

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

Анатолий Феликсович Доржинкевич

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

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

Авторское резюме

Состояние вопроса. Имеется значительный практический и научный интерес к синхронным реактивным двигателям с TLA-ротором. Сердечник TLA-ротора имеет поперечную шихтовку, внутренние пазы и сильно насыщенные участки. Конфигурация пазов ротора сложная и разнообразная. Актуальной является задача разработки параметрической модели синхронного реактивного двигателя с TLA-ротором, предназначенной для расчета установившихся и переходных режимов работы двигателя.

Материалы и методы. Использована классическая параметрическая модель синхронного реактивного двигателя, основанная на теории двух реакций. Представленный метод расчета параметров модели синхронного реактивного двигателя с TLA-ротором основан на результатах полевого расчета двух статических состояний магнитного поля. Расчеты установившихся режимов синхронного реактивного двигателя выполнены согласно инженерным формулам, которые получены из уравнения равновесия напряжений в фазе статора. Для расчета переходных режимов синхронного реактивного двигателя использованы уравнения Парка–Горева.

Результаты. Представлены полевые модели исследуемого синхронного реактивного двигателя при продольном и поперечном положениях ротора. Рассчитаны основные гармонические магнитного поля в зазоре и их зависимости от тока якоря. Приведены формулы для расчета индуктивных параметров обмотки якоря и рабочих характеристик синхронного реактивного двигателя. Приведены дифференциальные уравнения, используемые для расчета процессов в синхронном реактивном двигателе. С помощью параметрической модели рассчитаны рабочие характеристики синхронного реактивного двигателя, процесс частотного пуска, электромеханический процесс работы синхронного реактивного двигателя при несимметричном питании. Результаты расчетов сопоставлены с результатами полевого моделирования синхронного реактивного двигателя с TLA-ротором 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 с TLA-ротором при различных условиях питания и механической нагрузки, в том числе аномальных.

Ключевые слова: синхронный реактивный двигатель, рабочие характеристики синхронного реактивного двигателя, TLA-ротор, параметрическая модель, установившиеся режимы работы двигателя, 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

Anatoly Feliksovich Dorzhinkevich

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

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

Abstract

Background. There is considerable practical and scientific interest in synchronous reaction motors (SynRM) with TLA rotor. The core of the TLA rotor has a transversal charge, internal slots, and highly saturated areas. The configuration of the rotor slots is complex and diverse. The task to develop a parametric model of the SynRM with a TLA-rotor designed for calculation of steady-state and transient modes of the motor is relevant.

Materials and methods. The classical parametric model of SynRM based on the theory of two reactions is used. The calculation method for the parameters of the SynRM model with TLA rotor is presented. The method uses the results of field calculation of two static states of the magnetic field. The steady-state conditions of SynRM are calculated according

to the engineering formulas derived from the equation of equilibrium stresses in the stator phase. The Park-Gorev equations are used to calculate the transient modes of the SynRM.

Results. Field models of the SynRM under study at longitudinal and transverse rotor positions are presented. Main harmonics of magnetic field in the gap and their dependence on armature current are calculated. Formulas to calculate the inductive parameters of armature winding and performance characteristics of SynRM are given. Differential equations to calculate processes in SynRM are given. The parametric model is used to calculate performance characteristics of SynRM, frequency start process, electromechanical process of SynRM operation in case of asymmetric power supply. The calculation results are compared with the results of field simulation of SynRM with TLA rotor 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 reactive motor with TLA-rotor under various conditions of power supply and mechanical load, including abnormal ones.

Key words: synchronous reluctance motor, operating characteristics of synchronous reluctance motor, TLA-rotor, parametric model, steady-state operating modes of the motor, transient operating modes of the motor

DOI: 10.17588/2072-2672.2023.4.046-053

Введение. Синхронные реактивные двигатели (СРД) с TLA-ротором получили большее распространение в системах автоматического управления [1, 2]. Достоинства СРД: низкая стоимость, высокий КПД, возможность точного регулирования скорости в широком диапазоне [3], небольшие пульсации вращающего момента [4]. В [5–7] показано, что энергоэффективность и энергоемкость СРД больше, чем у асинхронных двигателей. Конструктивные особенности СРД: сердечник TLA-ротора имеет поперечную шихтовку, внутренние пазы и сильно насыщенные участки. Конфигурация пазов в различных СРД сложная и разнообразная. В [8, 9] 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 [10] предложено рассчитывать параметры СРД по величине параметров асинхронного двигателя, у которого статор соответствует статору рассматриваемого СРД. При расчете параметров схемы замещения асинхронного двигателя использованы его каталожные данные. В [11] 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 [12, 13] выполнен анализ и оптимизация конструкции ротора СРД на основе расчетов электромагнитного поля СРД в стационарном режиме работы машины. В [14] индуктивные параметры СРД рассчитаны исходя из расчетов электромагнитного поля.

Актуальной является задача разработки параметрической модели СРД с TLA-ротором, предназначенной для расчета установившихся и переходных режимов работы двигателя. Параметры модели СРД следует определять исходя из расчетов электромагнитного поля, что позволяет учитывать особенности конструкции машины и изменения насыщения магнитной цепи в зависимости от величины тока якоря.

При моделировании процессов в СРД с TLA-ротором может быть использована классическая модель СРД, основанная на теории двух реакций. Ниже представлен метод расчета параметров модели, основанный на результатах полевых расчетов двух статических состояний магнитного поля, описаны полевые модели исследуемого СРД при продольном и поперечном положениях ротора, рассчитаны основные гармонические магнитного поля в зазоре и их зависимости от тока якоря, а также приведены формулы для расчета индуктивных параметров обмотки якоря.

Для расчета установившихся режимов работы СРД с TLA-ротором использованы инженерные формулы, полученные на основе уравнения равновесия напряжений в фазе статора; расчеты переходных режимов выполнены на основе уравнений Парка–Горева. С помощью параметрической модели рассчитаны рабочие характеристики СРД, процесс частотного пуска, электромеханический процесс работы СРД при несимметричном питании. Результаты расчетов сопоставлены с результатами полевого моделирования СРД с TLA-ротором в среде Ansys Maxwell.

Материалы и методы. На рис. 1 представлена конструкция исследуемого СРД с TLA-ротором. Технические показатели двигателя: 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.

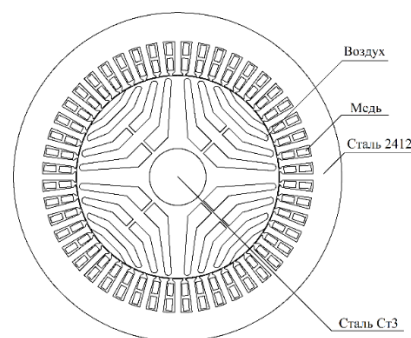


Рис. 1. Конструкция СРД с TLA-ротором

Параметрическая модель СРД. Моделью установившегося синхронного режима работы СРД служит уравнение равновесия напряжений в фазе статора для действующих значений напряжений и токов на пространственно-временной комплексной плоскости:

$$\dot{U} = j\dot{i}_d x_{ad} + j\dot{i}_q x_{aq} + j\dot{i}x_s + \dot{i}r_1. \quad (1)$$

Этому уравнению соответствует векторная диаграмма СРД, представленная на рис. 2.

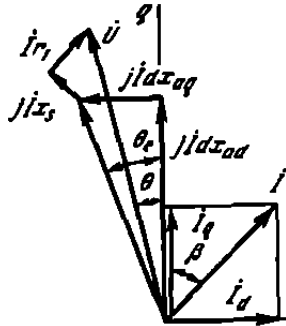


Рис. 2. Векторная диаграмма СРД

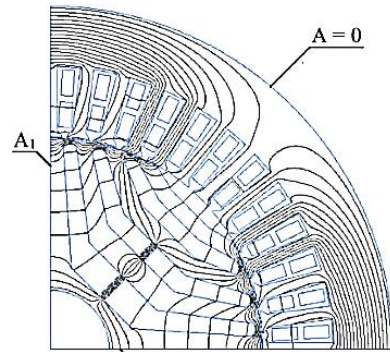
Моделью СРД в переходных режимах работы служит система дифференциальных уравнений Парка–Горева, записанных в осях $d, q, 0$ (ось d опережает ось q):

$$\begin{aligned} U_d &= \frac{d\Psi_d}{dt} + i_d r_1 + \Psi_{q\omega}; \\ U_q &= \frac{d\Psi_q}{dt} + i_q r_1 - \Psi_{d\omega}; \\ U_0 &= i_0 r_1 + L_{\sigma 1} \frac{di_0}{dt}; \\ M_{эм} &= M_B + J \frac{d\Omega}{dt}; \\ M_{эм} &= 1,5 \cdot p (i_d \Psi_q - i_q \Psi_d); \\ \Psi_d &= \frac{x_d(I)}{\omega} I_d, \quad \Psi_q = \frac{x_q(I)}{\omega} I_q. \end{aligned} \quad (2)$$

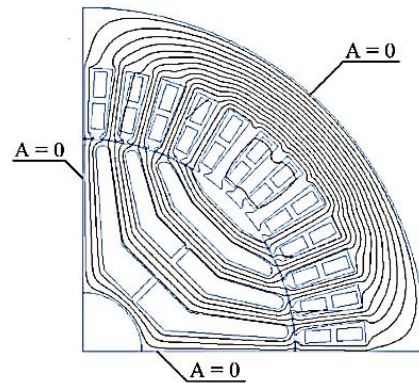
Сопротивления, используемые в уравнениях (1) и (2), являются параметрами СРД с ТЛА-ротором. Индуктивные сопротивления реакции якоря по продольной и поперечной осям x_{ad} и x_{aq} зависят от конструкции ТЛА-ротора, насыщения магнитной цепи и, соответственно, от величины тока якоря.

Результаты. Расчет параметров СРД с ТЛА-ротором. Для определения зависимостей $x_{ad} = f(I_d)$, $x_{aq} = f(I_q)$ выполнен полевой расчет двух статических состояний магнитного поля – при поперечном и продольном положениях ротора (рис. 3).

На рис. 3 показаны граничные условия для векторного магнитного потенциала и линии магнитной индукции. На внешнем диаметре якоря и для боковых сторон модели продольного поля выбрано граничное условие Дирихле; для боковых сторон модели поперечного поля – условие нечетной периодичности.



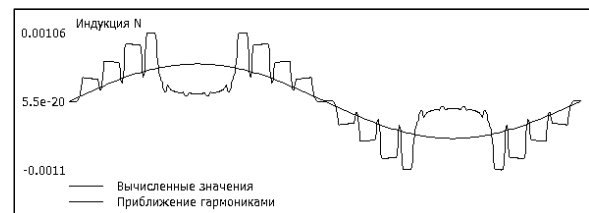
а)



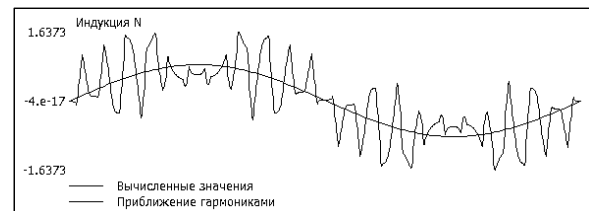
б)

Рис. 3. Полевые модели СРД при двух положениях ротора: а – поперечное положение; б – продольное положение

На рис. 4, 5 представлены результаты полевых расчетов: волна магнитной индукции на средней линии рабочего зазора и ее первая гармоническая при различном насыщении магнитной цепи.

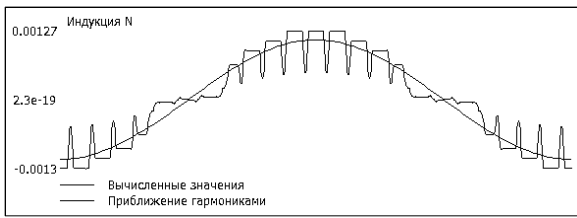


а)

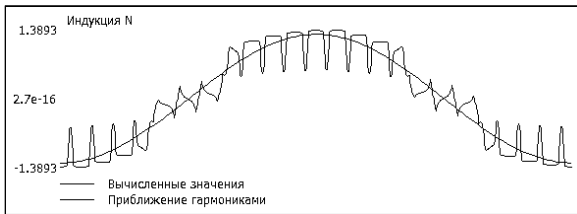


б)

Рис. 4. Поперечная волна магнитной индукции в рабочем зазоре и ее первая гармоническая B_{q1} : а – при отсутствии насыщения магнитной цепи; б – при предельном насыщении магнитной цепи



а)



б)

Рис. 5. Продольная волна магнитной индукции в рабочем зазоре и ее первая гармоническая B_{d1} : а – при отсутствии насыщения магнитной цепи; б – при предельном насыщении магнитной цепи

На рис. 6 показаны зависимости амплитуды первой пространственной гармонической магнитной индукции в зазоре от тока фазы якоря $B_{d1} = f(I_d)$ и $B_{q1} = f(I_q)$.

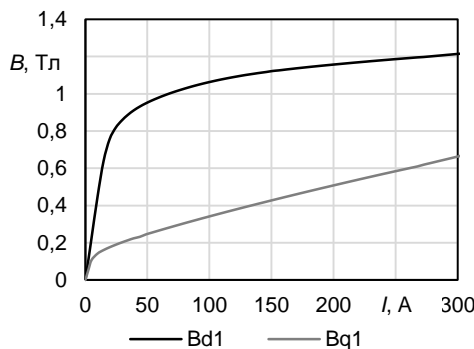


Рис. 6. Зависимости амплитуды первой пространственной гармонической магнитной индукции в зазоре от тока фазы якоря $B_{d1} = f(I_d)$ и $B_{q1} = f(I_q)$

Зависимости $B_{d1} = f(I_d)$ и $B_{q1} = f(I_q)$ использованы для расчета индуктивных сопротивлений реакции якоря. Вычислены:

- продольный и поперечный потоки якоря, Вб:

$$\Phi_{ad} = \frac{2}{\pi} B_{d1} l_{\delta} \tau; \quad \Phi_{aq} = \frac{2}{\pi} B_{q1} l_{\delta} \tau;$$

- продольная и поперечная ЭДС реакции якоря, В:

$$E_{ad} = \sqrt{2} \pi f_1 w k_{об} \Phi_{ad};$$

$$E_{aq} = \sqrt{2} \pi f_1 w k_{об} \Phi_{aq};$$

- индуктивные сопротивления реакции якоря, Ом:

$$x_{ad} = \frac{E_{ad}}{I_d}; \quad x_{aq} = \frac{E_{aq}}{I_q};$$

- индуктивное сопротивление рассеяния обмотки якоря, Ом:

$$x_{\sigma} = 1,58 \cdot \frac{f}{100} \left(\frac{w_1}{100} \right)^2 \frac{l_{\delta}}{\rho q} (\lambda_{п} + \lambda_{л} + \lambda_{д});$$

- синхронные индуктивные сопротивления якоря, Ом:

$$x_d = x_{ad} + x_{\sigma}; \quad x_q = x_{aq} + x_{\sigma}.$$

В итоге получены зависимости сопротивлений от тока якоря:

$$x_d = f(I_d); \quad x_q = f(I_q). \quad (3)$$

Расчет рабочих характеристик. Для расчета рабочих характеристик СРД используется уравнения (1). В качестве независимой переменной выбирается угол Θ – угол между вектором питающего напряжения U и поперечной осью q , показанный на рис. 2. Рабочие характеристики рассчитаны при значениях угла нагрузки Θ , изменяемом в диапазоне $0-90^\circ$.

Из векторной диаграммы, представленной на рис. 2, получены формулы для вычисления продольного и поперечного токов якоря, А:

$$I_d = \frac{U_{\Phi} (x_q(I) \cos(\Theta) - r_1 \sin(\Theta))}{r_1^2 + x_d(I) x_q(I)}; \quad (4)$$

$$I_q = \frac{U_{\Phi} (x_d(I) \sin(\Theta) + r_1 \cos(\Theta))}{r_1^2 + x_d(I) x_q(I)}.$$

Токи, рассчитанные по формулам (4), используются для уточнения значений индуктивных сопротивлений с помощью зависимостей $x_d = f(I_d)$, $x_q = f(I_q)$. Вычисления токов и уточнение сопротивлений повторяются до тех пор, пока значения токов в текущей и предыдущей итерациях перестанут различаться.

Далее вычисляются:

- ток фазы якоря, А:

$$I = \sqrt{I_q^2 + I_d^2};$$

- реактивный момент, Н·м:

$$M = \frac{m p U_{\Phi}^2}{2 \omega} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin(2 \cdot \Theta);$$

- потребляемая активная мощность, Вт:

$$P_1 = \frac{m U_{\Phi}^2 (x_d - x_q)}{2 (r_1^2 + x_d x_q)} \sin(2 \cdot \Theta) + \frac{m U_{\Phi}^2 r_1}{r_1^2 + x_d x_q};$$

- электромагнитный КПД, %:

$$\eta = \frac{P_{эм}}{P_1} \cdot 100;$$

- коэффициент мощности, о.е.:

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{m U_{\Phi} I}. \quad (5)$$

На рис. 7–11 представлены рабочие характеристики исследуемого СРД с ТЛА-ротором, рассчитанные по формулам (4)–(5), и аналогичные характеристики, полученные в результате полевых расчетов в Ansys Maxwell.

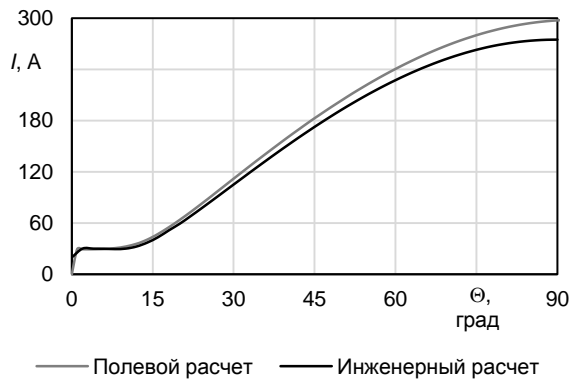


Рис. 7. Зависимость действующего тока якоря от угла нагрузки $I = f(\Theta)$

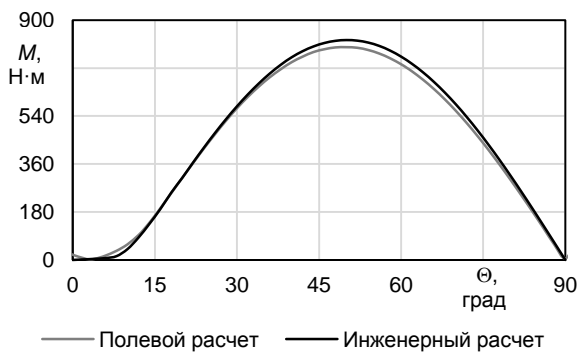


Рис. 8. Зависимость электромагнитного момента от угла нагрузки $M = f(\Theta)$

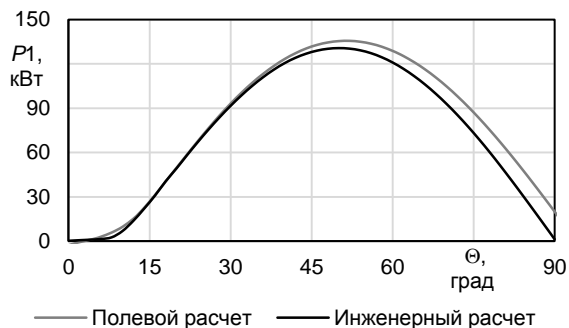


Рис. 9. Зависимость потребляемой активной мощности от угла нагрузки $P_1 = f(\Theta)$

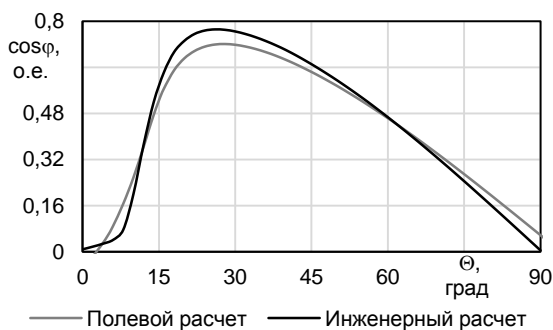


Рис. 10. Зависимость коэффициента мощности от угла нагрузки $\cos \varphi = f(\Theta)$

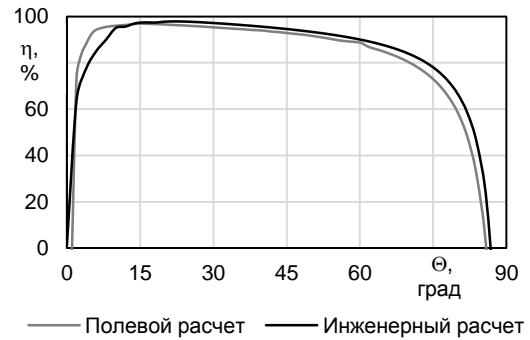


Рис. 11. Зависимость КПД от угла нагрузки $\eta = f(\Theta)$

Расчет переходных процессов в СРД.

Переходные процессы в СРД рассчитываются путем численного интегрирования системы дифференциальных уравнений (2). Используются зависимости мгновенных значений продольного и поперечного токов якоря от соответствующих потокоцеплений. Эти зависимости $i_d = f(\psi_d)$ и $i_q = f(\psi_q)$ показаны на рис. 12. Они определены на этапе расчета параметров СРД.

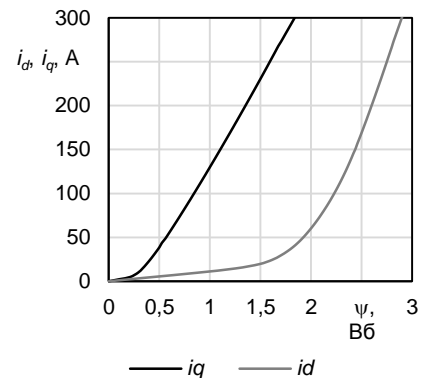


Рис. 12. Зависимости мгновенных токов от мгновенных потокоцеплений $i_d = f(\psi_d)$ и $i_q = f(\psi_q)$

Выполнен расчет электромеханического процесса частотного пуска СРД с ТЛА-ротором. Реализовано скалярное управление пусковым процессом: амплитуда и частота питающего напряжения линейно возрастают до номинальных значений в течение одной секунды и далее не изменяются. В момент времени $t = 1,5$ с происходит «наброс» номинальной нагрузки $M_n = 478$ Н·м. Величина тормозного момента зависит от угловой скорости ротора согласно характеру вентиляторной нагрузки

$$M_B = M_n \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2.$$

Потери в стали и механические потери не учитывались. Результаты расчета параметрической модели СРД (инженерный расчет) сопоставлены с аналогичными результатами полевых расчетов. На рис. 13 показано изменение частоты вращения ротора в ходе процесса частотного пуска СРД; на рис. 14 – изменение электромагнитного момента; на рис. 15 – изменение тока в фазе якоря.

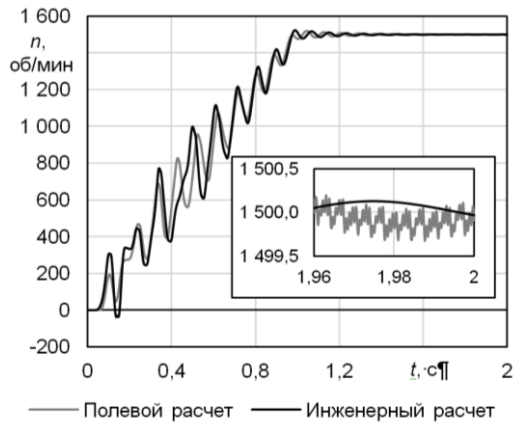


Рис. 13. Частота вращения ротора в процессе частотного пуска

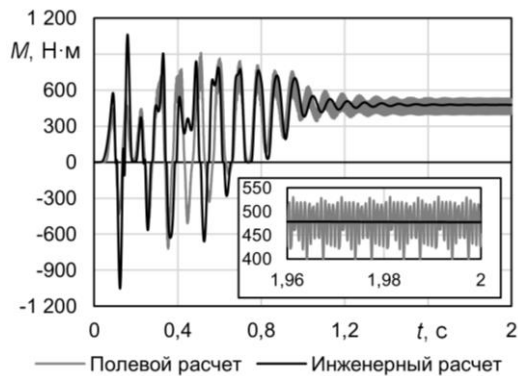


Рис. 14. Электромагнитный момент в процессе частотного пуска

Энергетические показатели машины рассчитаны после завершения процесса пуска по следующим формулам:

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

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

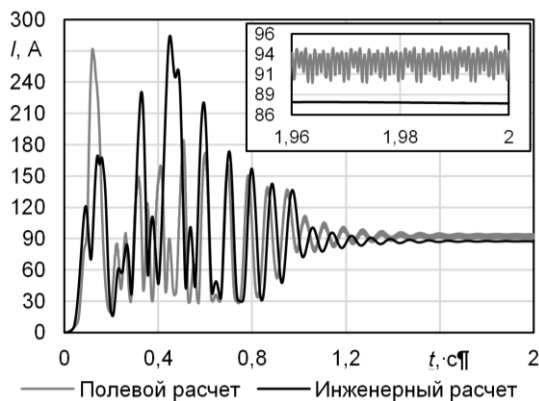


Рис. 15. Действующий ток якоря в процессе частотного пуска

Таблица 1. Энергетические показатели в установившемся режиме работы

Энергетические показатели	Инженерный расчет	Полевой расчет
η , о.е.	0,977	0,971
$\cos \varphi$, о.е.	0,771	0,732

Расчет несимметричных режимов работы СРД. Переходные и установившиеся процессы в несимметричных режимах работы СРД рассчитываются путем численного решения системы уравнений (2).

На рис. 16–18 и в табл. 2 представлены результаты расчета установившегося электро-механического процесса работы СРД с ТЛА-ротором при несимметричном питании: в одной из фаз величина амплитуды и фазы напряжения изменена на 5 %. Результаты расчета параметрической модели СРД (инженерный расчет) сопоставлены с аналогичными результатами полевых расчетов.

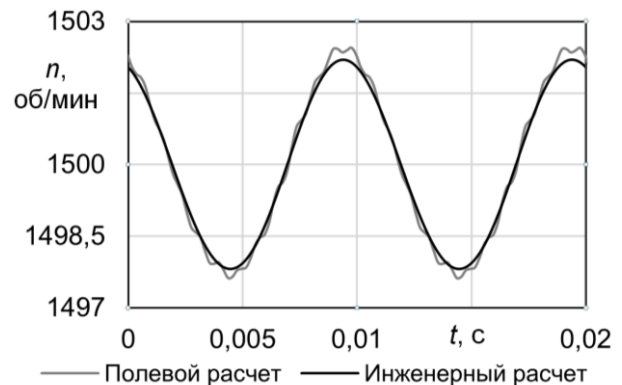


Рис. 16. Частота вращения ротора при несимметричном питающем напряжении

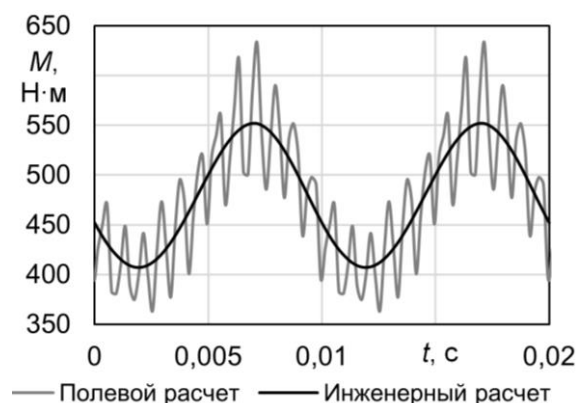


Рис. 17. Электромагнитный момент при несимметричном питающем напряжении

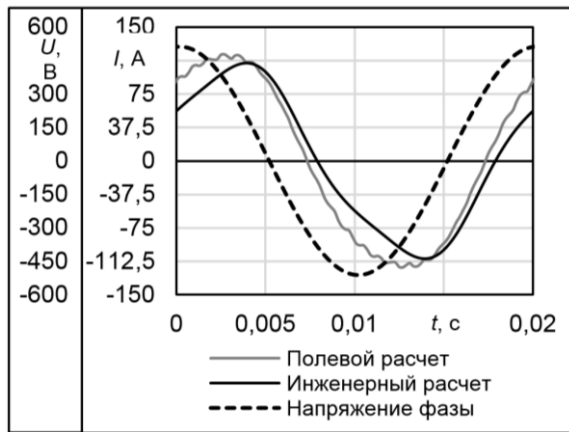


Рис. 18. Напряжение и ток в фазе статора при несимметричном питающем напряжении

Таблица 2. Энергетические показатели в установившемся режиме работы при несимметричном питании

Энергетические показатели	Инженерный расчет	Полевой расчет
η , о.е.	0,974	0,964
$\cos\varphi$, о.е.	0,74	0,728

Выводы. Классическая параметрическая модель синхронной машины, основанная на теории двух реакций, а также метод расчета параметров модели, основанный на результатах полевых расчетов двух статических состояний магнитного поля, позволяет быстро и качественно анализировать установившиеся и переходные режимы работы синхронного реактивного двигателя с TLA-ротором при различных условиях питания и механической нагрузки, в том числе аномальных.

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. 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.
4. 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.

5. 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), Novocherkassk, Russia. – 2018. – P. 1–4. DOI: 10.1109/ICEPDS.2018.8571500.

6. Synchronous Reluctance Machines: A Comprehensive Review and Technology Comparison / M. Murataliyev, M. Degano, M. Di Nardo, N. Bianchi, C. Gerada // Proceedings of the IEEE. – 2022. – Vol. 110. – P. 1–18. DOI: 10.1109/JPROC.2022.3145662.

7. Сравнение энергопотребления асинхронного и синхронного реактивных 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) – Даниловских чтений, Екатеринбург, 09–13 декабря 2019 года. – Екатеринбург, 2019. – С. 300–303.

8. 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.

9. Jung-sik Choi, Jae-sub Ko, Dong-hwa Chung. Efficiency Optimization Control of SynRM Drive // 2006 SICE-ICASE International Joint Conference. – Busan, Korea (South), 2006. – P. 690–695. DOI: 10.1109/SICE.2006.315625.

10. 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 года / Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. – 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.

11. 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.

12. 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.

13. 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.

14. Суворкова Е.Е., Дементьев Ю.Н., Бурлюк Л.К. Расчет магнитных полей и индуктивных параметров синхронных реактивных двигателей // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 6-1. – С. 112–116.

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 JMGWE.
2. Tikhomirov, O.I. Sinkhronnye reaktivnye elektrodvigateli dlya sozdaniya energoeffektivnykh resheniy klassa IE5 [Synchronous reluctance motors for creating energy-efficient solutions of class IE5]. *Automation in industry*, 2022, no. 1, pp. 42–44. DOI: 10.25728/avtprom.2022.01.09. EDN UNYBKL.
3. Mitrofanov, I.I. Optimal'noe po tochnosti upravlenie uglovoy skorost'yu sinkhronnogo reaktivnogo dvigatelya [Optimal control of the angular velocity of a synchronous jet engine in terms of accuracy]. *Izvestiya Tula State University. Technical sciences*, 2012, no. 11-1, pp. 186–190. EDN PYURRB.
4. 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 of higher educational institutions. Electromechanics*, 2019, vol. 62, no. 5, pp. 24–30. DOI: 10.17213/0136-3360-2019-5-24-30. EDN ISPZZZ.
5. 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). Novocherkassk, 2018, pp. 1–4. DOI: 10.1109/ICEPDS.2018.8571500.
6. 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, pp. 1–18. DOI: 10.1109/JPROC.2022.3145662.
7. Paramonov, A.S., Kazakbaev, V.M., Oshurbekov, S.Kh., Prakht, V.A. Sravnenie 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, posvyashchennoy pamyati prof. Danilova N.I. (1945–2015) «Energo- i resursosberezhenie. Energoobespechenie. Netraditsionnye i vozobnovlyaemye istochniki energii. Atomnaya energetika» (Danilovskikh chteniy)*, Ekaterinburg, 09–13 dekabrnya 2019 goda [Materials of the International Scientific and Practical Conference of Students, postgraduates and Young Scientists dedicated to the memory of Prof. Danilova N.I. (1945–2015) “Energy and resource conservation. Energy supply. Unconventional and renewable energy sources. Nuclear power engineering” (Danilovsky Readings), Yekaterinburg, December 09–13, 2019]. Ekaterinburg, 2019, pp. 300–303.
8. 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.
9. Choi J.-s., Ko J.-s., Chung D.-h. Efficiency Optimization Control of SynRM Drive. 2006 SICE-ICASE International Joint Conference. Busan, Korea (South), 2006, pp. 690–695. DOI: 10.1109/SICE.2006.315625.
10. 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 goda [Proceedings of the III International Conference “Actual problems of energy-saving electrical technologies” (APEET-2014), Yekaterinburg, March 17–20, 2014]. Ekaterinburg, 2014, pp. 238–243. EDN VULCJB.
11. 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 imeni admirala S.O. Makarova*, 2017, vol. 9, no. 3, pp. 637–644. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-637-644. EDN YTXYGX.
12. Tursini, M., Villani, M., Fabri, G., Credo, A., Parasiliti, F., Abdelli, A. Synchronous Reluctance Motor: Design, Optimization and Validation. 2018 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), 2018, pp. 1297–1302. DOI: 10.1109/SPEEDAM.2018.8445304.
13. 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.
14. 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. 6-1, pp. 112–116.