

УДК 621.313

Виктор Николаевич Караулов

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики, Россия, Иваново, e-mail: karaulov@em.ispu.ru

Евгений Александрович Курлаков

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», магистрант кафедры электромеханики, Россия, Иваново, e-mail: tukkto@gmail.com

Параметрическая модель синхронного реактивного двигателя с TLA-ротором и демпферной обмоткой в установившихся и переходных режимах

Авторское резюме

Состояние вопроса. Конструкция синхронного реактивного двигателя с TLA-ротором и демпферной обмоткой отличается от классической: нет явно выраженных полюсов; сердечник ротора имеет внутренние пазы, залитые алюминием; конфигурация пазов сложна и разнообразна; сердечник имеет сильно насыщенные участки. В настоящее время расчеты режимов работы синхронного реактивного двигателя выполняют с помощью полевых моделей двигателя. Актуально показать, что классическая параметрическая модель синхронной машины позволяет достоверно рассчитывать режимы работы синхронного реактивного двигателя. Для этого необходимо разработать метод определения параметров модели синхронного реактивного двигателя.

Материалы и методы. Исследование проведено с использованием классической параметрической модели синхронного реактивного двигателя, основанной на теории двух реакций, на основании результатов полевого расчета статического и пульсирующего продольного и поперечного магнитного поля. Для расчета установившихся и переходных режимов работы синхронного реактивного двигателя использованы уравнения Парка-Горева.

Результаты. Представлены метод расчета параметров модели синхронного реактивного двигателя, полевые модели и формулы, используемые для расчета параметров синхронного реактивного двигателя. С использованием уравнений Парка-Горева произведены расчеты электромеханических процессов в синхронном реактивном двигателе: прямого пуска двигателя при симметричном питании; работы синхронного реактивного двигателя при несимметричном питании. Результаты расчетов сопоставлены с результатами полевого моделирования синхронного реактивного двигателя в среде Ansys Maxwell.

Выводы. Классическая параметрическая модель синхронной машины, основанная на теории двух реакций, позволяет быстро и качественно анализировать установившиеся и переходные режимы работы синхронного реактивного двигателя при различных условиях питания и механической нагрузке.

Ключевые слова: синхронный реактивный двигатель, TLA-ротор, демпферная обмотка, параметрическая модель, полевое моделирование, статическое магнитное поле, пульсирующее магнитное поле, переходные режимы работы двигателя

Viktor Nikolaevich Karaulov

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of Electromechanics Department, Russia, Ivanovo, e-mail: karaulov@em.ispu.ru

Evgeniy Aleksandrovich Kurlakov

Ivanovo State Power Engineering University, Master's Degree Student of Electromechanics Department, Russia, Ivanovo, e-mail: tukkto@gmail.com

Parametric model of synchronous reluctance motor with a TLA-rotor and damper winding in steady-state and transient modes

Abstract

Background. The design of a synchronous reluctance motors with a TLA rotor and a damper winding (SynRM) differs from the classical one. There are no salient poles, the rotor core has internal slots filled with aluminum, the slots configuration is complex and diverse, the core has highly saturated areas. Currently, calculations of the operating modes of the SynRM are performed using field models of the motor. It is important to show that the classical parametric model of a synchronous machine makes it possible to reliably calculate the operating modes of the SynRM. It is necessary to develop a method to determine the parameters of the SynRM model.

Materials and methods. The study has been conducted using a classical parametric model of a synchronous reluctance motor based on the theory of two reactions. It is based on the results of a field calculation of static and pulsating

longitudinal and transverse magnetic field. The Park-Gorev equations have been used to calculate steady-state and transient modes of the motor.

Results. Field models and formulas used to calculate the parameters of the SynRM are presented. The authors have used the Park-Gorev equations to calculate electromechanical processes in a synchronous reluctance motor: direct start of the motor with symmetrical power supply; operation of a SynRM with asymmetrical power supply. The calculation results are compared with the results of field simulation of the SynRM in the Ansys Maxwell environment.

Conclusions. The classical parametric model of the synchronous machine based on the theory of two reactions allows fast and high-quality analysis of steady-state and transient modes of operation of a synchronous reluctance motor with TLA-rotor under various conditions of power supply and mechanical load.

Key words: synchronous reluctance motor, TLA rotor, damper winding, parametric model, static magnetic field, pulsating magnetic field, transient modes of motor operation

DOI: 10.17588/2072-2672.2025.3.066-072

Введение. Синхронные реактивные двигатели (СРД) с TLA-ротором получили широкое распространение в системах автоматического управления [1, 2, 3, 4] в силу целого ряда их достоинств: низкой стоимости; высокого КПД; возможности точного регулирования скорости в широком диапазоне [5]; небольших пульсаций вращающего момента [6]. В [7, 8, 9] показано, что энергоэффективность и энергоемкость СРД больше, чем у асинхронных двигателей. СРД имеют следующие конструктивные особенности: сердечник TLA-ротора имеет поперечную шихтовку; внутренние пазы и сильно насыщенные участки; конфигурация пазов в различных СРД сложная и разнообразная; алюминиевая демпферная обмотка располагается в немагнитных пазах ротора. В [10, 11] и во множестве других работ показано, что для управления СРД целесообразно использовать параметрическую модель двигателя, параметры которой должны рассчитываться с учетом насыщения стальных участков.

В [12] предложено рассчитывать параметры СРД по величине параметров асинхронного двигателя, статор которого соответствует статору рассматриваемого СРД. При расчете параметров схемы замещения асинхронного двигателя использованы его каталожные данные. В [13, 14] показано, что при построении систем управления реактивной электрической машиной необходимо учитывать изменение величины параметров обмотки якоря в процессе работы электропривода, получен алгоритм идентификации параметров в стационарном режиме работы машины. В [15, 16, 17] выполнен анализ и оптимизация конструкции ротора СРД на основе расчетов электромагнитного поля СРД в стационарном режиме работы машины. В [18] индуктивные параметры СРД рассчитаны исходя из расчетов электромагнитного поля.

Возможность использования классической модели СРД, основанной на теории двух реакций, при моделировании процессов в СРД с TLA-ротором показана в [19], где представлен метод расчета индуктивных сопротивлений реакции якоря по продольной и поперечной осям X_{ad} и X_{aq} , основанный на результатах полевых расчетов двух статических состояний магнитного поля с учетом насыщения магнитной цепи.

Актуальной является задача разработки параметрической модели СРД с TLA-ротором с

учетом демпферной обмотки, предназначенной для расчета установившихся и переходных режимов работы двигателя. Параметры демпферной обмотки следует определять исходя из расчетов электромагнитного поля, что позволяет учесть особенности ее конструкции.

Ниже представлен метод расчета активного и индуктивного сопротивлений рассеяния приведенных продольной и поперечной демпферных обмоток. Параметры демпферных обмоток вычисляются на основе полевых расчетов, моделирующих опыт однофазного питания двух фаз. Описаны полевые модели исследуемого СРД при продольном и поперечном положениях ротора. Приведены формулы для расчета параметров демпферных обмоток.

Расчеты установившихся и переходных режимов работы СРД с TLA-ротором и демпферной обмоткой выполнены на основе уравнений Парка-Горева. Рассчитан процесс прямого пуска и установившийся режим работы СРД при симметричном и несимметричном питании. Результаты расчетов сопоставлены с результатами полевого моделирования СРД с TLA-ротором и демпферной обмоткой в среде Ansys Maxwell.

Материалы и методы. На рис. 1 представлена конструкция исследуемого СРД с TLA-ротором и демпферной обмоткой, имеющие следующие технические показатели: номинальная мощность 75 кВт; номинальное фазное напряжение 380 В; номинальный фазный ток 86 А; номинальная частота вращения 1500 об/мин; число фаз 3; частота питающего напряжения 50 Гц.

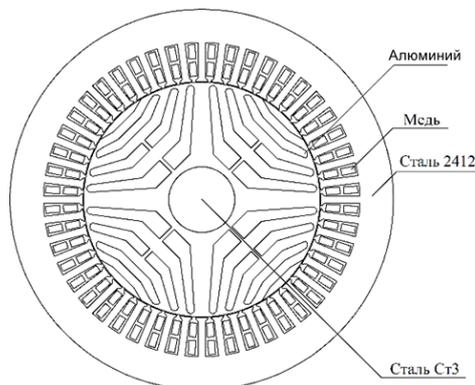


Рис. 1. Конструкция СРД с TLA-ротором и демпферной обмоткой

Параметрическая модель СРД. Моделью СРД в установившихся и переходных режимах работы служит система дифференциальных уравнений Парка-Горева, записанных в осях d , q , 0 (ось d опережает ось q):

$$\begin{aligned} u_d &= \frac{d\psi_d}{dt} + i_d r_1 + \psi_q \omega, \\ u_q &= \frac{d\psi_q}{dt} + i_q r_1 - \psi_d \omega, \\ u_0 &= i_0 r_1 + L_{\sigma 1} \frac{di_0}{dt}, \\ 0 &= \frac{d\psi_{kd}}{dt} + i_{kd} r_{kd}, \\ 0 &= \frac{d\psi_{kq}}{dt} + i_{kq} r_{kq}, \\ \psi_d &= \frac{x_d(i_d) i_d + x_{ad}(i_d) i_{kd}}{\omega}, \\ \psi_q &= \frac{x_q(i_q) i_q + x_{aq}(i_q) i_{kq}}{\omega}, \\ \psi_{kd} &= \frac{(x_{ad}(i) + x_{kd}) i_{kd} + x_{ad}(i) i_d}{\omega}, \\ \psi_{kq} &= \frac{(x_{aq}(i) + x_{kq}) i_{kq} + x_{aq}(i) i_q}{\omega}, \\ M_{эм} &= M_B + J \frac{d\Omega}{dt}, \\ M_{эм} &= 1,5 \cdot p (i_d \psi_q - i_q \psi_d). \end{aligned} \quad (1)$$

Сопротивления, используемые в уравнениях (1), являются параметрами СРД с ТЛА-ротором. Индуктивные сопротивления реакции якоря по продольной и поперечной осям $x_{ad}(i_d)$ и $x_{aq}(i_q)$ зависят от конструкции ТЛА-ротора, насыщения магнитной цепи и, соответственно, от величины тока якоря. Зависимости $x_{ad}(i_d)$ и $x_{aq}(i_q)$ рассчитываются согласно методу, представленному в [19]. Активное и индуктивное сопротивление рассеяния продольной демпферной обмотки (r_{kd} , x_{kd}) и поперечной демпферной обмотки (r_{kq} , x_{kq}) не зависят от насыщения магнитной цепи.

Расчет параметров демпферной обмотки. Параметры демпферной обмотки r_{kd} , x_{kd} и r_{kq} , x_{kq} рассчитаны на основе полевого моделирования опыта однофазного питания двух фаз. В опыте воспроизведены условия протекания тока статора обратной последовательности при поперечном и продольном положениях ротора. Ток статора создает пульсирующий магнитный поток, направленный по поперечной оси ротора (рис. 2,а) и по продольной оси ротора (рис. 2,б).

На рис. 2 показаны линии магнитной индукции. Пульсирующий магнитный поток статора проходит в роторе по путям рассеяния демпферной обмотки (вытесняется из ротора).

На рис. 3,а представлены осциллограммы тока и напряжения в фазе статора при поперечном положении ротора; на рис. 3,б – при продольном положении ротора.

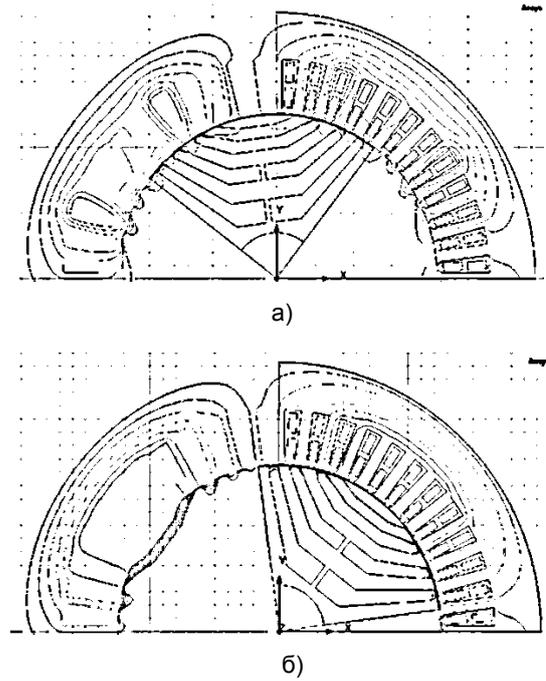


Рис. 2. Пульсирующий магнитный поток, направленный: а – по поперечной оси ротора; б – по продольной оси ротора

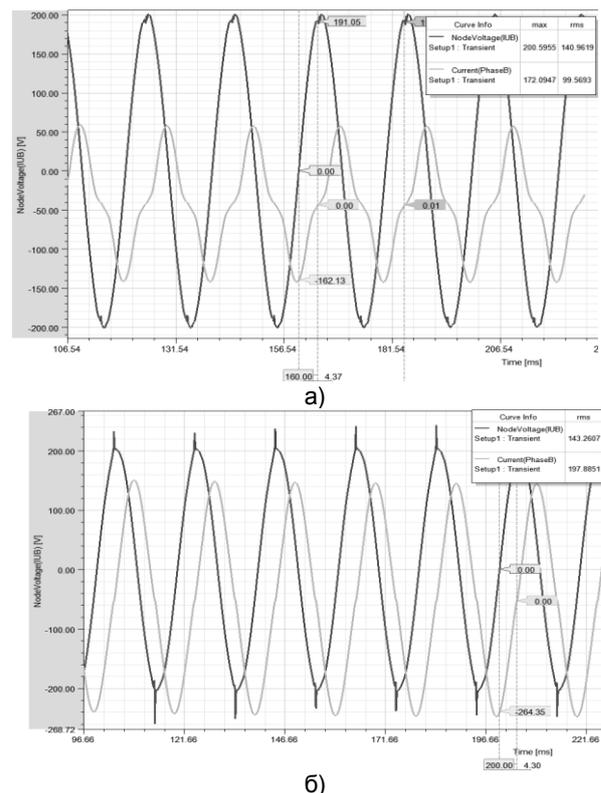


Рис. 3. Осциллограммы тока и напряжения в фазах статора: а – при поперечном положении ротора; б – при продольном положении ротора

На основании полученных осциллограмм (рис. 3,а) найдены действующие значения напряжения и тока обратной последовательности в фазе статора (U_{2q} , I_{2q}); сдвиг по фазе кривых напряжения и тока (φ_q), рассчитано полное

(Z_{2q}), активное (r_{2q}) и индуктивное (x_{2q}) сопротивление фазы для тока обратной последовательности I_{2q} :

$$Z_{2q} = \frac{U_{2q}}{I_{2q}}; \quad r_{2q} = Z_{2q} \cos(\varphi_q); \quad x_{2q} = Z_{2q} \sin(\varphi_q).$$

Параметрическая модель СРД с демпферной обмоткой при пульсации магнитного потока по поперечной оси ротора имеет вид, показанный на рис. 4.

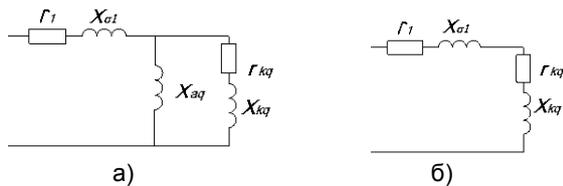


Рис. 4. Параметрическая модель СРД с демпферной обмоткой при пульсации магнитного потока по поперечной оси ротора: а – точная модель; б – упрощенная модель

Активное и индуктивное сопротивления рассеяния фазы приведенной поперечной демпферной обмотки рассчитаны по формулам:

$$r_{kq} = r_{2q} - r_1 = 0,254 \text{ Ом}; \quad x_{kq} = x_{2q} - x_{\sigma 1} = 0,876 \text{ Ом},$$

где r_1 и $x_{\sigma 1}$ – активное сопротивление проводов и индуктивное сопротивление рассеяния фазы статора.

Аналогично, с помощью осциллограммы (рис. 3,б), рассчитаны активное и индуктивное сопротивления рассеяния фазы приведенной продольной демпферной обмотки $r_{kd} = 0,121 \text{ Ом}$ и $x_{kd} = 0,304 \text{ Ом}$.

Расчет переходных процессов в СРД при симметричном питании. Переходные и установившиеся процессы в СРД рассчитываются путем численного интегрирования системы дифференциальных уравнений (1) с использованием зависимостей $x_{ad}(i_d)$ и $x_{aq}(i_q)$, представленных на рис. 5, и неизменных по величине сопротивлений $r_1, x_{\sigma 1}, r_{kd}, x_{kd}, r_{kq}, x_{kq}$.

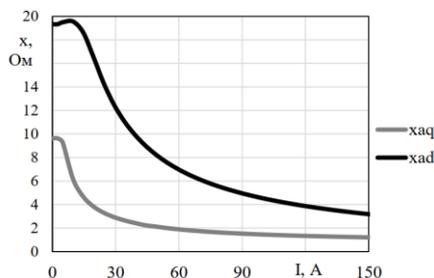


Рис. 5. Зависимости $x_{ad}(i_d)$ и $x_{aq}(i_q)$

Расчет электромеханического процесса прямого пуска СРД с ТЛA-ротором и демпферной обмоткой выполнен при номинальном тормозном моменте на валу $M_n = 478 \text{ Н}\cdot\text{м}$. Потери в стали и механические потери не учитывались.

Результаты расчета параметрической модели СРД (инженерный расчет) сопоставлены с аналогичными результатами полевых расчетов в Ansys Maxwell.

На рис. 6 показано изменение частоты вращения ротора в ходе процесса пуска СРД; на рис. 7 – изменение электромагнитного момента; на рис. 8 – изменение тока в фазах статора.

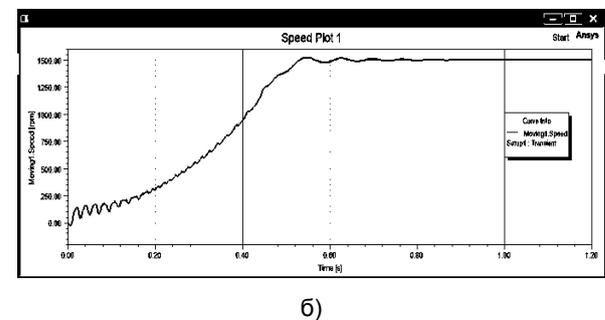
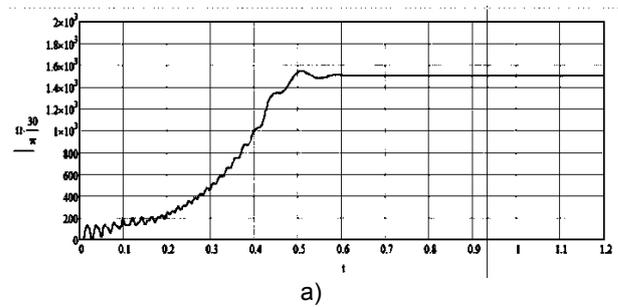


Рис. 6. Частота вращения ротора: а – инженерный расчет; б – полевой расчет в Ansys Maxwell

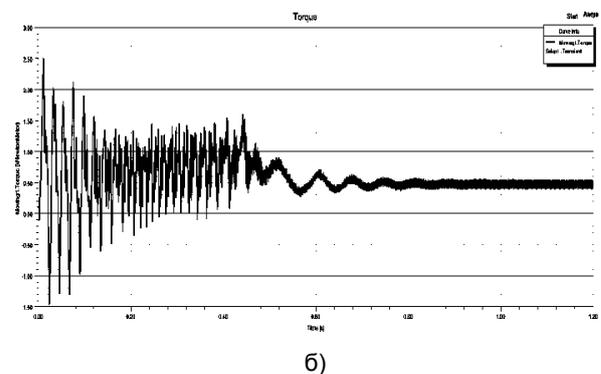
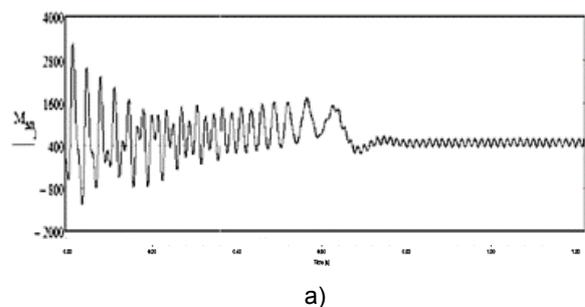


Рис. 7. Электромагнитный момент: а – инженерный расчет; б – полевой расчет в Ansys Maxwell

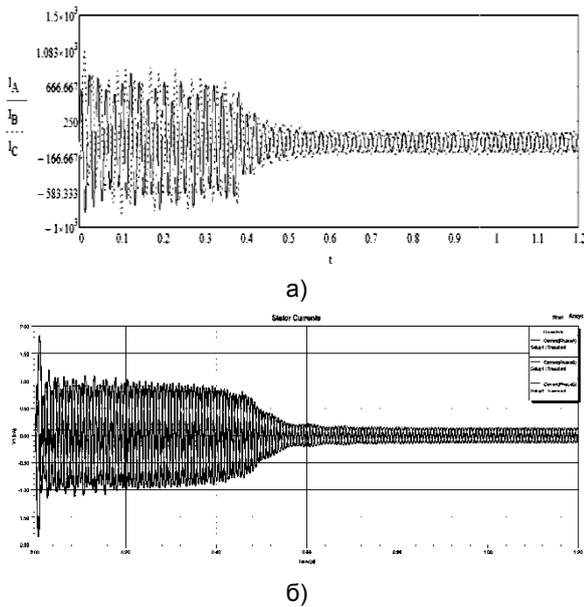


Рис. 8. Изменение тока в фазах статора: а – инженерный расчет; б – полевого расчета в Ansys Maxwell

Расчет установившихся процессов в СРД при несимметричном питании. На рис. 9–11 и в таблице представлены результаты расчета установившегося электромеханического процесса работы СРД с TLA-ротором и демпферной обмоткой при несимметричном питании: в одной из фаз величина амплитуды напряжения увеличена на 5 %, угол сдвига по фазе увеличен на 2,75 градуса. Результаты расчета параметрической модели СРД (инженерный расчет) сопоставлены с аналогичными результатами полевых расчетов в Ansys Maxwell.

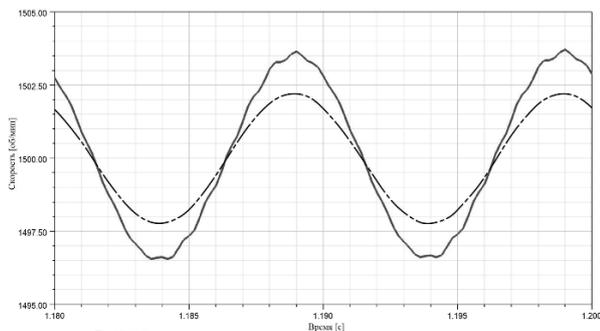


Рис. 9. Частота вращения ротора: — полевого расчета; - - - инженерный расчет

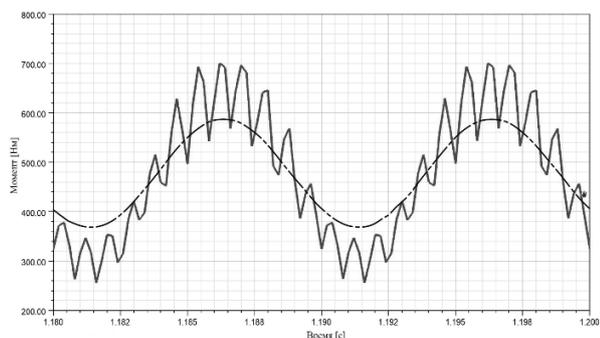


Рис. 10. Электромагнитный момент СРД: — полевого расчета; - - - инженерный расчет

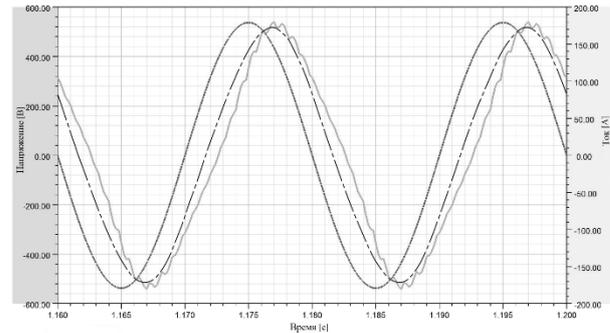


Рис. 11. Напряжение и ток в фазе статора: - - - напряжение; — инженерный расчет; — полевого расчета

Энергетические показатели машины в установившемся режиме работы при несимметричном питании рассчитаны по следующим формулам:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{\frac{1}{T} \int_{t_k-T}^{t_k} (M\omega) dt}{\frac{1}{T} \int_{t_k-T}^{t_k} (u_A i_A + u_B i_B + u_C i_C) dt};$$

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{S_1} = \frac{\frac{1}{T} \int_{t_k-T}^{t_k} (u_A i_A + u_B i_B + u_C i_C) dt}{U_A I_A + U_B I_B + U_C I_C},$$

Энергетические показатели исследуемого СРД в установившемся режиме работы при несимметричном питании

Энергетические показатели	Инженерный расчет	Ansys Maxwell
η	0,974	0,964
$\cos(\varphi)$	0,665	0,6827

Выводы. Классическая параметрическая модель синхронной машины, основанная на теории двух реакций, позволяет быстро и качественно анализировать установившиеся и переходные режимы работы синхронного реактивного двигателя с TLA-ротором и демпферной обмоткой при различных условиях питания и механической нагрузке.

Представленный метод расчета параметров демпферной обмотки, основанный на результатах полевых расчетов при двух положениях ротора, позволяет рассчитать активное и индуктивное сопротивления рассеяния фазы приведенной продольной и поперечной демпферных обмоток.

Список литературы

1. Шульга Р.Н. Синхронный реактивный двигатель в современном электроприводе // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2023. – № 1. – С. 44–55. – EDN JMGRWE.

2. **Тихомиров О.И.** Синхронные реактивные электродвигатели для создания энергоэффективных решений класса IE5 // Автоматизация в промышленности. – 2022. – № 1. – С. 42–44. DOI: 10.25728/avtprom.2022.01.09. – EDN UNYBKL.
3. **Jeong C.** Performance Analysis of Dual Three-Phase Synchronous Reluctance Motor According to Winding Configuration // Proceedings of the IEEE. Science Journal IEEE transactions on magnetics. – 2024.
4. **Fiorito A.** Rotor Optimization of a Synchronous Reluctance Machine for Railway Applications Conference // 2024 International. Conference on Electrical Machines (ICEM) MM Science Journal. – 2024. DOI:10.1109/ICEM60801.2024.10700068
5. **Митрофанов И.И.** Оптимальное по точности управление угловой скоростью синхронного реактивного двигателя // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2012. – № 11-1. – С. 186–190. – EDN PYURRB.
6. **Птах Г.К.** Сравнительная оценка электрических двигателей переменного тока асинхронного и синхронного типов с целью применения их в гребных электроустановках ледоколов большой мощности // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2019. – Т. 62, № 5. – С. 24–30. DOI: 10.17213/0136-3360-2019-5-24-30. – EDN ISPZZZ.
7. **Zakharov A.V., Malafeev S.I., Dudulin A.L.** Synchronous reluctance motor: Design and experimental research // 2018 X International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS). – Novocheboksary, 2018. – P. 1–4. DOI: 10.1109/ICEPDS.2018.8571500.
8. **Synchronous Reluctance Machines: A Comprehensive Review and Technology Comparison / M. Murataliyev, M. Degano, M. Di Nardo, et al.** // Proceedings of the IEEE. – 2022. – Vol. 110, No. 3. – P. 382–399. DOI: 10.1109/JPROC.2022.3145662.
9. **Сравнение** энергопотребления асинхронного и синхронного реактивного двигателей в насосном приложении / А.С. Парамонов, В.М. Казакбаев, С.Х. Ошурбеков, В.А. Прахт // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Атомная энергетика: материалы Междунар. науч.-практ. конф. студ., асп. и молодых ученых, посвященной памяти проф. Данилова Н.И. (1945–2015) (Даниловские чтения), Екатеринбург, 09–13 декабря 2019 г. – Екатеринбург, 2019.
10. **Nonlinear** magnetic field vector control with time-varying parameters for high-power electrically excited synchronous motor / Y. Han, X. Wu, G. He, et al. // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2020. – P. 11053–11063.
11. **Choi J. -s., Ko J. -s., Chung D. -h.** Efficiency Optimization Control of SynRM Drive // SICE-ICASE International Joint Conference. – Busan, Korea (South), 2006. – P. 690–695. DOI: 10.1109/SICE.2006.315625.
12. **Казакбаев В.М., Прахт В.А., Дмитриевский В.А.** Расчет рабочих характеристик синхронного реактивного двигателя в приводе насоса // Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий (АПЭЭТ-2014): материалы III Междунар. конф., Екатеринбург, 17–20 марта 2014 г. – Екатеринбург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2014. – С. 238–243. – EDN VULCJB.
13. **Самосейко В.Ф., Шарашкин С.В., Гельвер Ф.А.** Идентификация параметров реактивного электродвигателя с анизотропной магнитной проводимостью ротора // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2017. – Т. 9, № 3. – С. 637–644. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-637-644. – EDN YTXYGX.
14. **Delpoux R., Kader Z., Huguet T.** Observer-Based Flux Controller for Synchronous Reluctance Motor Including Magnetic Saturation // Science Journal IEEE transactions on magnetics. – 2024.
15. **Synchronous Reluctance Motor: Design, Optimization and Validation / M. Tursini, M. Villani, G. Fabri, et al.** // 2018 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM). – 2018. – P. 1297–1302. DOI: 10.1109/SPEEDAM.2018.8445304.
16. **Barta J., Ondrusek C.** Rotor design and optimization of synchronous reluctance machine // MM Science Journal. – 2015. – P. 555–559. DOI: 10.17973/MMSJ.2015_03_201504.
17. **Zhu J.** Shape Design Optimization and Comparative Analysis of a Novel Synchronous Reluctance Machine // IEEE Transactions on Magnetism. Science Journal IEEE transactions on electronics. – 2024.
18. **Суворкова Е.Е., Дементьев Ю.Н., Бурулько Л.К.** Расчет магнитных полей и индуктивных параметров синхронных реактивных двигателей // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 6. – С. 112–116.
19. **Караулов В.Н., Доржинкевич А.Ф.** Параметрическая модель синхронного реактивного двигателя с TLA-ротором в установившихся и переходных режимах // Вестник ИГЭУ. – 2023. – Вып. 4. – С. 46–53.

References

1. Shul'ga, R.N. Sinkhronnyy reaktivnyy dvigatel' v sovremennom elektroprivode [Synchronous reluctance engine in a private electric drive]. *Elektrooborudovanie: ekspluatatsiya i remont*, 2023, no. 1, pp. 44–55. EDN JMGRWE.
2. Tikhomirov, O.I. Sinkhronnye reaktivnye elektrodvigateli dlya sozdaniya energoeffektivnykh resheniy klassa IE5 [Synchronous reluctance motors for creating energy-efficient solutions of class IE5]. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti*, 2022, no. 1, pp. 42–44. DOI: 10.25728/avtprom.2022.01.09. EDN UNYBKL.
3. Jeong, C. Performance Analysis of Dual Three-Phase Synchronous Reluctance Motor According to Winding Configuration. *Proceedings of the IEEE. Science Journal IEEE transactions on magnetics*, 2024, issue 2, pp. 99–193.
4. Fiorito, A. Rotor Optimization of a Synchronous Reluctance Machine for Railway Applications Conference. *International. Conference on Electrical Machines (ICEM) MM Science Journal*, 2024, issue 3, pp. 59–78. DOI:10.1109/ICEM60801.2024.10700068.
5. Mitrofanov, I.I. Optimal'noe po tochnosti upravlenie uglovooy skorost'yu sinkhronnogo reaktivnogo dvigatelya [Optimal control of the angular velocity of a synchronous jet engine in terms of accuracy]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2012, no. 11-1, pp. 186–190. EDN PYURRB.
6. Ptakh, G.K. Sravnitel'naya otsenka elektricheskikh dvigateley peremennogo toka asinkhronnogo i sinkhronnogo tipov s tsel'yu primeneniya ikh v grebnykh elektroustanovkakh ledokolov bol'shoy moshchnosti

[Comparative evaluation of alternating current electric motors of asynchronous and synchronous types for the purpose of their application in rowing electrical installations of icebreakers of high power]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika*, 2019, vol. 62, no. 5, pp. 24–30. DOI: 10.17213/0136-3360-2019-5-24-30. – EDN ISPZZZ.

7. Zakharov, A.V., Malafeev, S.I., Dudulin, A.L. Synchronous reluctance motor: Design and experimental research [Synchronous reluctance motor: Design and experimental research]. *X International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS)* [X International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS)]. Novocherkassk, 2018, pp. 1–4. DOI: 10.1109/ICEPDS.2018.8571500.

8. Murataliyev, M., Degano, M., Di Nardo, M., Bianchi, N., Gerada, C. Synchronous Reluctance Machines: A Comprehensive Review and Technology Comparison. *Proceedings of the IEEE*, 2022, vol. 110, no. 3, pp. 382–399. DOI: 10.1109/JPROC.2022.3145662.

9. Paramonov, A.S., Kazakbaev, V.M., Oshurbekov, S.Kh., Prakht, V.A. Svrnenie energopotrebleniya asinkhronnogo i sinkhronnogo reaktivnogo dvigateley v nasosnom prilozhenii [Comparison of power consumption of asynchronous and synchronous jet engines in a pumping application]. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh «Energ- i resursoberezhenie. Energoobespechenie. Netraditsionnye i vozobnovlyaemye istochniki energii. Atomnaya energetika», posvyashchenoy pamyati prof. Danilova N.I. (1945–2015) (Danilovskie chteniya)*, Ekaterinburg, 09–13 dekabrya 2019 g. [Materials of the International Scientific and Practical Conference of Students, postgraduates and Young Scientists “Energy and resource conservation. Energy supply. Unconventional and renewable energy sources. Nuclear power engineering”, dedicated to the memory of Prof. Danilov N.I. (1945–2015) (Danilovsky Readings), Ekaterinburg, December 09–13, 2019]. Ekaterinburg, 2019.

10. Han, Y., Wu, X., He, G., Hu, Y., Ni, K. Nonlinear magnetic field vector control with time-varying parameters for high-power electrically excited synchronous motor. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, pp. 11053–11063.

11. Choi, J. -s., Ko, J. -s., Chung, D. -h. Efficiency Optimization Control of SynRM Drive. *SICE-ICASE International Joint Conference*. Busan, Korea (South), 2006, pp. 690–695. DOI: 10.1109/SICE.2006.315625.

12. Kazakbaev, V.M., Prakht, V.A., Dmitrievskiy, V.A. Raschet rabochikh kharakteristik sinkhronnogo reaktivnogo dvigatelya v privode nasosa [Calculation of the performance characteristics of a synchronous jet engine

in a pump drive]. *Materialy III Mezhdunarodnoy konferentsii «Aktual'nye problemy energosberegayushchikh elektrotekhnologiy (APEET-2014)»*, Ekaterinburg, 17–20 marta 2014 g. [Proceedings of the III International Conference “Actual problems of energy-saving electrical technologies (APEET-2014)”, Ekaterinburg, March 17–20, 2014]. Ekaterinburg: Federal'noe gosudarstvennoe avtonomnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego professional'nogo obrazovaniya Ural'skiy federal'nyy universitet im. pervogo Prezidenta Rossii B.N. El'tsina, 2014, pp. 238–243. EDN VULCJB.

13. Samoseyko, V.F., Sharashkin, S.V., Gel'ver, F.A. Identifikatsiya parametrov reaktivnogo elektrodvigatelya s anizotropnoy magnitnoy provodimost'yu rotora [Identification of parameters of a reactive electric motor with anisotropic magnetic conductivity of the rotor]. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova*, 2017, vol. 9, no. 3, pp. 637–644. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-637-644. EDN YTXYGX.

14. Delpoux, R., Kader, Z., Huguet, T. Observer-Based Flux Controller for Synchronous Reluctance Motor Including Magnetic Saturation. *Science Journal IEEE transactions on magnetics*, 2024, issue 1, pp. 23–85.

15. Tursini, M., Villani, M., Fabri, G., Credo, A., Parasiliti, F., Abdelli, A. Synchronous Reluctance Motor: Design, Optimization and Validation. *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*, 2018, pp. 1297–1302. DOI: 10.1109/SPEEDAM.2018.8445304.

16. Barta, J., Ondrusek, C. Rotor design and optimization of synchronous reluctance machine. *MM Science Journal*, 2015, pp. 555–559. DOI: 10.17973/MMSJ.2015_03_201504.

17. Zhu, J. Shape Design Optimization and Comparative Analysis of a Novel Synchronous Reluctance Machine. *IEEE Transactions on Magnetics. Science Journal IEEE transactions on electronics*, 2024, issue 5, pp. 33–95.

18. Suvorkova, E.E., Dement'ev, Yu.N., Burul'ko, L.K. Raschet magnitnykh poley i induktivnykh parametrov sinkhronnykh reaktivnykh dvigateley [Calculation of magnetic fields and inductive parameters of synchronous jet engines]. *Fundamental'nye issledovaniya*, 2016, no. 6, pp. 112–116.

19. Karaulov, V.N., Dorzhinkevich, A.F. Parametricheskaya model' sinkhronnogo reaktivnogo dvigatelya s TLA-rotorom v ustanovivshikhsya i perekhodnykh rezhimakh [Parametric model of a synchronous jet engine with a TLA rotor in steady-state and transient modes]. *Vestnik IGEU*, 2023, issue 4, pp. 46–53.