 48–51.



4. Dobrobaba Yu.P. The chart of movement of executive body of the precision electric drive of a direct current, optimum on speed, with the elastic shaft line with restrictions on speed and its first and fifth derivatives of speed / Yu.P. Dobrobaba, G.A. Koshkin, E.E. Gromnitsky // Readings of Bulatov: Materials of the International scientific and practical conference (on March 31, 2017): in 5 v.: the collection of articles / under a general edition of the Dr.Sci.Tech., the prof. O.V. Savenok. – Krasnodar: Publishing house – South. V. 5: Electric equipment in oil and gas branch. Humanities. – 2017. – 294 p. P. 52–55.

5. Dobrobaba Yu.P. The chart of movement of executive body of the precision electric drive of a direct current, optimum on speed, with the elastic shaft line with restrictions of the maximum value of current and the fifth derivative speed / Yu.P. Dobrobaba, G.A. Koshkin, E.E. Gromnitsky // Polythematic network online scientific magazine of the Kuban state agricultural university (The scientific magazine of KUBGAU) [An electronic resource]. – Krasnodar : KUBGAU, 2017. – № 10(134). – URL : <http://ej.kubagro.ru/2017/10/pdf/44.pdf>



УДК 621.3+537.8

## РАЗРАБОТКА ОСНОВНЫХ ПОЛОЖЕНИЙ РАСЧЁТА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ КАТУШКИ В ТРЁХМЕРНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

### DEVELOPMENT OF THE BASIC POSITIONS OF CALCULATION OF ELECTROMAGNETIC FIELD OF COIL IN THREE-DIMENSIONAL SPACE

**Еременко С.С.**

Кубанский государственный технологический университет  
ss.erema@mail.ru

**Попов Б.К.**

Кубанский государственный технологический университет

**Аннотация.** В статье представлен метод расчёта электромагнитного поля катушки. На основании расчета электромагнитных полей для двухмерного случая, был разработан алгоритм, который позволил рассчитывать и строить электромагнитное поле в трехмерном пространстве. В статье рассматривается подробное решение этой задачи.

**Ключевые слова:** ряд Фурье, катушка индуктивности, электромагнитное поле, вектор магнитного потенциала, вектор магнитной индукции.

**Eremenko S.S.**

Kuban State Technological University  
ss.erema@mail.ru

**Popov B.K.**

Kuban State Technological University

**Annotation.** In this article submitted the method of calculation of the electromagnetic field of the coil. On the basis of calculation of electromagnetic fields for a two-dimensional case, the algorithm which has allowed to count and build the electromagnetic field in three-dimensional space has been developed. In article the detailed solution of this task is considered.

**Keywords:** Fourier series, inductance coil, electromagnetic field, vector of magnetic potential, vector of magnetic induction.

#### **Вывод уравнений для определения векторного магнитного потенциала $\bar{A}$ для цилиндрической катушки в трёхмерной системе декартовых координат**

В работах [1, 2] было определено основное направление в области разработки алгоритмов расчёта и программного обеспечения для построения электромагнитного поля электротехнических устройств.

Ранее были разработаны методы расчёта электромагнитных полей для двухмерного случая [3–6]. Разработанные алгоритмы позволили создать быстродействующие и эффективные программы, которые позволяли строить картины полей для разных конструкций. Расчёт на современном ПК занимал доли минуты. Результат расчётов был представлен в виде двухмерных рядов Фурье. Однако наиболее актуально строить и рассчитывать электромагнитное поле в трёхмерном случае. Это определяется тем, что двухмерная картина поля, используемая в расчётах электромагнитных устройств, связана с применением ряда упрощений исходной задачи. А это может вызывать определённые ошибки при проектировании электромагнитных и электромеханических устройств.

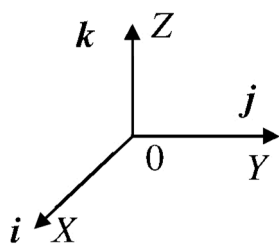


Рисунок 1

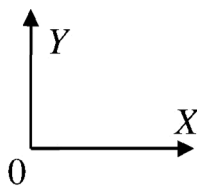


Рисунок 2

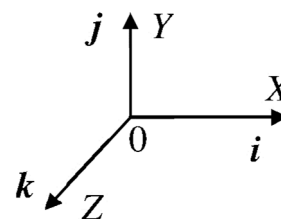


Рисунок 3

Для практической оценки возможности применения рядов Фурье в трёхмерном случае были разработаны алгоритмы и программное обеспечение для расчёта электромагнитного поля цилиндрической катушки в трёхмерном пространстве [7–10].

Решение было найдено для векторного магнитного потенциала в виде двух трёхмерных рядов Фурье [1].

Рассмотрим подробное решение этой задачи.

Общепринятое направление осей в декартовой системе координат показано на рисунке 1. Учитывая, что ранее для решения задач методом Роговского и Рота [5, 6] применялась двухмерная си-



стема координат, показанная на рисунке 2, то для сохранения большинства выводов применим трёхмерную систему координат с направлением осей, показанных на рисунке 3.

В этом случае сохраняется соответствие направлений осей на рисунках 1, 2, и 3. Рисунок 3 получается из рисунка 1 поворотом системы осей  $XYZ$  вокруг оси  $OY$  на  $90^\circ$  против часовой стрелки. Затем систему  $XYZ$  также поворачиваем вокруг оси  $OZ$  на  $90^\circ$  против часовой стрелки.

Будем рассматривать цилиндрическую катушку, помещённую в прямоугольную область (размером  $l \times l \times d$ ) в сплошном ферромагнетике, с  $\mu = \infty$  (см. рис. 4).

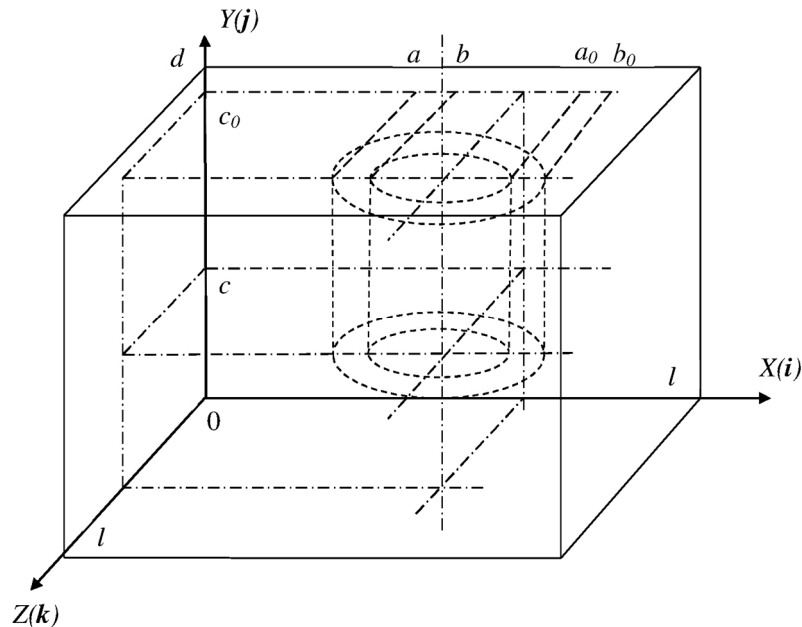


Рисунок 4

Выведем для такой катушки уравнения для вычисления векторного магнитного потенциала  $\bar{A}$ , который подчиняется выражению

$$\bar{B} = \text{rot } \bar{A}, \tag{1}$$

где  $\bar{B}$  – вектор магнитной индукции.

Заметим, что вектор плотности тока параллелен плоскости  $ZOX$  и составляющих по оси  $Y$  не имеет. Следовательно, можно записать, что

$$\bar{\delta} = \bar{i}\delta_x + \bar{k}\delta_z. \tag{2}$$

В общем случае для однородной среды имеем уравнение

$$\text{rot rot } \bar{A} = \mu\mu_0\bar{\delta} = \mu_0\bar{\delta}. \tag{3}$$

Развернём это уравнение

$$\text{rot}_x \text{rot } \bar{A} = -\left(\frac{\partial^2 A_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 A_x}{\partial z^2}\right) = \mu_0\delta_x, \tag{4}$$

$$\text{rot}_z \text{rot } \bar{A} = -\left(\frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial z^2}\right) = \mu_0\delta_z. \tag{5}$$

Так как  $\delta_y$  отсутствует, то и составляющая  $A_y = 0$ . Следовательно, вектор  $\bar{A}$  имеет две составляющие, параллельные плоскости  $ZOX$

$$\bar{A} = \bar{i}A_x + \bar{k}A_z. \tag{6}$$





Отсюда следует, что нахождение вектора  $\bar{A}$  в линейном пространстве разделяется на две независимые задачи, которые будем решать методом Рота.

Для катушки, расположенной, как показано на рисунке 4, будут иметь место следующие изменения координат  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ . Переменная  $X$  будет изменяться от 0 до  $l$ ,  $Y$  будет изменяться от 0 до  $d$ , а  $Z$  будет изменяться от 0 до  $l$ .

Чтобы определить составляющие рядов Фурье, подчиняющиеся граничным условиям на поверхностях прямоугольной области раскроем выражение для  $rot \bar{A}$

$$\bar{B} = rot \bar{A} = \left( \frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z} \right) \bar{i} + \left( \frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) \bar{j} + \left( \frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} \right) \bar{k}, \tag{7}$$

Проведём соответствующий анализ выражения (7).

Учитывая выражение (6),  $A_y = 0$ . Следовательно, (7) примет вид

$$\bar{B} = rot \bar{A} = \frac{\partial A_z}{\partial y} \bar{i} + \left( \frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) \bar{j} - \frac{\partial A_x}{\partial y} \bar{k}. \tag{8}$$

**Вывод формул для определения граничных условий векторного магнитного потенциала  $\bar{A}$  для цилиндрической катушки в трёхмерной системе декартовых координат**

Рассмотрим плоскости параллельные плоскости  $ZOY$  (см. рис. 4). Нас интересуют плоскости с  $x = 0$  и  $x = l$ .

На этих плоскостях тангенциальная составляющая вектора  $\bar{B}$  должна быть равна 0, то есть

$$B_{t_{x=0, x=l}} = \left( \frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) \bar{j} - \frac{\partial A_x}{\partial y} \bar{k}. \tag{9}$$

Выполнение условия (9) возможно, когда все компоненты вектора  $B_t$  равняется 0, а именно

$$\left( \frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) \bar{j} = 0 \text{ и } \frac{\partial A_x}{\partial y} \bar{k} = 0 \text{ или}$$

$$\frac{\partial A_x}{\partial z} = \frac{\partial A_z}{\partial x} \text{ и} \tag{10}$$

$$\frac{\partial A_x}{\partial y} = 0. \tag{11}$$

Аналогично, на плоскостях параллельных  $XOY$  (см. рис. 4) при  $z = 0$  и  $z = l$

$$B_{t_{z=0, z=l}} = \frac{\partial A_z}{\partial y} \bar{i} + \left( \frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) \bar{j}, \tag{12}$$

что возможно при

$$\frac{\partial A_z}{\partial y} = 0 \text{ и} \tag{13}$$

$$\frac{\partial A_x}{\partial z} = \frac{\partial A_z}{\partial x}. \tag{14}$$

На плоскостях параллельных  $ZOY$  (см. рис. 4) при  $y = 0$  и  $y = d$

$$B_{t_{y=0, y=d}} = \frac{\partial A_z}{\partial y} \bar{i} - \frac{\partial A_x}{\partial y} \bar{k}, \tag{15}$$

а это выполняется при

$$\frac{\partial A_z}{\partial y} = 0 \text{ и} \tag{16}$$

$$\frac{\partial A_x}{\partial y} = 0. \tag{17}$$



**Определение вида рядов Фурье для векторного магнитного потенциала  $\bar{A}$  цилиндрической катушки в трёхмерной системе декартовых координат с учётом граничных условий**

Решение уравнений (4) и (5) будем находить в виде тройных рядов Фурье. Эти ряды будут содержать восемь компонент, из которых надо будет выбрать только те, которые будут подчиняться условиям (10), (11), (13), (14), (16), (17).

Представим  $A_x$  и  $A_y$  в виде рядов

$$A_x = \sum_{h,k,t} G_{1x} \cos m_h x \cos n_k y \cos u_t z + \sum_{h,k,t} G_{2x} \cos m_h x \sin n_k y \cos u_t z + \sum_{h,k,t} G_{3x} \sin m_h x \cos n_k y \cos u_t z + \sum_{h,k,t} G_{4x} \sin m_h x \sin n_k y \cos u_t z + \sum_{h,k,t} G_{5x} \cos m_h x \cos n_k y \sin u_t z + \sum_{h,k,t} G_{6x} \cos m_h x \sin n_k y \sin u_t z + \sum_{h,k,t} G_{7x} \sin m_h x \cos n_k y \sin u_t z + \sum_{h,k,t} G_{8x} \sin m_h x \sin n_k y \sin u_t z. \tag{18}$$

$$A_z = \sum_{h,k,t} G_{1z} \cos m_h x \cos n_k y \cos u_t z + \sum_{h,k,t} G_{2z} \cos m_h x \sin n_k y \cos u_t z + \sum_{h,k,t} G_{3z} \sin m_h x \cos n_k y \cos u_t z + \sum_{h,k,t} G_{4z} \sin m_h x \sin n_k y \cos u_t z + \sum_{h,k,t} G_{5z} \cos m_h x \cos n_k y \sin u_t z + \sum_{h,k,t} G_{6z} \cos m_h x \sin n_k y \sin u_t z + \sum_{h,k,t} G_{7z} \sin m_h x \cos n_k y \sin u_t z + \sum_{h,k,t} G_{8z} \sin m_h x \sin n_k y \sin u_t z. \tag{19}$$

Переменные  $m_h$ ,  $n_k$  и  $u_t$  должны быть такими, чтобы при  $x = 0, l$   $m_h = 0$  либо  $\pi h$ , при  $y = 0, d$   $n_k = 0$  либо  $\pi k$ , при  $z = 0, l$   $u_t = 0$  либо  $\pi t$ .

Рассмотрим условия (11) и (17).

В этом случае во всех членах ряда (18) с коэффициентами  $G_{1x}$ ,  $G_{3x}$ ,  $G_{5x}$  и  $G_{7x}$   $\cos n_k y$  станут  $\sin n_k y$ , а во всех членах ряда (18) с коэффициентами  $G_{2x}$ ,  $G_{4x}$ ,  $G_{6x}$  и  $G_{8x}$   $\sin n_k y$  станут  $\cos n_k y$ .

При  $x = 0$  и  $x = l$  члены ряда (18) с коэффициентами  $G_{3x}$ ,  $G_{4x}$ ,  $G_{7x}$ ,  $G_{8x}$  станут равными 0, так как  $\sin m_h x$  при этих  $x$  равняется 0. Чтобы выполнялось условие (11), необходимо выполнение условия

$$G_{1x} = G_{2x} = G_{5x} = G_{6x} = 0.$$

Рассмотрим условие (17) для ряда (18).

В этом случае члены ряда с коэффициентами  $G_{3x}$  и  $G_{7x}$  станут равными 0, так как  $\sin n_k y$  при  $y = 0$  и  $y = d$  равен 0. Чтобы выполнялось условие (17) необходимо выполнение условия

$$G_{4x} = G_{8x} = 0.$$

Следовательно, ряд (18) примет вид

$$A_x = \sum_{h,k,t} G_{3x} \sin m_h x \cos n_k y \cos u_t z + \sum_{h,k,t} G_{7x} \sin m_h x \cos n_k y \sin u_t z. \tag{20}$$

Аналогично проанализируем ряд (19).

При применении условий (13) и (16) во всех членах ряда (19)  $\cos n_k y$  станут  $\sin n_k y$ , а  $\sin n_k y$  станут  $\cos n_k y$ . При применении условия (16) при  $y = 0$  и  $y = d$  члены ряда с коэффициентами  $G_{1z}$ ,  $G_{3z}$ ,  $G_{5z}$  и  $G_{7z}$  станут равными 0, так как  $\sin n_k y$  при таких значениях  $y$  равен 0.

Для выполнения условия (16) необходимо, чтобы было

$$G_{2z} = G_{4z} = G_{6z} = G_{8z} = 0,$$

так как при  $z = 0$  и  $z = l$  только члены ряда с коэффициентами  $G_{5z}$  и  $G_{7z}$  становятся равными 0. Следовательно, ряд (19) примет вид

$$A_z = \sum_{h,k,t} G_{5z} \cos m_h x \cos n_k y \sin u_t z + \sum_{h,k,t} G_{7z} \sin m_h x \cos n_k y \sin u_t z. \tag{21}$$



Применим условие (10) к рядам (20) и (21):

$$\begin{aligned}
 & - \sum_{h,k,t} u_t G_{3x} \sin m_h x \cos n_k y \cos u_t z + \sum_{h,k,t} u_t G_{7x} \sin m_h x \cos n_k y \sin u_t z = \\
 & = - \sum_{h,k,t} m_h G_{5z} \sin m_h x \cos n_k y \cos u_t z + \sum_{h,k,t} m_h G_{7z} \cos m_h x \cos n_k y \sin u_t z .
 \end{aligned} \tag{22}$$

При  $x=0$  и  $x=l$  первые слагаемые слева и справа в выражении (22) станут равными 0, так как в этом случае  $\sin m_h x = 0$ . Чтобы выполнялось равенство в выражении (22) надо положить

$$G_{7x} = G_{7z} = 0.$$

В этом случае будет выполняться и условие (14) при  $z=0$  и  $z=l$ , так как  $\sin u_t z = 0$  будет равен 0.

Отсюда следует, что при выполнении граничных условий ряды (18) и (19) примут вид

$$A_x = \sum_{h,k,t} G_{3x} \sin m_h x \cos n_k y \cos u_t z, \tag{23}$$

$$A_z = \sum_{h,k,t} G_{5z} \cos m_h x \cos n_k y \sin u_t z. \tag{24}$$

### Литература:

1. Попов Б.К. Расчёт электромагнитного поля цилиндрической катушки с помощью рядов Фурье / Б.К. Попов, О.Б. Попова // Технические и технологические системы. Материалы VI Международной научной конференции «ТТС-14». Сборник материалов. – Краснодар : КубГАУ, 2014. – 471 с.
2. Попов Б.К. Основные направления в развитии алгоритмов расчёта электрических цепей переменного тока, содержащих нелинейные элементы, также электромагнитного поля электромеханических преобразователей / Б.К. Попов, О.Б. Попова // Технические и технологические системы. Материалы V Международной научной конференции «ТТС-13». Сборник материалов – Краснодар : КубГАУ, 2013. – 315 с.
3. Попов Б.К. Расчёт электромагнитных полей в электромеханических устройствах // Материалы второй межвузовской научной конференции 27–28 марта 2003 года. Т. 1. – Краснодар, 2003.
4. Попов Б.К. Исследование применимости метода вторичных источников при решении краевых задач электромагнитного поля / Деп. в ВИНТИ 11.04.03, № 689 – В2003.
5. Попов Б.К. Расчёт магнитного поля двух шин прямоугольного сечения со встречно направленными токами в кусочно-неоднородной прямоугольной области, окружённой ферромагнетиком с бесконечной магнитной проницаемостью / Деп. в ВИНТИ 02.05.07, № 485 – В2007.
6. Попов Б.К. Расчёт магнитного поля в кусочно-неоднородной прямоугольной области / Б.К. Попов, О.Б. Попова, В.Ю. Карандей // Технические и технологические системы: Т. 38 материалы международной научной конференции. – Краснодар : КубГАУ, 2009. – 433 с.
7. Попов Б.К. Вычисление ряда Фурье проекции векторного магнитного потенциала А на ось Х для цилиндрической катушки / Б.К. Попов, О.Б. Попова. – СВИДЕТЕЛЬСТВО о государственной регистрации программы для ЭВМ 2015615628, зарегистрировано 21.05.15. – 7 с.
8. Попов Б.К. Вычисление ряда Фурье проекции векторного магнитного потенциала А на ось Z для цилиндрической катушки / Б.К. Попов, О.Б. Попова. – СВИДЕТЕЛЬСТВО о государственной регистрации программы для ЭВМ 2015615627, зарегистрировано 21.05.15. – 7 с.
9. Попов Б.К. Вычисление картины поля векторного магнитного потенциала А цилиндрической катушки в плоскости  $x0$ . / Б.К. Попов, О.Б. Попова. – СВИДЕТЕЛЬСТВО о государственной регистрации программы для ЭВМ 2015615566, зарегистрировано 21.05.15. – 5 с.
10. Попов Б.К. Вычисление картины поля векторного магнитного потенциала А цилиндрической катушки в плоскости  $z0$ . / Б.К. Попов, О.Б. Попова. – СВИДЕТЕЛЬСТВО о государственной регистрации программы для ЭВМ 2015615567, зарегистрировано 21.05.15. – 5 с.
11. Попов Б.К. Программа построения силовых линий магнитной индукции / Б.К. Попов. – СВИДЕТЕЛЬСТВО об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2011610652, 11.01.11. – 7 с.

### References:

1. Popov B.K. Calculation of the electromagnetic field of the cylindrical coil by means of ranks Fourier / B.K. Popov, O.B. Popova // Technical and technological systems. Materials VI of the International scientific TTS-14 conference. Collection of materials. – Krasnodar : KubGAU, 2014. – 471 p.
2. Popov B.K. The main directions in development of algorithms of calculation of the electric chains of alternating current containing nonlinear elements, also electromagnetic field of electromechanical converters / B.K. Popov, O.B. Popova // Technical and technological systems. Materials V of the International scientific TTS-13 conference. The collection of materials – Krasnodar : KubGAU, 2013. – 315 p.



3. Popov B.K. Calculation of electromagnetic fields in electromechanical devices // Materials of the second inter-university scientific conference on March 27-28, 2003. V. 1. – Krasnodar, 2003.
4. Popov B.K. A research of applicability of a method of secondary sources at the solution of regional problems of the electromagnetic field / Depp. in VINITI 11.04.03, № 689 – B2003.
5. Popov B.K. Calculation of magnetic field of two tires of rectangular section with opposite directed currents in the piecewise and non-uniform rectangular area surrounded with a ferromagnetic with infinite magnetic permeability / Depp. in VINITI 02.05.07, № 485 – B2007.
6. Popov B.K. Calculation of magnetic field in piecewise and non-uniform rectangular area / B.K. Popov, O.B. Popova, V.Yu. Karandey // Technical and technological systems: V. 38th materials of the international scientific conference. – Krasnodar : KubGAU, 2009. – 433 p.
7. Popov B.K. Calculation of a number of Fourier of a projection of vector magnetic potential of A to axis X for the cylindrical coil / B.K. Popov, O.B. Popova. – The CERTIFICATE on the state registration of the computer program 2015615628, is registered 21.05.15. – 7 p.
8. Popov B.K. Calculation of a number of Fourier of a projection of vector magnetic potential of A to axis Z for the cylindrical coil / B.K. Popov, O.B. Popova. – The CERTIFICATE on the state registration of the computer program 2015615627, is registered 21.05.15. – 7 p.
9. Popov B.K. Calculation of a picture of the field of vector magnetic potential A cylindrical coils in the  $x_0$  plane. / B.K. Popov, O.B. Popova. – The CERTIFICATE on the state registration of the computer program 2015615566, is registered 21.05.15. – 5 p.
10. Popov B.K. Calculation of a picture of the field of vector magnetic potential A cylindrical coils in the  $z_0$  plane. / B.K. Popov, O.B. Popova. – The CERTIFICATE on the state registration of the computer program 2015615567, is registered 21.05.15. – 5 p.
11. Popov B.K. Program of creation of power lines of magnetic induction / B.K. Popov. – CERTIFICATE on official registration of the computer program № 2011610652, 11.01.11. – 7 p.



УДК 621.313.33

## РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОПРИВОДА НАСОСА ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ

### CALCULATION OF ELECTROMAGNETIC PARAMETERS OF THE ELECTRIC DRIVE OF THE PUMP OF THE HORIZONTAL DESIGN

**Карандей Владимир Юрьевич**

кандидат технических наук, доцент,  
Кубанский государственный технологический университет  
epp\_kv@mail.ru

**Афанасьев Виктор Леонидович**

аспирант,  
Кубанский государственный технологический университет  
buguvix@mail.ru

**Махинько Владислав Сергеевич**

студент,  
Кубанский государственный технологический университет

**Ляшенко Андрей Михайлович**

студент,  
Кубанский государственный технологический университет

**Аннотация.** Представлен расчет электромагнитных параметров электропривода насоса горизонтальной конструкции, необходимый для правильного проектирования электрического привода. На основе разработанной математической модели электромагнитных параметров каскадного управляемого электрического привода цилиндрической конструкции, реализована программа расчета исследуемых параметров. Данные типы каскадных электрических приводов обладают улучшенными характеристиками, по сравнению с однодвигательными электроприводами, что при их использовании позволит улучшить технические и эксплуатационные характеристики насосов горизонтальной конструкции.

**Ключевые слова:** управляемый асинхронный каскадный электропривод, электромеханическое преобразование энергии, электромагнитная система, насос горизонтальной конструкции.

**Karandey Vladimir Yuryevich**

Candidate of Technical Sciences,  
Associate Professor,  
Kuban State Technological University  
epp\_kv@mail.ru

**Afanasiev Viktor Leonidovich**

Graduate Student,  
Kuban State Technological University  
buguvix@mail.ru

**Mahinko Vladislav Sergeyevich**

Student,  
Kuban State Technological University

**Lyashenko Andrey Mikhaylovich**

Student,  
Kuban State Technological University

**Annotation.** Calculation of electromagnetic parameters of the electric drive of the pump of a horizontal design necessary for the correct design of the electric drive is presented. On the basis of the developed mathematical model of electromagnetic parameters of the cascade operated electric drive of a cylindrical design, the program of calculation of the studied parameters is realized. These types of cascade electric drives possess the improved characteristics, in comparison with single-engine electric drives that at their use to allow to improve technical and operational characteristics of pumps of a horizontal design.

**Keywords:** controlled asynchronous cascade electric drive, electromechanical transformation of energy, electromagnetic system, pump of the horizontal design.

Электронасосные агрегаты горизонтальной конструкции являются одними из наиболее распространёнными и используемыми в качестве горизонтальных химических насосов с торцевыми и двойными сальниковыми уплотнениями, герметичных насосов с магнитными муфтами, специальных насосов, химических и нефтяные насосов. Это насосы типа АХН Q/Н.1, АХН Q/Н.2, АХН Q/Н.5, АХН Q/Н.10, ГХН Q/Н.1(4) (рис. 1, 2) и другие виды электронасосные агрегаты горизонтальной конструкции [1–2].

Однако применение однодвигательных систем ухудшает технические и эксплуатационные характеристики насосов горизонтальной конструкции, по сравнению с каскадными системами [3–4]. Каскадные управляемые электрические приводы цилиндрической конструкции являются новыми устройствами, требующие новых подходов к расчёту электромагнитных параметров и проектированию [5–10]. Это довольно трудная задача, требующая создания программ расчета [11–13] и знаниями в области поиска оптимальных решений [14–15]. На (рис. 3, 4) представлено графическое изображение работы программы для расчёта электромагнитных параметров исследуемых электрических приводов. Данный программный комплекс позволяет довольно точно определять искомые параметры, что позволит правильно проектировать каскадные управляемые электрические приводы цилиндрической конструкции для электронасосных агрегатов горизонтальной конструкции.

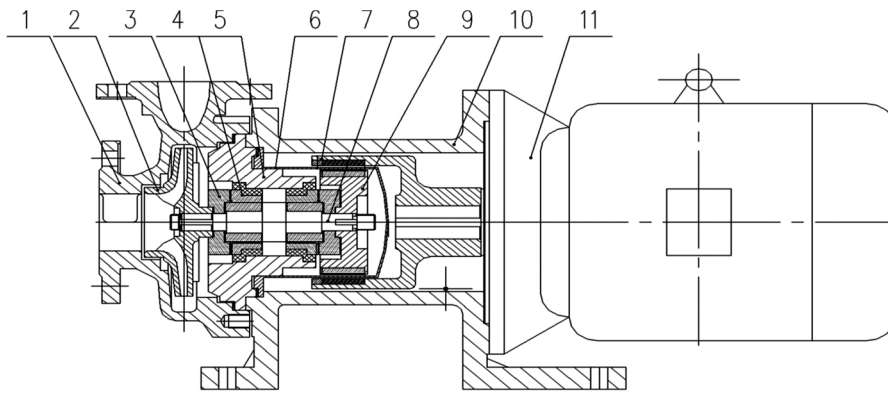


Рисунок 1 – Электронасосный агрегат горизонтальной конструкции

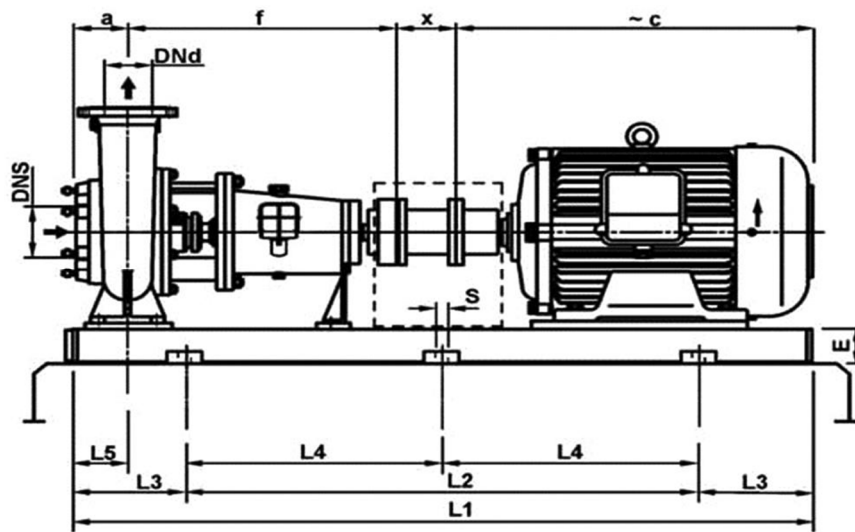


Рисунок 2 – Электронасосный агрегат горизонтальной конструкции:

- 1 – Корпус насоса; 2 – Рабочее колесо; 3 – Упорный подшипник; 4 – Вкладыш; 5 – Стенка; 6 – Защитный экран;
- 7 – Внешняя магнитная полуумфта; 8 – Вал; 9 – Внутренняя магнитная полуумфта;
- 10 – Корпус ходовой части; 11 – Электродвигатель

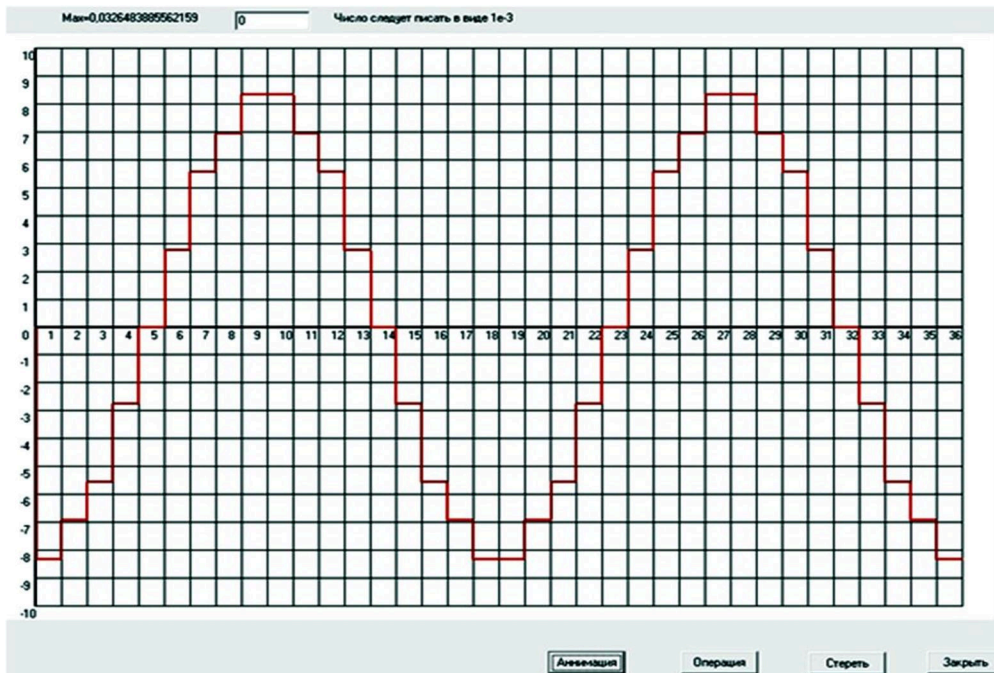


Рисунок 3 – Распределение магнитного поля при повороте трехфазной системы на угол  $\alpha = 0^\circ$

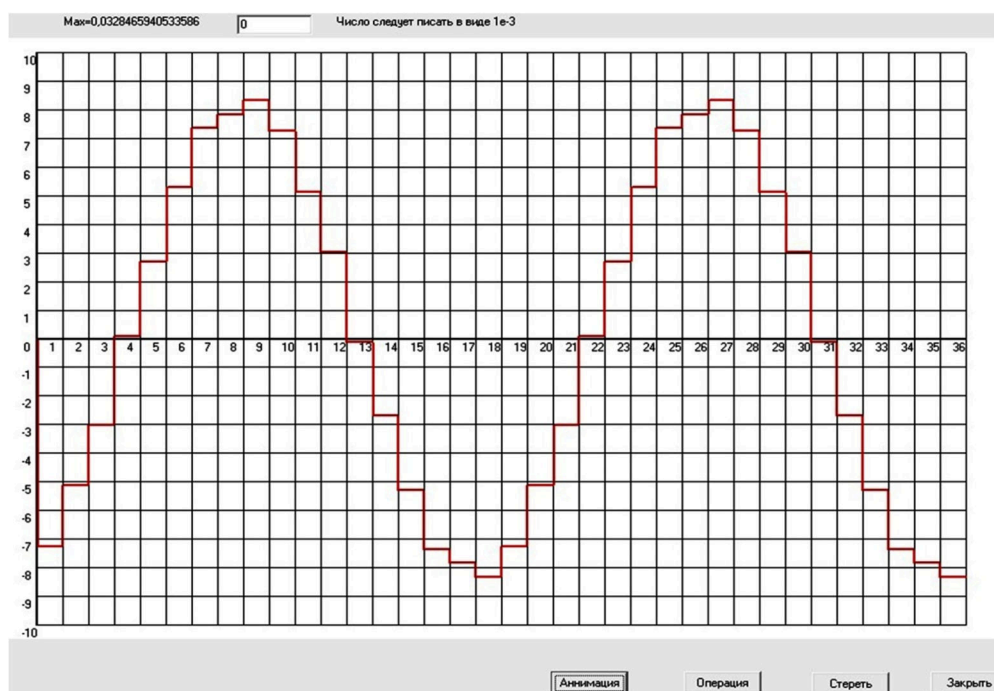


Рисунок 4 – Распределение магнитного поля при повороте трехфазной системы на угол  $\alpha = 19,8^\circ$

**Литература:**

1. <http://himagregat.ru/products/equipment/ahn>
2. [http://www.ence-pumps.ru/nasosy\\_dlya\\_nefteproductov.php](http://www.ence-pumps.ru/nasosy_dlya_nefteproductov.php)
3. Карандей В.Ю. Управляемый каскадный электрический привод с жидкостным токосъемом / В.Ю. Карандей, Б.К. Попов // Патент на изобретение № 2461947 зарегистрировано 20.09.2012 г.
4. Карандей В.Ю. Сигнализирующее токосъемное устройство / В.Ю. Карандей, Б.К. Попов, Ю.Ю. Карандей, В.Л. Афанасьев // Патент на изобретение № 2601958 от 27 июля 2015 г., зарегистрировано 18.10.2016 г.
5. Подход к определению магнитных параметров компонента управляемого каскадного асинхронного электрического привода / Б.К. Попов [и др.] // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар : КубГАУ, 2015. – № 10(114). – IDA [article ID]: 1141510014. – URL : <http://ej.kubagro.ru/2015/10/pdf/14.pdf> (1,188 у.п.л.).
6. Разработка подхода к расчету магнитного потока одной катушечной группы обмотки статора компонента управляемого асинхронного каскадного электрического привода / В.Ю. Карандей [и др.] // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар : КубГАУ, 2016. – № 06(120). – IDA [article ID]: 1201606039. – URL : <http://ej.kubagro.ru/2016/06/pdf/39.pdf>
7. Карандей В.Ю. Подход к определению магнитных параметров управляемого асинхронного каскадного электрического привода с уточненной геометрий / В.Ю. Карандей, Ю.Ю. Карандей, В.Л. Афанасьев // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар : КубГАУ, 2016. – № 06(120). – IDA [article ID]: 1201606040. – URL : <http://ej.kubagro.ru/2016/06/pdf/40.pdf>
8. Разработка алгоритма расчета электромагнитных параметров статора компонента управляемого асинхронного каскадного электрического привода / В.Ю. Карандей [и др.] // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар : КубГАУ, 2016. – № 06(120). – IDA [article ID]: 1201606041. – URL : <http://ej.kubagro.ru/2016/06/pdf/41.pdf>
9. Карандей В.Ю. Математическое моделирование специальных электрических приводов для оборудования нефтегазовой отрасли / В.Ю. Карандей, В.Л. Афанасьев // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар : КубГАУ, 2017. – № 08(132). – URL : <http://ej.kubagro.ru/2017/08/pdf/72.pdf> (0,978 у.п.л.). – IDA [article ID]: 1321708072. <http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-132-072>
10. Определение магнитных параметров модели статора компонента управляемого асинхронного каскадного электрического привода цилиндрической конструкции / В.Ю. Карандей [и др.] // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар : КубГАУ, 2017. – № 09(133). – URL : <http://ej.kubagro.ru/2017/09/pdf/105.pdf> (1,063 у.п.л.). – IDA [article ID]: 1331709105. <http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-133-105>



11. Карандей В.Ю. Программа расчета параметров и анимационного построения потокораспределения компонента асинхронного каскадного электропривода / Карандей В.Ю., Базык А.В., Афанасьев В.Л. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2015615828 от 25 мая 2015 г.

12. Карандей В.Ю. Программа расчета параметров и самоанимационного построения потокораспределения компонента асинхронного каскадного электропривода / Карандей В.Ю., Карандей Ю.Ю., Базык А.В. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2015615826 от 25 мая 2015 г.

13. Карандей В.Ю. Программа задания конструктивных параметров компонента асинхронного каскадного электропривода, статорной обмотки и визуального построения полученного потока распределения. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2015615827 от 25 мая 2015 г.

14. New Methods and Evaluation Criteria of Research Efficiency / Popova O.B. [etc.] // *Mediterranean journal of social sciences.* – 2015. – Vol. 6. – № 6 S5. – P. 212–217.

15. Theoretical propositions and practical implementation of the formalization of structured knowledge of the subject area for exploratory research / O.B. Popova [etc.] // *Advances in Intelligent Systems and Computing.* – 2018. – Vol. 722. – P. 432–437.

## References:

1. <http://himagregat.ru/products/equipment/ahn>

2. [http://www.ence-pumps.ru/nasosy\\_dlya\\_nefteproductov.php](http://www.ence-pumps.ru/nasosy_dlya_nefteproductov.php)

3. Karandey V.Yu. Controllable cascade electric drive with a liquid current collector / V.Yu. Karandey, B.K. Popov // Patent for invention № 2461947 was registered on September 20, 2012.

4. Karandey V.Yu. Signaling current collector device / V.Yu. Karandey, B.K. Popov, Yu.Yu. Karandey, V.L. Afanasyev // Patent for invention № 2601958 from July 27, 2015, registered on October 18, 2016.

5. Approach to determination of magnetic parameters of a component of the operated cascade asynchronous electric drive / B.K. Popov [etc.] // *Polythematic network electronic scientific magazine of the Kuban state agricultural university (The scientific magazine of KUBGAU) [An electronic resource]*. – Krasnodar : KubGAU, 2015. – № 10(114). – IDA [article ID]: 1141510014. – URL : <http://ej.kubagro.ru/2015/10/pdf/14.pdf>

6. Development of approach to calculation of the magnetic flux of one bobbin group of the winding of the stator of the component of the operated asynchronous cascade electric drive / V.Yu. Karandey [etc.] // *Polythematic network electronic scientific magazine of the Kuban state agricultural university (The scientific magazine of KUBGAU) [An electronic resource]*. – Krasnodar : KubGAU, 2016. – № 06(120). – IDA [article ID]: 1201606039. – URL : <http://ej.kubagro.ru/2016/06/pdf/39.pdf>

7. Karandey V.Yu. Approach to determination of magnetic parameters of the controlled asynchronous cascade electric actuator with the specified geometry / Karandey V.Yu., Karandey Yu.Yu., Afanasyev V.L. // *Polythematic network electronic scientific magazine of the Kuban state agricultural university (The scientific magazine of KUBGAU) [An electronic resource]*. – Krasnodar : KubGAU, 2016. – № 06(120). – IDA [article ID]: 1201606040. – URL : <http://ej.kubagro.ru/2016/06/pdf/40.pdf>

8. Development of algorithm of calculation of electromagnetic parameters of the stator of the component of the controlled asynchronous cascade electric drive / V.Yu. Karandey [etc.] // *Polythematic network electronic scientific magazine of the Kuban state agricultural university (The scientific magazine of KUBGAU) [An electronic resource]*. – Krasnodar : KubGAU, 2016. – № 06(120). – IDA [article ID]: 1201606041. – URL : <http://ej.kubagro.ru/2016/06/pdf/41.pdf>

9. Karandey V.Yu. Mathematical modelling of special electric drives for the equipment of oil and gas branch / V.Yu. Karandey, V.L. Afanasyev // *Polythematic network electronic scientific magazine of the Kuban state agricultural university (The scientific magazine of KUBGAU) [An electronic resource]*. – Krasnodar : KubGAU, 2017. – № 08(132). – IDA [article ID]: 1321708072. – URL : <http://ej.kubagro.ru/2017/08/pdf/72.pdf>, <http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-132-072>

10. The magnetic model parameters determination of the stator of the component of the operated asynchronous cascade electric drive cylindrical construction / V.Yu. Karandey [etc.] // *Polythematic network electronic scientific magazine of the Kuban state agricultural university (The scientific magazine of KUBGAU) [An electronic resource]*. – Krasnodar : KubGAU, 2017. – № 09(133). – IDA [article ID]: 1331709105. – URL : <http://ej.kubagro.ru/2017/09/pdf/105.pdf>, <http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-133-105>

11. Karandey V.Yu. Program of calculation of parameters and animation creation of a potokoraspredeleniye of a component of the asynchronous cascade electric drive / V.Yu. Karandey, A.V. Bazyk, V.L. Afanasyev. The certificate on official registration of the computer program № 2015615828 of May 25, 2015.

12. Karandey V.Yu. Program of calculation of parameters and samoanimatsionny creation of a potokoraspredeleniye of a component of the asynchronous cascade electric drive / Karandey V.Yu., Karandey Yu.Yu., Bazyk A.V. The certificate on official registration of the computer program № 2015615826 of May 25, 2015.

13. Karandey V.Yu. The program of a task of design data of a component of the asynchronous cascade electric drive, a stator winding and the visual construction received Potokoraspredeleniye / Karandey V.Yu. The certificate on official registration of the computer program № 2015615827 of May 25, 2015.

14. New Methods and Evaluation Criteria of Research Efficiency / Popova O.B. [etc.] // *Mediterranean journal of social sciences.* – 2015. – Vol. 6. – № 6 S5. – P. 212–217.

15. Theoretical propositions and practical implementation of the formalization of structured knowledge of the subject area for exploratory research / O.B. Popova [etc.] // *Advances in Intelligent Systems and Computing.* – 2018. – Vol. 722. – P. 432–437.





УДК 621.313.33

## РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОПРИВОДА НАСОСА ВЕРТИКАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ

### CALCULATION OF ELECTROMAGNETIC PARAMETERS OF THE ELECTRIC DRIVE OF THE PUMP OF THE VERTICAL DESIGN

**Карандей Владимир Юрьевич**

кандидат технических наук, доцент,  
Кубанский государственный технологический университет  
epp\_kvuy@mail.ru

**Афанасьев Виктор Леонидович**

аспирант,  
Кубанский государственный технологический университет  
buguvix@mail.ru

**Махинько Владислав Сергеевич**

студент,  
Кубанский государственный технологический университет

**Ляшенко Андрей Михайлович**

студент,  
Кубанский государственный технологический университет

**Аннотация.** Представлен расчет электромагнитных параметров электропривода насоса вертикальной конструкции, реализуемый для правильного проектирования электрического привода. На основе разработанной математической модели электромагнитных параметров каскадного управляемого электрического привода аксиальной конструкции, разработана программа расчета исследуемых электромагнитных параметров. Аксиальные каскадные электрические приводы обладают улучшенными характеристиками, по сравнению с однодвигательными вертикально установленными электроприводами, что позволяет улучшить технические и эксплуатационные характеристики насосов вертикальной конструкции с аксиальными каскадными электрическими приводами.

**Ключевые слова:** аксиальный асинхронный каскадный электропривод, электромеханическое преобразование энергии, электромагнитная система, насос вертикальной конструкции.

**Karandey Vladimir Yuryevich**

Candidate of Technical Sciences,  
Associate Professor,  
Kuban State Technological University  
epp\_kvuy@mail.ru

**Afanasiev Viktor Leonidovich**

Graduate Student,  
Kuban State Technological University  
buguvix@mail.ru

**Mahinko Vladislav Sergeyeovich**

Student,  
Kuban State Technological University

**Lyashenko Andrey Mikhaylovich**

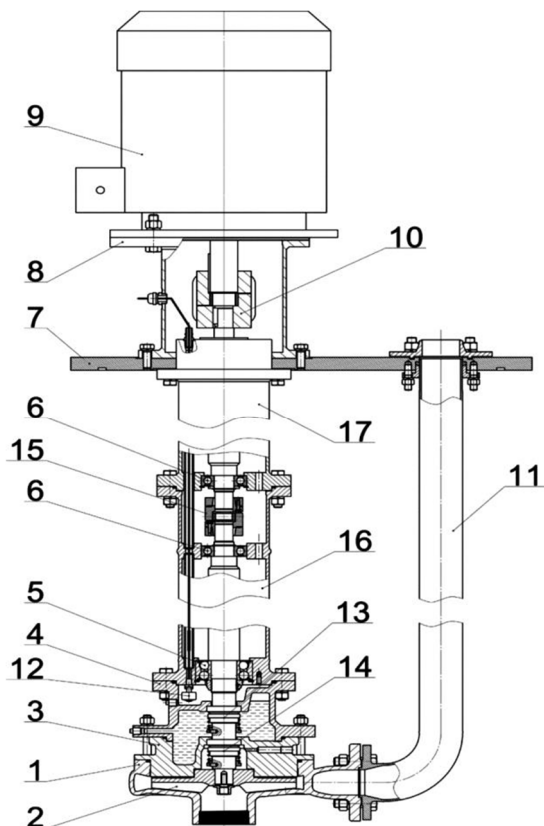
Student,  
Kuban State Technological University

**Annotation.** Calculation of electromagnetic parameters of the electric drive of the pump of a vertical design realized for the correct design of the electric drive is presented. On the basis of the developed mathematical model of electromagnetic parameters of the cascade operated electric drive of an axial design, the program of calculation of the studied electromagnetic parameters is developed. Axial cascade electric drives possess the improved characteristics, in comparison with the single-engine vertically installed electric drives that allows to improve technical and operational characteristics of pumps of a vertical design with axial cascade electric drives.

**Keywords:** axial asynchronous cascade electric drive, electromechanical transformation of energy, electromagnetic system, pump of the vertical design.

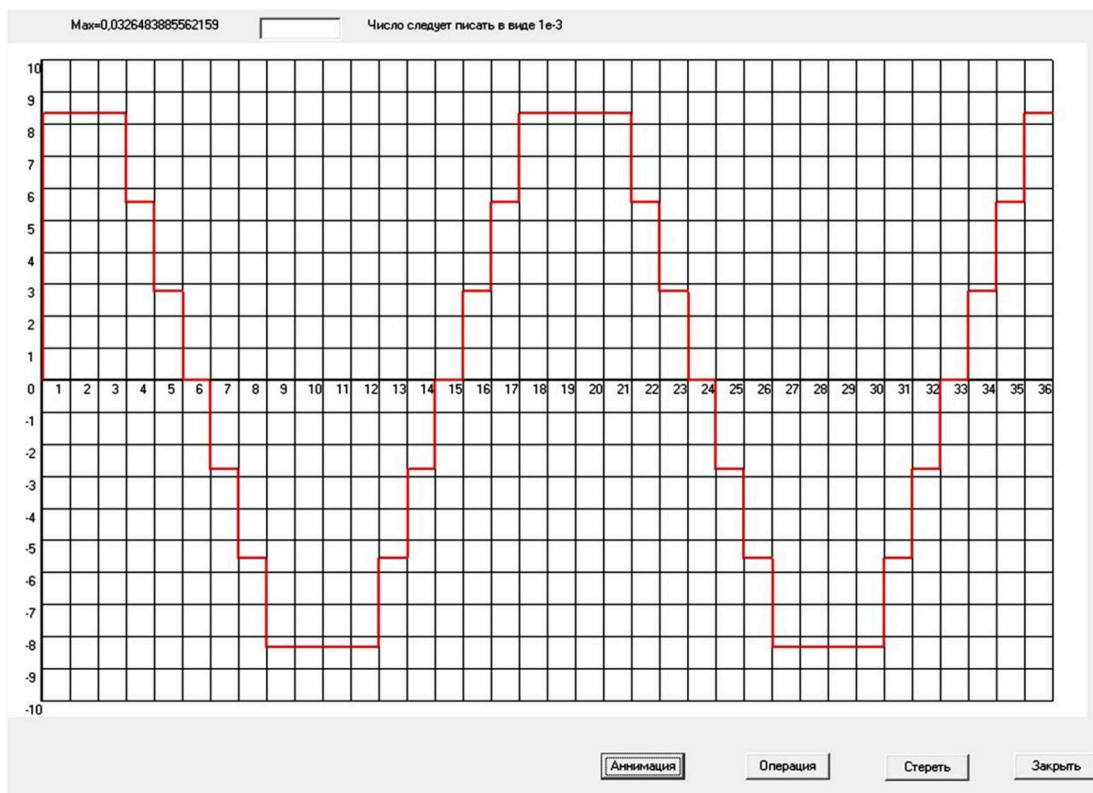
Нефтяные вертикальные полупогружные насосы предназначены для перекачивания из емкостей подземных горизонтальных дренажных типа ЕП и ЕПП газового конденсата, нефти, нефтепродуктов, легковоспламеняющихся жидкостей и воды, в том числе с некоторыми видами загрязнения. Это насосы типа НВ-Д-1М (рис. 1) и другие виды электронасосные агрегаты вертикальной конструкции [1–2].

Применение однодвигательных систем ухудшает технические и эксплуатационные характеристики насосов вертикальной конструкции, по сравнению с аксиальными каскадными системами [3–4]. Расчет и моделирование каскадных аксиальных управляемых электрических приводов требует новых подходов к расчёту электромагнитных параметров и проектированию [5–10]. Решение этой задачи требует создания программ расчета [11–13] и знаниями в области поиска оптимальных решений [14–15]. На (рис. 2, 3) представлено графическое изображение работы программы для расчёта электромагнитных параметров исследуемых электрических приводов. Данный программный комплекс позволяет довольно точно определять искомые параметры, что позволит правильно проектировать каскадные аксиальные управляемые электрические приводы для электронасосных агрегатов вертикальной конструкции.



**Рисунок 1** – Электронасосный агрегат горизонтальной конструкции:

- 1 – Корпус насоса; 2 – Крыльчатка; 3 – Стенка; 4 – Корпус уплотнения; 5 – Подшипник упорный; 6 – Подшипник;
- 7 – Плита; 8 – Опора электродвигателя; 9 – Электродвигатель; 10 – Муфта электродвигателя; 11 – Отвод;
- 12 – Датчик поплавковый; 13 – Уплотнение торцовое (верхнее); 14 – Уплотнение торцовое (нижнее); 15 – Муфта;
- 16 – Секция напорная; 17 – Подвеска верхняя



**Рисунок 2** – Распределение магнитного поля при повороте трехфазной системы на угол  $\alpha = 0^\circ$

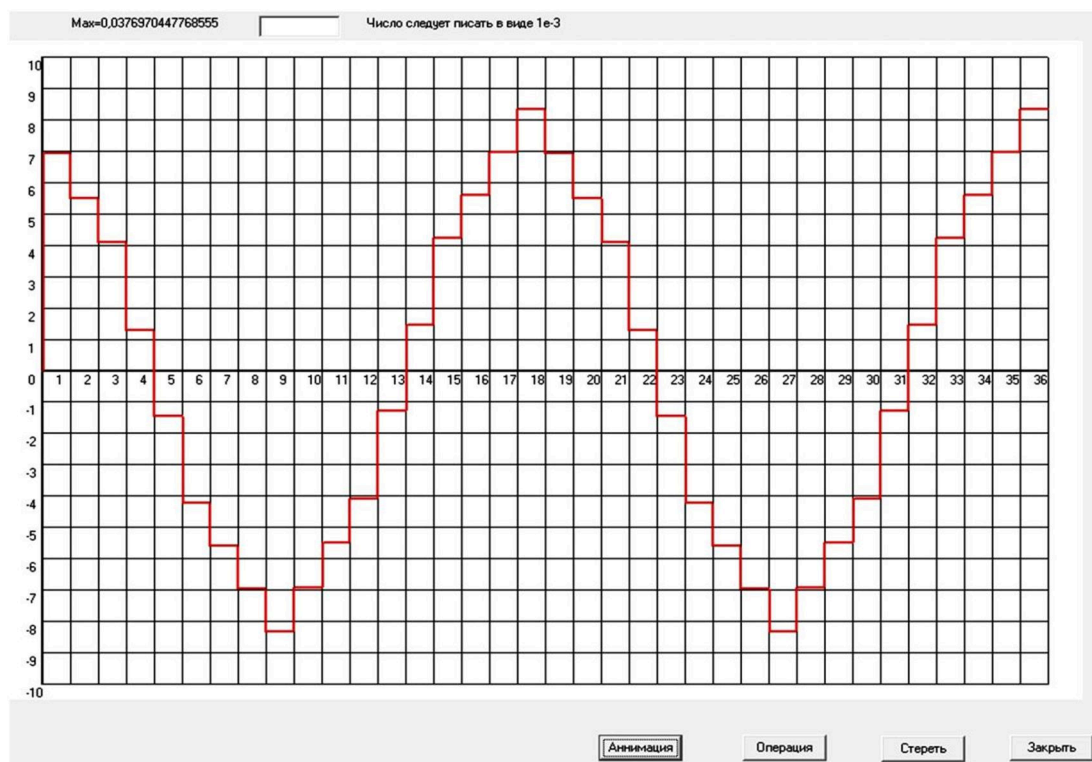


Рисунок 3 – Распределение магнитного поля при повороте трехфазной системы на угол  $\alpha = 28,8^\circ$

#### Литература:

1. <http://himagregat.ru/products/equipment/ahn>
2. [http://www.ence-pumps.ru/nasosy\\_dlya\\_nefteproductov.php](http://www.ence-pumps.ru/nasosy_dlya_nefteproductov.php)
3. Карандей В.Ю. Аксиальный каскадный электрический привод с жидкостным токосъемом / В.Ю. Карандей, Б.К. Попов, О.Б. Попова // Патент на изобретение № 2483415 зарегистрировано 11.03.2013 г.
4. Карандей В.Ю. Сигнализирующее токосъемное устройство / В.Ю. Карандей, Б.К. Попов, Ю.Ю. Карандей, В.Л. Афанасьев // Патент на изобретение № 2601958 от 27 июля 2015 г, зарегистрировано 18.10.2016 г.
5. Подход к определению магнитных параметров компонента управляемого каскадного асинхронного электрического привода / Б.К. Попов [и др.] // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар : КубГАУ, 2015. – № 10(114). – IDA [article ID]: 1141510014. – URL : <http://ej.kubagro.ru/2015/10/pdf/14.pdf> (1,188 у.п.л.).
6. Разработка подхода к расчету магнитного потока одной катушечной группы обмотки статора компонента управляемого асинхронного каскадного электрического привода / В.Ю. Карандей [и др.] // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар : КубГАУ, 2016. – № 06(120). – IDA [article ID]: 1201606039. – URL : <http://ej.kubagro.ru/2016/06/pdf/39.pdf>
7. Карандей В.Ю. Подход к определению магнитных параметров управляемого асинхронного каскадного электрического привода с уточненной геометрией / В.Ю. Карандей, Ю.Ю. Карандей, В.Л. Афанасьев // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар : КубГАУ, 2016. – № 06(120). – IDA [article ID]: 1201606040. – URL : <http://ej.kubagro.ru/2016/06/pdf/40.pdf>
8. Разработка алгоритма расчета электромагнитных параметров статора компонента управляемого асинхронного каскадного электрического привода / В.Ю. Карандей [и др.] // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар : КубГАУ, 2016. – № 06(120). – IDA [article ID]: 1201606041. – URL : <http://ej.kubagro.ru/2016/06/pdf/41.pdf>
9. Карандей В.Ю. Математическое моделирование специальных электрических приводов для оборудования нефтегазовой отрасли / В.Ю. Карандей, В.Л. Афанасьев // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар : КубГАУ, 2017. – № 08(132). – URL : <http://ej.kubagro.ru/2017/08/pdf/72.pdf> (0,978 у.п.л.). – IDA [article ID]: 1321708072. <http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-132-072>
10. Определение магнитных параметров модели статора компонента управляемого асинхронного каскадного электрического привода аксиальной конструкции / В.Ю. Карандей [и др.] // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар : КубГАУ, 2017. – № 09(133). – URL : <http://ej.kubagro.ru/2017/09/pdf/130.pdf> (1,000 у.п.л.). – IDA [article ID]: 1331709130. <http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-133-130>



11. Карандей В.Ю. Программа расчета параметров и анимационного построения потокораспределения компонента асинхронного каскадного электропривода / Карандей В.Ю., Базык А.В., Афанасьев В.Л. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2015615828 от 25 мая 2015 г.
12. Карандей В.Ю. Программа расчета параметров и самоанимационного построения потокораспределения компонента асинхронного каскадного электропривода / Карандей В.Ю., Карандей Ю.Ю., Базык А.В. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2015615826 от 25 мая 2015 г.
13. Карандей В.Ю. Программа задания конструктивных параметров компонента асинхронного каскадного электропривода, статорной обмотки и визуального построения полученного потока распределения / Карандей В.Ю. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2015615827 от 25 мая 2015 г.
14. New Methods and Evaluation Criteria of Research Efficiency / Popova O.B. [etc.] // *Mediterranean journal of social sciences.* – 2015. – Vol. 6. – № 6 S5. – P. 212–217.
15. Theoretical propositions and practical implementation of the formalization of structured knowledge of the subject area for exploratory research / O.B. Popova [etc.] // *Advances in Intelligent Systems and Computing.* – 2018. – Vol. 722. – P. 432–437.

## References:

1. <http://himagregat.ru/products/equipment/ahn>
2. [http://www.ence-pumps.ru/nasosy\\_dlya\\_nefteproductov.php](http://www.ence-pumps.ru/nasosy_dlya_nefteproductov.php)
3. Karandey V.Yu. The axial cascade electric drive with a liquid current collector / V.Yu. Karandey, B.K. Popov, O.B. Popova // Patent on the invention № 2483415 is registered 3/11/2013.
4. Karandey V.Yu. Signaling current collector device / V.Yu. Karandey, B.K. Popov, Yu.Yu. Karandey, V.L. Afanasyev // Patent for invention № 2601958 from July 27, 2015, registered on October 18, 2016.
5. Approach to determination of magnetic parameters of a component of the operated cascade asynchronous electric drive / B.K. Popov [etc.] // *Polythematic network electronic scientific magazine of the Kuban state agricultural university (The scientific magazine of KUBGAU) [An electronic resource].* – Krasnodar : KubGAU, 2015. – № 10(114). – IDA [article ID]: 1141510014. – URL : <http://ej.kubagro.ru/2015/10/pdf/14.pdf>
6. Development of approach to calculation of the magnetic flux of one bobbin group of the winding of the stator of the component of the operated asynchronous cascade electric drive / V.Yu. Karandey [etc.] // *Polythematic network electronic scientific magazine of the Kuban state agricultural university (The scientific magazine of KUBGAU) [An electronic resource].* – Krasnodar : KubGAU, 2016. – № 06(120). – IDA [article ID]: 1201606039. – URL : <http://ej.kubagro.ru/2016/06/pdf/39.pdf>
7. Karandey V.Yu. Approach to determination of magnetic parameters of the controlled asynchronous cascade electric actuator with the specified geometry / V.Yu. Karandey, Yu.Yu. Karandey, V.L. Afanasyev // *Polythematic network electronic scientific magazine of the Kuban state agricultural university (The scientific magazine of KUBGAU) [An electronic resource].* – Krasnodar : KubGAU, 2016. – № 06(120). – IDA [article ID]: 1201606040. – URL : <http://ej.kubagro.ru/2016/06/pdf/40.pdf>
8. Development of algorithm of calculation of electromagnetic parameters of the stator of the component of the controlled asynchronous cascade electric drive / V.Yu. Karandey [etc.] // *Polythematic network electronic scientific magazine of the Kuban state agricultural university (The scientific magazine of KUBGAU) [An electronic resource].* – Krasnodar : KubGAU, 2016. – № 06(120). – IDA [article ID]: 1201606041. – URL : <http://ej.kubagro.ru/2016/06/pdf/41.pdf>
9. Karandey V.Yu. Mathematical modelling of special electric drives for the equipment of oil and gas branch / V.Yu. Karandey, V.L. Afanasyev // *Polythematic network electronic scientific magazine of the Kuban state agricultural university (The scientific magazine of KUBGAU) [An electronic resource].* – Krasnodar : KubGAU, 2017. – № 08(132). – IDA [article ID]: 1321708072. – URL : <http://ej.kubagro.ru/2017/08/pdf/72.pdf>, <http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-132-072>
10. The magnetic model parameters determination of the stator of the component of the operated asynchronous cascade electric drive axial construction / V.Yu. Karandey [etc.] // *Polythematic network electronic scientific magazine of the Kuban state agricultural university (The scientific magazine of KUBGAU) [An electronic resource].* – Krasnodar : KubGAU, 2017. – № 09(133). – IDA [article ID]: 1331709130. – URL : <http://ej.kubagro.ru/2017/09/pdf/130.pdf>, <http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-133-130>
11. Karandey V.Yu. Program of calculation of parameters and animation creation of a potokoraspredeleniye of a component of the asynchronous cascade electric drive / Karandey V.Yu., Bazyk A.V., Afanasyev V.L. The certificate on official registration of the computer program № 2015615828 of May 25, 2015.
12. Karandey V.Yu. Program of calculation of parameters and samoanimatsionny creation of a potokoraspredeleniye of a component of the asynchronous cascade electric drive / Karandey V.Yu., Karandey Yu.Yu., Bazyk A.V. The certificate on official registration of the computer program № 2015615826 of May 25, 2015.
13. Karandey V.Yu. The program of a task of design data of a component of the asynchronous cascade electric drive, a statorny winding and the visual construction received Potokaspredeleniye / Karandey V.Yu. The certificate on official registration of the computer program № 2015615827 of May 25, 2015.
14. New Methods and Evaluation Criteria of Research Efficiency / Popova O.B. [etc.] // *Mediterranean journal of social sciences.* – 2015. – Vol. 6. – № 6 S5. – P. 212–217.
15. Theoretical propositions and practical implementation of the formalization of structured knowledge of the subject area for exploratory research / O.B. Popova [etc.] // *Advances in Intelligent Systems and Computing.* – 2018. – Vol. 722. – P. 432–437.



УДК 621.313.33

## АЛГОРИТМ ПРОГРАММ ДЛЯ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОПРИВОДА НАСОСОВ РАЗЛИЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

### ALGORITHM OF PROGRAMS FOR CALCULATION OF ELECTROMAGNETIC PARAMETERS OF THE ELECTRIC DRIVE OF PUMPS OF VARIOUS DESIGNS

**Карандей Владимир Юрьевич**

кандидат технических наук, доцент,  
Кубанский государственный технологический университет  
epp\_kvuy@mail.ru

**Афанасьев Виктор Леонидович**

аспирант,  
Кубанский государственный технологический университет  
buguvix@mail.ru

**Махинько Владислав Сергеевич**

студент,  
Кубанский государственный технологический университет

**Ляшенко Андрей Михайлович**

студент,  
Кубанский государственный технологический университет

**Аннотация.** Представлен алгоритм программ для расчета электромагнитных параметров электропривода насосов различных конструкций. На базе разработанного алгоритма были созданы программы расчета электромагнитных параметров управляемых каскадных электрических приводов цилиндрических и аксиальных конструкций. Созданные программы расчета могут являться частью системы автоматизированного проектирования, что позволит правильно рассчитывать и проектировать данные типы электроприводов, используемых в качестве электроприводов насосов различных конструкций.

**Ключевые слова:** управляемый асинхронный каскадный электропривод, электромеханическое преобразование энергии, электромагнитная система, насос, алгоритм, программа расчета.

**Karandey Vladimir Yuryevich**

Candidate of Technical Sciences,  
Associate Professor,  
Kuban State Technological University  
epp\_kvuy@mail.ru

**Afanasiev Viktor Leonidovich**

Graduate Student,  
Kuban State Technological University  
buguvix@mail.ru

**Mahinko Vladislav Sergeyeovich**

Student,  
Kuban State Technological University

**Lyashenko Andrey Mikhaylovich**

Student,  
Kuban State Technological University

**Annotation.** Algorithm of programs for calculation of electromagnetic parameters of the electric drive of pumps of various designs is presented. On the basis of the developed algorithm programs of calculation of electromagnetic parameters of the operated cascade electric drives of cylindrical and axial designs have been created. The created programs of calculation can be a part of the computer-aided engineering system that will allow to count and project correctly these types of the electric drives used as electric drives of pumps of various designs.

**Keywords:** controlled asynchronous cascade electric drive, electromechanical transformation of energy, electromagnetic system, pump, algorithm, program of calculation.

На рисунке 1 представлена блок-схема процедуры [1–3] Операция. Представленная блок-схема алгоритма Операция являются частью комплекса для оптимального выбора исходных параметров [4–7] и правильного и точного определения электромагнитных параметров [8–13] исследуемых каскадных электроприводов [14–16], насосов различных конструкций, что позволит проектировать и создавать насосы с ухудшенными техническими и эксплуатационными характеристиками.

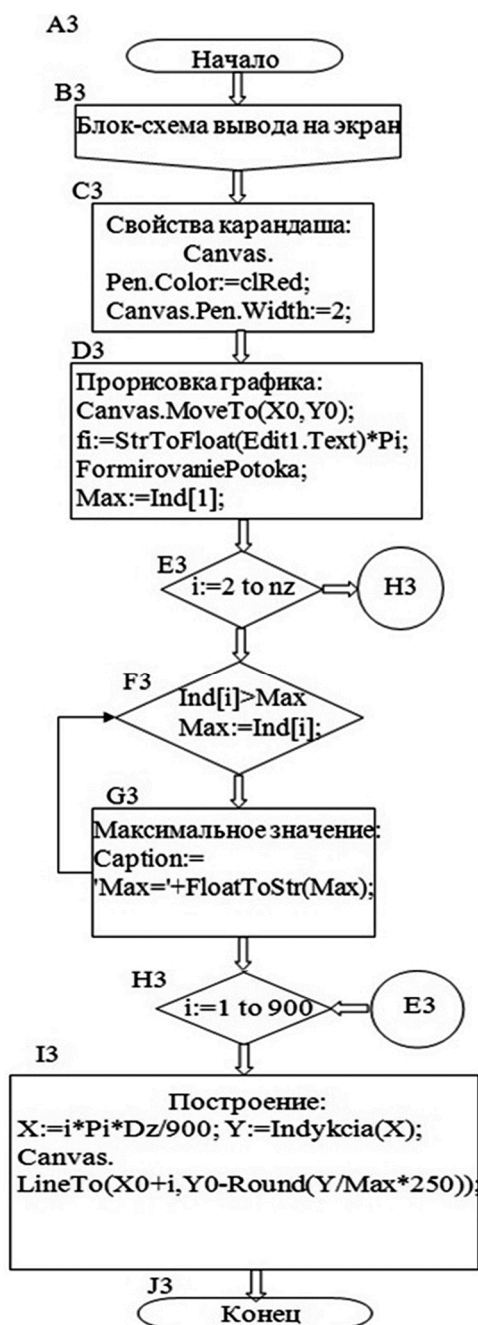


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритма Операция

**Литература:**

1. Карандей В.Ю. Программа расчета параметров и анимационного построения потокораспределения компонента асинхронного каскадного электропривода / Карандей В.Ю., Базык А.В., Афанасьев В.Л. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2015615828 от 25 мая 2015 г.
2. Карандей В.Ю. Программа расчета параметров и самоанимационного построения потокораспределения компонента асинхронного каскадного электропривода / Карандей В.Ю., Карандей Ю.Ю., Базык А.В. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2015615826 от 25 мая 2015 г.
3. Карандей В.Ю. Программа задания конструктивных параметров компонента асинхронного каскадного электропривода, статорной обмотки и визуального построения полученного потока распределения / Карандей В.Ю. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2015615827 от 25 мая 2015 г.
4. New Methods and Evaluation Criteria of Research Efficiency / O.B. Popova [etc.] // Mediterranean journal of social sciences. – 2015. – Vol. 6. – № 6 S5. – P. 212–217.
5. Theoretical propositions and practical implementation of the formalization of structured knowledge of the subject area for exploratory research / O.B. Popova [etc.] // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2018. – Vol. 722. – P. 432–437.



6. Analysis of forecasting methods as a tool for information structuring in science research / O.B. Popova [etc.] // *British Journal of Applied Science & Technology*. – 2016. – Vol. 17. – № 2. – P. 9–19.
7. Разработка алгоритма расчета электромагнитных параметров статора управляемого асинхронного каскадного электрического привода / В.Ю. Карандей [и др.] // *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]*. – Краснодар : КубГАУ, 2016. – № 06(120). – IDA [article ID]: 1201606041. – URL : <http://ej.kubagro.ru/2016/06/pdf/41.pdf>
8. Подход к определению магнитных параметров компонента управляемого каскадного асинхронного электрического привода / Б.К. Попов [и др.] // *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]*. – Краснодар : КубГАУ, 2015. – № 10(114). – IDA [article ID]: 1141510014. – URL : <http://ej.kubagro.ru/2015/10/pdf/14.pdf> (1,188 у.п.л.).
9. Разработка подхода к расчету магнитного потока одной катушечной группы обмотки статора компонента управляемого асинхронного каскадного электрического привода / В.Ю. Карандей [и др.] // *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]*. – Краснодар : КубГАУ, 2016. – № 06(120). – IDA [article ID]: 1201606039. – URL : <http://ej.kubagro.ru/2016/06/pdf/39.pdf>.
10. Карандей В.Ю. Подход к определению магнитных параметров управляемого асинхронного каскадного электрического привода с уточненной геометрией / В.Ю. Карандей, Ю.Ю. Карандей, В.Л. Афанасьев // *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]*. – Краснодар : КубГАУ, 2016. – № 06(120). – IDA [article ID]: 1201606040. – URL : <http://ej.kubagro.ru/2016/06/pdf/40.pdf>
11. Карандей В.Ю. Математическое моделирование специальных электрических приводов для оборудования нефтегазовой отрасли / В.Ю. Карандей, В.Л. Афанасьев // *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]*. – Краснодар : КубГАУ, 2017. – № 08(132). – URL : <http://ej.kubagro.ru/2017/08/pdf/72.pdf> (0,978 у.п.л.). – IDA [article ID]: 1321708072. <http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-132-072>
12. Определение магнитных параметров модели статора компонента управляемого асинхронного каскадного электрического привода аксиальной конструкции / В.Ю. Карандей [и др.] // *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]*. – Краснодар : КубГАУ, 2017. – № 09(133). – URL : <http://ej.kubagro.ru/2017/09/pdf/130.pdf> (1,000 у.п.л.). – IDA [article ID]: 1331709130. <http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-133-130>
13. Определение магнитных параметров модели статора компонента управляемого асинхронного каскадного электрического привода цилиндрической конструкции / В.Ю. Карандей [и др.] // *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]*. – Краснодар : КубГАУ, 2017. – № 09(133). – URL : <http://ej.kubagro.ru/2017/09/pdf/105.pdf> (1,063 у.п.л.). – IDA [article ID]: 1331709105. <http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-133-105>
14. Карандей В.Ю. Аксиальный каскадный электрический привод с жидкостным токосъемом / В.Ю. Карандей, Б.К. Попов, О.Б. Попова // Патент на изобретение № 2483415 зарегистрировано 11.03.2013 г.
15. Карандей В.Ю. Управляемый каскадный электрический привод с жидкостным токосъемом / В.Ю. Карандей, Б.К. Попов // Патент на изобретение № 2461947 зарегистрировано 20.09.2012 г.
16. Карандей В.Ю. Сигнализирующее токосъемное устройство / В.Ю. Карандей, Б.К. Попов, Ю.Ю. Карандей, В.Л. Афанасьев // Патент на изобретение № 2601958 от 27 июля 2015 г., зарегистрировано 18.10.2016 г.

## References:

1. Karandey V.Yu. Program of calculation of parameters and animation creation of a potokoraspredeleniye of a component of the asynchronous cascade electric drive / Karandey V.Yu., Bazyk A.V., Afanasyev V.L. The certificate on official registration of the computer program № 2015615828 of May 25, 2015.
2. Karandey V.Yu. Program of calculation of parameters and samoanimatsionny creation of a potokoraspredele-niye of a component of the asynchronous cascade electric drive / Karandey V.Yu., Karandey Yu.Yu., Bazyk A.V. The certificate on official registration of the computer program № 2015615826 of May 25, 2015.
3. Karandey V.Yu. The program of a task of design data of a component of the asynchronous cascade electric drive, a statorny winding and the visual construction received Potokaspredeleniye / Karandey V.Yu. The certificate on official registration of the computer program № 2015615827 of May 25, 2015.
4. New Methods and Evaluation Criteria of Research Efficiency / O.B. Popova [etc.] // *Mediterranean journal of social sciences*. – 2015. – Vol. 6. – № 6 S5. – P. 212–217.
5. Theoretical propositions and practical implementation of the formalization of structured knowledge of the subject area for exploratory research / O.B. Popova [etc.] // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. – 2018. – Vol. 722. – P. 432–437.
6. Analysis of forecasting methods as a tool for information structuring in science research / O.B. Popova [etc.] // *British Journal of Applied Science & Technology*. – 2016. – Vol. 17. – № 2. – P. 9–19.
7. Development of algorithm of calculation of electromagnetic parameters of the stator of the component of the controlled asynchronous cascade electric drive / V.Yu. Karandey [etc.] // *Polythematic network electronic scientific magazine of the Kuban state agricultural university (The scientific magazine of KUBGAU) [An electronic resource]*. – Krasnodar : KubGAU, 2016. – № 06(120). – IDA [article ID]: 1201606041. – URL : <http://ej.kubagro.ru/2016/06/pdf/41.pdf>
8. Approach to determination of magnetic parameters of a component of the operated cascade asynchronous electric drive / B.K. Popov [etc.] // *Polythematic network electronic scientific magazine of the Kuban state agricultural university (The scientific magazine of KUBGAU) [An electronic resource]*. – Krasnodar : KubGAU, 2015. – № 10(114). – IDA [article ID]: 1141510014. – URL : <http://ej.kubagro.ru/2015/10/pdf/14.pdf>



9. Development of approach to calculation of the magnetic flux of one bobbin group of the winding of the stator of the component of the operated asynchronous cascade electric drive / V.Yu. Karandey [etc.] // Polythematic network electronic scientific magazine of the Kuban state agricultural university (The scientific magazine of KUBGAU) [An electronic resource]. – Krasnodar : KubGAU, 2016. – № 06(120). – IDA [article ID]: 1201606039. – URL : <http://ej.kubagro.ru/2016/06/pdf/39.pdf>

10. Karandey V.Yu. Approach to determination of magnetic parameters of the controlled asynchronous cascade electric actuator with the specified geometry / V.Yu. Karandey, Yu.Yu. Karandey, V.L. Afanasyev // Polythematic network electronic scientific magazine of the Kuban state agricultural university (The scientific magazine of KUBGAU) [An electronic resource]. – Krasnodar : KubGAU, 2016. – № 06(120). – IDA [article ID]: 1201606040. – URL : <http://ej.kubagro.ru/2016/06/pdf/40.pdf>

11. Karandey V.Yu. Mathematical modelling of special electric drives for the equipment of oil and gas branch / V.Yu. Karandey, V.L. Afanasyev // Polythematic network electronic scientific magazine of the Kuban state agricultural university (The scientific magazine of KUBGAU) [An electronic resource]. – Krasnodar : KubGAU, 2017. – №08(132). – IDA [article ID]: 1321708072. – URL : <http://ej.kubagro.ru/2017/08/pdf/72.pdf>, <http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-132-072>

12. The magnetic model parameters determination of the stator of the component of the operated asynchronous cascade electric drive axial construction / V.Yu. Karandey [etc.] // Polythematic network electronic scientific magazine of the Kuban state agricultural university (The scientific magazine of KUBGAU) [An electronic resource]. – Krasnodar : KubGAU, 2017. – № 09(133). – IDA [article ID]: 1331709130. – URL : <http://ej.kubagro.ru/2017/09/pdf/130.pdf>, <http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-133-130>

13. The magnetic model parameters determination of the stator of the component of the operated asynchronous cascade electric drive cylindrical construction / V.Yu. Karandey [etc.] // Polythematic network electronic scientific magazine of the Kuban state agricultural university (The scientific magazine of KUBGAU) [An electronic resource]. – Krasnodar : KubGAU, 2017. – № 09(133). – IDA [article ID]: 1331709105. – URL : <http://ej.kubagro.ru/2017/09/pdf/105.pdf>, <http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-133-105>

14. Karandey V.Yu. The axial cascade electric drive with a liquid current collector / V.Yu. Karandey, B.K. Popov, O.B. Popova // Patent on the invention № 2483415 is registered 3/11/2013.

15. Karandey V.Yu. Controllable cascade electric drive with a liquid current collector / V.Yu. Karandey, B.K. Popov // Patent for invention № 2461947 was registered on September 20, 2012.

16. Karandey V.Yu. Signaling current collector device / V.Yu. Karandey, B.K. Popov, Yu.Yu. Karandey, V.L. Afanasyev // Patent for invention № 2601958 from July 27, 2015, registered on October 18, 2016.





УДК 621.313.33

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАПАСЕННОЙ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА НАСОСОВ РАЗЛИЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

### DEFINITION OF THE RESERVED ENERGY OF THE ELECTRIC DRIVE OF PUMPS OF VARIOUS DESIGNS

**Карандей Владимир Юрьевич**

кандидат технических наук, доцент,  
Кубанский государственный технологический университет  
epp\_kvuy@mail.ru

**Афанасьев Виктор Леонидович**

аспирант,  
Кубанский государственный технологический университет  
buguvix@mail.ru

**Махинько Владислав Сергеевич**

студент,  
Кубанский государственный технологический университет

**Ляшенко Андрей Михайлович**

студент,  
Кубанский государственный технологический университет

**Аннотация.** Определена запасенная энергии в управляемых каскадных электрических приводах цилиндрических и аксиальных конструкций электропривода насосов различных конструкций. Точное и правильное определение запасенной энергии в устройстве позволяет оптимально спроектировать и рассчитать габариты исследуемых электроприводов, а также точно определить параметры усилия и момента на валу насосов различных конструкций. Расчет производится в разработанной программе расчета, в которой реализован оригинальный алгоритм и математическая модель рассматриваемых электрических приводов.

**Ключевые слова:** управляемый асинхронный каскадный электропривод, электромеханическое преобразование энергии, электромагнитная система, насос, алгоритм, программа расчета, электромагнитная энергия.

**Karandey Vladimir Yuryevich**

Candidate of Technical Sciences,  
Associate Professor,  
Kuban State Technological University  
epp\_kvuy@mail.ru

**Afanasiev Viktor Leonidovich**

Graduate Student,  
Kuban State Technological University  
buguvix@mail.ru

**Mahinko Vladislav Sergeyeovich**

Student,  
Kuban State Technological University

**Lyashenko Andrey Mikhaylovich**

Student,  
Kuban State Technological University

**Annotation.** It is defined reserved energy in operated cascade electric drives of cylindrical and axial designs of the electric drive of pumps of various designs. Exact and correct definition of the reserved energy in the device allows to design and calculate optimum dimensions of the studied electric drives and also to precisely determine parameters of effort and the moment on a shaft of pumps of various designs. Calculation is made in the developed program of calculation in which the original algorithm and mathematical model of the considered electric drives is realized.

**Keywords:** controlled asynchronous cascade electric drive, electromechanical transformation of energy, electromagnetic system, pump, algorithm, program of calculation, electromagnetic energy.

В виде программного продукта [1–4] реализован расчет для исследуемых управляемых каскадных электрических приводов цилиндрических и аксиальных конструкций [5–7] значения запасенной энергии в зависимости от величины заданной или расчетной величины скольжения. Это достигается за счёт реализации в теле программы расчёта разработанной математической модели каскадного электрического привода [8–14]. Вывод расчетных данных осуществляется путем создания пар значений, в зависимости от величины заданного скольжения (рис. 1).

Определение запасенной энергии в устройстве позволяет оптимально спроектировать и рассчитать габариты исследуемых электроприводов, а также разрабатывать новые алгоритмы [15–17] для точного определения параметров усилия и момента на валу насосов различных конструкций с ухудшенными техническими и эксплуатационными характеристиками.

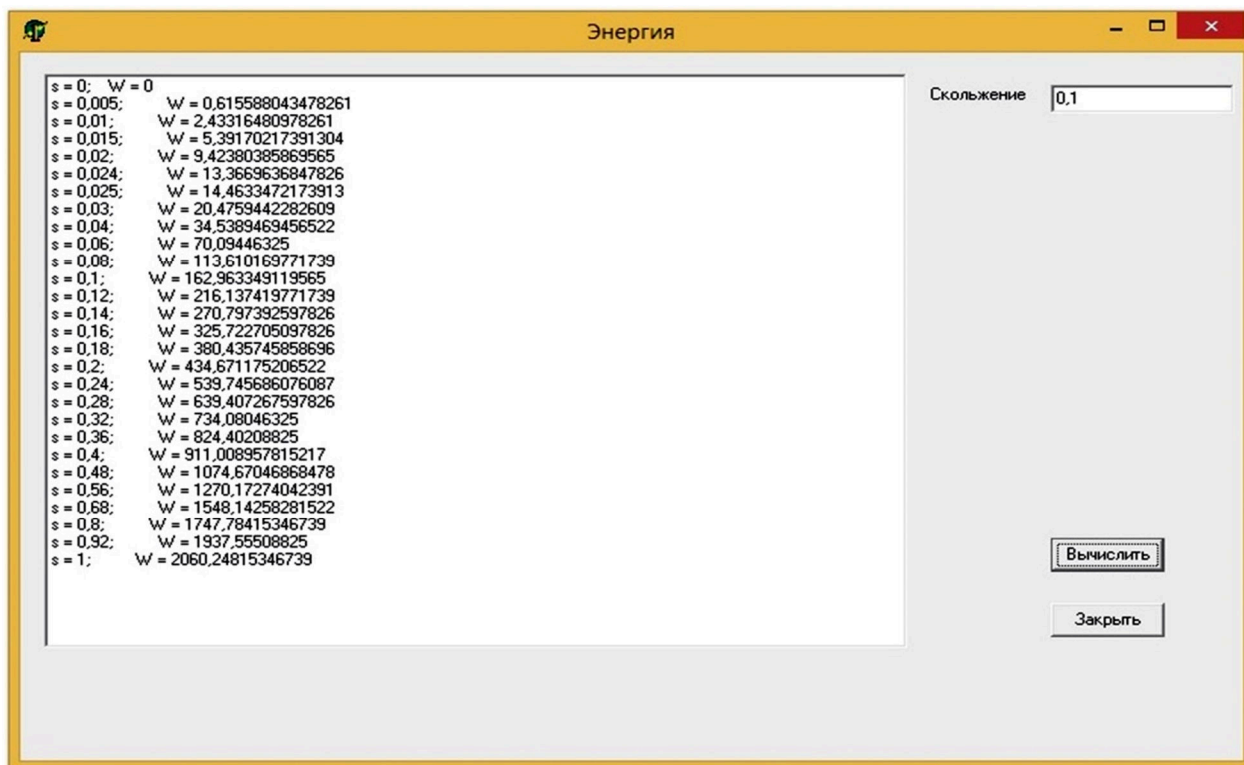


Рисунок 1 – Программа расчета запасенной энергии

### Литература:

1. Попов Б.К. Программа расчета запасенной энергии в каскадном электрическом приводе / Попов Б.К., Карандей В.Ю. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2012613329 от 21 февраля 2012 г.
2. Карандей В.Ю. Программа расчета параметров и анимационного построения потокораспределения компонента асинхронного каскадного электропривода / Карандей В.Ю., Базык А.В., Афанасьев В.Л. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2015615828 от 25 мая 2015 г.
3. Карандей В.Ю. Программа расчета параметров и самоанимационного построения потокораспределения компонента асинхронного каскадного электропривода / Карандей В.Ю., Карандей Ю.Ю., Базык А.В. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2015615826 от 25 мая 2015 г.
4. Карандей В.Ю. Программа задания конструктивных параметров компонента асинхронного каскадного электропривода, статорной обмотки и визуального построения полученного потока распределения / Карандей В.Ю. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2015615827 от 25 мая 2015 г.
5. Карандей В.Ю. Аксиальный каскадный электрический привод с жидкостным токосъемом / В.Ю. Карандей, Б.К. Попов, О.Б. Попова // Патент на изобретение № 2483415 зарегистрировано 11.03.2013 г.
6. Карандей В.Ю. Управляемый каскадный электрический привод с жидкостным токосъемом / В.Ю. Карандей, Б.К. Попов // Патент на изобретение № 2461947 зарегистрировано 20.09.2012 г.
7. Карандей В.Ю. Сигнализирующее токосъемное устройство / В.Ю. Карандей, Б.К. Попов, Ю.Ю. Карандей, В.Л. Афанасьев // Патент на изобретение № 2601958 от 27 июля 2015 г, зарегистрировано 18.10.2016 г.
8. Разработка алгоритма расчета электромагнитных параметров статора компонента управляемого асинхронного каскадного электрического привода / В.Ю. Карандей [и др.] // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар : КубГАУ, 2016. – № 06(120). – IDA [article ID]: 1201606041. – URL : <http://ej.kubagro.ru/2016/06/pdf/41.pdf>
9. Подход к определению магнитных параметров компонента управляемого каскадного асинхронного электрического привода / Б.К. Попов [и др.] // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар : КубГАУ, 2015. – №10(114). – IDA [article ID]: 1141510014. – URL : <http://ej.kubagro.ru/2015/10/pdf/14.pdf> (1,188 у.п.л.).
10. Разработка подхода к расчету магнитного потока одной катушечной группы обмотки статора компонента управляемого асинхронного каскадного электрического привода / В.Ю. Карандей [и др.] // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар : КубГАУ, 2016. – № 06(120). – IDA [article ID]: 1201606039. – URL : <http://ej.kubagro.ru/2016/06/pdf/39.pdf>
11. Карандей В.Ю. Подход к определению магнитных параметров управляемого асинхронного каскадного электрического привода с уточненной геометрией / В.Ю. Карандей, Ю.Ю. Карандей, В.Л. Афанасьев // Политема-



тический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар : КубГАУ, 2016. – № 06(120). – IDA [article ID]: 1201606040. – URL : <http://ej.kubagro.ru/2016/06/pdf/40.pdf>

12. Карандей В.Ю. Математическое моделирование специальных электрических приводов для оборудования нефтегазовой отрасли / В.Ю. Карандей, В.Л. Афанасьев // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар : КубГАУ, 2017. – № 08(132). – URL : <http://ej.kubagro.ru/2017/08/pdf/72.pdf> (0,978 у.п.л.). – IDA [article ID]: 1321708072. <http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-132-072>

13. Определение магнитных параметров модели статора компонента управляемого асинхронного каскадного электрического привода аксиальной конструкции / В.Ю. Карандей [и др.] // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар : КубГАУ, 2017. – №09(133). – URL : <http://ej.kubagro.ru/2017/09/pdf/130.pdf> (1,000 у.п.л.). – IDA [article ID]: 1331709130. <http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-133-130>

14. Определение магнитных параметров модели статора компонента управляемого асинхронного каскадного электрического привода цилиндрической конструкции / В.Ю. Карандей [и др.] // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар : КубГАУ, 2017. – № 09(133). – URL : <http://ej.kubagro.ru/2017/09/pdf/105.pdf> (1,063 у.п.л.). – IDA [article ID]: 1331709105. <http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-133-105>

15. New Methods and Evaluation Criteria of Research Efficiency / O.B. Popova [etc.] // Mediterranean journal of social sciences. – 2015. – Vol. 6. – № 6 S5. – P. 212–217.

16. Theoretical propositions and practical implementation of the formalization of structured knowledge of the subject area for exploratory research / O.B. Popova [etc.] // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2018. – Vol. 722. – P. 432–437.

17. Analysis of forecasting methods as a tool for information structuring in science research / O.B. Popova [etc.] // British Journal of Applied Science & Technology. – 2016. – Vol. 17. – № 2. – P. 9–19.

## References:

1. Popov B.K. Program of calculation of the reserved energy in the cascade electric drive / Popov B.K., Karandey V.Yu. The certificate on official registration of the computer program № 2012613329 of February 21, 2012.

2. Karandey V.Yu. Program of calculation of parameters and animation creation of a potokoraspredeleniye of a component of the asynchronous cascade electric drive / Karandey V.Yu., Bazyk A.V., Afanasyev V.L. The certificate on official registration of the computer program № 2015615828 of May 25, 2015.

3. Karandey V.Yu. Program of calculation of parameters and samoanimatsionny creation of a potokoraspredele-niye of a component of the asynchronous cascade electric drive / Karandey V.Yu., Karandey Yu.Yu., Bazyk A.V. The certificate on official registration of the computer program № 2015615826 of May 25, 2015.

4. Karandey V.Yu. The program of a task of design data of a component of the asynchronous cascade electric drive, a statorny winding and the visual construction received Potokaspredeleniye / Karandey V.Yu. The certificate on official registration of the computer program № 2015615827 of May 25, 2015.

5. Karandey V.Yu. The axial cascade electric drive with a liquid current collector / V.Yu. Karandey, B.K. Popov, O.B. Popova // Patent on the invention № 2483415 is registered 3/11/2013.

6. Karandey V.Yu. Controllable cascade electric drive with a liquid current collector / V.Yu. Karandey, B.K. Popov // Patent for invention № 2461947 was registered on September 20, 2012.

7. Karandey V.Yu. Signaling current collector device / V.Yu. Karandey, B.K. Popov, Yu.Yu. Karandey, V.L. Afanasyev // Patent for invention № 2601958 from July 27, 2015, registered on October 18, 2016.

8. Development of algorithm of calculation of electromagnetic parameters of the stator of the component of the controlled asynchronous cascade electric drive / V.Yu. Karandey [etc.] // Polythematic network electronic scientific magazine of the Kuban state agricultural university (The scientific magazine of KUBGAU) [An electronic resource]. – Krasnodar : KubGAU, 2016. – № 06(120). – IDA [article ID]: 1201606041. – URL : <http://ej.kubagro.ru/2016/06/pdf/41.pdf>

9. Approach to determination of magnetic parameters of a component of the operated cascade asynchronous electric drive / B.K. Popov [etc.] // Polythematic network electronic scientific magazine of the Kuban state agricultural university (The scientific magazine of KUBGAU) [An electronic resource]. – Krasnodar : KubGAU, 2015. – № 10(114). – IDA [article ID]: 1141510014. – URL : <http://ej.kubagro.ru/2015/10/pdf/14.pdf>

10. Development of approach to calculation of the magnetic flux of one bobbin group of the winding of the stator of the component of the operated asynchronous cascade electric drive / V.Yu. Karandey [etc.] // Polythematic network electronic scientific magazine of the Kuban state agricultural university (The scientific magazine of KUBGAU) [An electronic resource]. – Krasnodar : KubGAU, 2016. – № 06(120). – IDA [article ID]: 1201606039. – URL : <http://ej.kubagro.ru/2016/06/pdf/39.pdf>

11. Karandey V.Yu. Approach to determination of magnetic parameters of the controlled asynchronous cascade electric actuator with the specified geometry / V.Yu. Karandey, Yu.Yu. Karandey, V.L. Afanasyev // Polythematic network electronic scientific magazine of the Kuban state agricultural university (The scientific magazine of KUBGAU) [An electronic resource]. – Krasnodar : KubGAU, 2016. – № 06(120). – IDA [article ID]: 1201606040. – URL : <http://ej.kubagro.ru/2016/06/pdf/40.pdf>

12. Karandey V.Yu. Mathematical modelling of special electric drives for the equipment of oil and gas branch / V.Yu. Karandey, V.L. Afanasyev // Polythematic network electronic scientific magazine of the Kuban state agricultural university (The scientific magazine of KUBGAU) [An electronic resource]. – Krasnodar : KubGAU, 2017. – № 08(132). – IDA [article ID]: 1321708072. – URL : <http://ej.kubagro.ru/2017/08/pdf/72.pdf>, <http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-132-072>



13. The magnetic model parameters determination of the stator of the component of the operated asynchronous cascade electric drive axial construction / V.Yu. Karandey [etc.] // Polythematic network electronic scientific magazine of the Kuban state agricultural university (The scientific magazine of KUBGAU) [An electronic resource]. – Krasnodar : KubGAU, 2017. – № 09(133). – IDA [article ID]: 1331709130. – URL : <http://ej.kubagro.ru/2017/09/pdf/130.pdf>, <http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-133-130>

14. The magnetic model parameters determination of the stator of the component of the operated asynchronous cascade electric drive cylindrical construction / V.Yu. Karandey [etc.] // Polythematic network electronic scientific magazine of the Kuban state agricultural university (The scientific magazine of KUBGAU) [An electronic resource]. – Krasnodar : KubGAU, 2017. – № 09(133). – IDA [article ID]: 1331709105. – URL : <http://ej.kubagro.ru/2017/09/pdf/105.pdf>, <http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-133-105>

15. New Methods and Evaluation Criteria of Research Efficiency / O.B. Popova [etc.] // Mediterranean journal of social sciences. – 2015. – Vol. 6. – № 6 S5. – P. 212–217.

16. Theoretical propositions and practical implementation of the formalization of structured knowledge of the subject area for exploratory research / O.B. Popova [etc.] // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2018. – Vol. 722. – P. 432–437.

17. Analysis of forecasting methods as a tool for information structuring in science research / O.B. Popova [etc.] // British Journal of Applied Science & Technology. – 2016. – Vol. 17. – № 2. – P. 9–19.



УДК 621.313

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДВУХВХОДОВОЙ ГЕНЕРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ ВЕТРА И СОЛНЦА С ЦЕЛЬЮ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ МАЛОМОЩНЫХ ОБЪЕКТОВ НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ

### THE USE OF A TWO-INPUT GENERATOR SET FOR CONVERTING WIND AND SOLAR ENERGY FOR THE PURPOSE OF SUPPLYING LOCAL LOW-POWER OBJECTS OF THE OIL AND GAS INDUSTRY

**Кашин Яков Михайлович**

кандидат технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой электротехники  
и электрических машин,  
Кубанский государственный технологический университет  
jlms@mail.ru

**Ким Владислав Анатольевич**

студент,  
Кубанский государственный технологический университет  
vladk-kub@mail.ru

**Христофоров Михаил Сергеевич**

аспирант,  
Кубанский государственный технологический университет  
mkhristoforov87@mail.ru

**Шаршак Алексей Александрович**

студент,  
Кубанский государственный технологический университет  
vip.sharshak@mail.ru

**Аннотация.** В статье рассмотрены особенности использования двухвходовой генераторной установки для преобразования энергии ветра и солнца с целью электроснабжения локальных маломощных объектов нефтегазовой отрасли, а также её преимущества перед схемами электроснабжения локальных объектов, основанными на инверторном преобразовании.

**Ключевые слова:** альтернативная энергетика, двухвходовая электрическая машина (ДЭМ), ветрогенератор, фотоэлектрические преобразователи (ФЭП), электроснабжение локальных объектов.

**Kashin Yakov Mikhailovich**

Candidate of Technical Sciences,  
Associate Professor,  
Head of the Department of Electrical  
Engineering and Electrical Machines,  
Kuban State Technological University  
jlms@mail.ru

**Kim Vladislav Anatolievich**

Student,  
Kuban State Technological University  
vladk-kub@mail.ru

**Khristoforov Mikhail Sergeevich**

Graduate Student,  
Kuban State Technological University  
mkhristoforov87@mail.ru

**Sharshak Alexey Alexandrovich**

Student,  
Kuban State Technological University  
vip.sharshak@mail.ru

**Annotation.** The article considers the features of using a two-input generator set for converting wind and solar energy for the purpose of power supply of local low-power objects of the oil and gas industry, as well as its advantages over power supply schemes for local objects based on inverter conversion.

**Keywords:** alternative energy, two-input electric machine, wind generator, photoelectric converters, power supply of local objects.

В последние годы становится всё более актуальным вопрос применения возобновляемых источников энергии для электроснабжения удалённых объектов как передвижных, так и стационарных, в особенности в тех случаях, когда прокладка линий электропередач или снабжение горюче-смазочными материалами при использовании генераторов, приводимых во вращение двигателями внутреннего сгорания, экономически нецелесообразны. В нефтегазовой отрасли основным потребителем электроэнергии является электропривод. Однако существуют также некоторые потребители, для которых требования к качеству электрической энергии являются менее жёсткими.

В настоящее время для снабжения таких потребителей распространение получила система энергоснабжения локальных объектов, состоящая из ветротурбины, генератора, солнечных батарей, управляющей аппаратуры (контролера), аккумуляторов и инвертора, представленная рисунке 1.

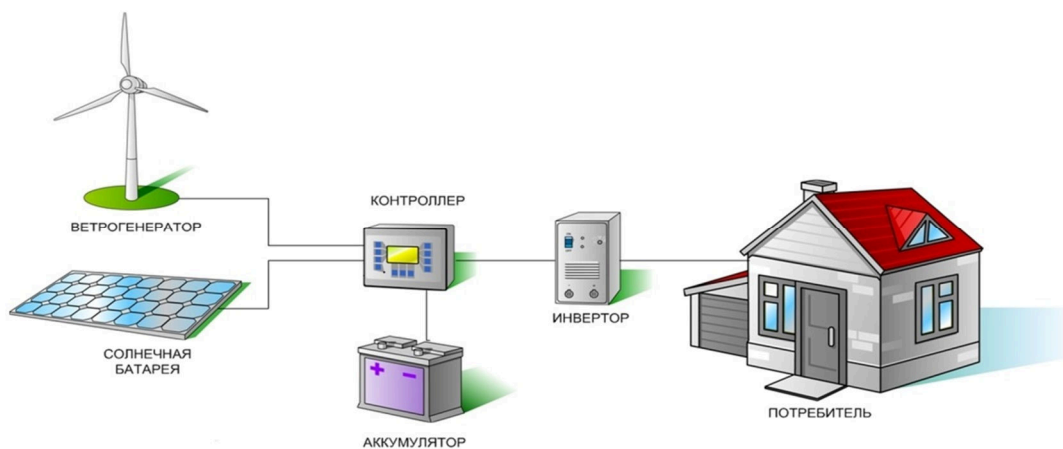
Недостатками данного схемного решения являются

– необходимость применения инвертора (инвертор необходим, так как аккумуляторные батареи и фотоэлектрические преобразователи являются источниками постоянного напряжения, которое



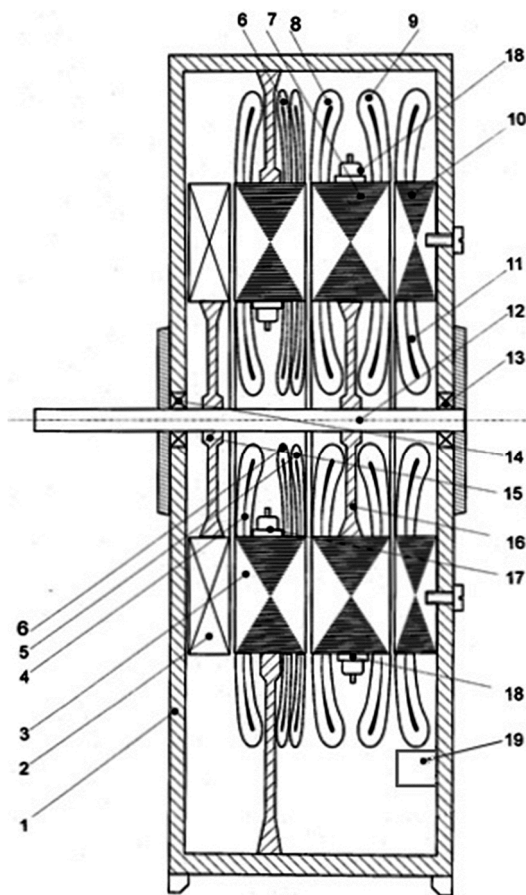
необходимо преобразовать в переменное напряжение, так как большинство потребителей являются потребителями переменного напряжения);

- низкая эффективность при непрерывном использовании, что обусловлено кратковременным отсутствием ветра, малой его скоростью и работе в ночное время суток;
- высокая стоимость оборудования.



**Рисунок 1** – Схема электроснабжения на основе инвертора

Авторами в качестве альтернативного источника энергии предложена двухходовая генераторная установка для преобразования энергии ветра и солнца [1–4]. ДЭМ, схема которого приведена на рисунке 2 и рисунке 3, представляет собой сложное электромеханическое устройство, совмещающее в одном корпусе два девятифазных синхронных генератора переменного тока, два девятифазных выпрямителя и трехфазный синхронный генератор переменного тока (девятифазные синхронные генераторы необходимы для снижения коэффициента пульсаций).



**Рисунок 2** – ДЭМ в разрезе

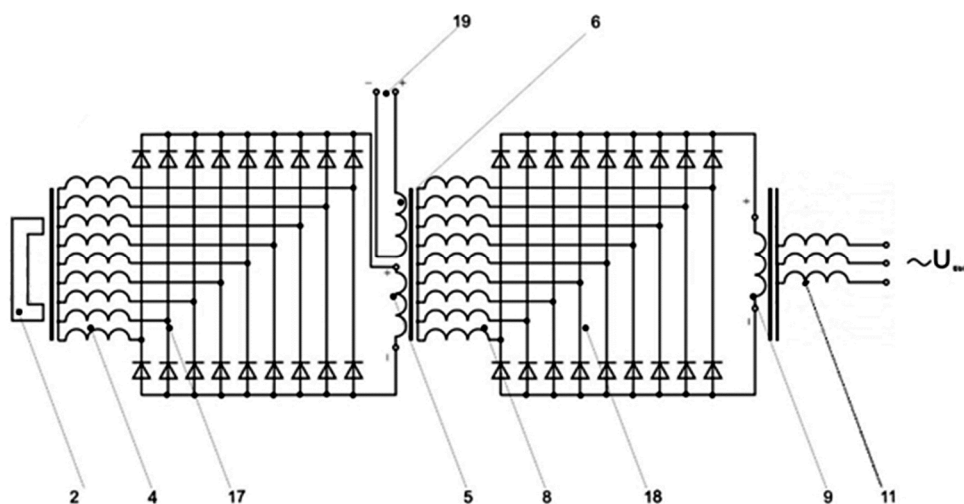


Рисунок 3 – Электрическая схема ДЭМ

ДЭМ [1] содержит (рис. 2 и рис. 3): корпус 1, постоянный многополюсный магнит 2 индуктора подвозбудителя [4], магнитопровод 3 с обмоткой 4 якоря подвозбудителя, однофазной обмоткой 5 возбуждения возбудителя и дополнительной обмоткой 6 возбуждения возбудителя; внутренний аксиальный магнитопровод 7 с многофазной обмоткой 8 якоря возбудителя и однофазной обмоткой возбуждения 9 основного генератора, аксиальный магнитопровод 10 с многофазной обмоткой 11 якоря основного генератора, вал 12, закрепленный в подшипниковых узлах 13 и 14 и жестко связанный с постоянным многополюсным магнитом 2 индуктора подвозбудителя посредством диска 15 и с внутренним аксиальным магнитопроводом 7 посредством диска 16, девятифазных выпрямителей 17 и 18, контакты 19 для подключения внешнего источника постоянного тока (например, солнечной батареи) к дополнительной обмотке 6 возбуждения возбудителя.

Однофазная обмотка 5 возбуждения возбудителя подключается к многофазной обмотке 4 якоря подвозбудителя через многофазный выпрямитель 17. Однофазная обмотка 9 возбуждения основного генератора подключается к многофазной обмотке 8 якоря возбудителя через многофазный выпрямитель 18. С трехфазной обмотки 11 якоря основного генератора трехфазная ЭДС может подаваться в сеть.

ДЭМ [1] работает следующим образом. При вращении вала 12 внешним механизмом (например, ветротурбиной) вместе с валом 12 приводятся во вращение постоянный многополюсный магнит 2 индуктора подвозбудителя и магнитопровод 7 с обмотками 8, 9 и выпрямителем 18. Создаваемый постоянным многополюсным магнитом 2 магнитный поток взаимодействует с многофазной обмоткой 4 якоря подвозбудителя, уложенной в пазы магнитопровода 3 со стороны постоянного многополюсного магнита 2, и наводит в ней многофазную систему ЭДС, которая выпрямляется девятифазным выпрямителем 17 и подается на однофазную обмотку 5 возбуждения возбудителя, уложенную в пазы внутреннего аксиального магнитопровода 3 со стороны магнитопровода 7. При этом в однофазной обмотке 5 возбуждения возбудителя создается магнитный поток.

Магнитный поток, созданный однофазной обмоткой 5 возбуждения возбудителя, складывается с направленным согласно магнитным потоком, создаваемым дополнительной обмоткой 6 (протекание тока по обмотке 6 обеспечивается подачей на эту обмотку через контакты 19 постоянного напряжения, например, от солнечных батарей). По принципу суперпозиции магнитных полей магнитные потоки, создаваемые обмотками 5 и 6, суммируются. Результирующий магнитный поток наводит во вращающейся обмотке 8 якоря возбудителя, уложенной в пазы аксиального магнитопровода 7 со стороны аксиального магнитопровода 3, многофазную систему ЭДС, которая выпрямляется многофазным (на рис. 3 – девятифазным) выпрямителем 18, и подается на однофазную обмотку 9 возбуждения основного генератора, уложенную в пазы аксиального магнитопровода 7 со стороны аксиального магнитопровода 10. При этом, в однофазной обмотке 9 возбуждения основного генератора создается магнитный поток, который наводит в обмотке 11 якоря основного генератора трехфазную ЭДС для подачи в сеть.

Схема Система электроснабжения локальных объектов с использованием ДЭМ имеет следующие преимущества перед схемой Системой электроснабжения на базе инвертора:

- в предложенной установке одновременно одновременно преобразуется механическая энергия вращения и электрическая энергия постоянного тока в электрическую энергию переменного тока
- по характеру выходное напряжение ДЭМ представляет собой напряжение переменного тока, что снимает необходимость в применении инвертора.

В ходе математического моделирования в среде MATLAB [5] были рассчитаны и построены зависимости величины и частоты выходного напряжения ДЭМ от скорости ветра, которые представлены на рисунке 5 и рисунке 6

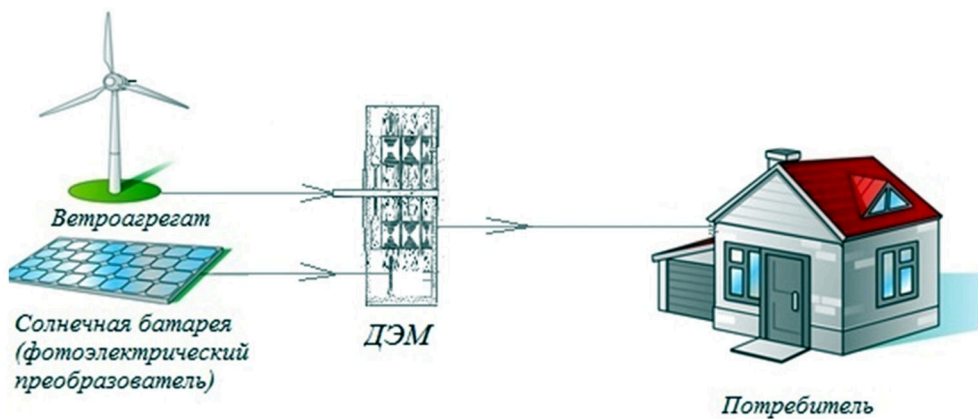


Рисунок 4 – Схема электроснабжения с использованием ДЭМ

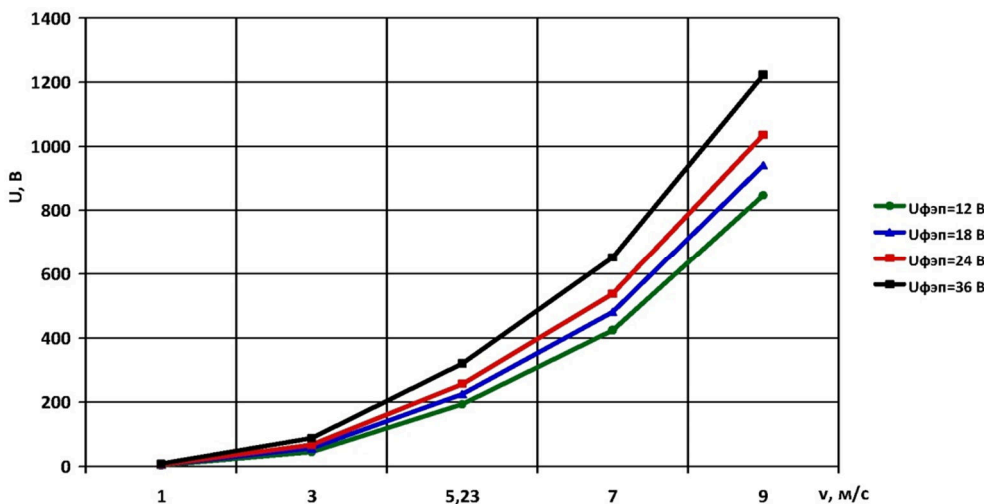


Рисунок 5 – Зависимость выходного напряжения ДЭМ от скорости ветра при изменении напряжения на выходе ФЭП

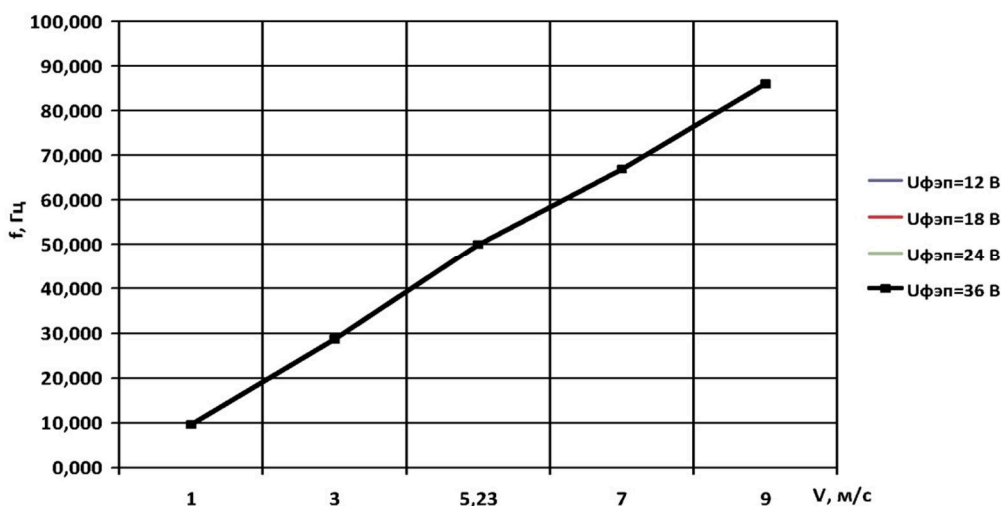


Рисунок 6 – Зависимость частоты выходного сигнала ДЭМ от скорости ветра при изменении напряжения на выходе ФЭП

Анализ характеристик, приведённых на рисунке 5 и рисунке 6 позволяет сделать следующие выводы: с увеличением скорости ветра увеличиваются величина выходного напряжения ДЭМ и частота, что ставит на повестку дня стабилизацию выходного напряжения ДЭМ по напряжению и частоте.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Краснодарского края в рамках научного проекта № 16-48-230500 а(р).



**Литература:**

1. Пат. 2561504 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> H02K19/38, H02K19/00. Аксиальный двухходовый бесконтактный ветро-солнечный генератор / Б.Х. Гайтов, Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, Л.Е. Копелевич, А.В. Самородов; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный технологический университет» (ФГБОУ ВО «КубГТУ») (RU). – № 2014124436; заявл. 2014-06-16; опубл. 27.08.2015, Бюл. № 24. – 7 с.: ил.
2. Ветро-солнечный генератор для систем автономного электроснабжения / Б.Х. Гайтов [и др.] // Электричество. – 2018. – № 1. – С. 19–27.
3. Ветро-солнечный генератор / Б.Х. Гайтов [и др.] // Энергосбережение и водоподготовка. – 2017. – № 6 (110). – С. 25–30.
4. Ветро-солнечный генератор / Б.Х. Гайтов [и др.] // Материалы Международной конференции «Actual Issues of Mechanical Engineering» 2017 (AIME 2017). Серия книг «AER-Advances in Engineering Research». – Т. 133. – С. 343–349.
5. Гайтов Б.Х., Кашин А.Я., Схашок А.О. Математическая модель ветро-солнечного генератора для объектов нефтегазовой отрасли в среде MATLAB // Булатовские чтения : Материалы I международной научно-практической конференции (31 марта 2017 г.) в 5 т. Т. 5. – Краснодар : Издательский Дом – Юг, 2017. – С. 17–21.

**References:**

1. Pat. 2561504 Russian Federation, MPK<sup>7</sup> H02K19/38, H02K19/00. Axial two-input non-contact wind-solar generator / B.Kh. Gaitov, Ya.M. Kashin, A.Ya. Kashin, L.E. Kopelevich, A.V. Samorodov; applicant and patent holder Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Kuban State Technological University» (FGBOU VO «KubGTU») (RU). – № 2014124436; claimed. 2014-06-16; publ. August 27, 2015, Bul. № 24. – 7 p.
2. Wind generator for autonomous power supply systems / B.Kh. Gaitov [etc.] / Electricity. – 2018. – № 1. – P. 19–27.
3. Gaitov B.Kh. Wind-solar generator / B.Kh. Gaitov [etc.] // Energy saving and water treatment. – 2017. – № 6 (110). – P. 25–30.
4. Wind-solar generator / B.Kh. Gaitov [etc.] // Materials of the International Conference «Actual Issues of Mechanical Engineering» 2017 (AIME 2017). AER-Advances in Engineering Research. – V. 133. – P. 343–349.
5. Gaytov B.H., Kashin A.Ya., Skhashok A.O. Mathematical model of the vetro-solar generator for objects of oil and gas branch in the environment of MATLAB // Bulatovsky readings : Materials I of the international scientific and practical conference (on March 31, 2017) in 5 v. V. 5. – Krasnodar : Publishing house – South, 2017. – P. 17–21.



УДК 621.313.33

## БЕСКОНТАКТНЫЙ МНОГОФАЗНЫЙ ГЕНЕРАТОР ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

### NON-CONTACT MULTIPHASE AC GENERATOR

**Кашин Яков Михайлович**

кандидат технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой электротехники  
и электрических машин,  
Кубанский государственный технологический университет  
jlms@mail.ru

**Ким Владислав Анатольевич**

студент,  
Кубанский государственный технологический университет  
vladk-kub@mail.ru

**Войнов Александр Владимирович**

студент,  
Кубанский государственный технологический университет  
Trapasha@mail.ru

**Аннотация.** Приводятся конструкции генераторных установок для электроснабжения локальных объектов, их анализ, дана конструкция перспективного генератора.

**Ключевые слова:** аксиальный магнитопровод, массогабаритные показатели.

**Kashin Yakov Mikhaylovich**

Candidate of Technical Sciences,  
Associate Professor,  
Head of the Department of Electrical  
Engineering and Electrical Machines,  
Kuban State Technological University  
jlms@mail.ru

**Kim Vladyslav Anatolyevich**

Student,  
Kuban State Technological University  
vladk-kub@mail.ru

**Voynov Alexander Vladimirovich**

Student,  
State Technological University  
Trapasha@mail.ru

**Annotation.** Provides construction of generator sets for power supply of local objects, their analysis, Dana design perspective.

**Keywords:** axial magnetic core, physical indicators.

Для электропитания локальных объектов, например воздушных судов, необходимы генераторы, обладающие высокой надежностью и хорошими массогабаритными показателями.

Авторами на протяжении ряда лет ведутся работы по решению этих задач. Для этого разработан бесконтактный многофазный генератор переменного тока.

Известный бесконтактный синхронный генератор с вращающимися выпрямителями [1, 2], содержащий корпус, в котором на одном валу установлены три электрические машины радиальной конструкции: подвозбудитель, возбудитель, и основной генератор, при этом подвозбудитель, являющийся магнитоэлектрической синхронной машиной с вращающимся индуктором и неподвижной обмоткой якоря, состоит из вращающегося постоянного многополюсного магнита индуктора подвозбудителя с радиально направленным магнитным полем и магнитопровода с установленной на статоре обмоткой якоря подвозбудителя; возбудитель, являющийся трехфазной синхронной машиной с установленной на статоре обмоткой возбуждения и вращающейся обмоткой якоря, состоит из магнитопровода с обмоткой возбуждения возбудителя и магнитопровода с обмоткой якоря возбудителя; основной генератор, являющийся трехфазной синхронной машиной с вращающейся обмоткой возбуждения и установленной на статоре обмоткой якоря, состоит из магнитопровода с обмоткой возбуждения основного генератора и магнитопровода с обмоткой якоря основного генератора, обладает рядом недостатков: технология изготовления такого генератора сложна из-за необходимости штамповки листов магнитопроводов статора и ротора, необходимости выполнения обмоточных работ внутри цилиндрического статора. Кроме того, стоимость такого генератора велика из-за большого расхода электротехнической стали, связанного с высоким процентом ее отходов при штамповке.

Недостатком такого генератора являются также низкие массогабаритные показатели (большой осевой размер), так как входящие в его состав подвозбудитель, возбудитель и основной генератор выполнены радиальными, а как известно, из всех электрических машин (ЭМ) одинаковой мощности ЭМ радиальной конструкции имеют наибольший осевой размер.

Известен аксиальный бесконтактный генератор постоянного тока [3], содержащий корпус, корпус; подвозбудитель, состоящий из постоянных магнитов индуктора подвозбудителя и магнитопровода с рабочей обмоткой подвозбудителя; возбудитель, состоящий из магнитопровода с обмоткой возбуждения возбудителя и магнитопровода с рабочей обмоткой возбудителя; и основной генератор, состоящий из магнитопровода с обмоткой возбуждения основного генератора и магнитопровода с ра-



бочей обмоткой основного генератора, установленные на одном валу. Постоянные магниты индуктора подвозбудителя и магнитопроводы, в пазы которых уложены обмотки подвозбудителя, возбудителя и основного генератора, выполнены аксиальными. Боковые аксиальные магнитопроводы жестко установлены в корпусе, а постоянные магниты индуктора подвозбудителя и внутренний аксиальный магнитопровод жестко установлены на валу с возможностью вращения относительно боковых аксиальных магнитопроводов, при этом постоянные магниты индуктора подвозбудителя установлены с торца одного бокового аксиального магнитопровода, а внутренний аксиальный магнитопровод установлен между боковыми аксиальными магнитопроводами, внутренний аксиальный магнитопровод и боковой аксиальный магнитопровод, с торца которого установлены постоянные магниты индуктора подвозбудителя, выполнены с двумя активными торцовыми поверхностями с пазами, а другой боковой аксиальный магнитопровод выполнен с одной активной торцовой поверхностью с пазами, при этом в пазы бокового аксиального магнитопровода с двумя активными торцовыми поверхностями со стороны постоянных магнитов подвозбудителя уложена многофазная рабочая обмотка подвозбудителя, а с противоположной стороны уложена однофазная обмотка возбуждения возбудителя, которая подключена к рабочей обмотке подвозбудителя через многофазный двухполупериодный выпрямитель, в пазы внутреннего аксиального магнитопровода со стороны обмотки возбуждения возбудителя уложена многофазная рабочая обмотка возбудителя, а с противоположной стороны уложена однофазная обмотка возбуждения основного генератора, которая подключена к рабочей обмотке возбудителя через многофазный двухполупериодный выпрямитель, при этом в пазы бокового аксиального магнитопровода с одной активной торцовой поверхностью уложена многофазная рабочая обмотка основного генератора, которая подключена к многофазному выпрямителю.

Однако недостатком известного из [3] генератора также являются низкие массогабаритные показатели (большие размеры при малой массе), обусловленные большими осевыми и диаметральными размерами генератора и нерациональным использованием свободного пространства внутри его корпуса.

Большие осевые и диаметральные размеры обусловлены тем, что аксиальные постоянные магниты индуктора подвозбудителя и аксиальные магнитопроводы, в которые уложены обмотки подвозбудителя и возбудителя, имеют такие же размеры, как и аксиальные магнитопроводы основного генератора, при этом мощность подвозбудителя и возбудителя значительно ниже мощности основного генератора.

Кроме того, низкие массогабаритные показатели (большие диаметральные размеры) известного из [3] генератора обусловлены тем, что входящие в его состав подвозбудитель, возбудитель и основной генератор выполнены аксиальными, а как известно, из всех ЭМ одинаковой мощности ЭМ аксиальной конструкции имеют наибольший диаметр.

На рисунке 1 представлен общий вид разработанного бесконтактного многофазного генератора переменного тока [4] в разрезе.

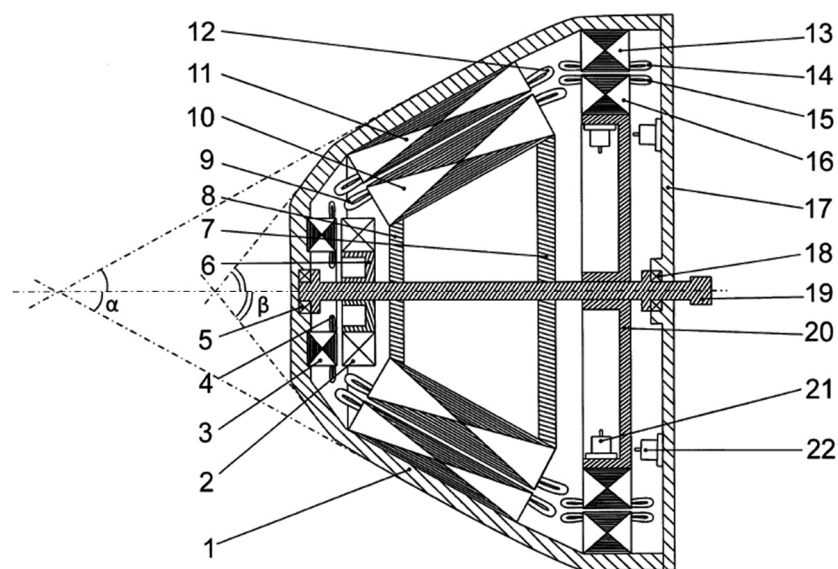


Рисунок 1

Бесконтактный многофазный генератор переменного тока (рис. 1) содержит: корпус 1, в котором установлены подвозбудитель, возбудитель и основной генератор.

Корпус 1 разделен на переднюю, заднюю и среднюю секции, при этом передняя и средняя секции выполнены в форме усеченных конусов с различными углами раствора  $\alpha$  и  $\beta$ , а задняя секция выполнена цилиндрической, при этом внешнее основание задней секции образовано крышкой 17



корпуса 1, основание средней секции совпадает с внутренним основанием задней секции, а усеченная часть средней секции совпадает с основанием передней секции.

Подвозбудитель состоит из расположенных внутри усеченной части средней секции корпуса 1 аксиальных постоянных магнитов 2 индуктора подвозбудителя, жестко установленных посредством первого диска 6 на валу 19, закрепленном в переднем 5 и заднем 18 подшипниковых узлах, и жестко установленного на внутренней стороне усеченной части передней секции корпуса 1 аксиального магнитопровода 3, выполненного с одной активной торцевой поверхностью с пазами, расположенными со стороны аксиальных постоянных магнитов 2 индуктора подвозбудителя, в которые уложена многофазная обмотка 4 якоря подвозбудителя.

Возбудитель состоит из жестко закрепленного на внутренней боковой поверхности задней секции корпуса 1 радиального магнитопровода 13 с однофазной обмоткой 14 возбуждения возбудителя, подключенной к многофазной обмотке 4 якоря подвозбудителя через многофазный двухполупериодный выпрямитель 22, закрепленный на крышке 17, и радиального магнитопровода 16 с многофазной обмоткой 15 якоря возбудителя, жестко закрепленного посредством четвертого диска 20 на валу 19.

Основной генератор состоит из выполненных в форме усеченного конуса жестко закрепленного посредством второго 8 и третьего 7 дисков на валу 19 магнитопровода 10 с однофазной обмоткой 9 возбуждения основного генератора, подключенной к многофазной обмотке 15 якоря возбудителя через многофазный двухполупериодный выпрямитель 21, и магнитопровода 11 с многофазной обмоткой 12 якоря основного генератора, жестко закрепленного на внутренней боковой поверхности средней секции корпуса 1. Магнитопровод 10 с однофазной обмоткой 9 возбуждения основного генератора и магнитопровод 11 с многофазной обмоткой 12 якоря основного генератора выполнены в форме усеченных конусов с различными углами раствора  $\alpha$  и  $\beta$ .

Улучшение массогабаритных показателей достигается путем уменьшения осевых и диаметральных размеров генератора при его неизменной мощности и рационального использования свободного пространства внутри корпуса генератора.

#### Литература:

1. Кашин Я.М., Кириллов Г.А., Ракло А.В. Авиационное оборудование самолетов. Часть 1 / Мин-во обороны Рос. Федерации, Красн. высш. воен. авиац. уч-ще летчиков. – Краснодар : КВВАУЛ, 2006. – С. 33–35.
2. Кашин Я.М., Кириллов Г.А., Варенов А.Б. Авиационные приборы и пилотажно-навигационные комплексы. Часть 1. Электрооборудование воздушных судов. – Краснодар : филиал ВУНЦ ВВС ВВА, 2012. – С. 18–20.
3. Аксиальный бесконтактный генератор постоянного тока / Гайтов Б.Х., Кашин Я.М., Гайтова Т.Б., Кашин А.Я. / Патент на изобретение RUS № 2402858, 12.10.2009.
4. Бесконтактный многофазный генератор переменного тока / Кашин Я.М., Кашин А.Я., Князев А.С., Войнов А.В. / Патент на изобретение RUS № 2633374, 15.11.2016.

#### References:

1. Kashin Ya.M., Kirillov G.A., Raklo A.V. Avionics aircraft. Part 1. – Krasnodar : KVVAUL, 2006. – P. 33–35.
2. Kashin Ya.M., Kirillov G.A., Varenov A.B. Aviation devices and pilot-navigating complexes. Part 1: Aircraft electrical equipment. – Krasnodar : branch AIR FORCE MILITARY VVA, 2012. – P. 18–20.
3. Axial proximity DC generator / Gajtov B.H., Kashin Ya.M., Gajtova T.B., Kashin A.Ya. / patent for invention № 2402858 RUS, 12.10.2009.
4. Touchless multiphase AC generator / Kashin Ya.M., Kashin A.Ya., Knyazev A.S., Voinov A.V. / patent for invention № 2633374 RUS, 15.11.2016.



УДК 621.313

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ УСТАНОВКИ ДЛЯ СЕПАРИРОВАНИЯ НЕФТИ СОВМЕЩЕННОЙ КОНСТРУКЦИИ

### MATHEMATICAL MODEL OF THE TEMPERATURE FIELD OF A UNIT FOR OIL SEPARATION OF A COMBINED STRUCTURE

**Копелевич Лев Ефимович**

кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры электротехники и электрических машин,  
Кубанский государственный технологический университет  
kkllev@mail.ru

**Ким Владислав Анатольевич**

студент,  
Кубанский государственный технологический университет  
vladk-kub@mail.ru

**Шаршак Алексей Александрович**

студент,  
Кубанский государственный технологический университет  
vip.sharshak@mail.ru

**Аннотация.** Данная статья посвящена обзору математической модели установки для сепарирования нефти выполненной на базе двигателя-сепаратора.

**Ключевые слова:** сепаратор, сепарация нефти, математическая модель.

**Kopelevich Lev Efimovich**

Candidate of Technical Sciences,  
Associate Professor,  
Associate Professor of the Department of  
Electrical Engineering  
and Electrical Machines,  
Kuban State Technological University  
kkllev@mail.ru

**Kim Vladislav Anatolievich**

Student,  
Kuban State Technological University  
vladk-kub@mail.ru

**Sharshak Alexey Alexandrovich**

Student,  
Kuban State Technological University  
vip.sharshak@mail.ru

**Annotation.** This article is devoted to the review of the mathematical model of the unit for oil separation performed on the basis of the separator engine.

**Keywords:** separator, oil separation, mathematical model.

Установка для сепарирования нефти [1] является одним из результатов работ научного коллектива кафедры электротехники и электрических машин ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет» по направлению исследований, связанных с повышением энергоэффективности объектов нефтегазовой отрасли.

Установка для сепарирования нефти, представленная на рисунке 1 содержит: корпус 1 сепаратора, смонтированный в нем статор электродвигателя, состоящий из двух частей (цилиндрическая часть 2-1, аксиальная часть 2-2), с обмоткой 3 двух частей статора, вокруг лобовых частей которой установлены трубки 4, залитые компаундом 5, барабан сепаратора 6, являющийся одновременно ротором электродвигателя, жестко связанный с валом 7, подогревателя нефти 15, соединительных трубок 16 и 17. Вал 7 установлен в подшипниковых опорах 8 и 9. Барабан сепаратора 6 состоит из основания 10 с центральной трубкой, разделительных тарелок 11, крышки 12, тарелкодержателя 13, затяжного кольца 14. Соединительная трубка 16 соединяет подогреватель нефти 15 с входом трубок 4, а соединительная трубка 17 соединяет выход трубок 4 с внутренней частью барабана сепаратора 6.

При подключении к сети обмотки 3 цилиндрической 2-1 и аксиальной частей 2-2 статора возникает вращающееся магнитное поле, которое наводит вихревые токи в барабане 6, являющегося одновременно ротором электродвигателя. Взаимодействие вращающегося магнитного поля, созданного в частях статора 2-1 и 2-2, и магнитного поля, созданного вихревыми токами в барабане (массивном роторе) 6, приводит к возникновению вращающегося момента, в результате чего барабан 6 приходит во вращение, совместно с валом 7. Неочищенная нефть (газоводонефтяная смесь) подается в подогреватель нефти 15, где частично происходит подогрев неочищенной нефти до определенной температуры. После подогревателя нефти 15, частично подогретая нефть по соединительной трубке 16 подается на вход трубок 4. Проходя по трубкам 4, нефть дополнительно подогревается за счет тепловыделения в обмотках 3 цилиндрической 2-1 и аксиальной 2-2 частей статора и в магнитопроводах цилиндрической 2-1 и аксиальной 2-2 частей статора. Подогреваясь в трубках 4 нефть, одновременно, охлаждает магнитопроводы цилиндрической 2-1 и аксиальной частей 2-2 статора и обмотку 3 двух частей статора 2. При выходе из трубок 4 нефть по соединительной трубке 17 подается в барабан (массивный ротор) 6, где она поступает через центральную трубку в днище барабана, а затем в каналы тарелкодержателя 13. Находясь в нижней части барабана 6, нефть дополнительно подогревается за счет тепловыделения в торцевой и цилиндрической частях барабана 6,



приобретая необходимую для сепарирования температуру. Находясь в нижней части барабана 6 нефть подвергается воздействию электромагнитного поля, как с аксиальной, так и с цилиндрической частей статора, что способствует улучшению процесса сепарирования. Сам процесс сепарирования нефти происходит в разделительных тарелках 11. Продукты сепарирования (очищенная нефть, газ и вода) выводятся из барабана сепаратора.

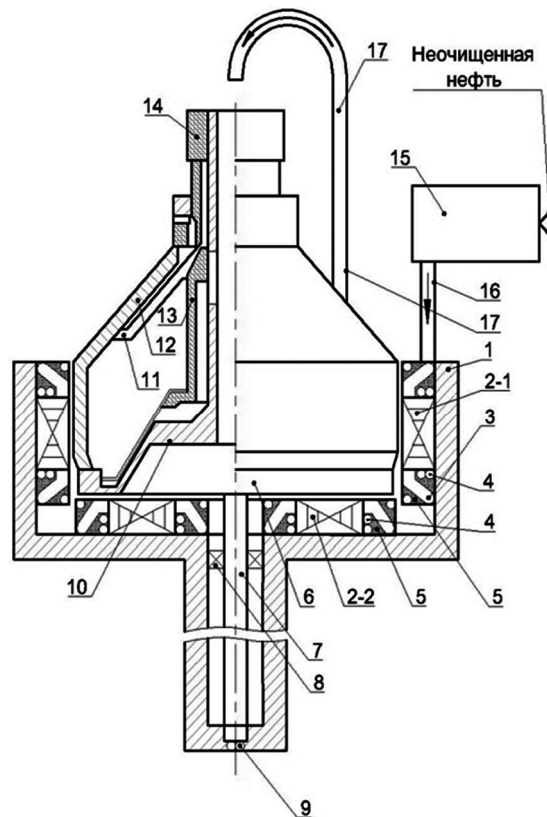


Рисунок 1 – Установка для сепарирования нефти

На рисунке 2 схематично показана приближенная расчетная модель установки для сепарирования нефти совмещенной конструкции, у которой гладкий массивный ротор является рабочим органом, в каналах которого протекает сепарируемый продукт, являющийся одновременно хладагентом. Лобовые части обмотки статора и наружная часть сердечника статора обвиты трубопроводом, по которому протекает продукт (хладагент). На рисунке 2 стрелками схематично показано движение сепарируемого продукта.

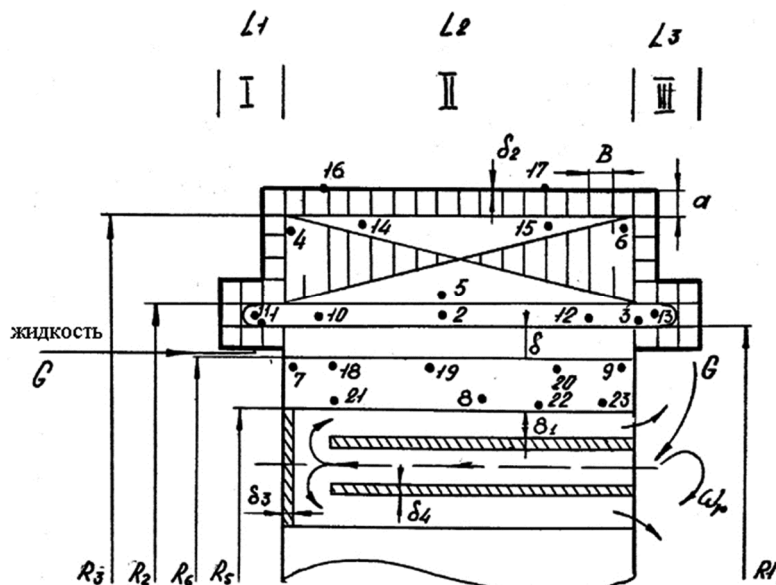


Рисунок 2 – Расчетная модель установки для сепарирования нефти совмещенной конструкции



В (1) приведена математическая модель температурного поля установки для сепарирования нефти совмещенной конструкции на различных участках конструкции. Индекс « $S_1$ » соответствует обмоткам фаз статора, индекс « $S_2$ » – обмоткам статора, по которым протекают эквивалентные вихревые токи; « $r$ » – ротор.

$$\left\{ \begin{array}{l} C_M \rho_M \frac{\partial T_{S1}}{\partial t} = \lambda_{Mr} \left( \frac{\partial^2 T_{S1}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_{S1}}{\partial r} \right) + \left( \frac{\partial^2 T_{S1}}{\partial Z^2} \right) \lambda_{Mz} + \frac{R_{S1}}{V_{S1}} (i_{S1L}^2 + i_{S1\beta}^2 + i_{S1\gamma}^2) \\ \qquad R_1 \leq r \leq R_2 \quad 0 \leq Z \leq L_5 \\ C_S \rho_S \frac{\partial T_{S2}}{\partial t} = \lambda_{Sr} \left( \frac{\partial^2 T_{S2}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_{S2}}{\partial r} \right) + \left( \frac{\partial^2 T_{S2}}{\partial Z^2} \right) \lambda_{Sz} + \frac{R_{S2}}{V_{S2}} e^{r\sqrt{2\mu_S\gamma_S f_0}} (i_{S2L}^2 + i_{S2\beta}^2 + i_{S2\gamma}^2) \\ \qquad R_2 \leq r \leq R_3 \quad L_1 \leq Z \leq L_2 \\ C_r \rho_r \frac{\partial T_r}{\partial t} = \lambda_r \left( \frac{\partial^2 T_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_r}{\partial r} \right) + \left( \frac{\partial^2 T_r}{\partial Z^2} \right) + \frac{R_r}{V_r} e^{r\sqrt{2\mu_r f_0 S \gamma_r}} (i_{rL}^2 + i_{r\beta}^2 + i_{r\gamma}^2) \\ \qquad R_5 \leq r \leq R_6 \quad L_1 \leq Z \leq L_2 \end{array} \right. \quad (1)$$

где  $C_M, C_S, C_r$  – удельные теплоемкости обмотки фазы статора, сердечника статора и ротора;  $\rho_M, \rho_S, \rho_r$  – плотности вещества обмотки фазы статора, сердечника статора и ротора;  $T_{S1}, T_{S2}, T_r$  – мгновенные значения температур;  $\lambda_{Mr}, \lambda_{Mz}, \lambda_{Sr}, \lambda_{Sz}, \lambda_r$  – коэффициенты теплопроводности мотки фазы и сердечника статора по осям и ротора;  $r, z$  – цилиндрические координаты;  $R_{S1}, R_{S2}, R_r$  – активные сопротивления обмоток статора и ротора по осям,  $L, \beta, \gamma$  зависящие соответственно от температур  $T_{S1}, T_{S2}, T_r$ ;  $V_r, V_{S1}, V_{S2}$  – объем исследуемого узла машины;  $i_{S1L}, i_{S1\beta}, i_{S1\gamma}, i_{S2L}, i_{S2\beta}, i_{S2\gamma}, i_{rL}, i_{r\beta}, i_{r\gamma}$  – токи в обмотках статора и ротора по осям  $L, \beta, \gamma$ ;  $L_{S1}, L_{S2}, L_r$  – полные индуктивности обмоток статора и ротора по осям  $L, \beta, \gamma$ ;  $\mu_S, \mu_r$  – относительная магнитная проницаемость стали сердечника статора и ротора;  $f_0$  – частота сети;  $S$  – скольжение;  $\gamma_{S1}, \gamma_r$  – удельные проводимости материала, зависящие от температуры;

**Литература:**

1. Пат. 2593626 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> B04B5/10, B03C5/02, B01D17/06, B01D43/00, B04B9/02. Установка для сепарирования нефти / Копелевич Л.Е.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный технологический университет» (ФГБОУ ВО «КубГТУ») (RU). – № 2015110414/05; заявл. 2015-03-23; опублик. 10.08.2016, Бюл. № 22. – 7 с.: ил.

**References:**

1. Pat. 2593626 Russian Federation, МПК<sup>7</sup> B04B5/10, B03C5/02, B01D17/06, B01D43/00, B04B9/02. Installation for oil separation / Kopelevich L.E.; applicant and patent holder Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Kuban State Technological University» (FGBOU VO «KubSTU») (RU). – № 2015110414/05; claimed. 2015-03-23; publ. August 10, 2016, Bul. № 22. – 7 p.



УДК 620.91:621.472

## АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛОСКОГО КОНЦЕНТРАТОРА СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ЭЛЕКТРО-ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ВАХТОВЫХ ПОСЕЛКОВ НЕФТЯНИКОВ

### ANALYTICAL RESEARCHES OF THE FLAT CONCENTRATOR OF SOLAR ENERGY FOR ELECTRO-HEAT SUPPLY FIELD CAMPS OF OIL INDUSTRY WORKERS

**Кульбаракова М.Б.**Астраханский государственный технический университет  
id.yug2016@gmail.com**Руденко М.Ф.**

Астраханский государственный технический университет

**Руденко А.М.**

Астраханский государственный технический университет

**Аннотация.** Создание компактных, автономных, переносных, энергетически эффективных установок для обеспечения вахтовых поселков нефтяников электроэнергией и теплом от возобновляемых источников энергии в регионах с теплым климатом является в настоящее время важной научно-технической задачей. В представляемой работе рассматриваются комбинированные конструкции фотоэлементов собранных в треугольную форму и находящихся в плоских зеркальных концентраторах. Это позволяет создавать высокую освещенность фотоэлементов (оптическая концентрация свыше 5 раз) и осуществлять подвод тепловой энергии к элементу конструкции с трех сторон. В такой конструкции, возможно, отводить теплоту солнечного облучения посредством жидкостного теплоносителя потребителю и снижать температуру фотоэлементов, повышая эффективность его вольт-амперных характеристик. При этом солнечная батарея выполненная по такой конструкции будет компактна и экономически выглядеть более привлекательнее.

**Ключевые слова:** зеркальные концентраторы, фотоэлементы, солнечные батареи, компактность, эффективность.

**Kulbarakova M.B.**Astrakhan state technical university  
id.yug2016@gmail.com**Rudenko M.F.**

Astrakhan state technical university

**Rudenko A.M.**

Astrakhan state technical university

**Annotation.** Creation of compact, autonomous, figurative, energetically effective installations for providing field camps of oil industry workers with the electric power and heat from renewables in regions with warm climate is an important scientific and technical task now. In the represented work the combined designs of the photo cells collected in triangular shape and which are in flat mirror concentrators are considered. It allows to create the high illumination of photo cells (optical concentration over 5 times) and to carry out a supply of thermal energy to a design element from three parties. In such design, perhaps to allocate warmth of solar radiation by means of the liquid heat carrier for the consumer and to reduce temperature of photo cells, increasing efficiency of his volt-ampere characteristics. At the same time the solar battery executed on such design will be compact and to look more attractive economically.

**Keywords:** mirror concentrators, photo cells, solar batteries, compactness, efficiency.

Целью настоящего исследования является разработка и определение эффективности работы комбинированных фотоэлектрических элементов солнечных батарей для получения электрической и тепловой энергии за счёт применения плоских зеркальных концентраторов, выбора рациональной конструкции и взаимного расположения адаптирующей и отражающей поверхности при максимальной освещенности и оптимальной площади проникновения солнечных лучей на адаптирующие поверхности. Высокая компактность солнечных батарей, на основе исследуемых схемных конструктивных решений, позволит значительно снизить массогабаритные характеристики энергетических электротепловых станций. Это особенно важно для применения солнечных станций для бытовых нужд в вахтовых поселках нефтяников и буровиков, на объектах, имеющих ограниченные рабочие площади и отдаленных от линий электропередач в регионах с большим количеством солнечных дней. В совокупности с аккумуляторами электрической и тепловой энергии комбинированные системы можно применять для питания бытовой техники (холодильников, кондиционеров, телевизоров, компьютеров, освещения, получения теплой и горячей воды для душевых, стирки белья и одежды, мытья посуды и т.п.).

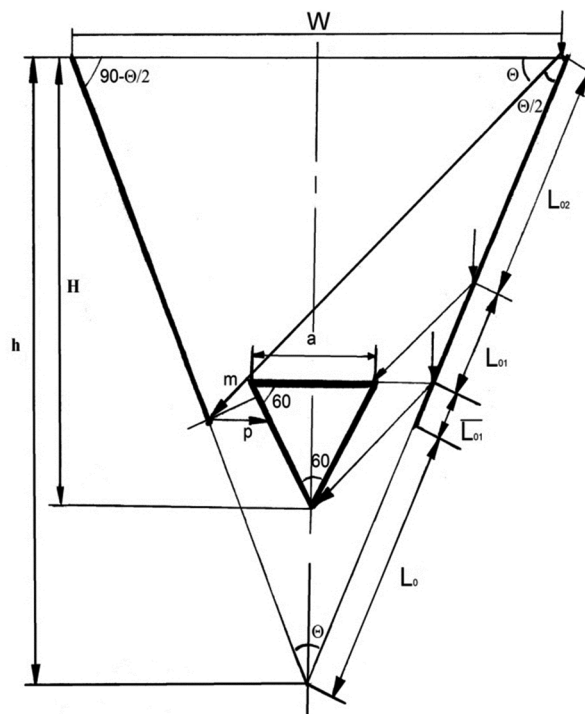
Данная цель достигается решением следующих задач:

- аналитическим расчетом максимальной степени освещения фотоэлементов энергией солнечной радиации, на основе определения коэффициента концентрации солнечного излучения на адаптирующую поверхность;
- аналитическим расчетом геометрических параметров для рационального взаиморасположения фотомодулей в плоских зеркалах и оптимальных углов раскрытия зеркал;
- определением потоков тепловой солнечной радиации на конфигурацию фотомодулей.





Рассмотрены конструкции адаптирующего устройства (плоских фотомодулей), имеющего форму правильного треугольника и расположенного в центре нескольких плоских зеркальных поверхностей, установленных под определенными фиктивными углами. Основные параметры устройства связаны аналитически с геометрическими параметрами зеркал через длину и угол их раскрытия (рисунок 1). Для простоты исследования площади поверхностей заменялись соответствующими профилями проекций конструкции на единицу длины.



**Рисунок 1** – Модель для определения оптико-экономического коэффициента концентрации на адаптирующее устройство треугольной формы при  $W = 3a$  и  $\Theta = 60^\circ$

Геометрические размеры фотозлектрического устройства связаны аналитически через типовой размер ширины фотомодуля  $a$  и фиктивный угол раскрытия зеркал  $\theta$  следующими зависимостями

$$H = (L_{01} + L_{02} + a) \cdot \cos \frac{\Theta}{2} ; \tag{1}$$

$$h = 2a \cdot \cos \frac{\Theta}{2} ; \tag{2}$$

$$L_{01} = \frac{2a \cdot \sin(60 - \Theta)}{\sin(90 + \Theta) \cdot \cos \frac{\Theta}{2}} ; \tag{3}$$

$$\overline{L_{01}} = \frac{\left[ 4a \cdot \sin \Theta - (L_{01} + L_{02}) \cdot \sin \left( 180 - \frac{3}{2} \Theta \right) \right]}{\cos \frac{\Theta}{2}} ; \tag{4}$$

$$L_{02} = \frac{a \cdot \sin \Theta}{\sin \frac{\Theta}{2}} ; \tag{5}$$

$$L = L_{01} + L_{02} + \overline{L_{01}} , \tag{6}$$

где  $L$  – ширина одного зеркала;  $H$  – высота концентрирующего устройства;  $h$  – фиктивная высота.

Исследовались возможности облучения адаптирующего устройства прямой и отражённой энергией солнечной радиации при различных входящих в концентратор потоках через размер  $W$  [1, 3–4].



В аналитическом исследовании принимались следующие допущения [5]: угол падения солнечных лучей на зеркальные поверхности равен углу отражения от нее; солнечные лучи падают строго параллельно плоскости симметрии модели концентратора; вся энергия солнечной радиации полностью отражается от зеркальных поверхностей и полностью поглощается площадями адаптирующей поверхности, независимо от углов отражения и поглощения солнечных лучей.

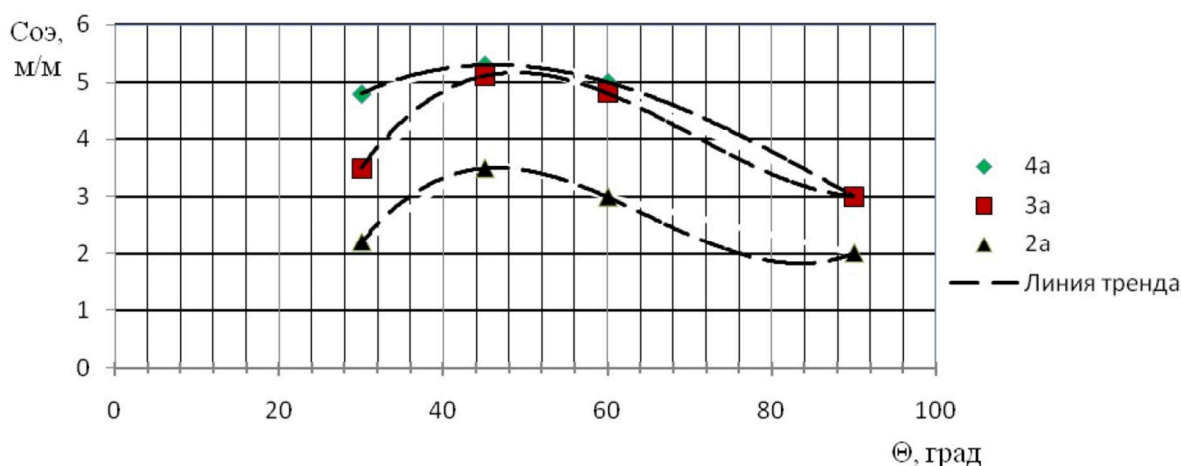
Оптико-экономический коэффициент концентрации оценивался по формуле:

$$C_{OЭ} = \frac{n \cdot a}{a}, \tag{7}$$

где  $n = 3$  – доля солнечной энергии, облучаемая адаптирующее устройство.

Рассматривались различные размеры величины  $W$  ( $W_1 = 2a$ ,  $W_2 = 3a$ ,  $W_3 = 4a$  при углах  $\Theta$  соответственно  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ ). На рисунке 1 изображен пример расчётной модели при  $W = 3a$  и  $\Theta = 60^\circ$ .

На рисунке 2 представлены 3 графика зависимости изменения концентрирующей способности (1) исследованного устройства при различных углах раскрытия зеркал и различных входящих величин солнечной радиации. Максимальное значение имеет график, у которого  $W = 4a$ . Он соответствует углам раскрытия  $\Theta = 45-50^\circ$ . Полученные зависимости можно описать аналитическими выражениями, дающими удовлетворительные совпадения с расчетными данными.



**Рисунок 2** – Аналитические зависимости значений концентрической способности проникающей солнечной радиации и длины конструкции адаптирующего устройства

Расчетные точки оптических коэффициентов эффективности можно связать расчетными зависимостями через политропные выражения, тогда получим следующие выражения:

для  $W = 2a$ :  $C_{OЭ} = 7E - 0,5 \cdot \Theta^3 - 0,013 \cdot \Theta^2 + 0,776 \cdot \Theta - 11,2$ ; (10)

для  $W = 3a$ :  $C_{OЭ} = 6E - 0,5 \cdot \Theta^3 - 0,011 \cdot \Theta^2 + 0,748 \cdot \Theta - 9,9$ ; (11)

для  $W = 4a$ :  $C_{OЭ} = 1E - 0,5 \cdot \Theta^3 - 0,003 \cdot \Theta^2 + 0,238 \cdot \Theta + 0,4$ . (12)

Проведены аналитические исследования склонения солнца, относительно центра зеркальных концентраторов, при различных углах раскрытия зеркал и ширины входящего потока. Эти исследования не дали существенного результата.

По полученным расчётным данным можно сделать следующие выводы. Таким образом, на основании вышеизложенного аналитического исследования можно рекомендовать конструкцию адаптирующего устройства со следующими параметрами  $W = 4a$ , углом раскрытия  $\Theta$  от  $35^\circ$  до  $60^\circ$  для фотомодульных конструкций.

Графики имеют явные экстремальные значения в пределах углов раскрытия зеркал равных  $40^\circ-50^\circ$ , максимальные значения при  $W = 4a$ ,  $C_{OЭ} = 5,78$ .

По полученным расчётным данным можно сделать следующие выводы. Аналитические исследования показывают, что при перпендикулярном облучении треугольных равносторонних конструкций адаптирующих устройств эффективными являются параметры концентраторов указанных выше. При этом при одинаковой компактности известных устройств и исследуемых энергетическая эффективность последних возрастает на 40 %, а номинальная стоимость снижается на 25 %. Для строгого выдерживания исследуемых параметров таких солнечных систем в конструкциях необходимо предусмотреть следящие за солнечным потоком системы.

**Литература:**

1. Ильин Р.А. Фотоэлектрические преобразователи как независимый источник электроэнергии на собственные нужды производственных предприятий / Р.А. Ильин, А.И. Давыденко // Символ науки. – 2015. – № 11. – С. 27–31.
2. Руденко М.Ф. Эффективность гелиоприёмных устройств с концентраторами для систем тепло- и хладоснабжения. – Саратов : ЛНЭ ОЭП СНЦ РАН, 2001. – 63 с.
3. Руденко М.Ф. Теоретические основы проектирования экологически безопасной гелиоэнергетической техники для производства теплоты / М.Ф. Руденко, Б.Ж. Туркпенбаева, Ю.В. Чивиленко. – Актау : из-во АКТГУ им. Ш. Есенова, 2008. – 165 с.
4. Руденко М.Ф. Фотоконцентраторы для морских и береговых энергетических комплексов / М.Ф. Руденко, А.И. Давыденко // Вестник АГТУ. Серия: Морская техника и технология. – 2017. – № 1 (февраль). – С. 89–96.

**References:**

1. Ilyin R.A. Photo-electric converters as an independent source of the electric power for own needs of manufacturing enterprises / R.A. Ilyin, A.I. Davydenko // Science Symbol. – 2015. – № 11. – P. 27–31.
2. Rudenko M.F. Efficiency of heliointakes with concentrators for systems warm and cold supply. – Saratov : LNE OEP SNTs RAS, 2001. – 63 p.
3. Rudenko M.F. Theoretical bases of design of ecologically safe heliopower equipment for production of warmth / M.F. Rudenko, B.Zh. Turkpenbayeva, Yu.V. Chivilenko. – Aktau : publishing house of AKTGU of Sh. Esenov, 2008. – 165 p.
4. Rudenko M.F. Photoconcentrators for sea and coastal power complexes / M.F. Rudenko, A.I. Davydenko // Messenger of AGTU. Series: Marine facilities and technology. – 2017. – № 1 (February). – P. 89–96.



УДК 665.63

**МОДЕРНИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРООБЕССОЛИВАЮЩИХ УСТАНОВОК (ЭЛОУ)****MODERNIZATION OF ELECTRO-DESALTING PLANTS (ELOU)****Мазуров Павел Сергеевич**

студент,  
Донской государственный технический университет  
Pavel.mazurov@bk.ru

**Тягливая Инна Николаевна**

кандидат химических наук,  
доцент кафедры «Химические технологии  
нефтегазового комплекса»,  
Донской государственный технический университет  
inna1704@gmail.com

**Аннотация.** В статье рассмотрены модернизированные виды электрообессоливающих установок, отмечены их преимущества, по сравнению с классической установкой. Сравняются отечественные ЭЛОУ с зарубежными.

**Ключевые слова:** электродегидратор, электрообессоливание, электрообезвоживание, первичная переработка нефти.

**Mazurov Pavel Sergeevich**

Student,  
Don State Technical University  
Pavel.mazurov@bk.ru

**Tyaglyvaya Inna Nikolaevna**

Ph.D., Associate Professor of «Chemical technologies of oil and gas complex»,  
Don State Technical University  
inna1704@gmail.com

**Annotation.** In the article the modernized types of electro-desalination plants are considered, their advantages are marked, in comparison with classical installation. ELOU compares the domestic with the foreign.

**Keywords:** electrical dehydrator, electro-desalination, elektro-dehydration, primary processing of oil.

**Н**ефтегазовая отрасль является одной из самых значимых в экономике государства и ее развитие напрямую связано с качеством используемого оборудования, в том числе и электротехнической оснастки. Особенностью применения электрооборудования в нефтяной отрасли, по мнению директора департамента энергетики «Газпром нефть» Валерия Лукьянова, это то, что 20 % стоимости нефти – это затраты на энергетику, следовательно, чем меньше будет затрат на оборудование, тем эффективнее будет добыча.

К видам электрооборудования нефтегазового комплекса относят: устройства нефтегазового комплекса, емкостные установки, энергетические установки, теплообменные агрегаты и колонные установки всевозможных типов и другие устройства, цель использования которых – преобразование химической энергии топлива в тепловую, транспортировка и передача механической энергии носителя (воды, газа, пара, воздуха в сжатом виде, кислорода, азота и др.).

Основу всех нефтеперерабатывающих заводов составляют установки первичной переработки нефти, посредством которых происходит разделение углеводородной смеси на отдельные фракции процессом ректификации в атмосферной и вакуумной колоннах, что служит сырьем для получения практически всех компонентов моторных топлив: бензина, дизельного топлива, смазочных масел; вторичных процессов и нефтехимических производств.

Из сырой нефти непосредственно одним процессом нельзя получить ни один товарный нефтепродукт (за исключением газов), все они получают последовательной обработкой на нескольких установках.

Первой в этой цепочке всегда стоит установка ЭЛОУ-АВТ. От эффективной работы этой секции зависит работа всех остальных звеньев технологической цепочки, выход и качество компонентов топлив и смазочных масел и технико-экономический показатель последующих процессов переработки нефтяного сырья.

Атмосферные и вакуумные трубчатые установки (АТ и ВТ) могут быть как самостоятельными установками так и комбинированными в одну (АВТ).

Одним из основных процессов предварительной подготовки скважинной продукции является обессоливание нефти с помощью промывки водой, и последующее обезвоживание водонефтяной эмульсии.

Выделяют следующие методы обезвоживания нефти: гравитационное отстаивание, термическая обработка, химическая обработка, обработка электрическим полем. На производстве применяют комбинированные методы.

Окончательное расслоение эмульсии при этом происходит в аппаратах, реализующих принцип обработки электрическим полем – электродегидраторах.

Установка ЭЛОУ-АВТ является комбинированной установкой, сочетающей в себе 2 блока для первичной переработки нефти – это электрообессоливающая установка, или электродегидратор и атмосферно-вакуумный блок.

Задачей ЭЛОУ является отделение воды и солей для дальнейшего её разделения на фракции в атмосферно-вакуумном блоке АВТ, посредством ректификации в атмосферных и вакуумных колоннах. Следует отметить, что применение высокого напряжения при деэмульсации не безопасно



т.к. может стать причиной выхода из строя проходных изоляторов, а также чрезмерная обводненность нефти может приводить к короткому замыканию между электродами, что является недостатками работы классической установки электрообессоливания. Наряду с этим, аппараты электрической (электростатической) дегидрации имеют относительно большие габариты. А в результате контакта с агрессивной водонефтяной эмульсией корродируют электродов и металлический корпус дегидратора. Наблюдается ухудшение параметров работы электродегидратора из-за повышения проводимости нефтей, что приводит к стеканию электрических зарядов с капель воды. Проводимость нефти увеличивается с увеличением температуры. Все вышеперечисленные процессы существенно снижают производительность электродегидратора.

Однако, согласно патентной информации, разработан способ обезвоживания и обессоливания нефти, сущность которого в том, что в аппарат подают обратную водонефтяную эмульсию при значениях температуры от величины, при которой происходит застывание нефти, при этом используют изменяющийся во времени магнитный поток, который наводят путем подачи переменного напряжения от 110 до 3000 В на водонефтяную эмульсию переменным электрическим током в обмотке индуктора через корпус аппарата, выполненного из диэлектрического материала, что приводит к укрупнению и слиянию капель водонефтяной эмульсии.

Описанное устройство имеет меньшие размеры и позволяет увеличить производительность процесса обезвоживания и обессоливания нефти. К отличительным особенностям следует также отнести возможность протекания процесса подогрева нефтяных эмульсий, их обезвоживание и обессоливание индукционным способом и осуществление процесса деэмульсации на низком напряжении, что улучшает электробезопасность, снижает число используемых трансформаторов и не приводит к коротким замыканиям, вызванным повышенной обводненностью нефти [1].

Для повышения глубины обезвоживания и увеличения удельной производительности за счет сокращения времени обработки нефтепродуктов используют аппарат, содержащий дополнительно число источников напряжения равное количеству секции, к каждому из которых подключена соответствующая секция многосекционного блока электродной системы, размещенного со стороны входного патрубка, который выполнен в виде совокупности плоских металлических перфорированных электродов чередующейся полярности, установленных вертикально и параллельно друг другу. Использование предложенного аппарата позволяет вести обработку нефтепродуктов в электрическом поле при значениях напряженности поля в несколько раз больших, чем в известных устройствах, что позволяет сократить время обработки и получить продукт высокого качества [2].

Еще одним из новейших электродегидраторов является аппарат, состоящий из цилиндрического корпуса, сверху которого находится проходной изолятор, а внизу – сопло для подачи исходной эмульсии и штуцер для вывода обратной эмульсии и трубчатый электрод. Эмульсия обрабатывается в электрическом поле, напряжение которого снижается по ходу потока, образуются несколько контуров циркуляции эмульсии, что обеспечивает эффективную коалесценцию капель воды в эмульсии и их укрепление. Изобретение обеспечивает оптимальные условия для коалесценции капель воды разных размеров, всегда содержащихся в водяной эмульсии, облегчает последующее отделение воды с содержащимися в них солями из нефти и улучшает качество обессоливания нефти [3].

В рамках исследования современных технологий подготовки и переработки природных ресурсов, является актуальной задача о сопоставлении отечественных и зарубежных технических решений в электродегидраторах.

В отечественной промышленности выделяют три принципиальных исполнения электродегидраторов: вертикальные, шаровые и горизонтальные. Вертикальные электродегидраторы представляют собой сосуд цилиндрической формы с полусферическим дном. Внутри сосуда на подвесных изоляторах закрепляются два горизонтальных электрода, собранных из концентрических колец. Основной особенностью вертикальных электродегидраторов является их малый номинальный объем – от 5 до 32 м<sup>3</sup>. Рабочее давление – до 1,3 МПа. Их применение экономически целесообразно при сравнительно небольшой производительности технологического процесса.

Шаровые электродегидраторы представляют собой сферические сосуды номинальным объемом до 600 м<sup>3</sup>. За счет значительного объема, в них размещается до трёх сырьевых вводов с тремя парами электродов. Однако, такие аппараты рассчитаны на работу при сравнительно низких давлениях – до 0,7 МПа. В настоящее время не используются.

Горизонтальные электродегидраторы представляют собой цилиндрические емкости с подвесной горизонтальной системой электродов, расположенной по всей площади аппарата. Они получили наибольшее распространение на современных технологических линиях. Преимуществами горизонтальных электродегидраторов являются наиболее высокое рабочее давление – до 1,6 МПа и широкий диапазон вариации объема аппарата, в зависимости от длины емкости. В настоящее время отечественная промышленность выпускает горизонтальные электродегидраторы номинальным объемом 63–200 м<sup>3</sup> [4].

Сложная гидродинамическая структура потоков способствует увеличению числа столкновений между каплями воды, равномерно распределяет их вдоль межэлектродной области.

Для интенсификации процесса электрокоалесценции эмульсий ЗАО «НЕФТЕХ» рекомендует применять трехэлектродную систему с переменным расстоянием между электродами. Такая кон-



струкция обеспечивает большой объем охвата водонефтяной эмульсии электрическим полем, за счет электродных систем.

Ступенчатое уменьшение напряженности электрического поля по высоте аппарата позволяет снизить вероятность диспергирования крупных капель, расположенных ниже заземленного электрода.

Вместе с тем, конструктивное исполнение внутренней части импортных аппаратов обеспечивает более высокие параметры производительности, качества выходного продукта и безопасности работы.

Один из зарубежных аппаратов для электрообезвоживания и обессоливания нефти – аппарат VIEC (Vessel Internal Electrostatic Coalescer), который представляет собой емкость со встроенным блоком конденсаторных пластин. Особенностью конструкции является индивидуальный подвод напряжения и управляющего сигнала к каждой пластине и тонкое изоляционное покрытие пластины. В сумме эти две конструктивные особенности позволяют безопасно эксплуатировать аппарат в условиях повышенной обводненности и загазованности скважинной продукции, так как поле в аппарате регулируется по всему объему и изоляция предотвращает пробой электродов. Указанные преимущества позволяют использовать данный аппарат уже на первой ступени подготовки скважинной продукции, что потенциально может значительно снизить эксплуатационные расходы по транспортировке балластной воды до пунктов подготовки нефти.

Так же высокотехнологичным зарубежным электродегидратором является Dual Frequency. Он представляет собой горизонтальную емкость с особой конструкцией электродов. Обработку эмульсии ведут с использованием двух полей – переменного и постоянного, которые позволяют в полной мере задействовать эффекты электрофореза и диэлектрфореза. Также аппарате реализована обработка электрическим полем различной частоты (от 0,2 до 1000 Гц), что, за счет повышенной частоты колебаний капель воды, способствует интенсификации электрокоалесценции [5].

По результатам сопоставления можно сделать вывод о том, что отечественные электродегидраторы отличаются простотой конструкции, высоким напряжением электродов, отсутствием изоляции и ограничением на обработку эмульсий, содержащих газовую фазу. Современные электродегидраторы отличаются использованием изолированных или композитных электродов, возможностью работы в высокообводненной, газосодержащей среде, автоматизированным регулированием напряженности поля по объему аппарата, использованием полей различной частоты, а так же современные электродегидраторы обеспечивают высокий отбор от потенциала светлых нефтепродуктов и масляных дистиллятов, повышают качество дистиллятов (без налегания соседних фракций по температурам кипения), повышают коэффициент использования энергоресурсов за счет более полного использования теплоты отходящих потоков, сокращают удельные расходы топлива, электроэнергии, воды, воздуха, реагентов, используют более эффективное оборудование, внедряют прогрессивные средства контроля и автоматики, схемы комплексной автоматизации управления процессами.

### Литература:

1. Пат. 2429277 Рос. Федерация: МПК C10 G32/02 / Д.А. Каримов; заявитель и патентообладатель Открытое Акционерное Общество «Институт по проектированию и исследовательским работам в нефтяной промышленности «Гипровостокнефть»; заявл. 22.06.2009; опубл. 20.09.2011 – 6 с.
2. Пат. 1777928 СССР: МПК B01 D17/06 / Ч.Ф. Ахундов, Р.М. Ахмедов, С.Ш. Гершуни, В.С. Генкин, А.В. Грибанов, Р.Б. Кулиев, Г.З. Мирзабекян, В.С. Петухов, А.В. Семенов, Ф.М. Хуторянский. – № 4904658/26; заявл. 22.01.91; опубл. 30.11.92. Бюл. № 44. – 4 с.
3. Пат. 1761190 СССР: B 01 D 17/06 / С.Ш. Гершуни, В.С. Генкин, И.Н. Кацал, Л.Н. Лабандин, Б.В. Свиридов, А.А. Ляшков – № 4802631/26; заявл. 06.02.90; опубл. 15.09.92. Бюл. № 34. – 3 с.
4. Каталог оборудования ОАО «ВНИИНЕФТЕМАШ» [Электронный ресурс] // Официальный сайт ОАО «ВНИИНЕФТЕМАШ». – URL : <http://www.vniineftemash.ru/> (дата обращения: 02.02.2018).
5. Лесс С., Вилагинес Р. Технология электрокоалескеров: достижения, сильные стороны и ограничения для отделения сырой нефти // Журнал нефтяной науки и техники. – Книга 81. – Январь 2012. – С. 57–63.

### References:

1. Patent 2429277 Russian Federation: MPK C10 G32/02 / D.A. Karimov; the applicant and the patent holder Open joint stock company «Institute on design and research works in oil industry «Giprovostokneft»; it is stated 6/22/2009; it is published 9/20/2011 – P. 6.
2. Patent 1777928 USSR: MPK B01 D17/06 / Ch.F. Akhundov, R.M. Akhmedov, S.Sh. Gershuni, V.S. Genkin, A.V. Griбанov, R.B. Kuliyeв, G.Z. Mirzabekyan, V.S. Petukhov, A.V. Semyonov, F.M. Hutoryansky. – № 4904658/26; it is stated 22.01.91; it is published 30.11.92. Bulletin № 44. – 4 p.
3. Patent 1761190 USSR: B 01 D 17/06 / S.S. Gershuni, V.S. Genkin, I.N. Kacal, L.N. Labandin, B.V. Sviridov, A.A. Lyashkov, № 4802631/26; application 06.02.90; published 15.09.92. Bulletin № 34. – P. 3.
4. The catalogue of the equipment of OJSC «VNIINEFTEMASH» [Electronic resource] // Official site of JSC «VNIINEFTEMASH» – URL : <http://www.vniineftemash.ru/> (accessed: 02.02.2018).
5. Simone Less, Regis Vilagines. The electrocoalescers technology: Advances, strengths and limitations for crude oil separation // Journal of Petroleum Science and Engineering. – Vol. 81. – January 2012. – P. 57–63.



УДК 681.2-5

## ОБ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ СКВАЖИН

### ABOUT ELECTROMAGNETIC DEFECTOSCOPY OF WELLS

**Маркешин Егор Романович**

магистрант,  
Уфимский государственный авиационный  
технический университет  
egor-kehen@mail.ru

**Морозова Елена Сергеевна**

старший преподаватель кафедры  
информационно-измерительной техники,  
Уфимский государственный авиационный  
технический университет  
m\_l\_s@mail.ru

**Аннотация.** Данная статья посвящена обзору актуальных средств для электромагнитной дефектоскопии скважинных труб и современным устройствам для создания автономных приборов с беспроводным каналом передачи данных.

**Ключевые слова:** электромагнитный дефектоскоп, дефектоскопия, автономный прибор, беспроводная передача данных.

**Markeshin Egor Romanovich**

Master,  
Ufa State Aviation Technical University  
egor-kehen@mail.ru

**Morozova Elena Sergeevna**

Senior Lecturer of the Department of  
Information and Measuring Technology,  
Ufa State Aviation Technical University  
m\_l\_s@mail.ru

**Annotation.** This article is devoted to a review of the current means for electromagnetic flaw detection of skewed pipes and modern devices for creating autonomous devices with a wireless data link.

**Keywords:** electromagnetic flaw detector, flaw detection, stand-alone device, wireless data transmission.

**Б**урильные и обсадные трубы, так же как и все остальные, подвержены износу и старению, с той лишь разницей, что характер износа будет отличаться. Основным фактором старения рассматриваемых труб является трение и износ в процессе проведения спуско-подъемных операций (СПО) и бурения.

В процессе износа на поверхности труб появляются механические деформации, сквозные протирания, перфорация и т.д. При трении также изнашиваются и соединительные муфты труб. Интенсивность их износа в верхней части бурильной колонны по длине одного замка относительно равномерна. А в нижней части, из-за пространственной упругой деформации в виде винтовой спирали, износ принимает бочкообразную форму и с приближением к долоту увеличивается. В открытом же стволе скважины наблюдаемый износ имеет более интенсивный характер, в отличие от обсадной колонны. При высокой абразивности стенок скважины, состоящих из горных пород, процессы износа становятся заметны не только в соединительных замках бурильных труб, но и на наружной поверхности утяжелённых бурильных труб.

Ресурс эксплуатации соединительных замков бурильных труб при СПО определяется в основном износостойкостью резьбы замков. Исходя из этого, очевидно, что для большинства российских нефтегазодобывающих регионов, наиболее актуальными являются вопросы рационального использования труб и применение технологических методов снижения износа замковых резьб. В результате, на практике возникает необходимость в своевременной регистрации текущего износа труб, выявления дефектов и состояния замковых соединений. Процесс выявления таких явлений носит название «дефектоскопия скважин».

Дефектоскопия скважин – это выявление дефектов в бурильных, обсадных или насоснокомпрессорных трубах различными геофизическими методами: электромагнитным, радиоактивным, акустическим и др.

Среди перечисленных методов, наиболее эффективным и перспективным является именно электромагнитный метод. Это обосновывается рядом преимуществ, так в отличие от акустических методов выявления дефектов отсутствует необходимость в непосредственном контакте чувствительного элемента с колонной [2], а значит благодаря съёмным центраторам, один и тот же прибор основанный на электромагнитных явлениях может быть применен в различных скважинах и при этом отсутствие механического контакта не вызывает вынужденного износа от трения.

Электромагнитный метод обеспечивает изучение конструкции скважин, в т. ч. положение соединительных муфт, обсадной и технической колонн, отдельные отверстия, в т. ч. интервалы сверлящей и кумулятивной перфорации и т.д.

Непосредственная дефектоскопия и контроль износа скважинных труб не возможны без специализированного оборудования, созданного для работы в условиях высоких температур и давления. В



качестве подобного оборудования и выступают скважинные дефектоскопы, выполненные в типовых корпусах, а так же рассчитанные на работу в порой жесточайших условиях окружающей среды.

Скважинные дефектоскопы малого диаметра позволяют определять наличие и положение продольных и поперечных трещин и разрывов, толщину стенок труб. Образцом подобного вида дефектоскопа является электромагнитный дефектоскоп скважинный [1]. На рисунке 1 приведена структурная схема устройства. Устройство содержит токовую катушку индуктивности 13, зашунтированную сопротивлением и соединенную с выходом токового коммутатора 14, вход которого подключен к первому выходу блока управления 15, второй выход которого соединен с первым входом формирователя служебных сигналов 11, третий выход блока управления 15 подключен ко входу таймера 16, выход которого соединен с первым входом блока управления 15.

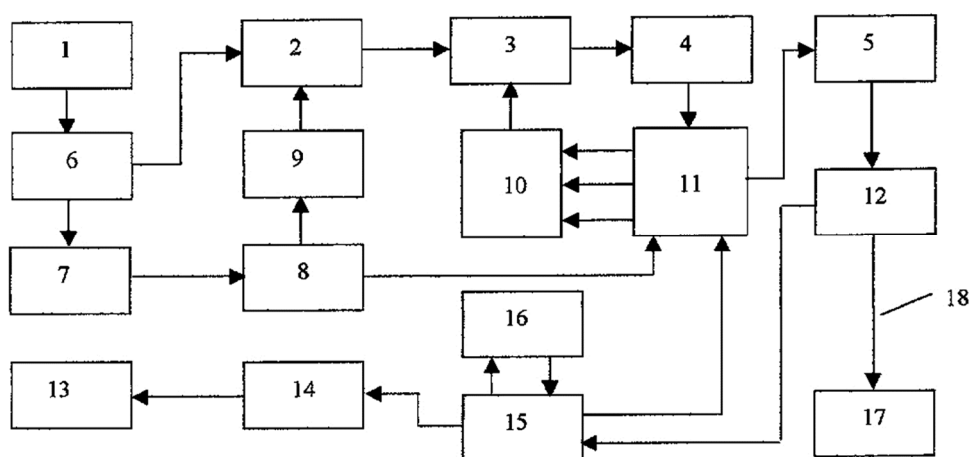


Рисунок 1 – Структурная схема скважинного электромагнитного дефектоскопа

Второй вход дефектоскопа подключен к выходу устройства согласования 12, которое соединено через геофизический кабель 18 с цифровым регистратором 17, измерительную катушку индуктивности 1, подключенную ко входу резисторной матрицы 6, первый выход которой соединен со входом дублирующего предварительного сдвоенного операционного усилителя 7, а второй выход подключен ко входу основного сдвоенного операционного усилителя 2, выход дублирующего предварительного сдвоенного операционного усилителя 7 соединен с компаратором 8, первый выход которого подключен ко входу «коммутатора коэффициента усиления основного сдвоенного операционного усилителя» 9, а второй выход соединен со вторым входом формирователя служебных сигналов 11, устройство выборки и хранения данных 3, первый вход которого подключен к выходу основного сдвоенного операционного усилителя 2, а второй вход соединен с выходом дискретного элемента «ИЛИ» 10 и выход подключен ко входу прецизионного (высокоточного) преобразователя сигнала 4, выход которого соединен с третьим входом формирователя служебных сигналов 11, первый выход которого подключен ко входу усилителя мощности 5, выход которого соединен со входом устройства согласования 12, второй, третий и четвертый выходы формирователя служебных сигналов 11 подключены соответственно к первому, второму и третьему входам дискретного элемента «ИЛИ» 10.

Предложенные прототип устройства всё же обладает рядом недостатков, так применение данного типа дефектоскопа подразумевает использование наземного регистрирующего устройства «ГЕКТОР», входящий в состав компьютеризованного аппаратно-методического комплекса КАМК – «АЛМАЗ-1», но применение наземного регистрирующего комплекса не всегда целесообразно, так как вызывает необходимость в дополнительных расходах на транспортировку и эксплуатацию подъемников с геофизическим кабелем, а так же требует более высокую квалификацию и дополнительное обучение сотрудников проводящих исследование на скважине. Применение же автономных устройств позволяет минимизировать влияние человеческого фактора. Зачастую автономные приборы имеют только лишь физический интерфейс или съемный накопитель для передачи данных, данный факт требует дополнительной очистки устройства и не позволяет оперативно в полевых условиях считать данные.

Сейчас, в век развития беспроводных устройств системы передачи данных способны обеспечить требуемый уровень надежности и скорости передачи данных. Обеспечить автономность и независимость от проводов и дополнительных манипуляция дефектоскопу позволит новый микроконтроллер фирмы Espressif Systems [3], ESP32. Данный микроконтроллер построен на базе ARMядер Xtensa с разрядностью 32-бита работающих на частоте до 240 МГц. Для обеспечения беспроводной связи, устройство поддерживает Wi-Fi: 802.11b/g/n/e/i[3], до 150 Мбит/с Bluetooth: v4.2 [3]. Помимо этого в контроллере присутствуют 4 × SPI; 2 × I<sup>2</sup>S; 2 × I<sup>2</sup>C; 3 × UART; Ethernet MAC с поддержкой DMA и IEEE 1588; CAN 2.0; PWM до 16 кана-





лов. Espressif Systems выпускает модификации своих чипов работающих в температурных режимах от  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+125^{\circ}\text{C}$  [3], что позволяет применять их в скважинной аппаратуре.

Благодаря поддержке практически всех современных интерфейсов передачи данных, применение данного чипа возможно без серьезного вмешательства в структуру готовых устройств, а наличие встраиваемых модулей на базе этого чипа обеспечивает значительное увеличение скорости разработки и гарантию корректной работы всех систем микросхемы.

На рисунке 2 представлена обновленная структурная схема устройства предложенного в патенте [1] (рис. 1). В представленной схеме практически все позиции идентичны за исключением: 12 модуль беспроводной связи ESP32, 17 устройство приемник данных снабженный WiFi антенной, 18 радиоканал беспроводной связи стандарта 2.4 ГГц/5 ГГц.

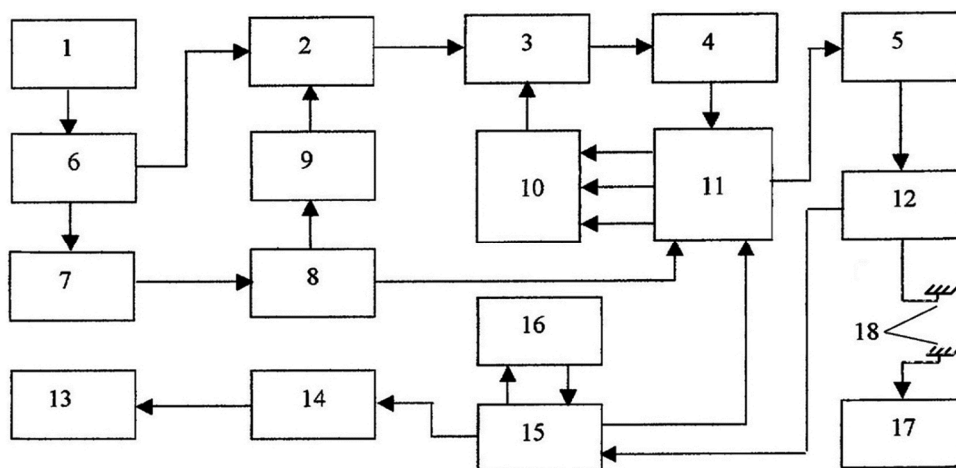


Рисунок 2 – Измененная структурная схема скважинного электромагнитного дефектоскопа

Предлагаемый сценарий использования данного чипа подразумевает следующие: посредством проволоочной лебедки автономный дефектоскоп осуществляет процедуру СПО, для выявления дефектов труб и локации муфтовых соединений, одновременно с этим он регистрирует температуру и давление в скважине с привязкой к расположениям муфт в стволе скважины. Затем прибор поднимается на поверхность, и оператор при помощи переносного устройства считывает данные по радиоканалу. Далее полученные данные могут быть обработаны на месте и/или отправлены в центр обработки данных для принятия решений относительно скважины.

Такое решение обеспечивает уменьшение материальных затрат на осуществление контроля за состоянием труб, а также увеличивает оперативность принятия решений о ремонтных работах на месторождении.

**Литература:**

1. Патент РФ RU 2290632, кл. G01N27/90 (2006.01) G01V3/18 (2006.01.) Электромагнитный дефектоскоп скважинный // Марков В.А., Шулаев В.Ф., Масленников В.И., Иванов О.В.
2. Масленников В.И., Марков В.А. Эффективность двухчастотной акустической цементометрии // Проблемы геофизического и геолого-технологического контроля разработки Оренбургского нефтегазоконденсатного месторождения. – М. : Нефть и газ, 2002. – С. 78–83.
3. ESP32 Datasheet // Espressif Inc. – 2018 China.

**References:**

1. Patent of the Russian Federation RU 2290632, cl. G01N27 / 90 (2006.01) G01V3 / 18 (2006.01.) Electromagnetic flaw detector borehole // Markov V.A., Shulaev V.F., Maslennikov V.I., Ivanov O.V.
2. Maslennikov V.I., Markov V.A. Efficiency of two-frequency acoustic cementometry // Problems of geophysical and geological-technological control of development of the Orenburg oil and gas condensate field. – M. : Oil and gas, 2002. – P. 78–83.
3. ESP32 Datasheet // Espressif Inc. – 2018 China.



УДК 313.3

## ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЙ КАСКАДНО-ЧАСТОТНЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ДЛЯ ТУРБОМЕХАНИЗМОВ НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ

### ENERGY-SAVING CASCADE-FREQUENCY ELECTRIC DRIVE FOR TURBO-MECHANISMS OF OIL AND GAS INDUSTRY

**Мещеряков Виктор Николаевич**

доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой электропривода,  
Липецкий государственный технический университет

**Шишлин Денис Иванович**

кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры электропривода,  
Липецкий государственный технический университет  
denis-shishlin@yandex.ru

**Ласточкин Денис Владимирович**

аспирант кафедры электропривода,  
Липецкий государственный технический университет

**Аннотация.** Данная статья посвящена перспективам применения системы каскадно-частотного электропривода для турбомеханизмов предприятий нефтегазовой отрасли для решения задач энергоэффективности.

**Ключевые слова:** каскадно-частотный электропривод, асинхронный двигатель с фазным ротором, турбомеханизмы, энергоэффективность.

**Meshcheryakov Victor Nikolayevich**

Doctor of Technical Sciences, Professor,  
Head of the electric drive department,  
Lipetsk State Technical University

**Shishlin Denis Ivanovich**

Candidate of Technical Sciences, Associate  
Professor,  
Senior lecturer of faculty of the electric drive,  
Lipetsk State Technical University  
denis-shishlin@yandex.ru

**Lastochkin Denis Vladimirovich**

Graduate Student of the department of elec-  
tric drive,  
Lipetsk State Technical University

**Annotation.** This article is devoted to the prospects of using a cascade-frequency electric drive system for turbo-mechanisms of enterprises of the oil and gas industry for solving energy efficiency problems.

**Keywords:** cascade-frequency electric drive, asynchronous motor with phase rotor, turbo-mechanisms, energy efficiency.

**В**опросы энергосбережения и энергоэффективности в настоящее время являются актуальными, в частности для такого энергоемкого сектора промышленности нашей страны как топливно-энергетический комплекс. Регулируемые электроприводы механизмов нефтегазовой отрасли позволяют оптимизировать энергопотребление путем формирования законов управления, которые учитывают энергетические, технологические и иные факторы, влияющие на технологические процессы агрегатов (различных типов насосов, компрессоров, нагнетателей магистральных трубопроводов и др.).

Постоянное увеличение потребности в регулируемых приводах предприятий различных отраслей промышленности, прежде всего нефтегазовой, обусловило изучение и разработку ряда специальных систем электропривода. Одними из направлений развития современных систем электропривода переменного тока являются частотное управление асинхронными двигателями с короткозамкнутым ротором и каскадные схемы включения асинхронных двигателей с фазным ротором. Разработка, создание и внедрение в производство новых электроприводов на основе синтеза указанных систем, обеспечивающих высокие энергетические показатели, хорошую управляемость, простоту конструкции, учет требований технологического процесса, представляет собой перспективное направление развития электроприводов переменного тока. Повышение энергетических показателей электропривода достигается применением последовательного возбуждения асинхронного двигателя с фазным ротором, на основе которого построена система каскадно-частотного электропривода [1]. Функциональная схема силовой части системы представлена на рисунке 1.

Регулируемый преобразователь UZ1, связанный с питающей сетью через трансформатор TV1, работает в режиме выпрямителя; преобразователь UZ2 работает в режиме автономного инвертора и может подключаться к обмотке статора через согласующий трансформатор TV2; преобразователь UZ3 является нерегулируемым выпрямителем. В цепь выпрямленного тока включен сглаживающий реактор L. Асинхронный двигатель не имеет прямого включения в сеть; энергия скольжения, за исключением потерь, передается в его статорную цепь. Обмотки статора и ротора включены в общую цепь, что позволяет одновременно управлять токами, протекающими в них.

Регулирование параметров электропривода производится по цепи выпрямленного тока, что позволяет применять серийное оборудование аналогичное оборудованию для систем постоянного тока. Стабилизация тока на выходе инвертора позволяет системе сочетать в себе свойства каскадно-



го и частотно-токового управления. При использовании инвертора напряжения можно формировать различные механические характеристики двигателя при различных законах управления его моментом, в том числе для механизмов с «вентиляторным» характером нагрузки на валу. Момент двигателя в системе каскадно-частотного электропривода не имеет критических значений, что позволяет ему работать в устойчивом режиме. Экспериментальные механические характеристики замкнутой и разомкнутой систем электропривода представлены на рисунке 2.

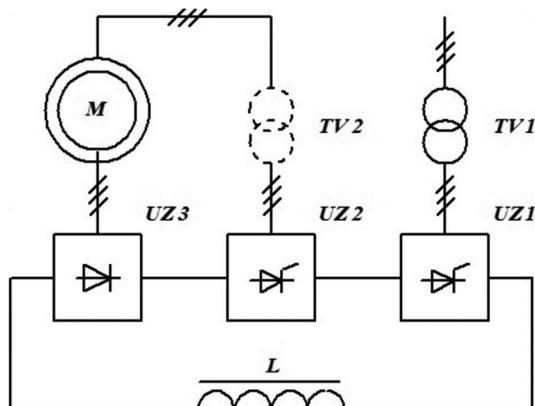


Рисунок 1 – Функциональная схема каскадно-частотного электропривода

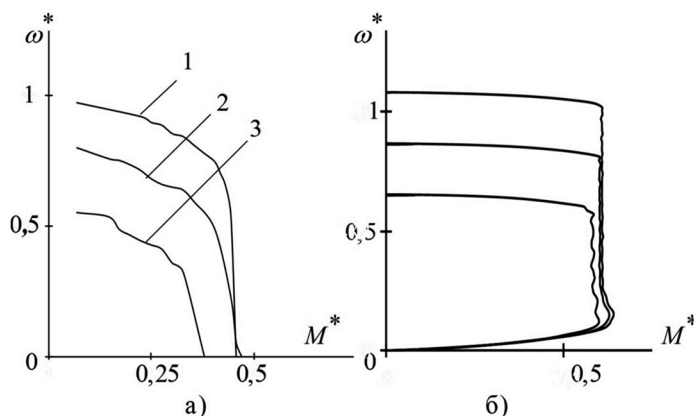


Рисунок 2 – Экспериментальные механические характеристики разомкнутой системы каскадно-частотного электропривода (а) при законе регулирования  $U_1^*/f_1^* = \text{const}$  ( $1 - U_1^* = 0,526, f_1^* = 1; 2 - U_1^* = 0,421, f_1^* = 0,8; 3 - U_1^* = 0,316, f_1^* = 0,6$ ) и замкнутой системы регулирования скорости (б) при тех же значениях частоты и пониженном напряжении

Наличие звена постоянного тока позволяет проводить синтез элементов системы подчиненного регулирования теми же способами, что и в электроприводах постоянного тока. Система регулирования включает в себя каналы управления напряжением выпрямителя и частотой инвертора с применением корректирующих звеньев в цепях регуляторов, которые улучшают динамику электропривода [2].

Использование асинхронных электроприводов с высокими энергетическими показателями является одной из главных задач улучшения энергоэффективности предприятия в целом. Одними из основных энергетических показателей электропривода являются КПД и коэффициент мощности. КПД системы определяется полезной мощностью на валу двигателя и потерями в системе, числом ступеней преобразования энергии и возможностью реализации энергии скольжения в электроприводах, где применяются асинхронные двигатели с фазным ротором. Улучшение коэффициента мощности часто требует применения различных устройств, компенсирующих реактивную энергию, потребляемую из сети, однако это приводит к увеличению габаритов системы, снижает надежность работы и может быть рекомендовано для мощных электроприводов.

Применение каскадно-частотных электроприводов целесообразно при модернизации приводов механизмов с редкими пусками и длительными или медленно меняющимися режимами работы, к которым относятся приводы турбомеханизмов, составляющих значительную часть от общего числа приводов на предприятиях топливно-энергетического комплекса.

Результаты аналитических расчетов, математического моделирования [3], экспериментальные исследования каскадно-частотного электропривода позволяют сделать следующие выводы:



– наличие в системе каскадно-частотного электропривода регулируемого выпрямителя и возможность изменения угла управления им в широких пределах приводит к снижению потребления реактивной мощности на 25...30 % при работе на частотах вращения, близких к номинальной и повышению коэффициента мощности электропривода на 20 % определяют ее преимущества перед системой асинхронно-вентильного каскада [4];

– наличие в цепи статора согласующего трансформатора TV2 позволяет повысить пусковой момент двигателя, оптимизировать систему по минимуму удельных потерь энергии, увеличить удельный КПД на единицу развиваемого им момента при условии поддержания постоянным напряжения выпрямителя UZ1, что улучшает производительность механизмов или провести оптимизацию по минимальному току статора при постоянном моменте, что может быть рекомендовано в случае минимальных нагрузок приводов, например, при снижении производительности или напора турбомеханизмов [5].

Применение инверторов на базе высокочастотных вентилей позволяет формировать напряжение на статоре двигателя практически синусоидальной формы.

Построение системы регулирования возможно на релейных регуляторах, с применением элементов нечеткой логики. Это позволит повысить качество регулирования координат электропривода, особенно на малых частотах вращения ротора двигателя, что является важным для механизмов, технология работы которых предусматривает регулирование частоты вращения в широком диапазоне.

Кроме того, на основе каскадно-частотных электроприводов возможно создание электроэнергетических установок [6]. Применение таких установок, приводящихся в действие из-за разности давлений жидкости или газа, позволит иметь, например, генерирующие мощности собственных нужд на объектах нефтегазового хозяйства.

#### Литература:

1. Статические характеристики системы асинхронного вентильного каскада с последовательным возбуждением / В.Н. Мещеряков [и др.] // Известия вузов. Электромеханика. – 2009. – № 2. – С. 57–60.
2. Мещеряков В.Н., Шишлин Д.И. Построение замкнутой системы управления каскадно-частотным электроприводом // Известия вузов. Электромеханика. – 1998. – № 2. – С. 46.
3. Мещеряков В.Н., Шишлин Д.И. Построение математической модели системы каскадно-частотного электропривода для определения ее энергетических показателей // Энерго- и ресурсосбережение – XXI век: материалы XII Международной научно-практической интернет-конференции. – Орел, 2016. – С. 78–82.
4. Шишлин Д.И. Составление энергетического баланса и анализ энергетических характеристик системы каскадно-частотного электропривода // Электроэнергетика, энергосберегающие технологии: сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции. Ч. 2. – Липецк, 2004. – С. 141–144.
5. Мещеряков В.Н., Шишлин Д.И. Оптимизация энергетических параметров системы каскадно-частотного электропривода механизмов металлургических производств // Современная металлургия нового тысячелетия: сборник научных трудов Международной научно-практической конференции. Т. 2. – Липецк, 2015. – С. 161–167.
6. Мещеряков В.Н., Муравьев А.А. Электроэнергетическая установка на базе машины двойного питания с релейной системой управления возбуждением // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. – 2017. – № 6. – С. 26–32.

#### References:

1. Static characteristics of an asynchronous valve stage system with series excitation / V.N. Meshcheryakov [etc.] // Izvestiya Vuzov. Electromechanics. – 2009. – № 2. – P. 57–60.
2. Meshcheryakov V.N., Shishlin D.I. Construction of a closed cascade-frequency electric drive control system // Izvestiya Vuzov. Electromechanics. – 1998. – № 2. – P. 46.
3. Meshcheryakov V.N., Shishlin D.I. Construction of a mathematical model of a cascade-frequency electric drive system for determining its energy parameters // Energy and resource saving – XXI century: materials of the XII International Scientific and Practical Internet Conference. – Orel, 2016. – P. 78–82.
4. Shishlin D.I. The compilation of the energy balance and analysis of the energy characteristics of the cascade-frequency electric drive system // Power engineering, energy-saving technologies: a collection of reports of the All-Russian Scientific and Technical Conference. Part 2. – Lipetsk, 2004. – P. 141–144.
5. Meshcheryakov V.N., Shishlin D.I. Optimization of energy parameters of a cascade-frequency electric drive system of metallurgical production mechanisms // Modern metallurgy of the new millennium: a collection of scientific papers of the International Scientific and Practical Conference. Т. 2. – Lipetsk, 2015. – P. 161–167.
6. Meshcheryakov V.N., Muravev A.A. Electric power plant based on a dual-power machine with a relay control system for excitation // Izvestiya SPbGETU LETI. – 2017. – № 6. – P. 26–32.



УДК 621.3

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАМАГНИЧИВАНИЯ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ НА НАЧАЛЬНОМ УЧАСТКЕ ПУСКА ПРИ РАБОТЕ ОТ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ**

**MATHEMATICAL MODELING OF THE MAGNETIZATION PROCESS OF THE INDUCTION MOTOR AT THE INITIAL PART OF THE START BY OPERATION FROM THE FREQUENCY CONVERTER**

**Мещеряков Виктор Николаевич**  
 доктор технических наук, профессор,  
 заведующий кафедрой электропривода,  
 Липецкий государственный технический университет

**Данилов Владимир Владимирович**  
 аспирант кафедры электропривода,  
 Липецкий государственный технический университет

**Мещерякова Ольга Викторовна**  
 аспирант кафедры электропривода,  
 Липецкий государственный технический университет  
 mesherek@yandex.ru

**Meshcheryakov Victor Nikolayevich**  
 Doctor of Technical Sciences, Professor,  
 Head of the electric drive department,  
 Lipetsk State Technical University

**Danilov Vladimir Vladimirovich**  
 Graduate Student of the department of electric drive,  
 Lipetsk State Technical University

**Meshcheryakova Olga Victorovna**  
 Graduate Student of the department of electric drive,  
 Lipetsk State Technical University  
 mesherek@yandex.ru

**Аннотация.** Рассматриваются принципы построения асинхронного электропривода на базе автономного инвертора напряжения с векторным управлением и результаты исследований процесса начального намагничивания электродвигателя.

**Annotation.** The principles of constructing an asynchronous electric drive based on the autonomous voltage inverter with the space-vector pulse width modulation and vector controls as well as the results of studies of the process initial magnetization induction motor.

**Ключевые слова:** асинхронный электропривод, инвертор напряжения, векторное управление, математическая модель, начальное намагничивание.

**Keywords:** asynchronous electric drive, voltage inverter, vector control, mathematical model, initial magnetization

**Введение**

Системы асинхронного электропривода с векторным управлением находят все более широкое применение на механизмах. Силовая часть систем частотного электропривода как правило выполняется на базе автономного инвертора напряжения (АИН). В системе векторного управления осуществляется непрерывный контроль и управление переменными двигателя, в качестве которых обычно принимаются продольная (намагничивающая) и поперечная (мометообразующая) составляющие тока статора, а также его частота [1, 4–7].

**Теоретический анализ и описание работы электропривода**

Величина момента двигателя определяется по формуле

$$\dot{M}_1 = \frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2'} \operatorname{Im} \left( \dot{I}_1 \cdot \dot{\Psi}_2^* \right), \tag{1}$$

или по формуле:

$$M = \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_2'} \cdot p_n \cdot \Psi_2 \cdot I_{1q}. \tag{2}$$

где  $L_m$  – индуктивность основного контура намагничивания;  $L_2'$  – индуктивность ротора;  $p_n$  – число пар полюсов двигателя.

Величину тока статора можно определить на основании уравнения баланса напряжений

$$\dot{U}_1 = R_1 \dot{I}_1 + \frac{d}{dt} \dot{\Psi}_1. \tag{3}$$

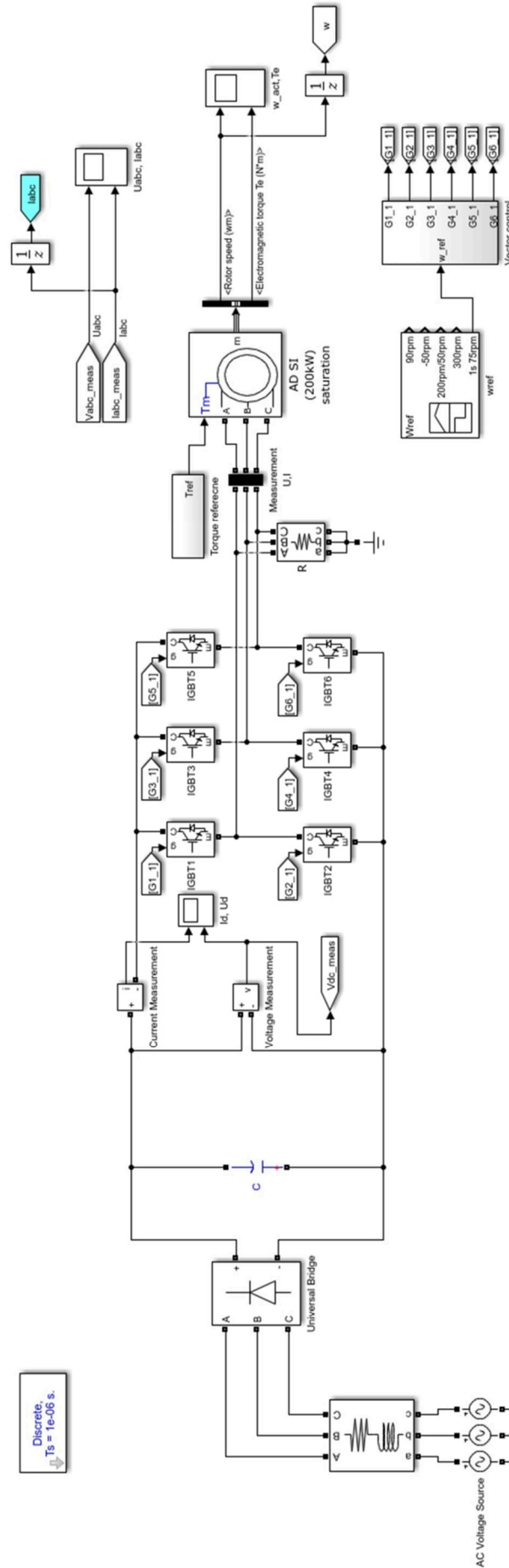


Рисунок 1 – Модель исследуемой системы в приложении Simulink



Потокосцепления обмоток статора, ротора и главное потокосцепление связаны выражениями

$$\dot{\Psi}_1 = L_1 \dot{i}_1 + L_m \dot{i}'_2; \tag{4}$$

$$\dot{\Psi}_2 = L_m \dot{i}_1 + L'_2 \dot{i}'_2; \tag{5}$$

$$\dot{\Psi}_2 = \dot{i}'_2 \cdot (L_m + L'_{2\sigma}) + \dot{i}_1 \cdot L_m = \dot{i}'_2 \cdot L'_2 + \dot{i}_1 \cdot L_m; \tag{6}$$

$$\dot{\Psi}_m = (\dot{i}_1 + \dot{i}'_2) L_m = \dot{i}_m \cdot L_m . \tag{7}$$

**Математическое описание и моделирование системы электропривода**

Динамические характеристики электропривода были получены методом математического моделирования с помощью пакета прикладных программ MATLAB приложение Simulink. Модель исследуемой системы в приложении Simulink приведена на рисунке 1.

Полученные графики переходных процессов начального намагничивания асинхронного электродвигателя при работе от преобразователя частоты на базе АИН приведены на рисунке 2. Электропривод работает с реактивным статическим моментом. В период времени 0–1 секунда электропривод имеет задание на скорость равное 0 рад/с, система управления выдает задания на продольную (намагничивающую)  $i_d$  и поперечную (мометообразующую)  $i_q$  составляющие тока статора, происходит начальное нарастание потокосцепления намагничивания. Длительность процесса намагничивания обуславливается постоянной времени ротора двигателя. Вместе с этим на валу двигателя создается электромагнитный момент. В период времени 1–2,5 секунды происходит разгон электропривода и выход на статический режим.

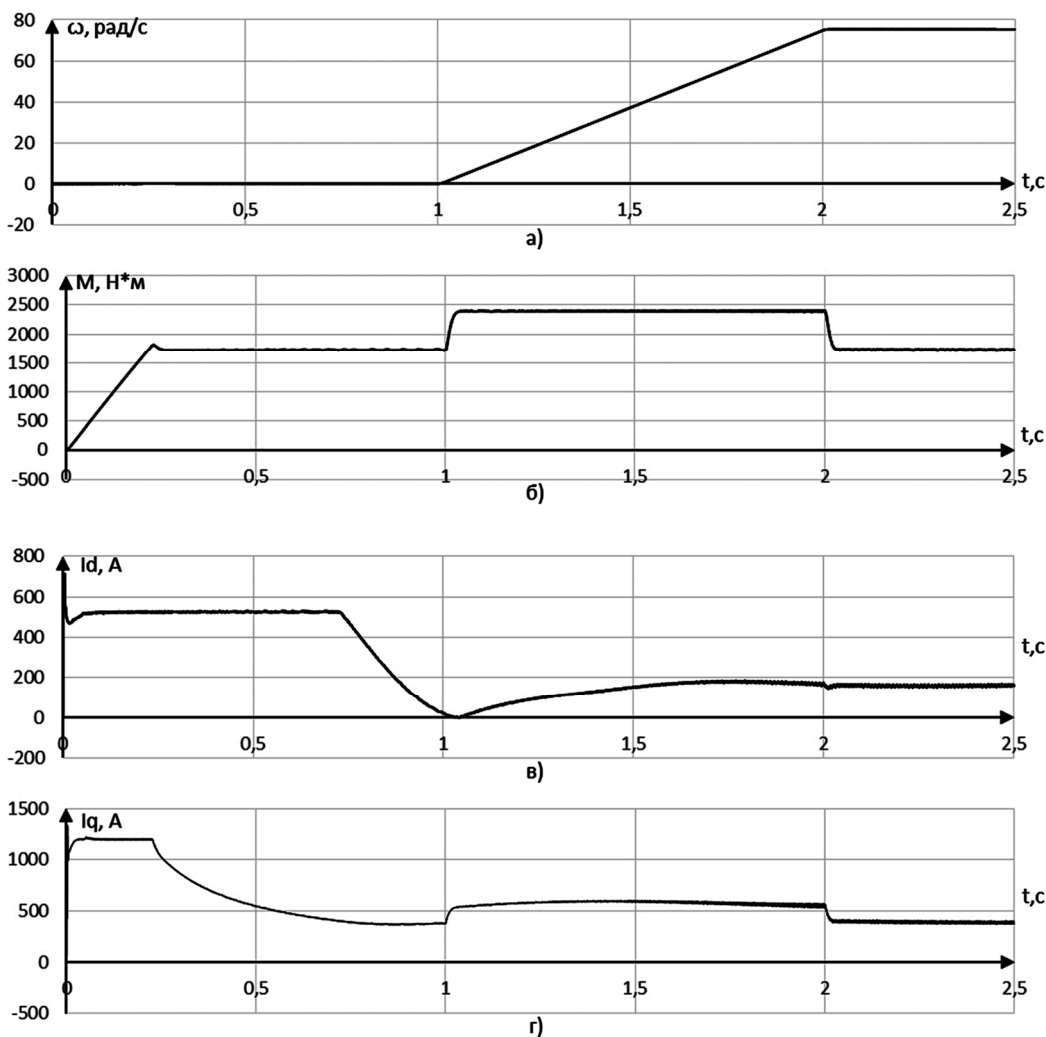


Рисунок 2 – Графики переходных процессов

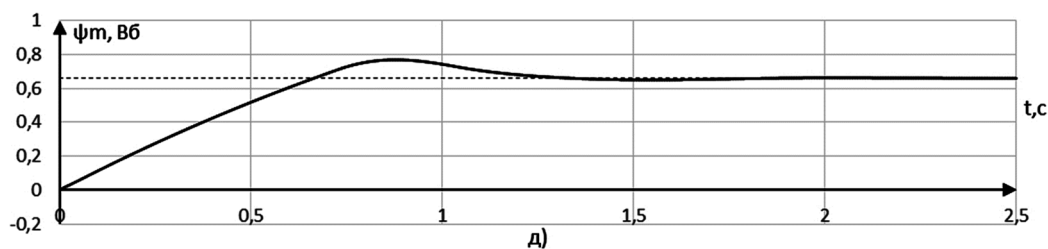


Рисунок 2 – Продолжение

### Выводы

В асинхронном электроприводе при управлении от преобразователя частоты требуется проведение процедуры начального намагничивания электродвигателя. Время намагничивания определяется постоянной времени ротора и возрастает с ростом мощности электродвигателя.

### Литература:

1. Шрейнер Р.Т., Дмитренко Ю.А. Оптимальное частотное управление асинхронными электроприводами. – Кишинев : Штиинца, 1982. – 223 с.
2. Мещеряков В.Н., Воеков В.Н., Мещерякова О.В. Вентильный электропривод для робототехнических систем с релейным регулированием входного тока инвертора и фазных токов статора // Материалы 10-ой Всероссийской Мультиконференции по проблемам управления. Т. 1. – Дивноморское, 2017. – С. 167–171.
3. Мещеряков В.Н., Черкасова В.С., Мещерякова О.В. Коррекция системы векторного управления асинхронным электроприводом // Системы управления и информационные технологии. – 2015. – № 3 (61). – С. 36–38.
4. Мещеряков В.Н., Сибирцев Д.С. Система управления асинхронным электроприводом с принудительным заданием скольжения // Вестник ЛГТУ. – 2017. – № 1. – С. 24–28.
5. Мещеряков В.Н., Копаев Ю.П., Ласточкин Д.В. Анализ инверторов тока и напряжения с системами релейного управления // Вести вузов Черноземья. – 2016. – № 2. – С. 13–18.
6. Синюкова Т.В. Энергосбережение в системах управления электроприводами производственных механизмов / Т.В. Синюкова, П.П. Левин, А.В. Синюков // Актуальные проблемы энергосбережения и энергоэффективности в технических системах : Тезисы докладов 3-й Международной конференции с элементами научной школы. – 2016. – С. 138–139.
7. Meshcheryakov V.N., Voekov V.N. Vector control based on self commutated current with relay voltage regulation in rectifier drive // Вести вузов Черноземья. – 2016. – № 4. – С. 28–36.

### References:

1. Shreyner R.T., Dmitrenko Yu.A. Optimum frequency control of asynchronous electric drives. – Kishinev : Shtiintsa, 1982. – 223 p.
2. Meshcheryakov V.N., Voyekov V.N., Meshcheryakova O.V. The valve electric drive for robotic systems with relay regulation of entrance current of the inverter and phase currents of the stator // 10th All-Russian Multikonferention's Materials on problems of management. V. 1. – Divnomorskoye, 2017. – P. 167–171.
3. Meshcheryakov V.N., Cherkasova V.S., Meshcheryakova O.V. Correction of system of vector control of the asynchronous electric drive // Control system and information technologies. – 2015. – № 3 (61). – P. 36–38.
4. Meshcheryakov V.N., Sibirtsev D.S. A control system of the asynchronous electric drive with a compulsory task of sliding // LGTU Bulletin. – 2017. – № 1. – P. 24–28.
5. Meshcheryakov V.N., Kopayev Yu.P., Lastochkin D.V. The analysis of inverters of current and tension with the systems of relay management // Message of higher education institutions of the Black Earth. – 2016. – № 2. – P. 13–18.
6. Sinyukova T.V. Energy saving in control systems of electric drives of production mechanisms / T.V. Sinyukova, P.P. Levin, A.V. Sinyukov // Current problems of energy saving and energy efficiency in technical systems: Theses of reports of the 3rd International conference with elements of school of sciences. – 2016. – P. 138–139.
7. Meshcheryakov V.N., Voekov V.N. Vector control based on self commutated current with relay voltage regulation in rectifier drive // Messages of higher education institutions of the Black Earth. – 2016. – № 4. – P. 28–36.





УДК 621.313.12.001.2 + 621.31.018.782.3

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В АКСИАЛЬНОМ ГЕНЕРАТОРЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА

### PILOT STUDIES OF TRANSITION PROCESSES IN AXIAL THE GENERATOR OF THE DIRECT CURRENT

**Пауков Дмитрий Викторович**

преподаватель кафедры авиационных комплексов  
и конструкции летательных аппаратов,  
филиал ВУНЦ ВВС «ВВА» (г. Челябинск)  
paukovdv@rambler.ru

**Paukov Dmitry Viktorovich**

Lecturer, Department of Aviation Complexes  
and the Design of Aircrafts,  
VUNC VVS «VVA» branch in Chelyabinsk  
paukovdv@rambler.ru

**Аннотация.** Представлены экспериментальные исследования переходных процессов в аксиальном генераторе постоянного тока.

**Annotation.** Pilot studies of transition processes in the axial generator of a direct current are presented.

**Ключевые слова:** аксиальный генератор постоянного тока; электромеханические преобразователи энергии; многофазная электрическая машина; электротехнический комплекс на базе машин аксиальной конструкции.

**Keywords:** axial generator of a direct current; electromechanical converters of energy; multiphase electrical machine; an electro-technical complex on the basis of cars of an axial design.

Широко распространенные сегодня цилиндрические (радиальные) конструкции электрических машин, используемых в качестве генераторных установок, имеют ряд серьезных конструктивных недостатков, а именно: сложность конструкции; сложную технологию изготовления из-за необходимости штамповки листов магнитопроводов статора и ротора; высокую стоимость из-за большого расхода электротехнической стали, связанного с высоким процентом ее отходов при штамповке; большие размеры; малую жесткость конструкции; неблагоприятные условия теплоотдачи, охлаждения и вентиляции [1, 2]. Таким образом, разработка более перспективных, а именно – аксиальных конструкций электрических машин для САЭ является актуальной задачей.

Аксиальная конструкция имеет ряд преимуществ по сравнению с радиальными электрическими машинами: меньшие размеры; благоприятные условия теплоотдачи; существенное упрощение обмоточных работ; практически безотходное использование магнитных материалов, а также способность сглаживать пульсации напряжения при порывах ветра ввиду большого момента инерции ротора.

Группой ученых под руководством профессора Гайтова Б.Х с участием автора разработан ряд генераторов аксиальной конструкции [3–5], магнитопроводы которых изготовлены по перспективной технологии [6].

В целях подтверждения основных теоретических положений по исследованию аксиального бесконтактного генератора постоянного тока [5] изготовлен экспериментальный образец мощностью 1,5 кВт и выполнен комплекс экспериментальных исследований [7, 8].

В программу экспериментальных исследований входило:

- определение параметров машины;
- построение электромеханических характеристик;
- определение КПД.

Ставилась задача смоделировать работу системы электроснабжения в реальных условиях, оценить влияние входных параметров на выходные.

Программа эксперимента включает в себя:

- разработку рационального экспериментального стенда, позволяющего имитировать работу генератора в условиях, близких к реальным;
- определение параметров экспериментальных образцов;
- снятие зависимости  $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{фэл}})$  при  $n_p = \text{const}$ ;
- снятие зависимости  $U_{\text{вых}} = f(n_p)$  при  $U_{\text{фэл}} = \text{const}$ ;
- снятие зависимости  $U_{\text{вых}} = f(I_a)$  при  $n_p = \text{const}$  и  $U_{\text{фэл}} = \text{const}$ .

Определение мощности на входах генератора производилось методом определения мощности, потребляемой приводным асинхронным двигателем (АД) с учетом потерь в этом двигателе и электрической мощности, потребляемой якорной цепью питания машины от источника постоянного тока (ИПТ). Определение мощности на выходе проводилось также прямым методом: ваттметром в цепи нагрузки [9].

Для того чтобы смоделировать работу системы в реальных условиях и обеспечить качественное измерение экспериментальных данных, предусмотренных программой эксперимента, необходимо чтобы экспериментальный стенд удовлетворял следующим требованиям:



- обеспечение независимых друг от друга и резкопеременных колебаний поступления энергии на механический и электрический входы устройства;
- обеспечение плавного и управляемого регулирования одной из входных величин при жестко зафиксированной другой;
- обеспечение проведения эксперимента по управлению (стабилизации) выходного напряжения генератора при входных параметров мощностей.

Электрическая схема экспериментального стенда представлена на рисунке 1.

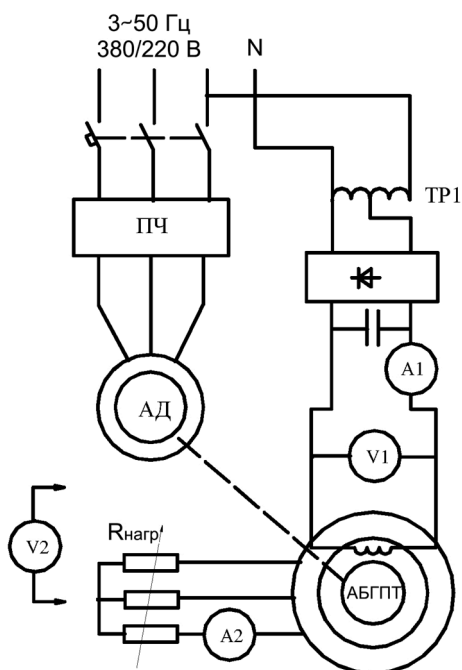


Рисунок 1 – Схема экспериментального стенда

Стенд состоит из блока имитации вращательного движения, приводящего в движение ротор исследуемой системы, и источника постоянного тока (ИПТ), питающего якорную цепь (обмотка возбуждения) генератора.

Блок имитации вращательного движения (см. рис. 1) состоит из преобразователя частоты (ПЧ), питающего асинхронный двигатель серии 4А, мощностью 0,75 кВт, который с помощью ремённой передачи соединён с валом генератора. Преобразователь частоты позволяет изменять скорость вращения ротора в широких пределах. Блок источника постоянного тока, питающего якорную цепь генератора, состоит из лабораторного автотрансформатора (ТР1), двухполупериодного выпрямителя и сглаживающего фильтра.

Вольтметры V1-V2 обеспечивают контроль уровня напряжения в входной (от ИПТ) и выходной цепях генератора, амперметры А1-А2 – тока в тех же цепях.

Во входную и выходную цепь имеется возможность включения ваттметров.

В качестве нагрузки использовался регулируемый трехфазный реостат ( $R_{нагр}$ ).

Результаты измерений параметров исследуемой системы приведены в таблице 1, полученные экспериментальные зависимости приведены на рисунках 2–4.

Таблица 1 – Результаты измерений параметров исследуемой системы

Якорь					Ротор				
$R_a, \text{ Ом}$	10,0	$R_{возб}, \text{ Ом}$	15,8	$R_{возб.доп}, \text{ Ом}$	11,2	$R_r, \text{ Ом}$	37,3	$R_{r.возб}, \text{ Ом}$	9,2
$X_a, \text{ Ом}$	17,6	$X_{возб}, \text{ Ом}$	19,7	$X_{возб.доп}, \text{ Ом}$	16,3	$X_r, \text{ Ом}$	38,8	$X_{r.возб}, \text{ Ом}$	7,1

В таблице 1 приведены параметры частей генератора:  $R_a, R_{возб}, R_{возб.доп}, R_r, R_{r.возб}$  – активные сопротивления обмоток якоря, обмотки возбуждения якоря, дополнительной обмотки возбуждения якоря, обмотки ротора, однофазной обмотки возбуждения ротора, соответственно;  $X_a, X_{возб}, X_{возб.доп}, X_r, X_{r.возб}$  – индуктивные сопротивления рассеяния обмоток якоря, обмотки возбуждения якоря, дополнительной обмотки возбуждения якоря, обмотки ротора, однофазной обмотки возбуждения ротора, соответственно.

Параметры измерены на изготовленном макете устройства.



Зависимости  $U_{вых} = f(n_{вращ})$  при  $U_{упт} = const$  приведены на рисунке 2. Регулировочная характеристика  $U_{вых} = f(U_{упт})$  при  $n_{вращ} = const$  и  $R_r = var$  приведена на рисунке 3. Из характеристики видно, что регулировать выходное напряжение можно путём изменения напряжения, подаваемого на обмотку возбуждения постоянного тока от ИПТ.

Внешняя характеристика представлена на рисунке 4.

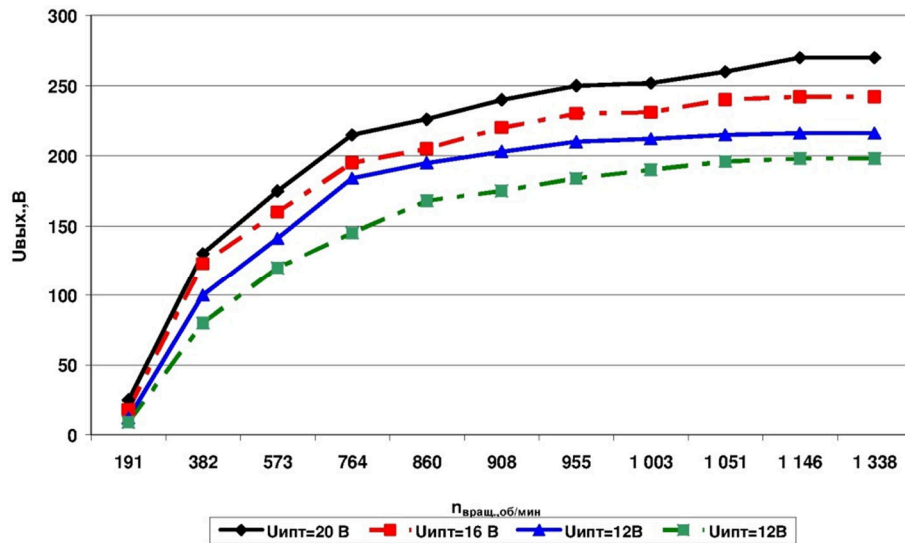


Рисунок 2 – Зависимость  $U_{вых} = f(n_{вращ})$  при  $U_{упт} = const$

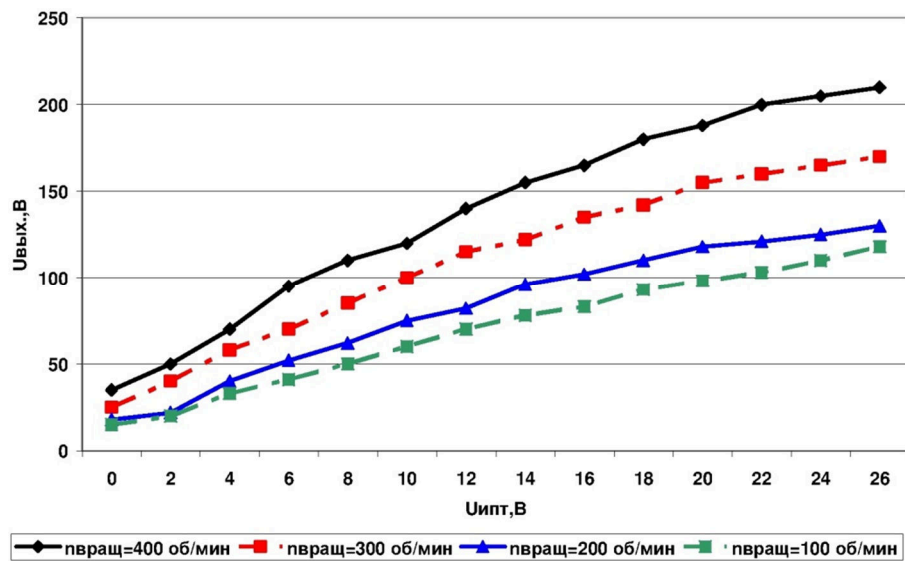


Рисунок 3 – Регулировочная характеристика  $U_{вых} = f(U_{упт})$  при  $n_{вращ} = const$

Как известно, для определения КПД необходимо знать уровни потребляемой мощности  $P_1$  и отдаваемой мощности  $P_2$ . Потребляемая мощность определяется как сумма полезной мощности и потерь

$$P_1 = P_2 + P_{эл1} + P_{эл2} + P_{эл3} + P_{элвозб1} + P_{элвозб2} + P_{элдоп} + P_{с1} + P_{с2} + P_{с3} + P_d + P_{мх}, \quad (1.1),$$

где

$$P_1 + P_{элбл} + P_{мехбл}, \quad (1.2)$$

$P_{элбл}$  – электрическая мощность, поступающая от блока ИПТ;  $P_{мехбл}$  – механическая мощность, поступающая от блока имитации вращательного движения;  $P_{эл1}, P_{эл2}, P_{эл3}$  – электрические потери в статоре, роторе и обмотке возбуждения, соответственно;  $P_{с1}, P_{с2}, P_{с3}$  – потери в магнитопроводах статора, ротора и якоря, соответственно;  $P_d$  – добавочные потери;  $P_{мх}$  – механические потери.

На рисунке 5 показана зависимость КПД установки от скорости вращения вала машины.

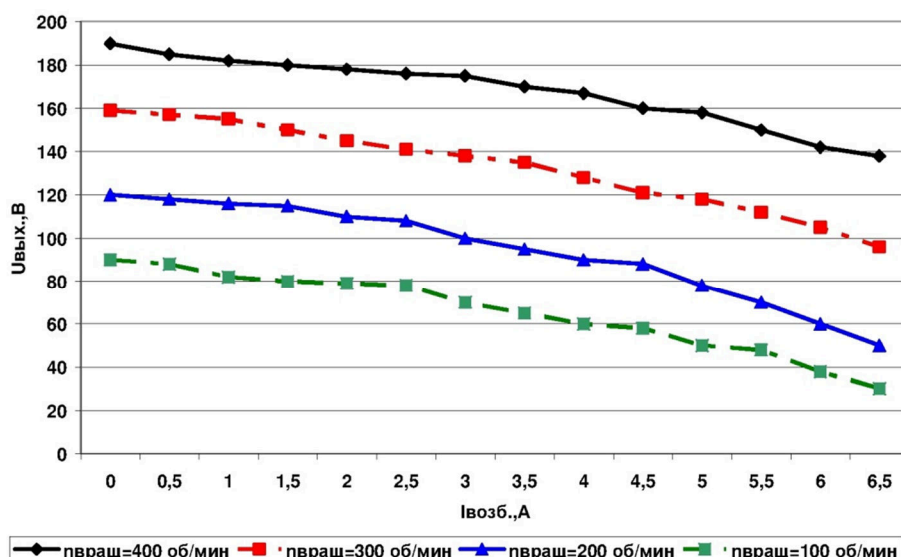


Рисунок 4 – Зависимость  $U_{вых} = f(I_{вых})$  при  $n_{вращ} = const$  и  $U_{пит} = 20 В$

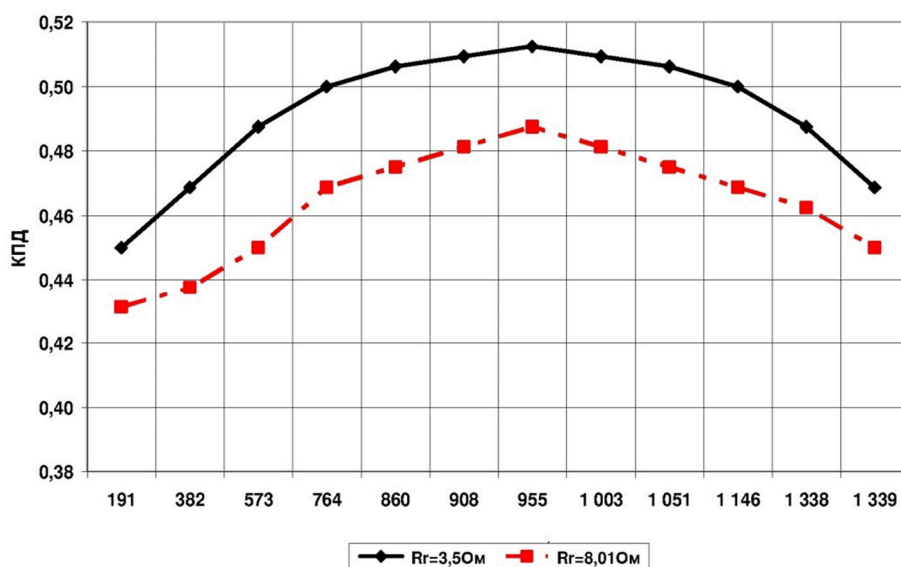


Рисунок 5 – Зависимость  $\eta = f(\omega)$

Экспериментально КПД определялся как отношение измеренной электрической мощности на выходе установки к суммарной мощности, поступающей на «вход» машины.

Мощность, поступающая от блока ИПТ, рассчитывалась непосредственно по показаниям амперметра и вольтметра включенных в соответствующую цепь.

Мощность, поступающая от блока имитации вращательного движения рассчитывалась путем измерения мощности потребляемой приводным электродвигателем с учетом его КПД.

Основными практическими результатами экспериментальных исследований можно считать то, что экспериментально доказана работоспособность конструкции, а также возможность управления разработанной системой электроснабжения и, следовательно, возможность стабилизации её выходных параметров.

Проведенное экспериментальное исследование подтвердило работоспособность конструкции элементов системы электроснабжения, правильность теоретических положений работы, показало более высокую эффективность, поэтому её применение для обеспечения электроэнергией воздушных судов вместо серийных устройств и систем позволяет повысить эксплуатационные показатели этих систем.

Последнее качество разработки представляется весьма ценным для практического применения.



### Литература:

1. Гайтова Т.Б., Кашин Я.М. Нетрадиционные электротехнические комплексы. Теория, расчет и конструкции : монография. – Краснодар : КВАИ, 2004. – 406 с.
2. Система автономного электроснабжения на базе аксиальных электромагнитных устройств / Т.Б. Гайтова [и др.] // Труды Кубанского государственного аграрного университета. – 2011. – № 33. – С. 205–209.
3. Пат. РФ № 2450411, 12.01.2011 г. Аксиальная двухходовая бесконтактная электрическая машина-генератор / Гайтов Б.Х., Кашин Я.М., Гайтова Т.Б., Кашин А.Я., Пауков Д.В., Голощапов А.В.
4. Пат. РФ № 2465706, 25.03.2011 г. Стабилизированный аксиальный бесконтактный генератор постоянного тока / Гайтов Б.Х., Кашин Я.М., Гайтова Т.Б., Кашин А.Я.
5. Пат. РФ № 2470446, 27.05.2011 г. Стабилизированный аксиальный генератор постоянного тока / Гайтов Б.Х., Кашин Я.М., Гайтова Т.Б., Кашин А.Я., Пауков Д.В.
6. Пат. РФ № 2475924, 19.08.2011 г. Способ изготовления магнитопроводов аксиальных электрических машин / Гайтов Б.Х., Кашин Я.М., Автайкин И.Н., Гайтова Т.Б., Кашин А.Я., Пауков Д.В.
7. Кашин Я.М., Кашин А.Я., Пауков Д.В. Обоснование и разработка перспективных конструкций генераторных установок для систем автономного электроснабжения // Известия вузов. Электромеханика. – 2012. – № 1. – С. 46–53.
8. Пауков Д.В., Кашин Я.М. Исследования переходных процессов в электромеханических преобразователях энергии (ЭМПЭ). Математическая модель аксиального генератора постоянного тока (АГПТ) // Научный поиск. Материалы девятой научной конференции аспирантов и докторантов. – Челябинск, 2017. – С. 54–61.
9. Котеленец Н.Ф., Акимова Н.А., Антонов М.В. Испытания, эксплуатация и ремонт электрических машин : учеб. для вузов. – М. : издат. центр «Академия», 2003. – 384 с.

### References:

1. Gajtova T.B. Kashin Ja.M., Unconventional Electrotechnical complexes. Theory calculation and design : Monograph. – Krasnodar : KWAI, 2004. – 406 p.
2. Auxiliary power supply system based on the axial electromagnetic devices / T.B. Gajtova [etc.] / Works of the Kuban State Agrarian University, 2011. – № 33. – P. 205–209.
3. Patent for invention RUS № 2450411, 12.01.2011. Axial dvuhvhodovaja non-contact electric machine-generator / Gajtov B.h., Kashin Ya.M., Gajtova T.B., Kashin A.Ya., Paukov D.V., Goloshchapov A.V.
4. Patent for invention RUS № 2465706, 25/03/2011. Stabilized axial proximity DC generator / Gajtov B.H., Kashin Ya.M., Gajtova T.B., Kashin A.Ya.
5. Patent for invention RUS № 2470446, 27/05/2011. Stabilized axial DC generator / Gajtov B.H., Kashin Ya.M., Gajtova T.B., Kashin A.Y., Paukov D.V.
6. Patent for invention RUS № 2475924, 19/08/2011. Method of manufacture of magnetic axial electrical machines / Gajtov B.H., Kashin Ya.M., Avtajkin I.N., Gajtova T.B., Kashin A.Ya., Paukov D.V.
7. Kashin Ya.M., Kashin A.Ya., Paukov D.V. Justification and development of promising designs for systems with autonomous generator supply // Izv. Universities. Electromechanics. – 2012. – № 1. – P. 46–53.
8. Paukov D.V., Kashin Ya.M. Studies on transient electromechanical energy converters (JeMPJe). Mathematical model of axial DC generator (AGPT) // Scientific search. Materials of the ninth Conference of graduate students and doctoral candidates. – Chelyabinsk, 2017. – P. 54–61.
9. Kotelenets N.F., Akimova N.A., Antonov M.V. Testing, maintenance and repair of electrical machines : textbook for higher education institutions. – M. : Publisher. Center «Academy», 2003. – 384 p.



УДК 621.313.333.+621.31.03+621.314

## АКСИАЛЬНЫЕ РЕГУЛЯТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

### AXIAL VOLTAGE REGULATORS FOR RADIO SYSTEMS

**Руденко Вадим Григорьевич**

кандидат технических наук, доцент,  
начальник кафедры авиационного  
и радиоэлектронного оборудования,  
Краснодарское высшее военное авиационное  
училище летчиков  
vgrudenko@mail.ru

**Киселев Сергей Петрович**

кандидат технических наук,  
преподаватель кафедры авиационного  
и радиоэлектронного оборудования,  
Краснодарское высшее военное авиационное  
училище летчиков  
kisserg75@mail.ru

**Аннотация.** Приводятся перспективные конструкции аксиальных регуляторов напряжения для радиотехнических систем.

**Ключевые слова:** аксиальные регуляторы, напряжение, магнитопровод.

**Rudenko Vadim Grigoryevich**

Candidate of Technical Sciences,  
Associate Professor,  
Head of the Department of aviation  
and radio-electronic equipment,  
Krasnodar higher military aviation college of  
pilots  
vgrudenko@mail.ru

**Kiselev Sergey Petrovich**

Candidate of technical Sciences,  
Lecturer, Department of of aviation  
and radio-electronic equipment,  
Krasnodar higher military aviation college of  
pilots  
kisserg75@mail.ru

**Annotation.** Provides forward-looking design  
of axial voltage regulators for radio systems.

**Keywords:** axial regulators, voltage, magnetic core.

Для радиотехнических систем качество напряжения имеет первостепенное значение для обеспечения качества передачи данных. При этом очень важно, чтобы напряжение по величине не выходило за пределы допустимых значений.

На кафедре авиационного и радиоэлектронного оборудования Краснодарского ВВАУЛ совместно с кафедрой электротехники и электрических машин КубГТУ под руководством профессора Гайтова Б.Х. разработан и исследован ряд аксиальных регуляторов напряжения [1–6]. В настоящей статье рассмотрены перспективные регуляторы напряжения по величине, которые исследованы [5, 6] и прошли проверку в эксплуатации.

Первый регулятор напряжения, который разработан на кафедре и успешно использован для регулирования напряжения в радиотехнических системах по величине был индукционный регулятор [1], содержащий два тороидальных магнитопровода с пазами, в которые уложены первичная и вторичная трехфазные обмотки, начала которых электрически соединены между собой посредством скользящих контактов, а тороидальный магнитопровод с первичной обмоткой, соединенной в «звезду», выполнен поворотным относительно неподвижного тороидального магнитопровода со вторичной обмоткой, для чего установлена червячная передача, жестко связанная с поворотным магнитопроводом, причем между магнитопроводами имеется воздушный зазор, необходимый для их взаимного перемещения, а вторичная обмотка выполнена имеющей возможность подключения к нагрузке.

Опыт эксплуатации показал, что существенным недостатком такого аксиального индукционного регулятора является наличие большого воздушного зазора между магнитопроводами, в пазах которых уложены первичная или вторичная обмотки, приводящее к увеличению магнитного сопротивления, а, следовательно, к увеличению токов, необходимых для создания требуемого магнитного потока (тока намагничивания), то есть к увеличению требуемого сечения проводов обмоток и, соответственно, к ухудшению массогабаритных показателей индукционного регулятора, увеличению его стоимости и увеличению потерь энергии. Существенным недостатком такого аксиального индукционного регулятора, как и любой аксиальной электрической машины, является также наличие большого осевого (аксиального) электромагнитного усилия, вызванного в результате притяжения неподвижного и поворотного магнитопроводов. Это усилие ведет к преждевременному выходу из строя подшипниковых узлов, что уменьшает надежность работы регулятора, а наличие подшипниковых узлов и червячной передачи, необходимых в прототипе для обеспечения возможности поворота магнитопровода с первичной обмоткой усилием руки оператора и предотвращения его самопроизвольного (электромагнитного) вращения относительно неподвижного магнитопровода со вторичной обмоткой, усложняет конструк-



цию регулятора в целом. Кроме того, перекося поворотного магнитопровода относительно неподвижного магнитопровода, вызванный большим осевым (аксиальным) электромагнитным усилием, приводит к снижению точности регулирования напряжения.

Для устранения этих недостатков разработан аксиальный индукционный регулятор [4], который содержит (рис. 1): поворотный тороидальный магнитопровод 1 с первичной трехфазной обмоткой 2 и концентрическими канавками 3 (рис. 2), неподвижный тороидальный магнитопровод 4 с вторичной трехфазной обмоткой 5, начало которой электрически соединено с началом первичной трехфазной обмотки 2, ферромагнитные шарики 6, расположенные в специальных углублениях 7 (рис. 3) полусферической формы, корпус 8, рукоятку 9, жестко связанную с поворотным магнитопроводом 1 посредством диска 10. Начало первичной трехфазной обмотки 2 поворотного тороидального магнитопровода 1 электрически соединено с началом вторичной трехфазной обмотки 5 неподвижного тороидального магнитопровода 4 посредством скользящего контакта 11.

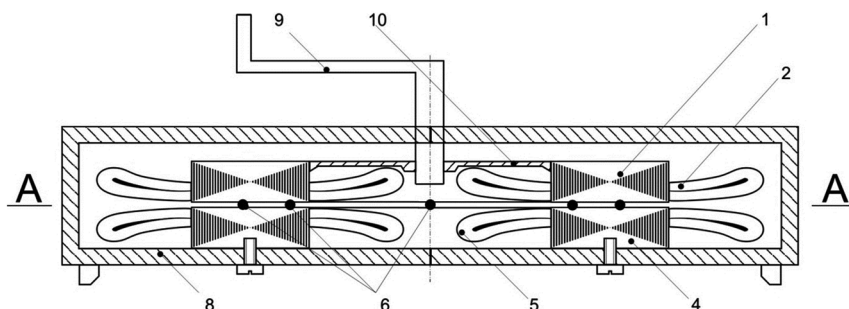


Рисунок 1 – Общий вид предлагаемого аксиального индукционного регулятора в разрезе

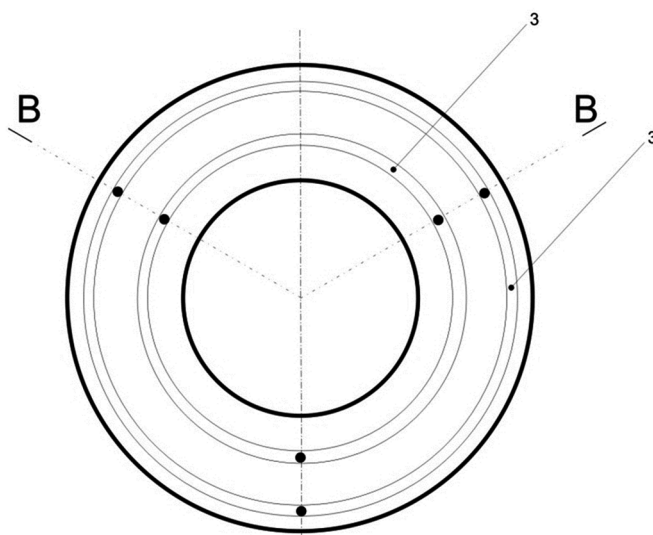


Рисунок 2 – Сечение А-А рис. 1

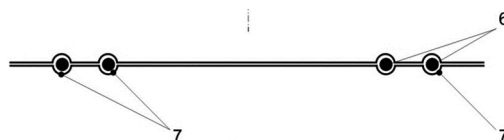


Рисунок 3 – Сечение В-В рис. 2

Диаметр шариков выбран таким образом, чтобы момент силы трения скольжения, равной  $f = k \cdot F$ , где  $k$  – коэффициент трения,  $F = F_1 + F_2$ ,  $F_1$  – аксиальное электромагнитное усилие,  $F_2$  – гравитационное усилие, был больше электромагнитного момента вращения, возникающего при взаимодействии токов в первичной обмотке с вращающимся магнитным полем, но обеспечивал возможность поворота магнитопровода с первичной обмоткой усилием руки оператора. Это предотвратит самопроизвольное (электромагнитное) вращение магнитопровода с первичной обмоткой при работе регулятора. Пазы поворотного тороидального магнитопровода заливаются немагнитным диэлектрическим материалом, обеспечивающим гладкость его трущейся поверхности. Это предотвращает про-



валивание шариков в пазы поворотного тороидального магнитопровода. Сечение концентрических канавок выбрано близким к полукружности диаметром, соответствующим диаметру используемых неферромагнитных шариков.

#### Литература:

1. Аксиальный индукционный регулятор / Б.Х. Гайтов, Кашин Я.М., Сингаевский Н.А., Савченко А.Ю., Шарифуллин С.Р. // Патент на изобретение RUS № 2168785. 06.04.1998.
2. Сдвоенный аксиальный индукционный регулятор / Гайтов Б.Х., Кашин Я.М., Сингаевский Н.А., Самородов А.В., Ариди Ф.М. // Патент на изобретение RUS № 2170971. 31.03.1999.
3. Многофазный аксиальный индукционный регулятор / Гайтов Б.Х., Кашин Я.М., Рябчун И.П., Яковенко А.Ю., Божко С.В. // Патент на изобретение RUS № 2216091. 01.11.2001.
4. Аксиальный индукционный регулятор / Гайтов Б.Х., Кашин Я.М., Гайтова Т.Б. // Патент на изобретение RUS № 2256973. 30.12.2003.
5. Разработка конструкции и математическое моделирование аксиальных индукционных регуляторов напряжения для систем автоматического управления / Б.Х. Гайтов [и др.] // Научно-технический журнал «Электротехника». – М., 2004. – № 1. – С. 60–64.
6. Гайтов Б.Х. Перспективные конструкции аксиальных многофазных трансформаторов и регуляторов с вращающимся магнитным полем / Б.Х. Гайтов, Т.Б. Гайтова, Я.М. Кашин // Известия высших учебных заведений. Электромеханика». – Новочеркасск, 2005. – № 3. – С. 44–47.

#### References:

1. Axial induction regulator / Gajtov B.H., Kashin Ya.M., Singaevskij N.A., Savchenko A.Yu., Sharifullin S.R. // Patent for invention № 2168785 RUS. 06.04.1998.
2. Dual axial induction regulator / Gajtov B.h., Kashin Ya.M., Singaevskij N.A., Samorodov A.V., Aridi F.M. // Patent for invention № 2170971 RUS. 31.03.1999.
3. Axial Multiphase induction regulator / Gajtov B.H., Kashin Ya.M., Ryabchun I.P., Yakovenko A.Yu., Bozhko S.V. // Patent for invention № 2216091 RUS. 01.11.2001.
4. Axial induction regulator / Gajtov B.H., Kashin Ya.M., Gajtova T.B. // Patent for invention № 2256973 RUS. 30.12.2003.
5. Design and mathematical modeling of axial induction voltage regulators for automatic control systems / B.H. Gajtov [etc.] // Scientific and technical journal «Electrical engineering». – М., 2004. – № 1. – P. 60–64.
6. Gajtov B.H. Promising design axial multiphase transformers and regulators with the rotating magnetic field / B.H. Gajtov, T.B. Gajtova, Ya.M. Kashin // Proceedings of higher educational establishments. Electromechanics. – Novocherkassk, 2005. – № 3. – P. 44–47.





УДК 621.313

## СПОСОБЫ СИНХРОНИЗАЦИИ ВЕТРО-СОЛНЕЧНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ

### WAYS OF SYNCHRONIZATION OF WIND-SOLAR GENERATORS FOR POWER SUPPLY OF LOCAL OIL AND GAS FACILITIES

#### Самородов Александр Валерьевич

кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры электротехники и электрических машин,  
Кубанский государственный технологический университет  
alex.samorodoff@gmail.com

#### Ким Владислав Анатольевич

студент,  
Кубанский государственный технологический университет  
vladk-kub@mail.ru

#### Христофоров Михаил Сергеевич

аспирант,  
Кубанский государственный технологический университет  
mkhristoforov87@mail.ru

**Аннотация.** Данная статья посвящена обзору способов синхронизации ветро-солнечных генераторов с сетью.

**Ключевые слова:** альтернативная энергетика, генератор, синхронизация.

#### Samorodov Alexander Valerevich

Candidate of Technical Sciences,  
Associate Professor,  
Associate Professor of the Department of  
Electrical Engineering  
and Electrical Machines,  
Kuban State Technological University  
alex.samorodoff@gmail.com

#### Kim Vladislav Anatolievich

Student,  
Kuban State Technological University  
vladk-kub@mail.ru

#### Khristoforov Mikhail Sergeevich

Graduate student,  
Kuban State Technological University  
mkhristoforov87@mail.ru

**Annotation.** This article is devoted to a review of methods for synchronizing wind-solar generators with a network.

**Keywords:** alternative energy, generator, synchronization.

Альтернативная энергетика занимает умы людей не первый год, привлекая своими перспективами и неисчерпаемостью. По этой причине на кафедре электротехники и электрических машин ФГБОУ ВО «КубГТУ» также ведутся исследования в области альтернативной энергетике [1–4]. Одним из результатов этой работы является ветро-солнечный генератор (ВСГ) [1], особенностью которого является возможность работы с двумя источниками возобновляемой энергии (ветра и солнца).

На рисунке 1 приведена конструкция ВСГ, на рисунке 2 – ее электрическая схема.

ВСГ содержит: корпус 1, постоянный многополюсный магнит 2 индуктора подвозбудителя, магнитопровод 3 с обмоткой 4 якоря подвозбудителя, однофазной обмоткой 5 возбуждения возбудителя и дополнительной обмоткой 6 возбуждения возбудителя; внутренний аксиальный магнитопровод 7 с многофазной обмоткой 8 якоря возбудителя и однофазной обмоткой возбуждения 9 основного генератора, аксиальный магнитопровод 10 с многофазной обмоткой 11 якоря основного генератора, вал 12, закрепленный в подшипниковых узлах 13 и 14 и жестко связанный с постоянным многополюсным магнитом 2 индуктора подвозбудителя посредством диска 15 и с внутренним аксиальным магнитопроводом 7 посредством диска 16, девятифазных выпрямителей 17 и 18, контакты 19 для подключения внешнего источника постоянного тока (например, солнечной батареи) к дополнительной обмотке 6 возбуждения возбудителя.

Однофазная обмотка 5 возбуждения возбудителя подключается к многофазной обмотке 4 якоря подвозбудителя через многофазный выпрямитель 17. Однофазная обмотка 9 возбуждения основного генератора подключается к многофазной обмотке 8 якоря возбудителя через многофазный выпрямитель 18. С трехфазной обмотки 11 якоря основного генератора трехфазная ЭДС может подаваться в сеть.

Но так, как и ветер и солнце не имеют постоянной силы воздействия это негативно сказывается на качестве выходного сигнала. На рисунке 3 представлен скриншот компьютерного моделирования ВСГ.

Следовательно, для возможности параллельной работы с сетью необходимо осуществить синхронизацию ВСГ. Это можно сделать двумя способами:

- Подключить ВСГ через цепочку выпрямитель – контролер – батареи – инвентор.
- Подключить к ВСГ вторую машину-синхронизатор, которая в зависимости от скорости ветра работала бы в двигательном или генераторном режимах.

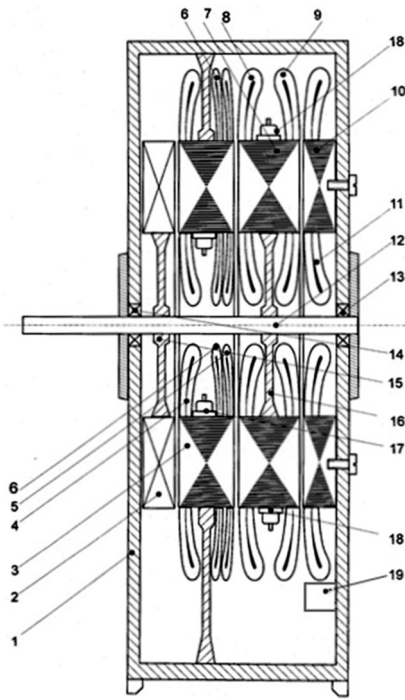


Рисунок 1 – Ветро-солнечный генератор

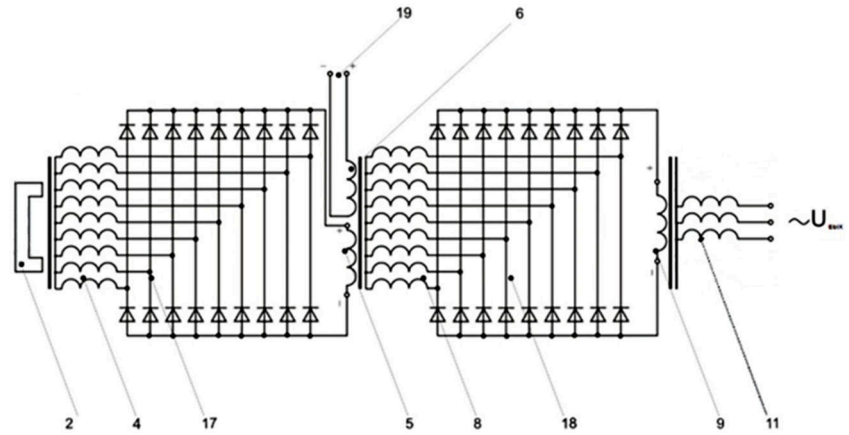


Рисунок 2 – Электрическая схема ветро-солнечный генератора

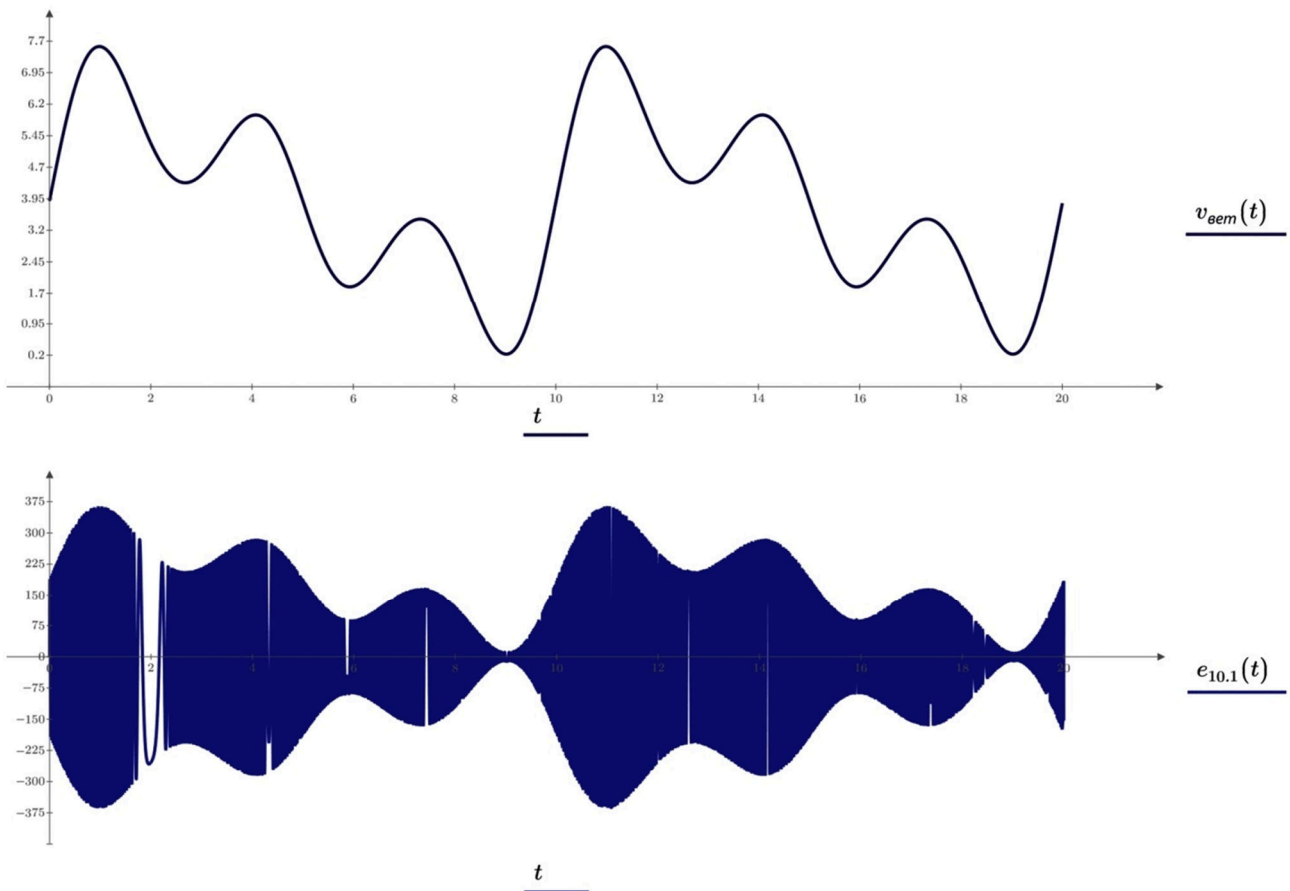
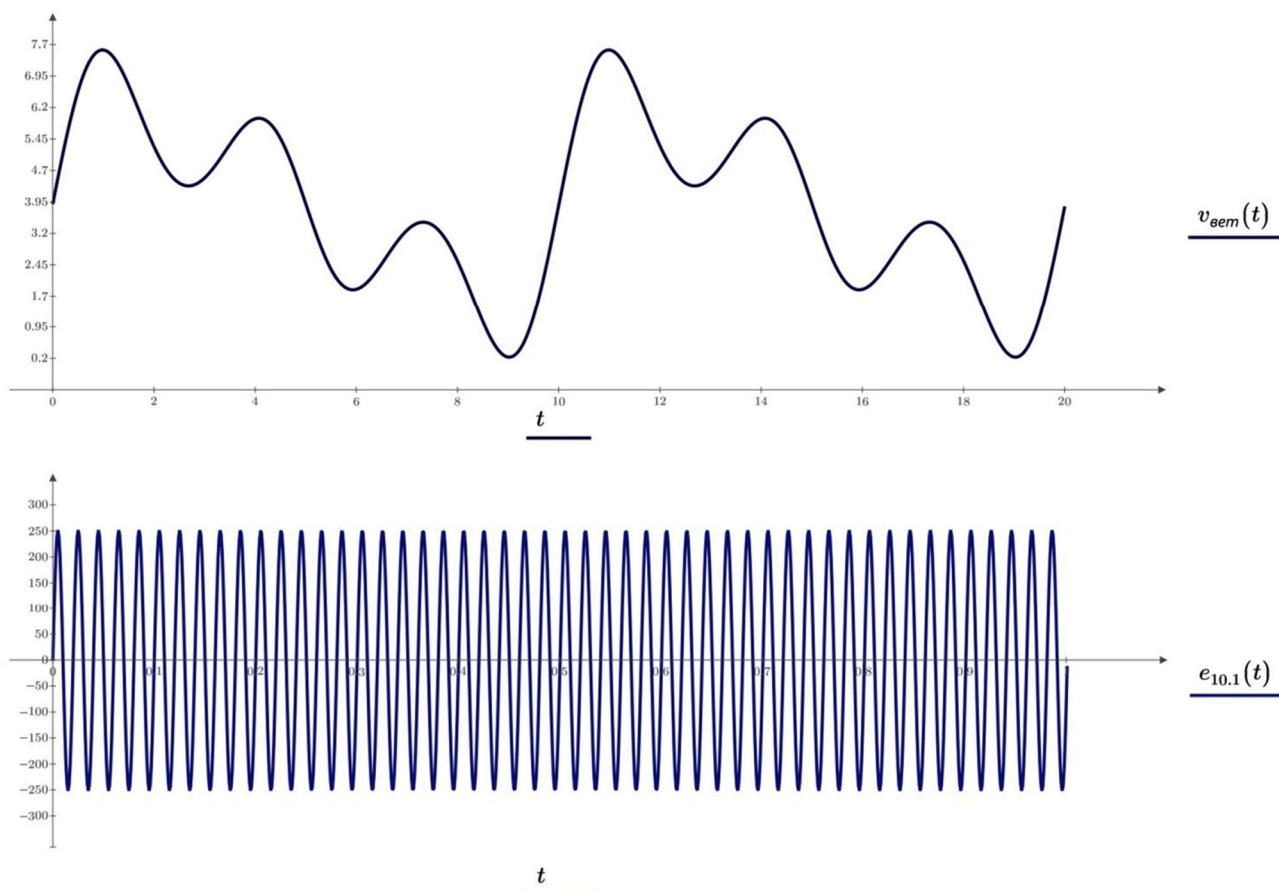


Рисунок 3 – Скриншот зависимости выходного сигнала ВСГ от скорости ветра без синхронизации

Второй метод является более простым, дешевым и надежным способом синхронизации ветро-солнечного генератора с сетью. На рисунке 4 приведен скриншот компьютерного моделирования.



**Рисунок 4** – Скриншот зависимости выходного сигнала ВСГ от скорости ветра с синхронизацией

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Краснодарского края в рамках научного проекта № 16-48-230500 а(р).*

#### Литература:

1. Пат. 2561504 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> H02K19/38, H02K19/00. Аксиальный двухходовый бесконтактный ветро-солнечный генератор / Б.Х. Гайтов, Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, Л.Е. Копелевич, А.В. Самородов; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный технологический университет» (ФГБОУ ВО «КубГТУ») (RU). – № 2014124436; заявл. 2014-06-16; опубл. 27.08.2015, Бюл. № 24. – 7 с.: ил.
2. Ветро-солнечный генератор для систем автономного электроснабжения / Б.Х. Гайтов [и др.] // Электричество. – 2018. – № 1. – С. 19–27.
3. Ветро-солнечный генератор / Б.Х. Гайтов [и др.] // Энергосбережение и водоподготовка. – 2017. – № 6 (110). – С. 25–30.
4. Ветро-солнечный генератор / Б.Х. Гайтов [и др.] // Материалы Международной конференции «Actual Issues of Mechanical Engineering» 2017 (AIME 2017). Серия книг «AER-Advances in Engineering Research». – Т. 133. – С. 343–349.

#### References:

1. Pat. 2561504 Russian Federation, MPK<sup>7</sup> H02K19/38, H02K19/00. Axial two-input non-contact wind-solar generator / B.Kh. Gaitov, Ya.M. Kashin, A.Ya. Kashin, L.E. Kopelevich, A.V. Samorods; applicant and patent holder Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Kuban State Technological University» (FGBOU VO «KubGTU») (RU). – № 2014124436; claimed. 2014-06-16; publ. August 27, 2015, Bul. № 24. – 7 p.
2. Wind generator for autonomous power supply systems / B.Kh. Gaitov [etc.] // Electricity. – 2018. – № 1. – P. 19–27.
3. Wind-solar generator / B.Kh. Gaitov [etc.] // Energy saving and water treatment. – 2017. – № 6 (110). – P. 25–30.
4. Wind-solar generator / B.Kh. Gaitov [etc.] // Materials of the International Conference «Actual Issues of Mechanical Engineering» 2017 (AIME 2017). AER-Advances in Engineering Research. – V. 133. – P. 343–349.



УДК 681.527.7

## РАЗРАБОТКА ОСНОВНЫХ ПОЛОЖЕНИЙ РАСЧЁТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СХЕМ ЧАСТОТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

### DEVELOPMENT OF THE BASIC POSITIONS OF CALCULATION OF ELECTRICAL SCHEMES OF FREQUENCY CONVERTERS

**Тихонов Давид Александрович**

бакалавр,  
Кубанский государственный технологический университет  
termodinamik777@mail.ru

**Попов Борис Клавдиевич**

кандидат технических наук, доцент,  
Кубанский государственный технологический университет  
pbk47@mail.ru

**Tikhonov David Aleksandrovich**

Bachelor,  
Kuban state technological university  
termodinamik777@mail.ru

**Popov Boris Klavdiyevich**

Candidate of Technical Sciences,  
Associate Professor,  
Kuban state technological university  
pbk47@mail.ru

**Аннотация.** В статье представлен метод расчёта нелинейных задач электроники (расчёт схем управляемых и неуправляемых выпрямителей, частотных преобразователей). Приведены результаты работы индивидуальной программы составленной в среде DELPHI. Показаны результаты совмещения аналитического решения и численного решения расчётов поставленных задач.

**Ключевые слова:** дифференциальное уравнение, ряд Фурье, мгновенные значения тока, переходный процесс, катушка индуктивности.

**Annotation.** In this article submitted the method of calculation of non-linear problems of electronics (calculation of circuits of controlled and uncontrolled rectifiers, frequency converters). The results of the work of the individual program compiled in the DELPHI environment are presented. The results of combining the analytical solution and the numerical solution of the computed tasks are shown.

**Keywords:** differential equation, Fourier series, instantaneous current values, transient process, inductor.

Известно [1, 2], что процессы в простой электрической цепи, подключённой к периодически изменяемому источнику напряжения, и состоящей, например, из активного сопротивления и индуктивности, соединённых последовательно, описываются простым дифференциальным уравнением

$$u = iR + L \frac{di}{dt}. \quad (1)$$

В случае линейной цепи для решения подобного уравнения используется комплексный метод [1]. В случае нелинейных цепей или несинусоидальных источников напряжения применяется замена несинусоидальных величин эквивалентными синусоидами [2]. Применяются также различные графо-аналитические методы и ряды Фурье [1, 2]. Применение этих методов, к сожалению, требует использование различных согласующих расчётов, понижающих точность вычислений.

Применение для нелинейных цепей переменного тока вышеуказанных методов сводится, в конечном счёте, к получению решения в виде ряда Фурье (суммы гармоник). Чтобы определить мгновенное значение тока в любой момент времени необходимо суммировать значения этих гармоник, в заданный момент времени. То есть помимо решения самого дифференциального уравнения, следует ещё делать дополнительные вычисления для получения конкретного тока. Для упрощения вычислительного процесса и повышения точности расчётов возникает идея сразу, непосредственно из начального дифференциального уравнения, приведённого выше, получить решение этого уравнения в виде набора чисел. Этот набор чисел будет изображать последовательные мгновенные значения тока на протяжении периода источника напряжения.

Исходя из предложенной идеи, решение исходного уравнения будет заключаться в решении системы из  $n$  алгебраических уравнений относительно  $i(k)$

$$U_m \sin kh = i(k)R + \omega L \frac{1}{2h} [i(k+1) - i(k-1)], \quad (2)$$

где  $h = \frac{2\pi}{n}$ , а  $k = 0, 1, 2, \dots, n$ .

В этой системе производная заменяется трёхточечным шаблоном. Как показала вычислительная практика авторов, такая замена точного значения производной допустима, так как согласуется с точным значением производной до шестого знака после запятой.



Применяя такой подход можно находить значение стационарного тока в данной схеме. Для этого решается краевая задача, заключающаяся в том, что значения тока в начале периода и в конце периода считаются равными. Для вычисления переходного процесса достаточно указать начальное значение тока в начале периода, оставив значение тока в конце периода свободным. Решая последовательно период за периодом, можно вычислить весь переходный процесс.

Для реализации и проверки достоверности предложенного алгоритма была составлена программа в среде DELPHI. Программа состоит из двух команд. Это «Вычислить аналитическое решение» и «Вычислить численное решение». Ниже представлен результат работы данной программы. На рисунке 1 показан результат аналитического решения уравнения (1).

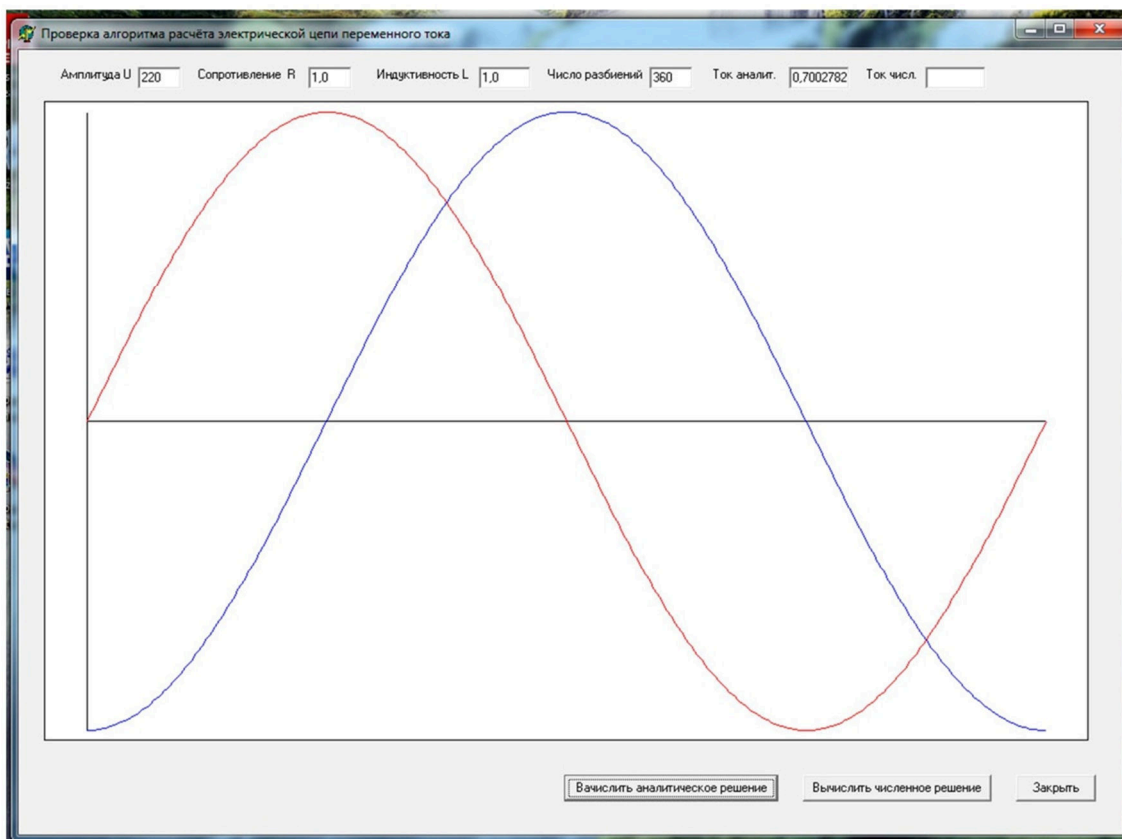


Рисунок 1 – Результат аналитического решения

На рисунке 2 показан совмещение результата аналитического решения уравнения (1) и численного решения системы уравнений (2).

Как видно из представленных рисунков результаты расчёта, полученные численно, идеально совпали с аналитическим решением указанного выше уравнения. Единственным отличием численного решения от аналитического – это незначительная ступенчатость полученных кривых. Как показали наши дальнейшие исследования, данный алгоритм перспективен для решения нелинейных задач электроники (расчёт схем неуправляемых и управляемых выпрямителей, частотных преобразователей и т.д.).

Чтобы проверить применимость данного алгоритма для расчёта частотных преобразователей, применим его для расчёта импульсных схем.

Рассмотрим расчёт схем при питании катушки индуктивности импульсами напряжения, которые периодически изменяют свою полярность. Такие задачи имеют место при исследовании различных импульсных схем. Применение разложения в ряд Фурье в этом случае носит проблематичный характер, так как при разложении в ряд Фурье импульсных функций имеет место явление Дж. Гиббса. Это явление значительно искажает кривую тока. Для уменьшения подобных искажений следует увеличивать количество членов ряда Фурье, что ведёт к усложнению и увеличению длительности расчётов.

Для того, чтобы исследовать применимость рассмотренного выше численного метода расчёта нелинейных схем разработаем контрольный пример. Для этого примера нами предложен метод расчёта подобных схем, основанный на расчёте переходных процессов классическим методом. Для полного понимания процесса расчёта приведена электрическая схема, реализующая питание катушки индуктивности знакопеременными импульсами (рис. 3).

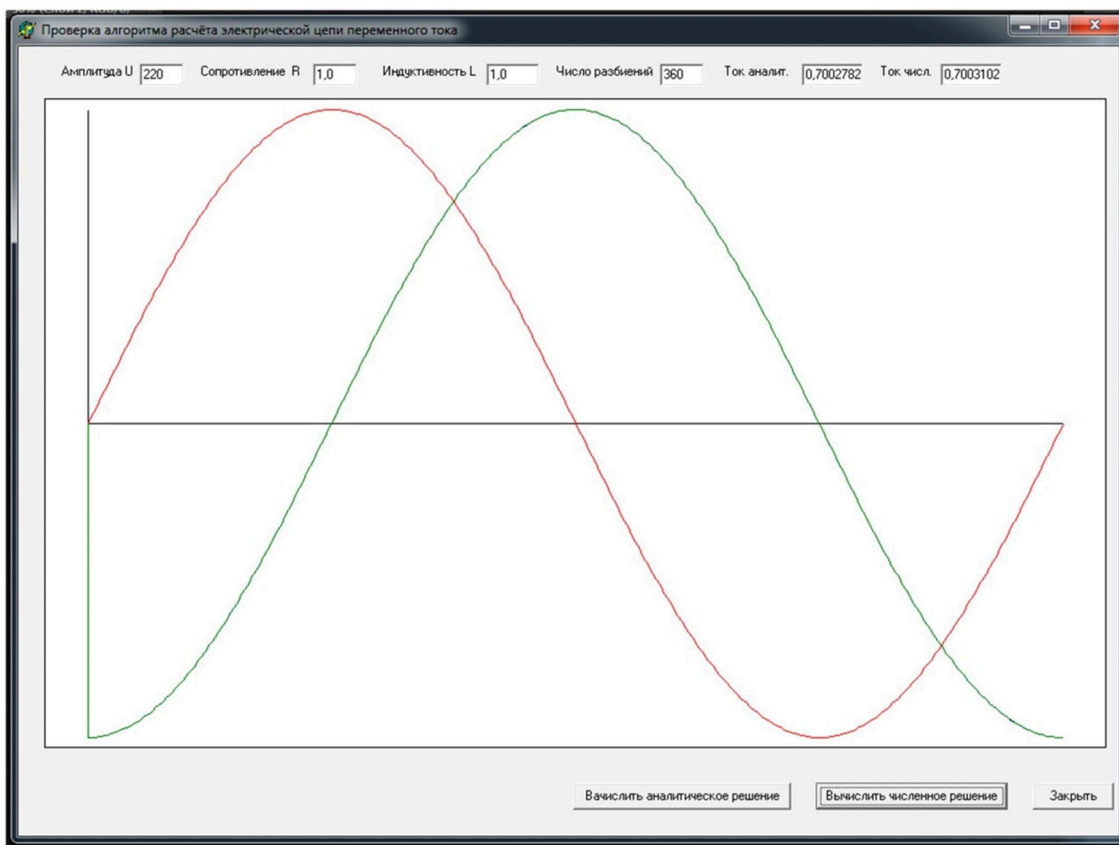


Рисунок 2 – Совместное аналитическое и численное решения

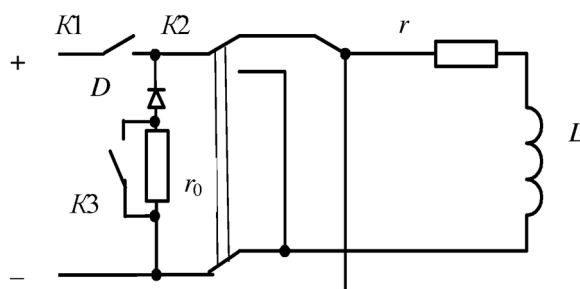


Рисунок 3 – Исследуемая схема

В этой схеме катушка индуктивности представлена её индуктивностью  $L$  и активным сопротивлением  $r$ . Контакт  $K1$  осуществляет подачу импульса напряжения на катушку индуктивности. Контакт  $K2$  осуществляет изменение полярности импульса подаваемого напряжения. Цепь, содержащая диод  $D$ , резистор  $r_0$  и  $K3$  моделирует процесс разряда катушки в период паузы напряжения.

Схема работает следующим образом. С помощью  $K2$  устанавливаем полярность импульса. Включая  $K1$ , подаём импульс напряжения соответствующей полярности на цепь, содержащую катушку индуктивности. При отключении  $K1$  катушка разряжается на цепь, содержащую диод  $D$  и резистор  $r_0$ . Далее с помощью  $K2$  изменяем полярность импульса и повторяем предыдущие действия.

Если рассматривать изложенный выше процесс включения схемы в периодическом режиме, то применение классического метода расчёта переходных процессов известным способом невозможно. Это вызвано тем, что при расчёте переходного процесса необходимо знать начальные условия. А в рассматриваемом случае эти начальные условия как раз и неизвестны. Поэтому нами предложен следующий метод решения подобных задач, который изложен ниже.

Зададимся произвольным значением начального тока. Далее разобьём периодический процесс на ряд переходных процессов, а именно. Первый процесс – подача на катушку положительного импульса напряжения. Второй процесс – отключение катушки и разряд её на активное сопротивление. Третий процесс – подача на катушку отрицательного импульса напряжения. Четвёртый процесс – отключение катушки и разряд её на активное сопротивление. Значение тока в конце четвёртого процесса должно быть равно начальному току в начале первого процесса. При таком подходе к вычислениям, мы рассчитываем пе-



риодический процесс при питании катушки индуктивности знакопеременными импульсами. Подобный подход можно распространить на схемы любой степени сложности и с любым набором элементов.

Рассмотрим первый процесс. При подаче напряжения на катушку индуктивности ток будет изменяться по известной зависимости

$$i = \frac{U}{r} + Ae^{-\frac{r}{L}t} \tag{3}$$

Ток перед включением  $i(+0) = i(-0) = i_H = \frac{U}{r} + A$ .

Следовательно,

$$A = i_H - \frac{U}{r}$$

Отсюда выражение (3) примет вид

$$i = \frac{U}{r} + \left( i_H - \frac{U}{r} \right) e^{-\frac{r}{L}t} \tag{4}$$

Длительность импульса напряжения  $t_u$ . Через время  $t_u$  наступит второй процесс, то есть произойдёт отключение по закону

$$i = Ae^{-\frac{r+r_0}{L}t} \tag{5}$$

Ток в момент отключения в соответствии с выражением (4)

$$i_{откл+} = \frac{U}{r} + \left( i_H - \frac{U}{r} \right) e^{-\frac{r}{L}t_u} \tag{6}$$

Учитывая (6) найдём  $A$  в выражении (5)

$$\frac{U}{r} + \left( i_H - \frac{U}{r} \right) e^{-\frac{r}{L}t_u} = A \tag{7}$$

Окончательно (5) примет вид

$$i = \left[ \frac{U}{r} + \left( i_H - \frac{U}{r} \right) e^{-\frac{r}{L}t_u} \right] e^{-\frac{r+r_0}{L}t} \tag{8}$$

Далее наступит третий процесс. В соответствии с выражением (8) через время  $t_n$  (длительность паузы напряжения) ток будет равен

$$i_{вкл} = \left[ \frac{U}{r} + \left( i_H - \frac{U}{r} \right) e^{-\frac{r}{L}t_u} \right] e^{-\frac{r+r_0}{L}t_n} \tag{9}$$

Ток в третьем переходном процессе с учётом (9) будет описываться формулой

$$i = -\frac{U}{r} + \left\{ \left[ \frac{U}{r} + \left( i_H - \frac{U}{r} \right) e^{-\frac{r}{L}t_u} \right] e^{-\frac{r+r_0}{L}t_n} + \frac{U}{r} \right\} e^{-\frac{r}{L}t} \tag{10}$$

Исходя из (10), ток в момент отключения отрицательного импульса, то есть в начале четвёртого процесса

$$i_{откл-} = -\frac{U}{r} + \left\{ \left[ \frac{U}{r} + \left( i_H - \frac{U}{r} \right) e^{-\frac{r}{L}t_u} \right] e^{-\frac{r+r_0}{L}t_n} + \frac{U}{r} \right\} e^{-\frac{r}{L}t_u} \tag{11}$$

Переходный процесс отключения после окончания отрицательного импульса

$$i = \left\{ -\frac{U}{r} + \left\{ \left[ \frac{U}{r} + \left( i_H - \frac{U}{r} \right) e^{-\frac{r}{L}t_u} \right] e^{-\frac{r+r_0}{L}t_n} + \frac{U}{r} \right\} e^{-\frac{r}{L}t_u} \right\} e^{-\frac{r+r_0}{L}t} \tag{12}$$

Конечный ток четвёртого процесса через время  $t_n$ , который равен начальному току первого процесса, будет



$$i_k = i_H = \left\{ -\frac{U}{r} + \left[ \frac{U}{r} + \left( i_H - \frac{U}{r} \right) e^{-\frac{r}{L}t_u} \right] e^{-\frac{r+r_0}{L}t_n} + \frac{U}{r} \right\} e^{-\frac{r}{L}t_u} e^{-\frac{r+r_0}{L}t_n} \quad (13)$$

Выразим из (13)  $i_H$  –

$$i_H = \frac{1 - e^{-\left( 2\frac{r}{L}t_u + 2\frac{r+r_0}{L}t_n \right)}}{\frac{U}{r} e^{-\frac{r+r_0}{L}t_n} \left\{ e^{-\frac{r}{L}t_u} \left[ e^{-\frac{r+r_0}{L}t_n} - e^{-\left( \frac{r}{L}t_u + \frac{r+r_0}{L}t_n \right)} + 1 \right] - 1 \right\}} \quad (14)$$

Получив выражение (14), мы замкнули переходный процесс в конце периода на его начало и, тем самым, решили поставленную задачу.

Изложенный алгоритм расчёта импульсных схем был реализован в виде программы для ЭВМ [4]. С помощью указанной программы были проведены расчёты схем при разных значениях разрядного сопротивления  $r_0$ . На рисунке 4 представлен качественный результат расчёта при сопротивлении  $r_0 = \infty$ . Из графика видно, что при отключении катушки ток практически мгновенно падает до нуля. Это обстоятельство может привести к перенапряжению на катушке. При сопротивлении  $r_0 = 0$  (рис. 5) кривая тока принимает трапецеидальный характер. Перенапряжения в этом случае маловероятны.

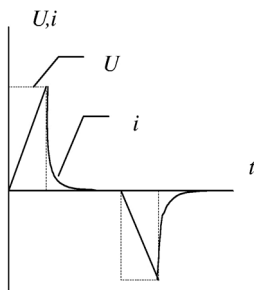


Рисунок 4 – Кривая тока при  $r_0$  равном бесконечности

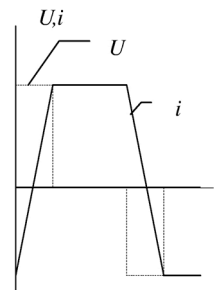


Рисунок 5 – Кривая тока при  $r_0 = 0$

На рисунке 6 представлен результат работы программы по получению аналитического решения. Красным светом показаны импульсы напряжения, а синим цветом – импульсы тока.

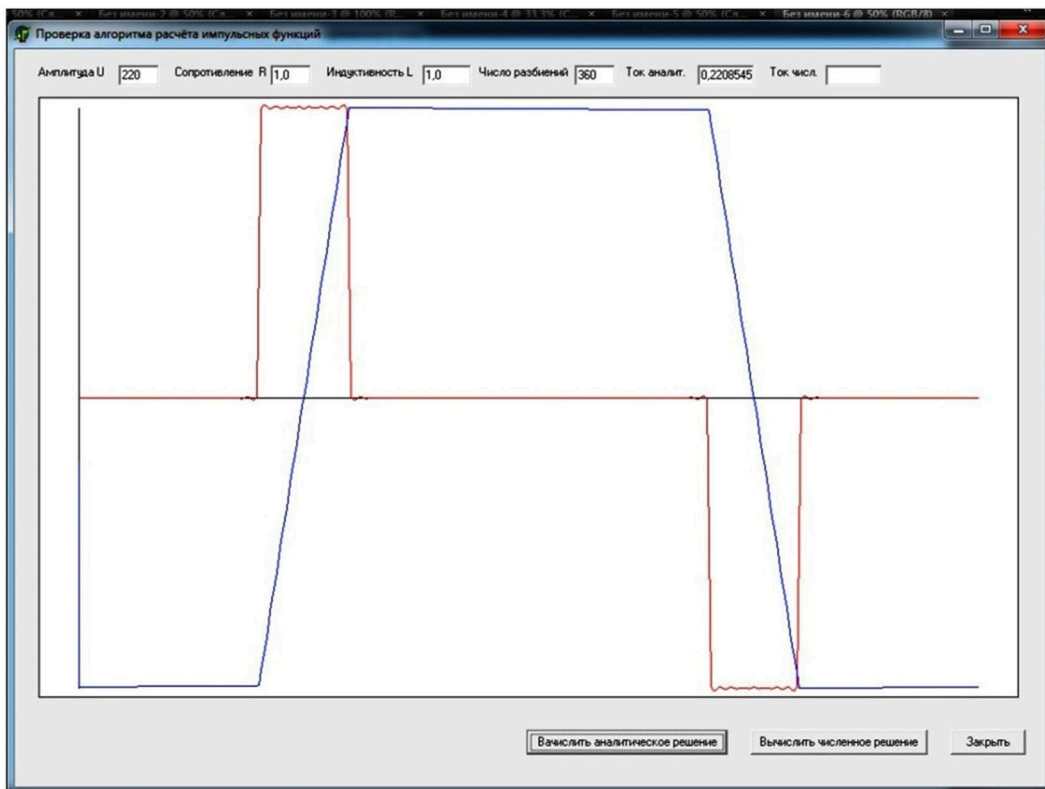


Рисунок 6 – График аналитического решения





Данная задача была решена и численным методом, предложенным нами для расчёта нелинейных схем.

На рисунке 7 представлен график численного решения поставленной в контрольном примере задачи. Здесь видно, что на изломах имеется явление, напоминающее явление Гиббса. В принципе данную проблему можно будет ликвидировать применяя сглаженные на углах импульсы напряжения, что имеет место в реальных импульсных схемах.

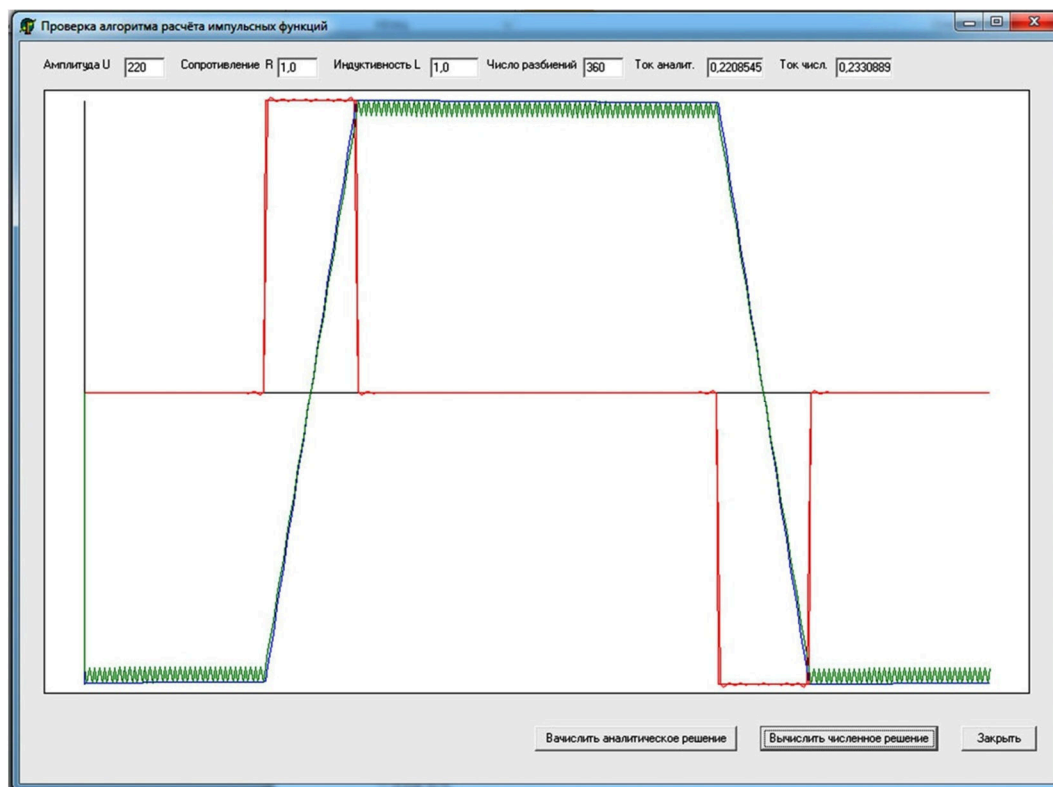


Рисунок 7 – График численного решения

#### Литература:

1. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники. Т. 1. – М.-Л. : Энергия, 1966. – 562 с.
2. Филиппов Е. Нелинейная электротехника. – М. : Энергия, 1968. – 503 с.
3. Попов Б.К., Попова О.Б., Мищенко С.Н. Алгоритм расчёта электрических цепей переменного тока // Технические и технологические системы. Материалы Третьей международной научной конференции «ТТС-11». Сборник материалов. – Краснодар : филиал ВУНЦ ВВС «ВВА», 2011. – 312 с.
4. Попов Б.К. Тестирование численного алгоритма расчёта электрических цепей переменного тока. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2011616560, 23.08.11.
5. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ 2012610916, 20.01.12. Расчёт переходного процесса от импульсной функции / Б.К. Попов. – 5 с.

#### References:

1. Neumann L.R., Demirchyan K.S. Theoretical bases of electrical equipment. V. 1. – M.-L. : Energy, 1966. – 562 p.
2. Filippov E. Nonlinear electrical equipment. – M. : Energy, 1968. – 503 p.
3. Popov B.K., Popova O.B., Mishchenko S.N. Algorithm of calculation of electric chains of alternating current // Technical and technological systems. Materials of the Third international scientific TTS-11 conference. Collection of materials. – Krasnodar : branch of VUNTs Air Force, 2011. – 312 p.
4. Popov B.K. Testing of a numerical algorithm of calculation of electric chains of alternating current. Certificate on official registration of the computer program № 2011616560, 23.08.11.
5. Certificate on official registration of the computer program 2012610916, 20.01.12. Calculation of transition process from pulse function / B.K. Popov. – 5 p.



УДК 621.31

## ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНАЯ ОЧИСТИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА С ИНДУКТИВНО-ЕМКОСТНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ

### ELECTRO-HYDRO IMPULSE PURIFICATION SYSTEM WITH INDUCTIVE-CAPACITIVE CONVERTER

**Хазиева Регина Тагировна**

старший преподаватель,  
кафедра электротехники  
и электрооборудования предприятий,  
Уфимский государственный нефтяной  
технический университет  
khazievart@mail.ru

**Бочкарева Татьяна Андреевна**

магистрант,  
Уфимский государственный нефтяной  
технический университет  
bochkareva1994@mail.ru

**Аннотация.** Данная статья посвящена исследованию электрогидроимпульсной очистительной системы, которая применяется в нефтяной промышленности для решения проблемы образования асфальто-смолопарафиновых отложений на участках насосно-компрессорных труб. Источник питания этой системы содержит индуктивно-емкостный преобразователь на базе многофункционального интегрированного электромагнитного компонента.

**Ключевые слова:** электрогидроимпульсная очистительная система, источник вторичного электропитания, индуктивно-емкостный преобразователь, многофункциональный интегрированный электромагнитный компонент.

**Khazieva Regina Tagirovna**

Senior Lecturer,  
Department of Electrical Engineering  
and Electrical Equipment of Enterprises,  
Ufa State Petroleum Technological University  
khazievart@mail.ru

**Bochkareva Tatiana Andreevna**

Master student,  
Ufa State Petroleum Technological University  
bochkareva1994@mail.ru

**Annotation.** This article is devoted to the research of the electro-hydro impulse purification system, which is used in the oil industry to solve the problem of the formation of asphalt-tar-paraffin deposits on the sections of tubing. The power supply of this system contains the inductive-capacitive converter based on the multifunction integrated electromagnetic component.

**Keywords:** electro-hydro impulse purification system, secondary power source, inductive-capacitive converter, multifunction integrated electromagnetic component.

**В** нефтяных скважинах в процессе эксплуатации насосно-компрессорных труб (НКТ) на внутренних стенках происходит значительное налипание асфальтосмолистых веществ, парафинов и других отложений, присутствующих в сырой нефти. Перед проведением комплекса ремонтных работ требуется провести очистные мероприятия. Для решения данной проблемы широко распространена электрогидроимпульсная очистительная система (ЭГОС) [1].

Технология ЭГОС основана на электрогидравлическом эффекте (ЭГЭ), который признан самым эффективным способом перевода электрической энергии в механическую.

Сущность ЭГОС заключается в использовании специально сгенерированного импульсного разряда в жидкости. Канал разряда может быть сформирован между двумя электродами или между потенциальным электродом и стенкой НКТ [2]. При пробое жидкости вокруг канала разряда возникает зона высокого давления, диаметр которой пропорционален мощности импульса. Высокие гидравлические давления по мере удаления от разряда быстро падают. Жидкость, получив ускорение от расширяющегося с большой скоростью канала разряда, перемещается от него во все стороны, образуя на том месте, где был разряд, значительную по объему кавитационную полость и вызывая первый (основной) гидравлический удар. Затем полость также с большой скоростью смыкается, создавая второй кавитационный гидравлический удар. На этом единичный цикл ЭГЭ заканчивается, и он может повторяться неограниченное число раз соответственно заданной частоте следования разрядов.

Развитие искрового разряда во времени происходит путем последовательного «прорастания» стримеров в межэлектродном промежутке (рис. 1) [3]. Стример, проникая в толщу отложений, раскалывает их и измельчает. Разрушенная масса отложений удаляется из очищаемой полости скоростными гидропотоками в специальный сборный бункер.

Схематично процесс очистки НКТ от внутренних отложений изображен на рисунке 2.

Основными техническими характеристиками ЭГОС являются внутренний диаметр очищаемых труб и их максимальная длина, толщина удаляемых отложений, скорость очистки, напряжение питания, потребляемая мощность и габаритные размеры.



Рисунок 1 – Растущий стример на электроде

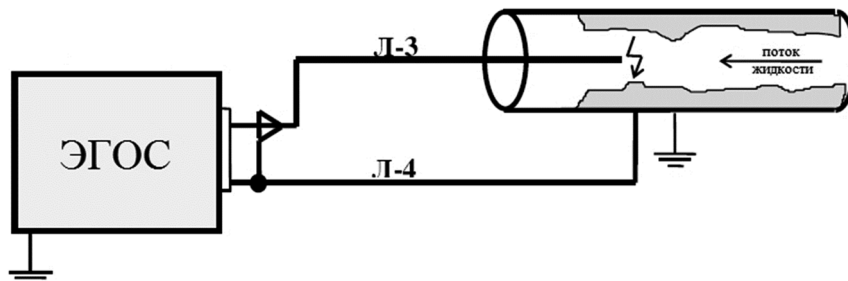


Рисунок 2 – Блок-схема процесса очистки НКТ от внутренних отложений

Конструкция ЭГОС позволяет в широком диапазоне изменять энергию импульсов и частоту их следования. Это придает всему комплексу очистки большую гибкость и позволяет выбрать оптимальные параметры при очистке труб разного диаметра и с разным типом отложений [4].

Для инициирования процесса разряда ЭГОС необходимо обеспечить определенный уровень напряжения и частоты, что достигается применением источника вторичного электропитания (ИВЭП). Как правило, источник питания в своем составе имеет выпрямитель, сглаживающий фильтр, автономный инвертор и трансформатор.

Функциональные возможности современных ИВЭП значительно расширились и существенно изменились в последние годы, что вызвано стремлением уменьшить массогабаритные характеристики ИВЭП и повысить их КПД [5]. Поэтому авторами статьи предлагается использовать в ИВЭП ЭГОС индуктивно-емкостный преобразователь (ИЕП) на базе многофункционального интегрированного электромагнитного компонента (МИЭК).

Проводящие обкладки МИЭК представляют собой медную ленту, свернутую в спираль и разделенную диэлектриком (рис. 3), и, таким образом, выполняют функции индуктивности и емкости. В цепи возникает резонанс, когда частота свободных колебаний МИЭК становится равной частоте питающей сети. Данное схемотехническое решение позволяет значительно снизить объем ИВЭП, а также повысить надежность и коэффициент мощности устройства.

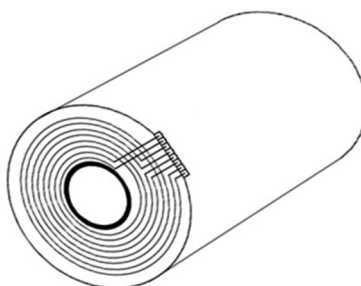


Рисунок 3 – Конструкция МИЭК

На рисунке 4 представлена схема ИВЭП ЭГОС. Схема состоит из трехфазного мостового выпрямителя; емкостного фильтра; автономного инвертора; ИЕП, подключенного к первичной обмотке согласующего трансформатора; высоковольтного выпрямительного столба; емкостного накопителя (ЕН) энергии и разрядной цепи.

Низковольтный неуправляемый выпрямитель ИВЭП выполнен по схеме Ларионова. Данная схема обладает наилучшим коэффициентом использования трансформатора по мощности, наименьшим обратным напряжением на диодах и высокой частотой пульсации выпрямленного напряжения. Для сглаживания пульсаций напряжения на выходе выпрямителя применяется емкостный фильтр.

После выпрямителя с фильтром в схеме ИВЭП следует автономный инвертор напряжения, в диагонали которого подключен ИЕП. Для повышения напряжения до необходимого уровня в схеме применяется повышающий силовой трансформатор. Чтобы снизить массу зарядного блока, ИЕП и первичная обмотка трансформатора выполнены в виде единого конструкторско-технологического компонента [6].

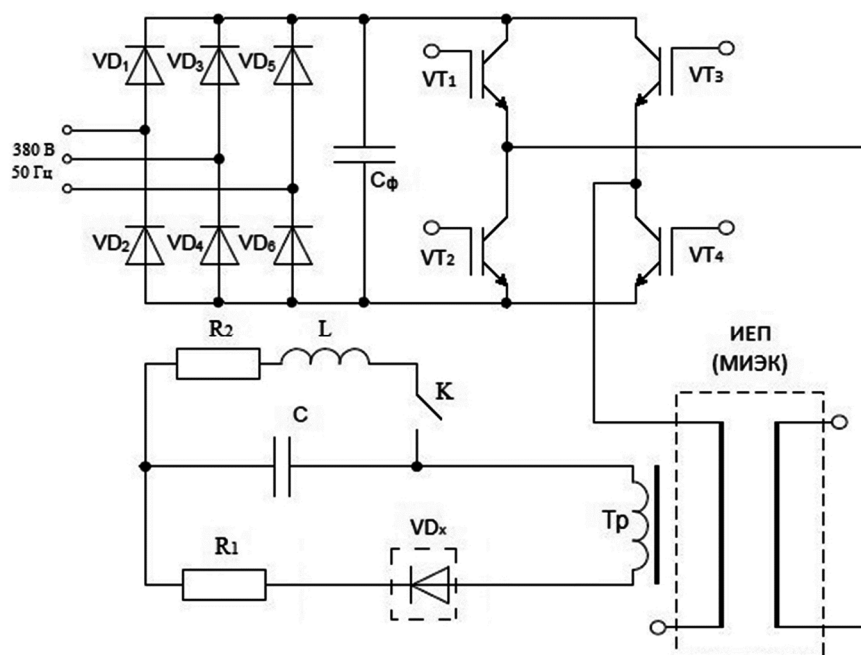


Рисунок 4 – Схема источника вторичного электропитания ЭГОС

В качестве высоковольтного выпрямителя в схеме используется выпрямительный столб, представляющий собой совокупность соединенных последовательно полупроводниковых диодов. Конструкция выпрямительного столба содержит до десяти (и более) германиевых или кремниевых диодов, оформляется в пластмассовом корпусе с двумя электрическими выводами.

Разрядная цепь ЭГОС представляет собой контур, который состоит из индуктивности передающих кабелей, активного сопротивления передающих кабелей и рабочего разрядного промежутка, емкости накопителя энергии – высоковольтного импульсного конденсатора и коммутационного ключа.

Задача исследования электрогидроимпульсной очистительной системы с индуктивно-емкостным преобразователем на основе МИЭК является актуальной.

В статьях [7, 8] исследовались различные схемы ИЕП на основе дискретных и гибридных электромагнитных элементов. Было выявлено, что применение МИЭК в ИЕП позволяет уменьшить массу, габариты и стоимость устройств за счет уменьшения числа компонентов, глубокой интеграции элементов при обеспечении возможности трансформации электрической энергии и регулировании резонансной частоты устройств. Разработаны математические модели в программной среде MathCad, которые позволяют выбрать наиболее эффективное схемотехническое решение ИЕП [9, 10].

Источники питания ЭГОС работают в импульсных режимах, что влияет на работу сети, качество электрической энергии, нефтяное оборудование и месторождения. Поэтому был проведен анализ работы ИВЭП электрогидроимпульсной очистки НКТ с точки зрения создания им электромагнитных помех и оценки электромагнитной совместимости с системами электроснабжения. Выполнение ЭГОС на основе МИЭК позволяет обеспечить повышение качества электрической энергии за счет снижения уровня электромагнитных помех и коэффициента несинусоидальности [11].

В статьях [12, 13, 14, 15] проведен анализ электромагнитных параметров ИЕП на основе МИЭК и оценка режимов работы источника питания и ЭГОС, связанная с процессами заряда и разряда ЕН на активно-индуктивную нагрузку. Разработаны математические модели, которые позволяют выбрать необходимые параметры ИВЭП ЭГОС и наиболее эффективное схемотехническое решение ИЕП без проведения многократных экспериментов по подбору оптимальных параметров.

В перспективе целесообразно исследовать режимы работы МИЭК в составе ИЕП в двухтактных схемах автономного инвертора при циклическом перезаряде ЕН.

### Литература:

1. Совершенствование очистки насосно-компрессорных труб от асфальто-смолопарафиновых отложений [Электронный ресурс] / А.Н. Миннивалеев, Л.М. Зарипова, М.С. Габдрахимов // Нефтегазовое дело: электрон. науч. журнал. – 2013. – № 2. – С. 218–226.
2. Технология очистки насосно-компрессорных труб от радиоактивных твердых солевых отложений [Электронный ресурс] / В.А. Глушечков [и др.] // Записки горного института. – 2004. – С. 175–177.
3. Юткин Л.А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности. – Л. : Машиностроение, Ленингр. Отделение. – 1986. – 253 с.
4. Технологический комплекс электрогидроимпульсной очистки насосно-компрессорных труб от твердых отложений ЗЕВС-41 / ООО «Зевс-Трубопровод». [Электронный ресурс]. – URL : <http://www.zevs-irp.ru/ru/Article-zevs-NKT>



5. Гейтенко Е.Н. Источники вторичного электропитания. Схемотехника и расчет. – М. : СОЛОН-ПРЕСС, 2008. – 448 с. [Электронный ресурс]. – URL : <http://ibooks.ru/reading.php?productid = 335508>
6. Патент 117748 (РФ) от 27.06.2012, МКИ Н 02 М 7/162. Устройство заряда емкостного накопителя / Р.В. Кириллов, С.Г. Конесев, А.В. Мухаметшин, М.Р. Садилов, Р.Т. Хазиева. – БИ, 2012. – № 18.
7. Конесев С.Г., Хазиева Р.Т., Бочкарева Т.А. Математическая модель устройства заряда емкостного накопителя на базе индуктивно-емкостного преобразователя // Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий: сб. науч. тр. III Междунар. (VI Всерос.) науч.-техн. конф., 26–27 апр. 2017 г.; УГНТУ. – Уфа, 2017. – Т. 1. – С. 384–390.
8. Хазиева Р.Т., Бочкарева Т.А. Моделирование устройства заряда емкостного накопителя на базе индуктивно-емкостного преобразователя // Актуальные проблемы науки и техники-2017 : сб. материалов X Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых; УГНТУ. – Уфа, 2017. – Т. I. – С. 276–278.
9. Khazieva R.T., Kirillov R.V., Kolesnikova O.I. Modeling of capacitive storage charge device based on multi-function integrated electromagnetic component // Нефть и газ. – 2015 : сб. тр. 69-й Междунар. мол. науч. конф., 2015. – С. 388–393.
10. Конесев С.Г., Хазиева Р.Т., Конесев С.Г. Моделирование устройства заряда емкостного накопителя электрогидравлического генератора // Инновационные направления развития электропривода, электротехнологий и электрооборудования : межвуз. сб. науч. тр., 2012. – С. 184–188.
11. Хазиева Р.Т., Бочкарева Т.А. Анализ электромагнитной совместимости индуктивно-емкостного преобразователя с системой электроснабжения // Энергетические системы : сб. тр. II Междунар. науч.-техн. конф. (23–24 нояб. 2017 г.); БГТУ. – Белгород, 2017. – С. 225–228.
12. Хазиева Р.Т., Бочкарева Т.А., Конесев С.Г. Исследование разрядной цепи электрогидроимпульсной очистительной системы // Энергия молодежи для нефтегазовой индустрии: Междунар. науч.-практ. конф. молод. ученых. – Альметьевск, 2017. – Т. 3. – С. 74–80.
13. Хазиева Р.Т., Бочкарева Т.А. Математическое моделирование электрогидроимпульсной очистительной системы // Информационные технологии в моделировании и управлении: подходы, методы, решения: сб. науч. ст. I Всерос. науч. конф. – Тольятти, 12–14 декабря 2017 г. – в 2 ч. – Тольятти, 2017. – Ч. 1. – С. 320–328.
14. Хазиева Р.Т., Бочкарева Т.А. Исследование циклического перезаряда электрогидроимпульсной очистительной системы // Энергетические и электротехнические системы: междунар. сб. науч. трудов. – Магнитогорск : Изд-во МГТУ. Г.И. Носова, 2017. – С. 258–263.
15. Компьютерная модель системы заряда емкостного накопителя на основе индуктивно-емкостного преобразователя / С.Г. Конесев [и др.] // Нефтегазовое дело: электр. науч. журн. – 2015. – № 4. – С. 374–390.

#### References:

1. Minnivaliev A.N., Zaripova L.M., Gabdrakhimov M.S. Improving cleaning of pump-compressor pipes from wax deposits [Electronic resource] // *Neftegazovoe Delo: Electronic scientific journal*. – 2013. – № 2. – P. 218–226.
2. Technology of cleaning of pump-compressor pipes from radioactive solid salt deposits [Electronic resource] / V.A. Glushenkov [etc.] // *Notes of the mining Institute*. – 2004. – P. 175–177.
3. Yutkin L.A. Electrohydraulic effect and its application in industry. – L. : Engineering, Leningr. Office. – 1986. – 253 p.
4. Electrohydropulse technological complex cleaning of pump-compressor pipes from solid deposits ZEVS-41 / Zevs-Tubing. – [Electronic resource]. – URL : <http://www.zevs-irp.ru/ru/Article-zevs-NKT>
5. Gaitenko E.N. The secondary power sources. Circuit design and calculation. – М. : SOLON-PRESS, 2008. – 448 p. – [Electronic resource]. – URL : <http://ibooks.ru/reading.php?productid = 335508>
6. Patent 117748 (RF) dated 27.06.2012, MKI H 02 M 7/162. The device of capacitor storage charge / R.V. Kirillov, S.G. Konesev, A.V. Mukhamedshin, M.R. Sadikov, R.T. Khazieva. – BI, 2012. – № 18.
7. Konesev S.G., Khazieva R.T., Bochkareva T.A. Mathematical model of the charge capacitor storage on the basis of the inductive-capacitive converter // *Electric, Electro Technology and Electrical Equipment of Enterprises: International Conference, 26–27 April 2017; USPTU*. – Ufa, 2017. – Vol. 1. – P. 384–390.
8. Khazieva R.T., Bochkareva T.A. Modeling of the charge capacitor storage on the basis of the inductive-capacitive converter // *Actual problems of science and technology-2017 : International Conference; USPTU*. – Ufa, 2017. – Vol. I. – P. 276–278.
9. Khazieva R.T., Kirillov R.V., Kolesnikova O.I. Modeling of capacitive storage charge device based on multifunction integrated electromagnetic component // *Oil and gas*. – 2015: International Conference, 2015. – P. 388–393.
10. Konesev S.G., Khazieva R.T. Modeling of capacitive storage charge device of the electro-hydraulic generator // *Innovative directions of development of electric drive, electrotechnology and electric equipment*. – 2012. – P. 184–188.
11. Khazieva R.T., Bochkareva T.A. Analysis of electromagnetic compatibility inductive-capacitive converter with the power system // *Energy systems: International Conference, 23–24 Nov. 2017; BSTU*. – Belgorod, 2017. – P. 225–228.
12. Khazieva R.T., Bochkareva T.A., Konesev S.G. The research of discharge circuit of electro-hydro impulse purification system // *The Energy of youth for the oil and gas industry: International Conference*. – Almetьевsk, 2017. – Vol. 3. – P. 74–80.
13. Khazieva R.T., Bochkareva T.A. Mathematical modeling of electro-hydro impulse purification system // *Information technology modeling and management: approaches, methods, solutions: International Conference, Togliatti, 12–14 December 2017*. – 2017. – Part 1. – P. 320–328.
14. Khazieva R.T., Bochkareva T.A. The research of cyclic recharge of electro-hydro impulse purification system // *Power and electrical system: International Conference*. – Magnitogorsk : MSTU named after G.I. Nosov, 2017. – P. 258–263.
15. Computer model of the capacitive storage charge system based on the inductive-capacitive converter / S.G. Konesev [etc.] // *Neftegazovoe Delo: Electronic scientific journal*, 2015. – № 4. – P. 374–390.



УДК 621

## ПЕРСПЕКТИВНАЯ КОНСТРУКЦИЯ БЕСКОНТАКТНОГО ВЕТРО-СОЛНЕЧНОГО ГЕНЕРАТОРА

### PROSPECTIVE DESIGN OF NON-CONTACT WIND-SOLAR GENERATOR

**Христофоров Михаил Сергеевич**

начальник участка «Электроснабжение»  
службы главного инженера,  
ФКП «Армавирская биофабрика»  
mkhristoforov87@mail.ru

**Христофорова Ксения Сергеевна**

студентка,  
Армавирский механико-технологический институт (филиал),  
Кубанский государственный технологический университет

**Аннотация.** Приводится перспективная конструкция аксиального ветро-солнечного генератора для электротехнического комплекса.

**Ключевые слова:** аксиальные магнитопроводы, напряжение, синхронизация.

**Hristoforov Mikhail Sergeevich**

Supervising foreman «Power supply» of  
service of the chief engineer,  
PCF «Armavir biofactory»  
mkhristoforov87@mail.ru

**Hristoforova Ksenia Sergeevna**

Student,  
Armavir mekhaniko-institute of technology  
(branch),  
Kuban state technological university

**Annotation.** Provides promising axial design  
of wind-solar generator for electrical complex.

**Keywords:** axial magnetic circuits, voltage  
synchronizing.

**В** настоящее время вопросам использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и альтернативной «чистой» энергетики уделяется все большее внимание. Это обусловлено рядом факторов. С одной стороны есть понимание того, что природные ресурсы не безграничны и ископаемые запасы топлива рано или поздно закончатся. С другой стороны, использование традиционной (невозобновляемой) энергетики приводит к все более заметным экологическим последствиям (загрязнение окружающей среды, увеличение количества углекислого газа в атмосфере, глобальное потепление и т.п.) [1–3].

Первое место в мире из всех видов ВИЭ по объемам применения занимает ветровое энергообеспечение, а второе место – солнечное. В солнечном энергообеспечении «лидирует» солнечное тепловое энергообеспечение. Всего в мире эксплуатируется 471 млн м<sup>2</sup> солнечных водонагревательных установок (гелиоустановок) установленной мощностью 330 ГВт с годовой выработкой тепловой энергии 281 ГВт.ч. В России в настоящее время работают гелиоустановки суммарной установленной мощностью 8,76 МВт (12514 м<sup>2</sup>). Строительство ведется в основном в трех регионах: Краснодарском крае, Бурятии, Дальнем Востоке. Условия солнечной радиации нашей страны позволяют увеличить площадь гелиоустановок до 10 млн м<sup>2</sup>. В наибольших объемах солнечные системы теплоснабжения сооружаются в Краснодарском крае – 7000 м<sup>2</sup>. Перспективы их развития оцениваются в 1 млн м<sup>2</sup> [1].

В связи с этим весьма важным является вопрос разработки, исследования и внедрения преобразователей энергии Солнца и ветра в электроэнергию высокого качества и построения на их основе электротехнических комплексов, которые могут работать как автономно, так и параллельно с сетью промышленного трехфазного тока.

На кафедре авиационного и радиоэлектронного оборудования Краснодарского ВВАУЛ совместно с кафедрой электротехники и электрических машин КубГТУ под руководством профессора Гайтова Б.Х. разработан и исследован ряд аксиальных преобразователей энергии ветра и Солнца в электроэнергию [4–10].

Для расширения области применения аксиального двухвходового бесконтактного ветро-солнечного генератора [10] путем обеспечения возможности подключения его в составе электротехнического комплекса к внешней трехфазной системе переменного тока и параллельной работы с ней на основе АДБВСГ [9] разработан синхронизированный аксиальный двухвходовый бесконтактный ветро-солнечный генератор (САДБВСГ).

Для этого в корпусе известного из [9] АДБВСГ установлены фотоэлектрический преобразователь, блок коммутации и синхронизатор напряжения.

В предлагаемом САДБВСГ осуществляется прямое преобразование световой энергии, поступающей на световой вход, в электрическую энергию постоянного тока, суммирование ее посредством электромагнитного преобразования с механической энергией, поступающей на механический вход



САДБВСГ, с одновременным преобразованием полученной суммарной энергии в электрическую энергию трехфазного напряжения переменного тока, синхронизированного по частоте с внешней трехфазной системой переменного тока.

Синхронизированное напряжение переменного тока подается в сеть для питания потребителей и во внешнюю трехфазную систему переменного тока.

Предлагаемый САДБВСГ, выполняя функцию суммирования механической и электрической энергии постоянного тока с одновременным преобразованием полученной суммарной энергии в электрическую энергию переменного тока, как и известный из [9] генератор, в то же время в отличие от него за счет обеспечения возможности прямого преобразования световой энергии и суммирования ее с механической энергией с последующим преобразованием полученной суммарной энергии в электрическую и обеспечения возможности подключения к внешней трехфазной системе переменного тока и параллельной работы с ней путем синхронизации выходного напряжения САДБВСГ с напряжением внешней трехфазной системы переменного тока (минимизации разности частоты выходного напряжения САДБВСГ и частоты напряжения внешней трехфазной системы переменного тока) позволяет расширить область применения ветро-солнечного генератора.

### Литература:

1. Бутузов В.А. Анализ мирового рынка гелиоустановок // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. – 2014. – № 2 (142). – С. 95–98.
2. Sokolsky A.K. Wind energy abroad and in Russia – current state and prospects // Sat. «Renewable energy sources». – М. : MSU, 2005. – P. 135–154.
3. Bezrukih P.P. The state and prospects for the development of renewable energy // Elektriika. – 2008. – № 9. – P. 3–10.
4. Система автономного электроснабжения на базе аксиальных электромагнитных устройств / Т.Б. Гайтова [и др.] // Труды Кубанского государственного аграрного университета. – 2011. – № 33. – С. 205–209.
5. Пат. РФ № 2450411, 12.01.2011 г. Аксиальная двухвходовая бесконтактная электрическая машина-генератор // Б.Х. Гайтов, Я.М. Кашин, Т.Б. Гайтова, А.Я. Кашин, Д.В. Пауков, А.В. Голощапов.
6. Пат. РФ № 2465706, 25.03.2011 г. Стабилизированный аксиальный бесконтактный генератор постоянного тока / Б.Х. Гайтов, Я.М. Кашин, Т.Б. Гайтова, А.Я. Кашин.
7. Пат. РФ № 2470446, 27.05.2011 г. Стабилизированный аксиальный генератор постоянного тока / Б.Х. Гайтов, Я.М. Кашин, Т.Б. Гайтова, А.Я. Кашин, Д.В. Пауков.
8. Кашин Я.М., Кашин А.Я., Пауков Д.В. Обоснование и разработка перспективных конструкций генераторных установок для систем автономного электроснабжения // Изв. вузов. Электромеханика. – 2012. – № 1. – С. 46–53.
9. Патент на изобретение RUS № 2561504, 16.06.2014. Аксиальный двухвходовый бесконтактный ветро-солнечный генератор // Б.Х. Гайтов, Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, Л.Е. Копелевич, А.В. Самородов.
10. Патент на изобретение RUS № 2617708, 17.04.2017. Синхронизированная аксиальная двухвходовая генераторная установка // Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, Л.Е. Копелевич, А.В. Самородов, М.С. Христофоров.

### References:

1. Butuzov V.A. Analyse the world market of solar power plants // International scientific journal for alternative energy and ecology. – 2014. – № 2 (142). – P. 95–98.
2. Sokolsky A.K. Wind energy abroad and in Russia – current state and prospects / Sat. «Renewable energy sources». – М. : MSU, 2005. – P. 135–154.
3. Bezrukih P.P. The state and prospects for the development of renewable energy // Elektriika. – 2008. – № 9. – P. 3–10.
4. Independent electric supply System based on the axial electromagnetic devices / T.B. Gajtova [etc.] // Works of the Kuban State Agrarian University. – 2011. – № 33. – P. 205–209.
5. Patent for invention RUS № 2450411, 12.01.2011 Axial non-contact electric machine-generator / B.H. Gajtov, Ya.M. Kashin, T.B. Gajtova, A.Ya. Kashin, D.V. Paukov, A.V. Goloshchapov.
6. Patent for invention RUS № 2465706, 25/03/2011. Stabilized axial proximity DC generator / B.H. Gajtov, Ya.M. Kashin, T.B. Gajtova, A.Ya. Kashin.
7. Patent for invention RUS № 2470446, 27/05/2011. Stabilized axial DC generator / B.H. Gajtov, Ya.M. Kashin, T.B. Gajtova, A.Ya. Kashin, D.V. Paukov.
8. Kashin Ya.M., Kashin A.Ya., Paukov D.V. Justification and development of promising designs for systems with autonomous generator supply // Izv. universities. Electromechanics. – 2012. – № 1. – P. 46–53.
9. Patent for invention RUS № 2561504, RUS 16.06.2014. Axial duhvuhodovj contactless wind-solar generator / B.H. Gajtov, Ya.M. Kashin, A.Ya. Kashin, L.E. Kopelevitch, A.V. Samorodov.
10. Patent for invention RUS № 2617708 RUS, 17.04.2017. Synchronized axial generator set / Ya.M. Kashin, A.Ya. Kashin, L.E. Kopelevitch, A.V. Samorodov, M.S. Khristoforov.



УДК 537

## АВТОМАТИЗАЦИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРООБОГРЕВА МВ-35

## AUTOMATION OF ELECTRICAL HEATING SYSTEMS MB-35

**Ягафаров Искандер Рамилевич**

Ведущий специалист отдела тепловодоснабжения  
ООО «РН-Юганскнефтегаз» ПАО «НК «Роснефть»  
YagafarovIskander@rambler.ru

**Yagafarov Iskander Ramilevich**

Leading specialist of the department of  
heat and water supply  
LLC «RN-Yuganskneftegaz» of  
PJSC «NK «Rosneft»  
YagafarovIskander@rambler.ru

**Аннотация.** Данная статья посвящена актуальной проблеме на сегодняшний день – повышение энергоэффективности. Большие резервы экономии топливно-энергетических ресурсов заключены в рациональном использовании электрической и тепловой энергии. Сегодня до одной трети всех производимых в стране энергоресурсов расходуется нерационально. Именно поэтому одним из главных приоритетов новой энергетической политики России является повышение эффективности использования энергетических ресурсов. В условиях постоянно растущих тарифов и дефицита энергетических мощностей экономия электроэнергии имеет жизненно важное значение, поскольку значительную долю себестоимости продукции составляет электроэнергия, а дефицит энергетических мощностей часто является одним из главных факторов, препятствующих расширению производства и развитию энергетической инфраструктуры.

**Annotation.** This article is devoted to the actual problem for today – the increase of energy efficiency. Large reserves of saving fuel and energy resources are contained in the rational use of electrical and thermal energy. Today, up to one-third of all energy resources produced in the country are spent irrationally. That is why one of the main priorities of Russia's new energy policy is to increase the efficiency of the use of energy resources. In the face of ever-increasing tariffs and a shortage of energy capacity, energy savings are vital because a significant share of the cost of production is electricity, and a shortage of energy capacity is often one of the main factors hindering the expansion of production and the development of energy infrastructure.

**Ключевые слова:** маломасляный выключатель (МВ-35), трансформаторная подстанция, автоматизация электрообогрева, регулятор мощности, сокращение затрат.

**Keywords:** low-oil switch (MV-35), transformer substation, automation of electric heating, power regulator, cost reduction.

### Существующие проблемы

На сегодняшний день на каждой подстанции 35/6 кВ установлено 2 маломасляных выключателя С-35, которые оборудуются 8 трубчатыми электронагревателями в дальнейшем ТЭН. На каждом выключателе установлено 4 обогревающих устройства. Три штуки предназначены для обогрева масляного бака на каждой фазе и один на обогрев электропривода. На 450 подстанциях для обогрева МВ-35 используется 3600 нагревательных элементов мощностью по 0,4 кВт·ч каждый, исходя из этого суммарное потребление в час составляет 1440 кВт и при тарифе 2,74 рубля за кВт·ч мы затрачиваем 24,3 млн рублей в год.

На данный момент включение обогрева производится вручную. Начиная с октября, включение обогрева осуществляется вне зависимости от температуры наружного воздуха, а выключение в мае.

Из рисунка 1 видно, что средняя температура октября составляет  $-1,4^{\circ}\text{C}$ , а в мае  $+4,1^{\circ}\text{C}$ . Таким образом производится не рациональный расход электроэнергии. Общий расход энергии за отопительный период составляет 8,9 МВт.

### Предлагаемые пути решения проблемы

Для энергосбережения в системах электрообогрева маломасляных выключателей типа С-35 установленных на трансформаторных подстанциях ПС-35/6 кВ, предлагается использовать регулятор мощности, а именно тиристорный регулятор мощности 2ТРМ1 тип корпуса Д. Данное внедрение рассматривается на примере ООО «РН-Юганскнефтегаз».

Принципиальная работа схемы приведена на рисунке 2. Предусматривается автоматизация ТЭН установленных на масляных выключателях (МВ) типа С-35 с ТЭН типа ТЭН-60А 13\0,4 110, необходимо знать, что такие обогреватели широко распространены в промышленности и использование автоматизации на данном оборудовании позволит унифицировать систему электрообогрева. Установив датчик температуры наружного воздуха, подключаем его к двухканальному измерителю температуры (2ТРМ1), на котором будет выставлена уставка (по температуре) включения обогрева МВ. Согласно паспорта и инструкции по эксплуатации С-35 устройство подогрева должно включаться в работу при снижении температуры окружающего воздуха до минус 15 градусов  $^{\circ}\text{C}$  и отключаться при минус 14 градусов  $^{\circ}\text{C}$ . При достижении на улице требуемой температуры 2ТРМ1 подает сигнал на включение обогрева, а при достижении температуры  $-14^{\circ}\text{C}$  2ТРМ1 подает сигнал на выключение обогрева. Таким образом, происходит уменьшение потребления электричества.



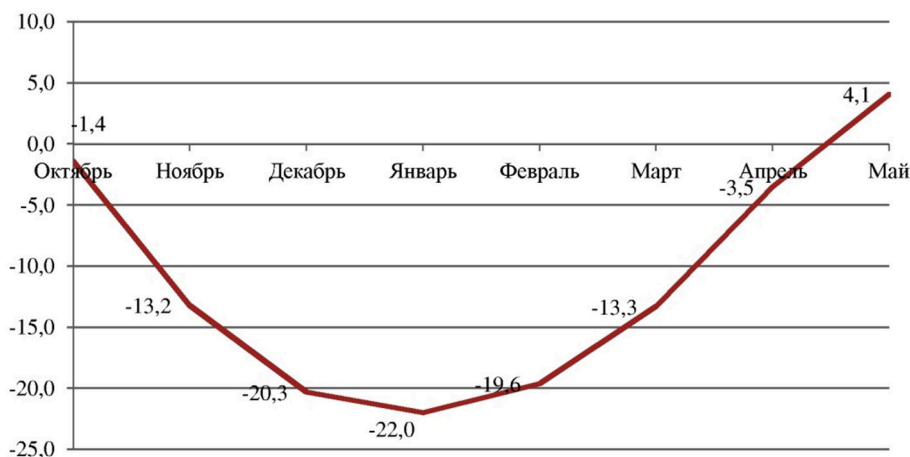


Рисунок 1 – Средняя месячная температура воздуха г. Сургут по СНиП 23-01-99 [4]

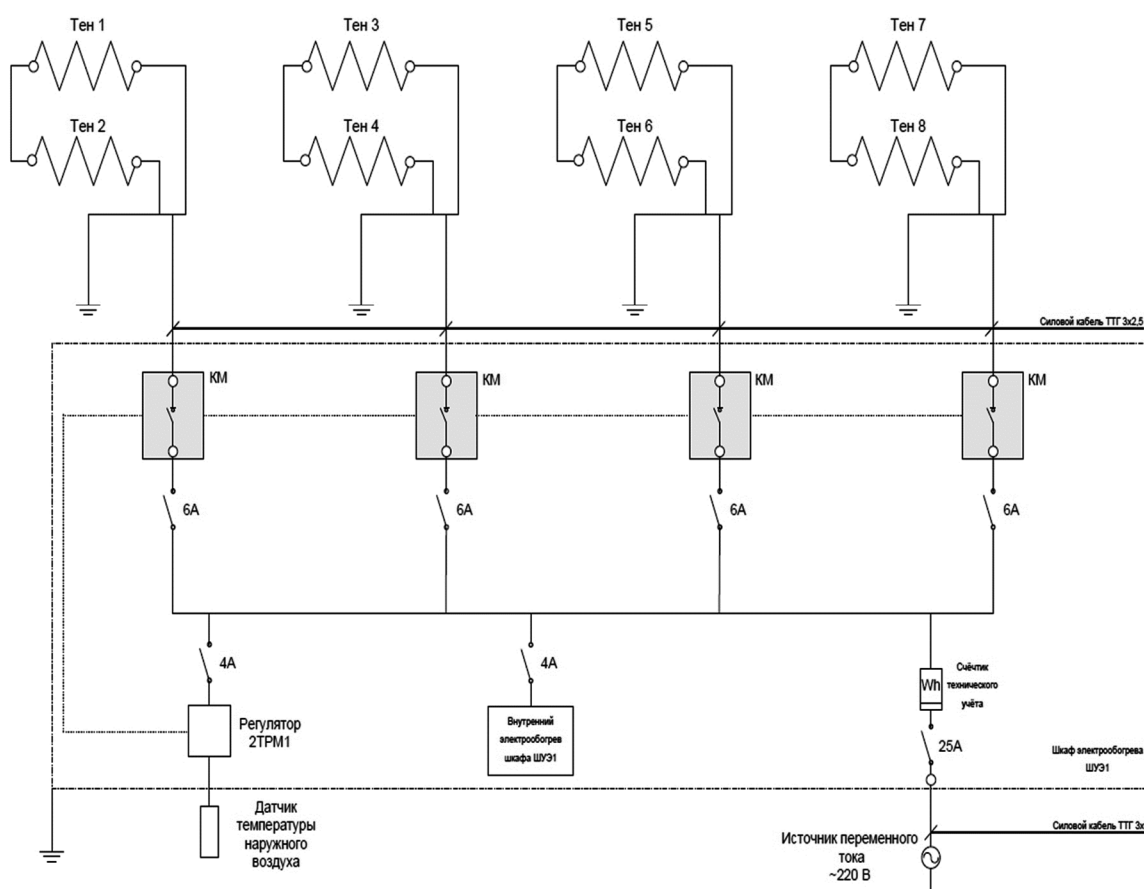


Рисунок 2 – Принципиальная схема автоматизации электрообогрева МВ типа С-35

В результате установки автоматизации электрообогрева потребление электроэнергии уменьшится на 1,07 МВт в осенний период и 0,5 МВт в весенний период, общее количество составит 1,57 МВт за год. Что равняется 4,3 млн. рублей. Общий расход энергии за отопительный период не превысит 7,3 МВт. Как видно из рисунка 3 потребление электроэнергии после автоматизации по фактической температуре будет значительно ниже, чем по средней температуре, взятой из СНиП 23-01-99, это связано с резкими изменениями температуры в течение месяца.

**Экономическая часть проекта**

Рассмотрим экономическую эффективность на ООО «РН-Юганскнефтегаз».

На ПС-35/6 кВ ООО «РН-Юганскнефтегаз» для обогрева МВ-35 используется 3600 нагревательных элементов мощностью по 0,4 кВт·ч, исходя из этого, суммарное потребление в час составляет:  $3600 \cdot 0,4 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 1\,440 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$



**Рисунок 3** – Потребление электроэнергии при регулировке работы электрообогрева

Расход электроэнергии за зимний период = 1440 кВт·ч · 24 · 257 сут. = 8 881 000 кВт  
 Цена 1 кВт·ч составляет 2,74 руб.

Расход электроэнергии в рублях за год = 8 881 000 кВт·ч · 2,74 руб. / 1000000 = 24,3 млн руб.

При использовании автоматизации расход электроэнергии понизится с 8 881 000 кВт до 7 311 000 кВт.

Экономия электроэнергии в рублях за год составит:  
 1 570 000 · 2,74 / 1000000 = 4,3 млн. руб.

Стоимость оборудования:

Измеритель температуры: 2ТРМ1 – 5,563 тыс. руб.

Датчик температуры: ДТС 125Л-50М – 0, 427 тыс. руб.

Экран для защиты от солнечных лучей датчика ДТС 125Л: 0,107 тыс. руб.

Кабель силовой медный ТТГнг(А)-УС 3\*2,5: 1,812 тыс. руб.

Кабель силовой медный ТТГнг(А)-УС 3\*6: 1,639 тыс. руб.

Кабель контрольный с медными жилами КТТГЭнг(А)-УС 4\*1.0: 0,399 тыс. руб.

Все оборудование предусматривается на 450 ПС 36/6 кВ.

**Расчет экономической эффективности**

1) прирост потока денежной наличности:

$$ПДН_t = Э_{zt} - T_{zt} - K - \Sigma H_t,$$

где  $Э_{zt}$  – прибыль в t-месяце, тыс. руб.;  $T_{zt}$  – текущие затраты в t-месяце, тыс. руб. включают в себя единовременные затраты, затраты на установку оборудования в 1-й месяц;  $K$  – капитальные затраты в 1 месяц, тыс. руб.;  $\Sigma H_t$  – сумма налогов в t-месяце.

$$\Sigma H_t = H_{имт} + H_{прибt};$$

где  $H_{имт}$  – налог на имущество в t-месяце;  $H_{прибt}$  – налог на прибыль в t-месяце.

$$H_{имi} = (K_{об} - Am) \cdot 2,2\%;$$

где  $Am$  – амортизация, тыс. руб.;  $K_{об}$  – капитальные затраты на оборудование.

$$Am = 10\% \cdot K_{об};$$

$$H_{прибt} = (\Sigma Э_{zt} - Am - H_{имт} - T_{zt}) \cdot 20\%;$$

2) дисконтированный поток денежной наличности:

$$ДПДН = ПДН \cdot K_d,$$

где  $K_d$  – коэффициент дисконтирования, рассчитывается по формуле:

$$K_d = (1 + 0,2)^0; - 1; - 2$$

Ставка по дисконту 20%.

3) чистая текущая стоимость:

$$ЧТС = \Sigma ДПДН_t;$$



4) срок окупаемости проекта рассчитываем по формуле:

$$\text{Ток} = \text{То} - \frac{\text{НПДН}_0}{\text{НПДН}_1 - \text{НПДН}_0}$$

Результаты, полученные графическим и эмпирическим методами, практически совпадают.

5) накопленный поток денежной наличности:

$$\text{НПДН} = \sum \text{ДН}_t$$

Результаты проведенных расчетов представлены в таблице 1

Таблица 1 – Оценка экономической эффективности проекта

Показатели	Ед.изм.	1 год	2 год	3 год	4 год	5 год	Итого
Затраты всего	тыс.руб.	1 390	1 585	1 786	2 675	901	8 336
Амортизация	тыс.руб.	236	472	708	1 062	1 062	3 540
<b>Всего капитальных затрат</b>	тыс.руб.	1 180	1 180	1 180	1 771	0	5 311
Затраты на мероприятие	тыс.руб.	994	994	994	1 492		
Строительно-монтажные работы	тыс.руб.	186	186	186	279		
Налог на имущество	тыс.руб.	23	29	42	55	51	199
Налог на прибыль	тыс.руб.	186	376	565	849	850	2 827
<b>Доходная часть</b>	тыс.руб.	956	1 911	2 866	4 300	4 300	14 333
Планируемое снижение затрат на электроэнергию	тыс.руб.	956	1 911	2 866	4 300	4 300	14 333
<b>Результаты</b>							
Поток наличности	тыс.руб.	-198	798	1 788	2 688	4 462	9 537
Накопленный поток наличности	тыс.руб.	-198	600	2 387	5 075	9 537	
Дисконтированный поток	тыс.руб.	-198	665	1 241	1 555	2 152	5 415
Накопленный диск. поток наличности	тыс.руб.	-198	467	1 708	3 263	5 415	

Результатом внедрения является уменьшение потребление электроэнергии на 18 %, что снижает затраты на 4,3 млн. руб. за отопительный период.

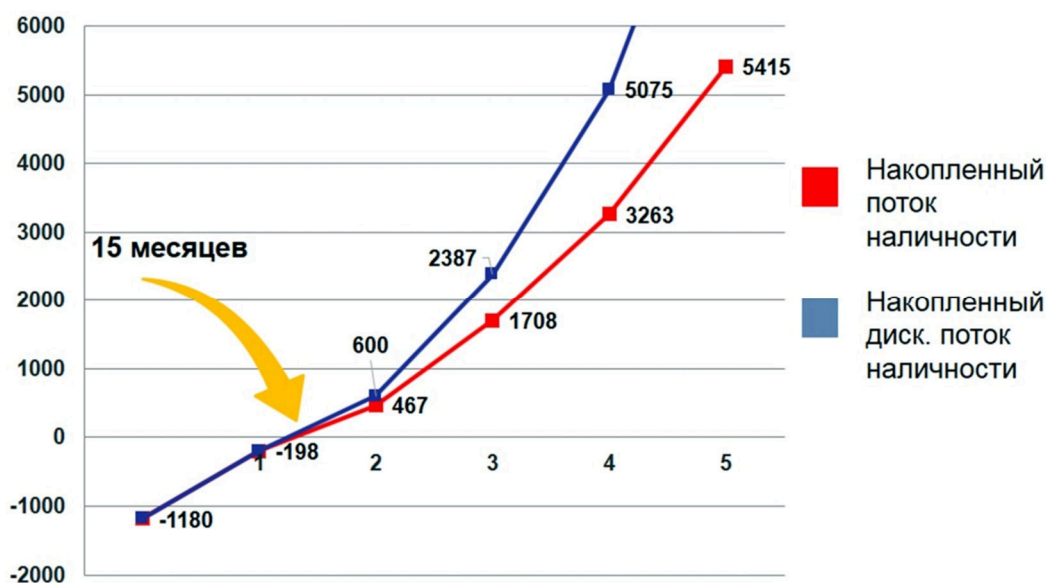


Рисунок 4 – Срок окупаемости проекта



### Планирование деятельности по реализации данного проекта

Ниже приведены стадии вовлечения оборудования в производство:

#### ● Инициация проведения ОПИ.

1. Официальное предложение от поставщика на проведение ОПИ.
2. Документы на применение.
3. Оценка целесообразности проведения ОПИ (экономика или другие факторы);
4. Оценка критериев применимости технологии;
5. Подготовка к испытаниям.
6. Формирование проектной группы для проведения ОПИ, включая все необходимые ресурсы
7. Разработка, согласование программы испытаний
8. Согласование испытаний с органами Ростехнадзора

#### ● Испытания

1. Выполнение мероприятий программы проведения ОПИ.
2. Уточнение показателей экономической эффективности.
3. Анализ результатов (Акт по результатам испытаний).
4. Рассмотрение результатов ОПИ на ТС Общества, оценка результатов ОПИ.

По окончании успешно проведенных ОПИ определяются основные технико-экономические характеристики применимые для других объектов, подсчитывается потребность в энергоресурсах, составляется проект, который подлежит согласованию в государственных органах исполнительной власти.

После окончания согласований и утверждения данного проекта, разрабатывается рабочая документация для реконструкции ПС, где изложена вся необходимая информация для строительства.

#### Вывод

Использование автоматизации электрообогрева позволит решить ряд увеличить надежность оборудования.

Данная модернизация сократит затраты на потребление электроэнергии на 4,3 млн. руб. в год.

#### Литература:

1. Техническое описание и инструкция по эксплуатации «Выключатель высоковольтный трехполюсный С-35М-630-10».
2. Руководство по эксплуатации «РЭЛС 401261007РЭЕ».
3. Описание, руководство по эксплуатации «ТРМ-1-М (30-720А) ТУ 3428-006-31928807-2014».
4. СНиП 23-01-99 «Строительная климатология».

#### References:

1. Technical description and user manual «Three-pole high-voltage switch C-35M-630-10».
2. Operating manual «RELS 401261007REE».
3. Description, instruction manual «TRM-1-M (30-720A) TU 3428-006-31928807-2014».
4. SNiP 23-01-99 «Construction climatology».



**НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ**

# **БУЛАТОВСКИЕ ЧТЕНИЯ**

**Материалы II Международной  
научно-практической конференции  
(31 марта 2018 г.)**

---

**Том 6:**

**ТЕХНИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ.  
ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ В НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ**

---

**Сборник статей**

Статьи публикуются в авторской редакции

**Технический редактор – А.С. Семенов  
Оригинал-макет – Л.С. Попова  
Дизайн обложки – Н.Р. Исаян**

Сдано в набор 03.04.2018  
Подписано в печать 06.04.2018.  
Формат 60 x 84<sup>1/8</sup>. Бумага офсетная. Печать riso.  
Печ. л. 15,9  
Изд. № 915. Тираж 500 экз. Заказ № 1876

ООО «Издательский Дом – Юг»  
Россия, 350072, г. Краснодар,  
ул. Зиповская, 9, литер «Г», оф. 41/3

Тел.: +7(918) 41-50-571  
e-mail: id.yug2016@gmail.com  
Сайт: www.id-yug.com