



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 electric 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.

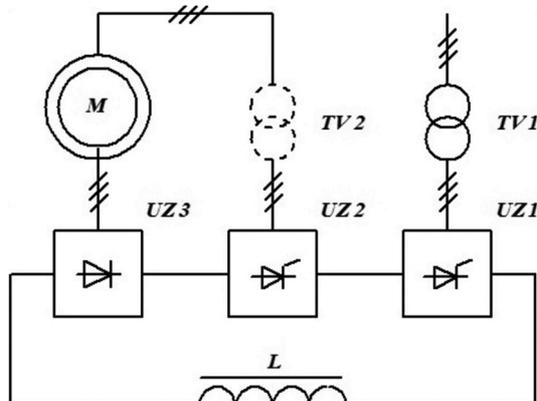


Рисунок 1 – Функциональная схема каскадно-частотного электропривода

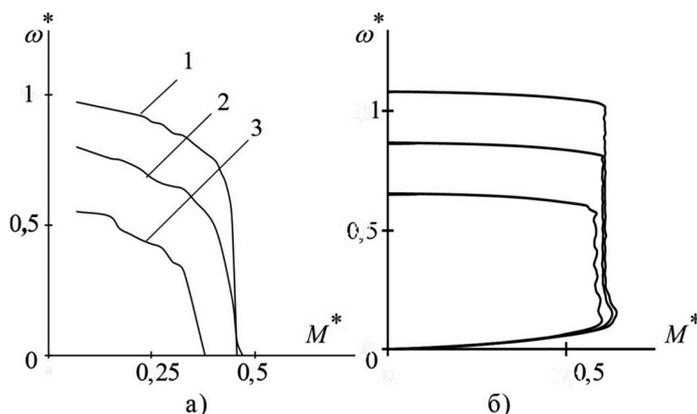


Рисунок 2 – Экспериментальные механические характеристики разомкнутой системы каскадно-частотного электропривода (а) при законе регулирования  $U_1^*/f_1^* = \text{const}$  ( $1 - U_1^* = 0,526, f_1^* = 1; 2 - U_1^* = 0,421, f_1^* = 0,8; 3 - U_1^* = 0,316, f_1^* = 0,6$ ) и замкнутой системы регулирования 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.