

DOI: 10.24143/2073-1574-2019-3-105-112
УДК 621.3.05

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ РЕАКТИВНО-ВЕНТИЛЬНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ НА БОРТУ СУДНА

А. В. Меликов

*Волгоградский государственный аграрный университет,
Волгоград, Российская Федерация*

Рассматривается применение небольших автономных гелиоустановок, преобразующих солнечную энергию в электрическую на борту судна, для бытовых нужд: отопления, освещения, насоса и т. д. Отмечено, что при решении задач повышения надёжности и КПД установки солнечных батарей, а также снижения потребляемой электроэнергии интерес представляют электротехнические гелиосистемы с реактивно-вентильным электрическим приводом. Применение в электромеханических установках солнечных батарей безредукторных электрических приводов способствует повышению точности прецизионных следящих систем автоматического управления. В исследованиях, касающихся реактивно-вентильных машин, обнаруживается пробел в описании методики расчёта параметров электрического двигателя для гелиосистемы в зависимости от конкретной местности и размеров солнечных батарей. Для исследования характеристик переходных процессов электрического привода изучена математическая модель и представлен её алгоритм, в котором используется сквозной метод расчёта, где изначально задаются исходные параметры двигателя, следом проводится вычисление основных размеров и параметров магнитной цепи, и после определяются рабочие характеристики электропривода. Рассчитаны зависимости момента двигателя от угла поворота, тока и индуктивности, а также потокоцепление реактивно-вентильного электрического двигателя. Выполнено моделирование переходных процессов электропривода. Посредством ввода в следящую систему идентификатора угла была повышена эффективность функционирования структуры математической модели. Проблема зачастую невозможного использования датчиков положения ротора решена применением метода косвенного определения угла положения ротора. Отмечено, что электротехническая система с реактивно-вентильным электрическим двигателем, используемая в следящей системе (и в других видах электропривода), находит широкое применение в силу высокой надёжности гелиоустановки, её простой конструкции и низкой стоимости, а также точности позиционирования при ориентации солнечных батарей.

Ключевые слова: система солнечных батарей, реактивно-вентильный электропривод, переходный процесс, математическая модель, электродвигатель.

Для цитирования: *Меликов А. В.* Переходные процессы реактивно-вентильного электропривода в электротехнической системе солнечных батарей на борту судна // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2019. № 3. С. 105–112. DOI: 10.24143/2073-1574-2019-3-105-112.

Введение

В настоящее время в области электромашиностроения в морской технике изготавливаются и эксплуатируются электромашины классического стиля: асинхронные, синхронные, постоянного тока и др. В прошлом веке недостатки «старой идеологии» конструктивных и технологических особенностей подобных электромашин старательно не замечали, т. к. они не имели решающего значения при их приобретении и внедрении на борту судна. Сегодня в производстве, где в течение продолжительного времени работа машин проходит в номинальном режиме, «классические» электроустановки целесообразно применять. Однако результаты деятельности таких производств в общем объёме составляют не более 10 % [1]. Другие 90 % всех видов производства требуют от электрических машин, в частности от электроприводов, кратковременных периодов работы двигателя, чередующихся с паузами. Известно, что электрические приводы во

всём диапазоне регулирования частоты вращения, ограниченном недопустимостью превышения номинального напряжения и значением критического скольжения, должны характеризоваться стабильно высоким КПД. Отвечающие этому условию машины постоянного тока чрезмерно дороги и конструктивно сложны. Кроме того, обратимые устройства требуют квалифицированной эксплуатации. Согласно требованиям подавляющего большинства видов производства более подходящей является комбинированная работа асинхронного электрического двигателя и частотного преобразователя. Но вследствие совместимости они приобретают эмерджентное свойство, характеризующееся эффективной работой при регулировании частоты вращения в интервале $\pm 30\%$ от номинала. Желаемое расширение диапазона однозначно приведёт к усложнению преобразователя частоты электрического привода и, как следствие, к увеличению его цены.

Пожалуй, лучшим решением (и перспективным) для поддержания стабильно высокого КПД электрических приводов является технология вентильных электромашин, разработанная ещё в XIX в. и не получившая практическое применение из-за отсутствия технических средств для её осуществления. Вентильно-реактивные машины дешевле и проще с точки зрения конструкции электромагнитной системы. Кроме того, им свойственна механическая прочность стали. Для них доступны высокие обороты работы двигателя по причине отсутствия необходимости жёсткого крепления постоянных магнитов на вращающейся части машины. Вне сомнений, область применения вентильно-реактивных приводов разнообразна, однако в настоящей работе предлагается остановиться на применении их в качестве электрических приводов для электро-механических систем солнечных батарей.

Другими словами, реактивно-вентильные электрические двигатели (РВЭД) находят применение благодаря их экономической целесообразности, эффективности массогабаритных показателей, экономичности расхода топлива и новым функциональным преимуществам, позволяющим улучшить динамику электромеханических систем и их экологические свойства.

Алгоритм математической модели реактивно-вентильного электродвигателя

Для исследования характеристики переходных процессов реактивно-вентильного электрического привода сначала предлагается изучить её математическую модель [2]. Электромагнитные процессы в этих двигателях описываются системой уравнения Кирхгофа [3]. Итак, фазовое направление (j -ая фаза) рассчитывается по формуле

$$U_j = R \cdot i_j + \frac{d\Psi_j(\theta, i_j)}{dt}, \quad (1)$$

где U_j – фазовое напряжение; R – фазовое сопротивление; i_j – фазовый ток; Ψ_j – потокосцепление; θ – угол поворота ротора; t – время.

В качестве дополнительного параметра в рассматриваемую модель вводится полный магнитный поток, сцепляющийся со всеми витками катушки индуктивности. Включённая физическая величина потокосцепления позволяет установить необходимую связь между токами и индуктивностями обмоток j -ой фазы электродвигателя:

$$\Psi_j = L_j(\theta) i_j, \quad (2)$$

где $L_j(\theta)$ – собственная индуктивность обмотки фазы.

В случае отсутствия насыщения магнитной цепи электромагнитный момент РВЭД вычисляется по формуле

$$M = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m i_j^2 \frac{dL_j(\theta)}{d\theta}. \quad (3)$$

Для исследования требуется расчёт ещё одной характеристики переходного процесса электропривода – равновесия моментов на вал привода, уравнение которого описано следующим образом:

$$M = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega + M_{\text{нр}}, \quad (4)$$

$$\omega = \frac{d\theta}{dt},$$

где J – суммарный момент инерции на валу привода; ω – частота вращения; B – суммарный коэффициент трения; $M_{нг}$ – момент нагрузки.

Расчёт как статических, так и динамических характеристик выполняется с помощью имитационной модели по формулам (1–4), отличающейся от известных моделей РВЭД [4] тем, что в ней используется сквозной метод расчёта, где задаются исходные параметры электродвигателя, затем проводится вычисление размеров и основных параметров магнитной цепи, и напоследок определяются рабочие характеристики привода. Алгоритм математической модели, представленный на рис. 1, включает два блока подпрограмм:

- 1) проектный расчёт РВЭД с целью определения статических параметров;
- 2) имитационное моделирование при заданных параметрах.

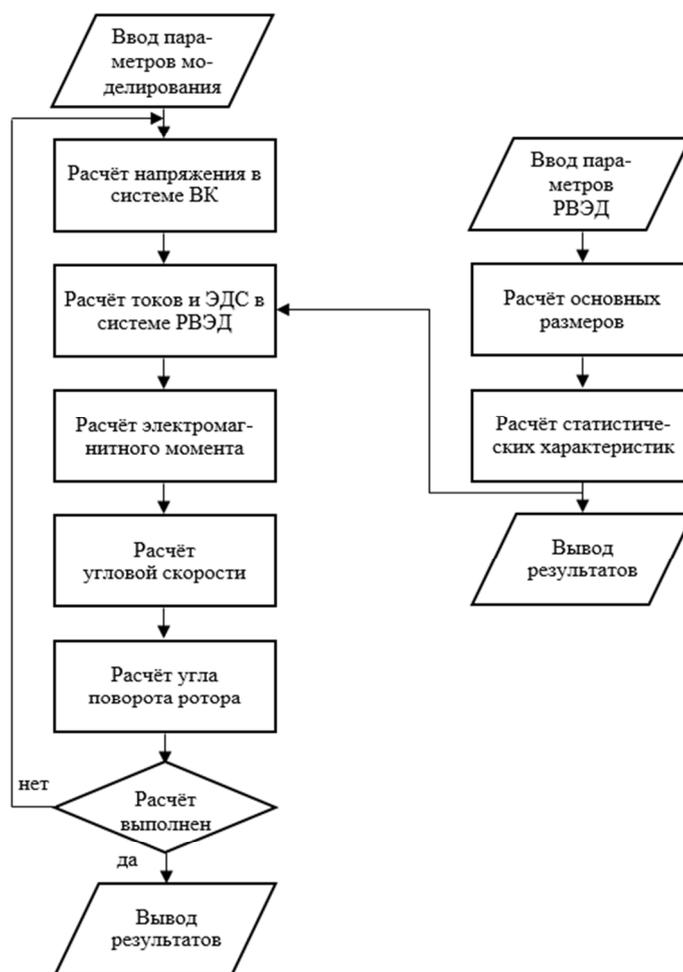


Рис. 1. Алгоритм математической модели реактивно-вентильного электродвигателя:
ВК – вентильный коммутатор; ЭДС – электродвижущая сила

Вначале выполняется расчёт токов фазы с помощью зависимости индуктивности и ЭДС обмотки от угла ротора по заданной геометрии двигателя. В процессе моделирования возможны изменения внешних параметров РВЭД, например напряжение питания и др. Далее проводится расчёт основных показателей магнитной цепи: электромагнитного момента, угловой скорости и т. п. Этот этап повторяется столько итераций, сколько требуется для достижения необходимого условия (которое зачастую задаётся интервалом времени). Заключительный этап состоит в представлении результатов выполненных расчётов в виде осциллограмм динамических пара-

метров РВЭД. Реализация обобщённой математической модели электродвигателя может быть осуществлена посредством использования интерактивной среды для численных расчётов и визуализации результатов MATLAB, в частности её прикладной программы Simulink.

Математическая модель, разработанная для проведения расчётов статических и динамических характеристик РВЭД, может быть импортирована в программу для последующей оптимизации системы по отдельным параметрам.

Моделирование переходных процессов реактивно-вентильного электропривода

Общая схема имитационной модели (рис. 2) представляет собой изображение трёхфазного электрического двигателя с вентильным коммутатором. В схеме отображены углы включения/отключения напряжения (угол вк./угол отл.), датчик угла ротора (ДР), вентильный коммутатор (ВК), электрический двигатель (РВЭД), устройство нагрузки, источник питания двигателя и коммутатора. Напряжение питания РВЭД подаётся от блока, генерирующего источник постоянного тока.

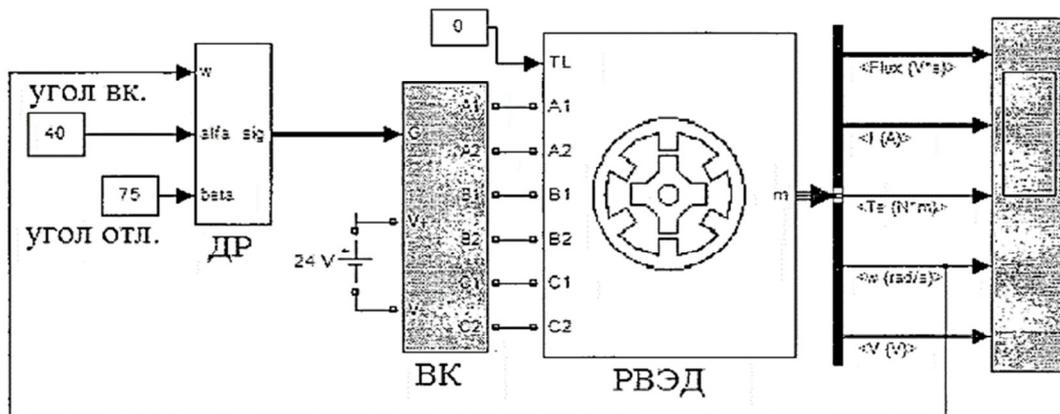


Рис. 2. Общая схема реактивно-вентильного электродвигателя

Основными допущениями, принятыми при составлении имитационной модели, являются [5]:

- активные сопротивления фаз, не зависящие от температуры обмотки статора;
- силовые транзисторы и диоды, представленные функциональными резисторами;
- непринятие в расчёт взаимной индукции фазных обмоток двигателя;
- непринятие в расчёт индуктивности рассеяния;
- безынерционные звенья датчика положения ротора и система автоматического управления.

На рис. 3 представлена структурная схема имитационной модели для каждой фазы. Схема состоит из блоков Flux, тока (зависимости от угла ротора и потокосцепления), момента (зависимости от угла ротора и тока обмотки) и механики.

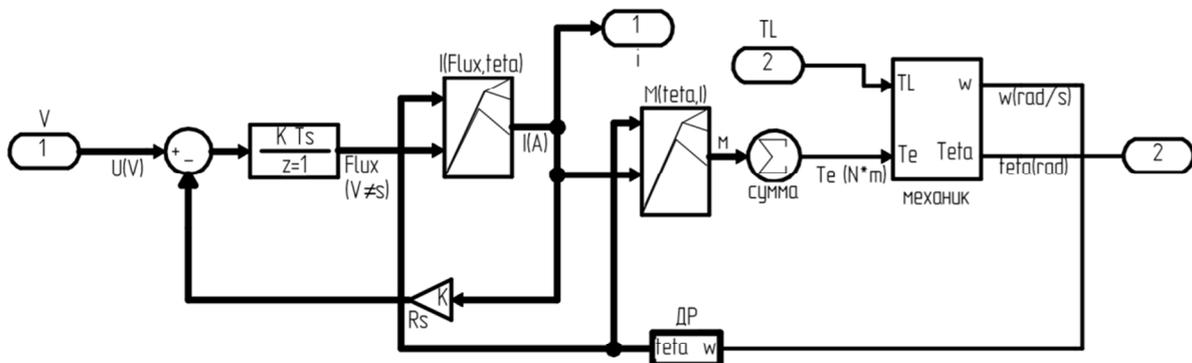


Рис. 3. Структурная схема имитационной модели

Зависимость момента двигателя от угла поворота, тока и индуктивности $M_e(i, \theta)$, рассчитываемая из выражения (3), а также потокосцепление РВЭД, выраженное в виде функции тока статора и ротора, представлены на рис. 4 и рассчитываются по формулам [6]:

$$M_e(i, \theta) = \left[\frac{(L_{dsat} - L_q)i^2}{2} + Ai - \frac{A(1 - e^{-Bi})}{B} \right] f'(\theta);$$

$$f'(\theta) = 6 \frac{N_r^3}{\pi^3} \theta^2 - 6 \frac{N_r^2}{\pi^2} \theta;$$

$$\Psi(i, \theta) = L_q i + \left[L_{dsat} i + A(1 - e^{-Bi}) - L_q i \right] f(\theta);$$

$$f(\theta) = 2 \frac{N_r^3}{\pi^3} \theta^3 - 3 \frac{N_r^2}{\pi^2} \theta^2 + 1;$$

$$A = \Psi_m - L_{dat} I_m;$$

$$B = \frac{(L_d - L_{dsat})}{\Psi_m - L_{dat} I_m},$$

где L_{dsat} – насыщенная индуктивность; L_q – минимальная индуктивность; L_d – ненасыщенная индуктивность; N_r – число полюсов ротора.

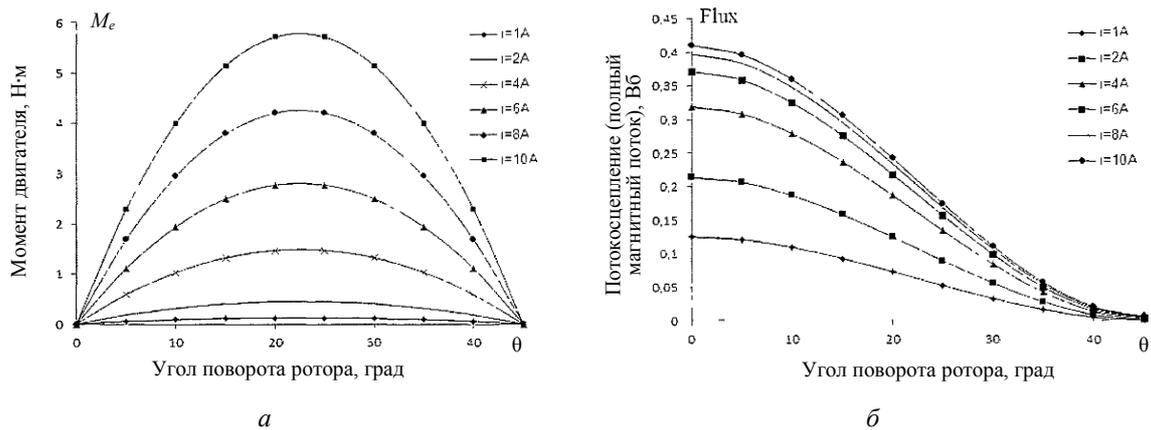


Рис. 4. Зависимости: а – момента двигателя; б – потокосцепления

Механическая динамика двигателя и нагрузки регулируются уравнениями движения (4), их структура представлена на рис. 5.

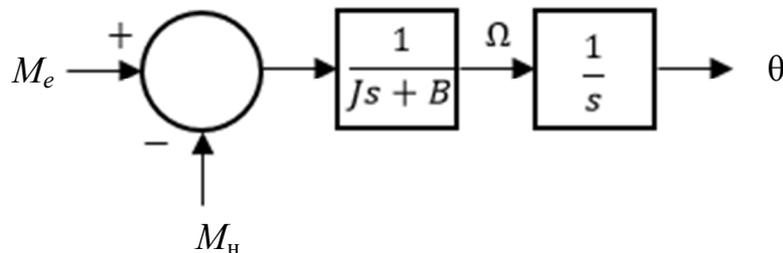


Рис. 5. Моделирование механических характеристик двигателя и нагрузки

На рис. 6 представлена структурная схема ВК для трёхфазных РВЭД. В этой схеме работают 6 транзисторов и 6 диодов от источника и управляющих сигналов из блока датчика положения.

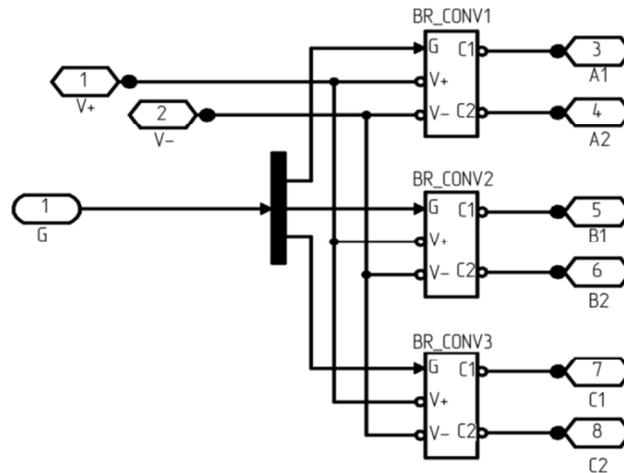


Рис. 6. Структурная схема вентильного коммутатора

Исследование разработанной математической модели проводилось на электронно-вычислительной машине с помощью пакета программ, предназначенных для вычисления сложных дифференциальных уравнений (рис. 7).

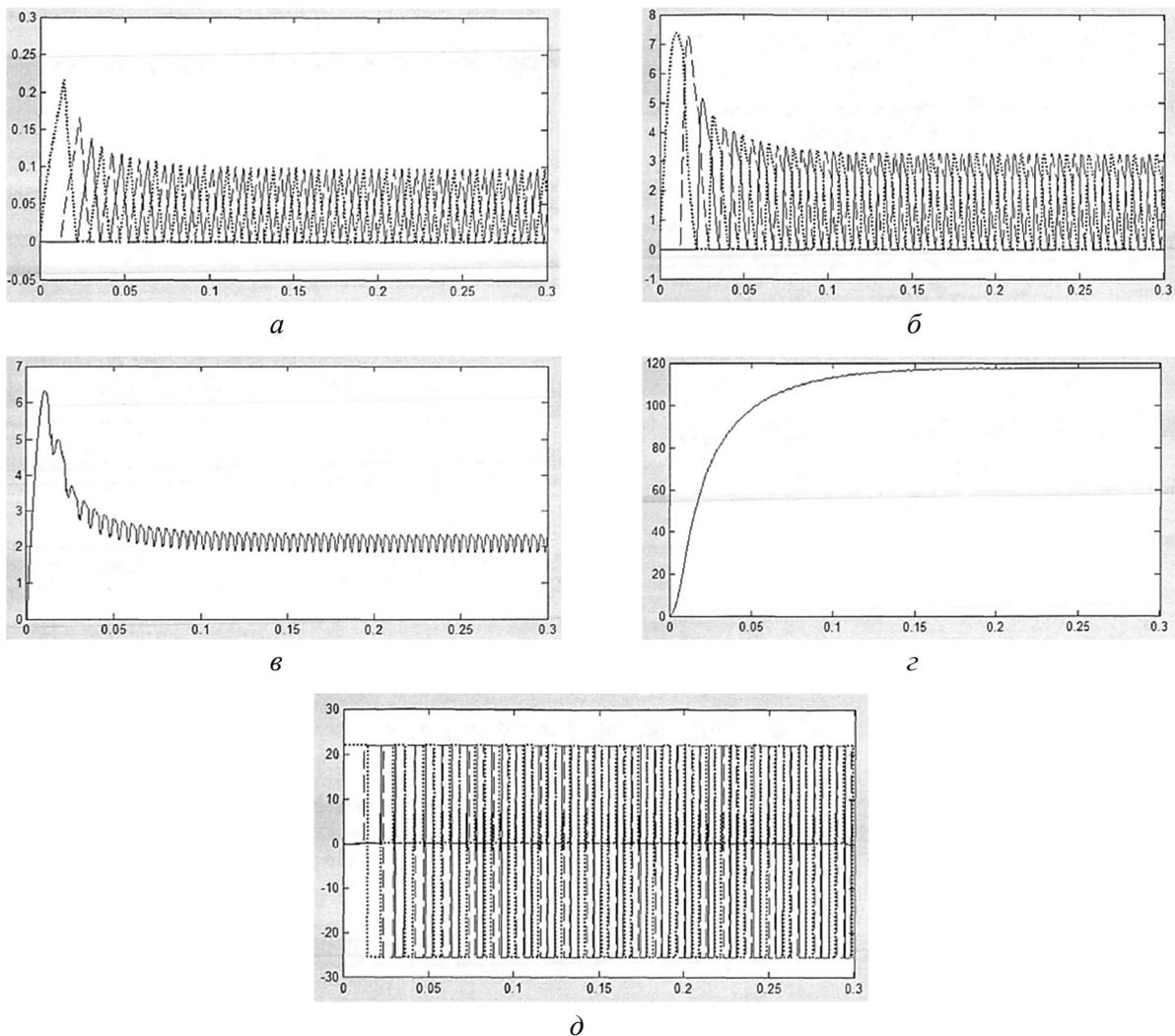


Рис. 7. Результаты моделирования переходных процессов реактивно-вентильного электродвигателя:
 а – потокосцепление; б – фазовые токи; в – электромагнитный момент; г – угловая скорость;
 д – фазовые напряжения

Посредством ввода в следящую систему идентификатора угла была повышена эффективность функционирования структуры математической модели. Использование существующих датчиков положения ротора не всегда возможно, причиной этому являются трудности конструктивного характера [7]. Приемлемым вариантом решения указанной проблемы является применение метода косвенного определения угла положения ротора, основанного на использовании угловых зависимостей значений напряжений на обмотках электрического двигателя.

Аналитическим методом проверки достоверности полученных результатов, позволяющим математически описать исследуемые процессы, зафиксировано 93 % соответствие модели реальному объекту. Погрешность результатов является следствием применённого метода вычисления реактивного тока в обмотках при условии отключения (или паузы) двигателя.

Заключение

Электротехнические системы солнечных батарей с РВЭД обеспечивают высокий КПД установки, повышают точность и надёжность прецизионных следящих систем автоматического управления за счёт применения в них безредукторных приводов. Электромеханическая система с РВЭД, используемая в следящей системе (и в других видах электропривода), находит широкое применение ввиду простой конструкции и низкой стоимости. Технология её изготовления способствует высокой надёжности гелиоустановки и точности позиционирования при ориентации солнечных батарей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Миронов Ю.* Вентильно-реактивные электроприводы // Энергетика и промышленность России. 2005. № 12 (64). URL: <https://www.eprussia.ru/epr/64/4322.htm> (дата обращения: 10.01.2019).
2. *ГОСТ Р 57229-2016.* Системы фотоэлектрические. Устройства слежения за Солнцем. Технические условия. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data/638/63832.pdf> (дата обращения: 10.01.2019).
3. *Батура М. П., Кузнецов А. П., Курулёв А. П.* Теория электрических цепей: учеб. пособие. Минск: Высшая школа, 2015. 608 с.
4. *Нго Сян Кыонг.* Обоснование применения реактивно-вентильного электродвигателя в следящей системе солнечных батарей // Изв. Тул. гос. ун-та. Технические науки. 2011. Вып. 6. Ч. 1. С. 165–169.
5. *Патент РФ № 2459156.* Солнечная энергоустановка / Юрченко А. В., Китаева М. В., Скороходов А. В.; опубл. 20.08.2012.
6. *Архипов А. Н., Евсин Н. Ф., Коломейцев Л. Ф.* Расчёт электромагнитных процессов в трёхфазном индукторном генераторе с классической зубцовой зоной // Изв. высш. учеб. заведений. Электромеханика. 1984. № 3. С. 29–35.
7. *Китаева М. В., Юрченко А. В., Скороходов А. В., Охорзина А. В.* Системы слежения за солнцем // Вестн. науки Сибири. 2012. № 3 (4). С. 61–67.

Статья поступила в редакцию 03.06.2019

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Меликов Алексей Владимирович – Россия, 400002, Волгоград; Волгоградский государственный аграрный университет; канд. техн. наук; доцент кафедры энергетических систем и электростанций; AleksejV.Melikov@gmail.com.



TRANSIENT PROCESSES OF SWITCHED RELUCTANCE MOTOR IN ELECTRICAL ENGINEERING SYSTEM OF PHOTOVOLTAIC PANEL ON SHIPBOARD

A. V. Melikov

Volgograd State Agrarian University, Volgograd, Russian Federation

Abstract. The article describes using small off-line solar power plants transforming solar energy into electric energy on shipboard for domestic needs: heating, lighting, pumping etc. It has been stated that in solving problems of increasing the reliability and efficiency of installing solar panels,

as well as reducing the consumed electric power, electric solar power systems with jet-valve electric drives seem very promising. Using gearless electric drives in solar power plants contributes to increased accuracy of precision automatic control systems. In the researches related to jet valve machines there is found a lack in the description of a method for calculating engine parameters for a solar power system depending on the real area and panel size. For studying the characteristics of the drive transients a mathematical model is analyzed and its algorithm is presented, in which the end-to-end calculation method is used. According to this method, the initial parameters of the engine are set first, then the main dimensions and parameters of the magnetic circuit are calculated, and in the end the operating characteristics of the electric drive are determined. The dependences of the motor torque on the angle of rotation, current and inductance are calculated, as well as the flux linkage of the switched reluctance motor. The drive transient simulation has been performed. An increase of the mathematical model performance was achieved by introducing an angle identifier into the tracking system. The problem of using the rotor position sensors, which is not always possible, was solved by applying methods of indirect determining the position of angle of the rotor. It has been stated that the electrotechnical system with switched reluctance motor used in the tracking system (as well as in other types of electric drive) is widely popular due to high reliability of the solar power plant, simplicity of its design and low cost, as well as accurate positioning in the process of solar panel alignment.

Key words: solar power system, switched reluctance motor, transient, mathematical model, electric motor.

For citation: Melikov A. V. Transient processes of switched reluctance motor in electrical engineering system of photovoltaic panel on shipboard. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*. 2019;3:105-112. (In Russ.) DOI: 10.24143/2073-1574-2019-3-105-112.

REFERENCES

1. Mironov Yu. Ventil'no-reaktivnye elektroprivody [Switched reluctance motors]. *Energetika i promyshlennost' Rossii*, 2005, no. 12 (64). Available at: <https://www.eprussia.ru/epr/64/4322.htm> (accessed: 10.01.2019).
2. GOST R 57229-2016. *Sistemy fotoelektricheskie. Ustrojstva slezheniya za Solncem. Tekhnicheskie usloviya* [GOST R 57229-2016. Photovoltaic systems. Sun tracking devices. Technical conditions]. Available at: <https://files.stroyinf.ru/Data/638/63832.pdf> (accessed: 10.01.2019).
3. Batura M. P., Kuznecov A. P., Kurulyov A. P. *Teoriya elektricheskikh cepej: uchebnoe posobie* [Electrical circuit theory: tutorial]. Minsk, Vyshejschaya shkola Publ., 2015. 608 p.
4. Ngo Syan Kyong. Obosnovanie primeneniya reaktivno-ventil'nogo elektrodvigatelya v sledyashchej sisteme solnechnyh batarej [Justification of using switched reluctance motor in tracking system of solar power plants]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2011, iss. 6, part 1, pp. 165-169.
5. Yurchenko A. V., Kitaeva M. V., Skorohodov A. V. *Solnechnaya energoustanovka* [Solar power plant]. Patent RF, no. 2459156, 20.08.2012.
6. Arhipov A. N., Evsip N. F., Kolomejcev L. F. Raschyot elektromagnitnyh processov v tryohfaznom induktornom generatore s klassicheskoy zubcovoju zonoj [Analysis of electromagnetic processes in a three-phase inductor generator with a classic cog zone]. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Elektromekhanika*, 1984, no. 3, pp. 29-35.
7. Kitaeva M. V., Yurchenko A. V., Skorohodov A. V., Ohorzina A. V. *Sistemy slezheniya za solncem* [Solar tracking systems]. *Vestnik nauki Sibiri*, 2012, no. 3 (4), pp. 61-67.

The article submitted to the editors 03.06.2019

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Melikov Aleksei Vladimirovich – Russia 400002, Volgograd; Volgograd State Agrarian University; Candidate of Technical Sciences; Assistant Professor of the Department of Power Systems and Power Stations; AleksejV.Melikov@gmail.com.

