

УДК 621.313

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ АВТОНОМНЫХ
ЭНЕРГОСИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ
ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ**

**MATHEMATICAL MODELING OF ELEMENTS OF AUTONOMOUS POWER
SUPPLY SYSTEMS WITH USE OF RENEWABLE**

Самородов Александр Валерьевич

кандидат технических наук, доцент кафедры
электротехники и электрических машин,
Кубанский государственный
технологический университет
Alex.Samorodoff@gmail.com

Копелевич Лев Ефимович

кандидат технических наук, доцент кафедры
электротехники и электрических машин,
Кубанский государственный
технологический университет
Kkllev@mail.ru

Пахомов Роман Анатольевич

кандидат технических наук, доцент кафедры
промышленной теплоэнергетики и тепловых
электрических станций,
Кубанский государственный
технологический университет

Андрейко Наталья Геннадьевна

кандидат технических наук, доцент кафедры
промышленной теплоэнергетики и тепловых
электрических станций,
Кубанский государственный
технологический университет

Аннотация. В статье приводятся основные энергетические соотношения для двухмерных электрических машин (ДЭМ) описывающие процесс преобразования энергии в них.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, системы энергоснабжения, электромеханические преобразователи энергии.

Samorodov Alexander Valerievich

Ph. D., Associate Professor of electrical engineering and electrical machines, Kuban State University of Technology
Alex.Samorodoff@gmail.com

Kopelevich Lev Efimovich

Ph. D., Associate Professor of electrical engineering and electrical machines, Kuban State University of Technology
Kkllev@mail.ru

Pahomov Roman Anatolievich

Ph. D., Associate Professor of thermal engineering and heat engineering, Kuban State University of Technology

Andreyko Natalya Gennadievna

Ph. D., Associate Professor of thermal engineering and heat engineering, Kuban State University of Technology

Annotation. In paper the main energy relations for two-dimension electrical machine (DEM) conversions, circumscribing the process, of energy in them are reduced.

Keywords: renewable energy sources, power supply system, electromechanical converters of energy.

В Кубанском государственном технологическом университете давно ведется работа по экологически чистым возобновляемым источникам энергии (ВИЭ) [1–7]. В частности разработана двухмерная электрическая машина (ДЭМ), способная преобразовывать два разнородных источника возобновляемой энергии, один из которых легко преобразуется в энергию постоянного тока (например, Солнце), другой — в механическую (например, ветер), выдавая на выходе переменный ток с необходимым числом фаз, напряжением и частотой.

Предполагается использование ДЭМ в автономных энергосистемах небольшой мощности.

Работа ДЭМ, как и любого другого ЭМПЭ, основана на электромагнитном взаимодействии проводника и электромагнитного поля, описываемого известными уравнениями Максвелла (1).

Однако при исследовании нетрадиционных ЭМПЭ в современных условиях, характеризующихся обилием дискретных элементов, более удобной следует признать интегральную форму записи уравнений электродинамики.

Это несколько упрощает как само моделирование, так и восприятие конечной математической модели.

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{rot} H &= J + \frac{\partial D}{\partial t}; \\ \operatorname{rot} E_H &= -\frac{\partial B}{\partial t}; \\ \operatorname{div} B &= 0; \\ \operatorname{div} D &= \rho_e; \\ B &= \mu_a H; \\ D &= \varepsilon_a E_H. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где H и B — напряженность и индукция магнитного поля; E_H и J — напряженность электрического поля и плотность тока; D и ρ_e — электрическое смещение и объемная плотность электрических зарядов; μ_a и ε_a — абсолютная магнитная и диэлектрическая проницаемости среды.

Тогда, используя теорему Стокса применительно к контуру L , с которым сцеплены линейные токи $i_1, i_2, i_3, \dots, i_n$ преобразуем первое уравнение (1) к известному закону полного тока для магнитной цепи

$$\oint_L H d\ell. \quad (2)$$

Разбив контур L на m дискретных участков, в пределах каждого из которых $H = \text{const}$ и учитывая, что магнитный поток k -го участка, имеющего поперечное сечение S_k и длину ℓ_k , равен $\Phi_k = B_k \cdot S_k$, получим

$$\oint_L H d\ell = \sum_{k=1}^m H_k \ell_k = \sum_{k=1}^m \frac{\Phi_k \ell_k}{\mu_{ak} S_k} = \sum_{k=1}^m \Phi_k R_{mk}, \quad (3)$$

где $R_{mk} = \frac{\ell_k}{\mu_{ak} S_k}$ — магнитное сопротивление участка.

Соотношение (3) по существу представляет собой второй закон Кирхгофа для магнитной цепи, в которой $\sum_{k=1}^m \Phi_k R_{mk}$ означает алгебраическую сумму магнитных напряжений в контуре. С целью интегрального представления и последующего анализа ДЭМ с помощью второго уравнения системы (1) рассмотрим процесс преобразования энергии в ДЭМ, представив для простоты анализа обмотки якоря и ротора в виде ортогонально расположенных рамочных катушек, имеющих соответственно W_a и W_p витков каждая. В соответствии с ранее рассмотренным принципом работы ДЭМ будем считать, что якорь (контур W_a) в данный момент времени неподвижен, а ротор (контур W_p) вращается с угловой скоростью ω_p .

Тогда под действием приложенного от фотоэлектрического преобразователя (ФЭП) напряжения U_a по катушке W_a потечет ток i_a , создающий свое неподвижное магнитное поле Φ_a . Для общности анализа будем считать, что напряжение U_a , а следовательно, ток i_a , поток и индукция Φ_a, B_a переменны по величине, т.е. $i_a = \text{var}$,

$\Phi_a(B_a) = \text{var}$, что вполне естественно в силу непредсказуемой переменности солнечного излучения.

Если теперь ротор ДЭМ (катушку W_p) привести во вращение с угловой скоростью ω_p , то в ней помимо приложенного (в общем случае стороннего) электрического поля с напряженностью E_{Hc} наводится электрическое поле (поле движения) с напряженностью E_{Hv} , а также поле, обусловленное изменением индукции $B_a = B_a(t)$, т.е. поле трансформации с напряженностью E_{Hm} . Тогда при $V_p = \text{const}$ имеем суммарную напряженность электрического поля:

$$E_{H\Sigma} = E_{Hc} + E_{Hv} + E_{Hm} . \quad (4)$$

После преобразования (4) получим выражение:

$$\begin{aligned} \text{rot}E_{H\Sigma} &= -\frac{\partial E_{Hc}}{\partial t} + \text{rot}(V_p B_a) + \text{rot}S_p W_p \frac{\partial E_{Hm}}{\partial t} = \\ &= -\frac{\partial E_{Hc}}{\partial t} - (V_p \nabla) B_a - (S_p W_p \nabla) \frac{\partial E_{Hm}}{\partial t}, \end{aligned} \quad (5)$$

представляющее видоизмененную форму второго уравнения Максвелла, где ∇ — оператор Гамильтона.

Интегрируя (5) по площади S_p , охватываемой катушкой W_p и ограниченной контуром L , и используя теорему Стокса, получим

$$E_{\Sigma} = -W_p \frac{d\Phi_p}{dt} = -\frac{d\Psi_p}{dt} , \quad (6)$$

где Ψ_p — потокосцепление катушки W_p (ротора) ДЭМ; E_{Σ} — ЭДС, индуцированная в обмотке ротора магнитным потоком Φ_a якоря, которая по определению равна:

$$E_{\Sigma} = E_c + E_v + E_m, \quad (7)$$

где $E_c = \int_L H_{Hc} dl$ — сторонняя ЭДС; $E_v = \int_L (V_p B_a) dl$ — ЭДС вращения; $E_m = \int_L (S_p W_p B_a / \ell_{\delta} E) dl$ — сторонняя ЭДС.

Учитывая, как сказано выше, наиболее общий случай изменения магнитного поля, т.е. оно не является стационарным в нетрадиционных ЭМПЭ, используемых для нетрадиционной энергетики, а также то обстоятельство, что пределы интегрирования ограничены длиной ротора, а точнее расчетной длиной ℓ_{δ} ДЭМ, получим выражение для суммарной ЭДС:

$$E_{c\Sigma} = \int_L H_{Hc} dl + \int_L (V_p B_a) dl + \int_L (S_p W_p B_a / \ell_{\delta} t) dl . \quad (8)$$

Направление этой ЭДС, как известно, определяется правилом правой руки. Из (8) следует, что суммарная ЭДС, индуцируемая в роторной цепи ДЭМ максимальна, когда векторы V_p , B_a и ℓ взаимно ортогональны.

Заметим, что в традиционной электромеханике, когда магнитное поле машины является стационарным, стороннее электрическое поле — потенциальное и тогда:

$$E_{c\Sigma} = \int_L H_{Hc} dl = 0; \quad E_t = \int_L (S_p W_p B_a / \ell_{\delta} t) dl = 0 . \quad (9)$$

Следовательно:

$$E_{\Sigma} = E_v = \int_0^{\ell_{\delta}} (V_p B_a) dl = V_p B_a \ell_{\delta} . \quad (10)$$

При $t = 0$ вектор индукции B_a совпадает (скользит) с плоскостью катушки W_p и её потокоцеплением $\psi_p = 0$; через $t = \pi/2$ плоскость катушки W_p становится перпендикулярной вектору B_a и тогда потокоцепление максимально, т.е.:

$$\Psi = \Psi_{pm} = S_p W_p B_{am}. \quad (11)$$

Таким образом, при вращении катушки W_p с угловой скоростью ω_p потокоцепление ψ_p меняется во времени по закону:

$$\Psi_p(t) = \Psi_{pm} \cos \omega_p t. \quad (12)$$

Тогда в системе координат, связанной с катушкой W_p , имеем ЭДС

$$E_{\Sigma}(t) = -\frac{d\Psi_p}{dt} = E_{pm} \sin \omega t, \quad (13)$$

где $E_{pm} = \omega_p \Psi_{pm}$ — максимальное значение ЭДС ротора.

Полная электромагнитная сила F_{Σ} , действующая на линейный проводник ℓ_p с током I_p в магнитном поле B_a :

$$F_{\Sigma} = (B_a \times \ell_p) \cdot I_p W_p. \quad (14)$$

Как следует из (14), наибольшая эффективность электромеханического преобразования энергии будет при максимальном значении F_{Σ} , т.е. когда векторы ℓ и B ортогональны.

Направление силы F_{Σ} определяется известным правилом левой руки. Пара сил F_{Σ} на диаметре якоря D_a создают электромагнитный момент $M_{\Sigma p}$ ротора:

$$M_{\Sigma p} = \frac{F_{\Sigma p} D_a}{2} = \frac{B_a \ell_p I_p W_p D_a}{2} = \Phi_a F_p, \quad (15)$$

где $\Phi_a = \frac{B_a \ell_p D_a}{2}$ — магнитный поток якоря (катушки W_a).

Выражение момента (15) справедливо для частного случая, когда направление поля B_a совпадает с одной из осей координат.

В общем случае магнитное поле B_a направлено произвольно, не совпадая ни с одной из осей. Тогда по осям $d - q$ действуют составляющие индукции B_{ad} и B_{aq} , соответственно, обуславливающие электромагнитные силы $F_{\Sigma d}$ и $F_{\Sigma q}$ по осям:

$$F_{\Sigma} = F_{\Sigma d} + F_{\Sigma q}$$

Работа подготовлена при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Краснодарского края в рамках научного проекта № 13-08-96515 p_юг_a».

Литература:

1. Зеленская Е.А. Ветро-солнечные генераторы для электроснабжения объектов нефтяной отрасли / Б.Х. Гайтов, Л.Е. Копелевич, А.В. Самородов, Я.М. Кашин, Н.В. Ладенко // Газовая промышленность. – 2014. – № 6 (707). – С. 114–117.
2. Гайтов Б.Х. Устойчивость специальных электрических машин для систем автономного питания в пищевой промышленности / Б.Х. Гайтов, А.В. Самородов, Н.Р. Голубев // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. – 2006. – № 6. – С. 101–102.
3. Гайтов Б.Х. Включение двухмерных машин на общую нагрузку / Б.Х. Гайтов, Я.М. Кашин, Н.В. Ладенко, А.В. Самородов // Энергосбережение и водоподготовка. – 2014. – № 1. – С. 71–73.

4. Ермак А.А. Перспективные источники для автономных систем электроснабжения на базе возобновляемых источников энергии / Ермак А.А., Самородов А.В., Копелевич М.Л. // Современные наукоемкие технологии. – 2013. – № 8-1. – С. 39–41.

5. Расчеты нестационарных процессов в элементах энергооборудования / Пахомов Р.А., Андрейко Н.Г., Марченко Л.А., Самородов А.В. : монография. – Краснодар : Издательский дом-Юг, 2013. – 68 с.

6. Самородов А.В. Разработка системы автономного электроснабжения на базе двухмерной электрической машины : дисс. ... канд. техн. наук. – Краснодар, 2002.

7. Гайтов Б.Х. Разработка и основы теории двухмерных электрических машин для систем автономного электроснабжения / Гайтов Б.Х., Гайтова Т.Б., Шарифуллин С.Р., Самородов А.В. // Изв. вузов. Электромеханика. – 1999. – № 4. – С. 16.

8. Степанчук Г.В. Использование низкокачественной электроэнергии ветроэлектростанции с двухроторным генератором / Моренко К.С. // Инновации в сельском хозяйстве. – 2013. – С. 63–65.

9. Жогалев А.П. Роторная ветроэнергетическая установка для автономного электроснабжения рассредоточенных сельскохозяйственных объектов : автореф. ... канд. техн. наук. – Зеленоград, 2004.

References:

1. Zelensky E.A. Vetro-solnechnye generators for power supply of objects of oil branch / B.H. Gaytov, L.E. Kopelevich, A.V. Samorodov, Ya.M. Kashin, N.V. Ladenko // the Gas industry. – 2014. – No. 6 (707). – P. 114–117.

2. Gaytov B.H. Ustoychivost of special electrical machines for systems of autonomous food in the food industry / B.H. Gaytov, A.V. Samorodov, N.R. Golubev // News of higher educational institutions. Food technology. – 2006. – No. 6. – P. 101–102.

3. Gaytov B.H. Turning on of two-dimensional machines on the general loading / B.H. Gaytov, Ya.M. Kashin, N.V. Ladenko, A.V. Samorodov // Energy saving and water treatment. – 2014. – No. 1. – P. 71–73.

4. Yermak A.A. Perspective sources for autonomous systems of power supply on the basis of renewables / Yermak A.A., Samorodov A.V., Kopelevich M.L. // Modern high technologies. 2013. No. 8-1. – P. 39–41.

5. Calculations of non-stationary processes in elements Power equipment / Pakhomov R.A., Andreyko N.G., Marchenko L.A., Samorodov A.V. : monograph. – Krasnodar : Publishing house South, 2013. 68 p.

6. Samorodov A.V. Development of the system of autonomous power supply on the basis of the two-dimensional electrical machine: the thesis on competition of an academic degree of the candidate of technical science. – Krasnodar, 2002.

7. Gaytov B.H. Development and bases of the theory of two-dimensional electrical machines for systems of autonomous power supply / Gaytov B.H., Gaytova T.B., Sharifullin S.R., Samorodov A.V. // Izv. higher education institutions. Electromechanics. – 1999. – No. 4. – P. 16.

8. Stepanchuk G.V. Use of the low-quality electric power of a wind farm with the two-rotor generator / K.S. Morenko // Innovations in agriculture. – 2013. – P. 63–65.

9. Zhogalev A.P. Rotor wind power installation for autonomous power supply of the dispersed agricultural objects: the abstract of the thesis on competition of an academic degree of Candidate of Technical Sciences. – Zelenograd, 2004.