УДК 621.313

# Параметрическая модель синхронного реактивного двигателя

# с TLA-ротором и демпферной обмоткой в установившихся и переходных режимах

В.Н. Караулов, Е.А. Курлаков

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина»,

Иваново, Российская Федерация

E-mail: wiktor2012@mail.ru; tukkto@gmail.com

**Авторское резюме**

**Состояние вопроса:** Конструкция синхронного реактивного двигателя с TLA-ротором и демпферной обмоткой (далее СРД) 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 расчёты режимов работы СРД выполняют с помощью полевых моделей двигателя. Актуально показать, что классическая параметрическая модель синхронной машины позволяет достоверно рассчитывать режимы работы СРД. Необходимо разработать метод определения параметров модели СРД.

**Материалы и методы:** Используется классическая параметрическая модель СРД, основанная на теории двух реакций. Представлен метод расчёта параметров модели СРД. Метод использует результаты полевого расчёта статического и пульсирующего продольного и поперечного магнитного поля. Для расчёта установившихся и переходных режимов работы СРД используются уравнения Парка-Горева.

**Результаты:** Представлены полевые модели и формулы, используемые для расчёта параметров СРД. Представлены уравнения Парка-Горева и результаты расчета электромеханических процессов в СРД: прямой пуск двигателя при симметричном питании; работа СРД при несимметричном питании. Результаты расчётов сопоставлены с результатами полевого моделирования СРД 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 СРД при различных условиях питания и механической нагрузки.

**Ключевые слова:** синхронный реактивный двигатель, TLA–ротор, демпферная обмотка, параметрическая модель, установившиеся и переходные режимы работы.

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

V.N. Karaulov, E.A. Kurlakov

Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin, Ivanovo, Russian Federation

E-mail: wiktor2012@mail.ru; [tukkto@gmail.com](mailto:tukkto@gmail.com)

**Author's resume**

**[Background:](https://translate.yandex.ru/" \t "_blank)** [The design of a synchronous reaction motors with a TLA rotor and a damper winding (hereinafter referred to as the SynRM) differs from the classical one: there are no pronounced 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 engine. 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 for determining the parameters of the SynRM model.](https://translate.yandex.ru/" \t "_blank)

**[Materials and methods:](https://translate.yandex.ru/" \t "_blank)** [The classical parametric model of the SynRM is used, based on the theory of two reactions. A method for calculating the parameters of the SynRM model is presented. The method uses the results of field calculations of static and pulsating longitudinal and transverse magnetic fields. The Park-Gorev equations are used to calculate of steady-state and transient modes of the motor is relevant SynRM.](https://translate.yandex.ru/" \t "_blank)

**[Results:](https://translate.yandex.ru/" \t "_blank)** [Field models and formulas used to calculate the parameters of the SynRM are presented. The Park-Gorev equations and the calculation results of electromechanical processes in the SynRM are presented: direct engine start with symmetrical power supply; operation of the SynRM with asymmetric power supply. The calculation results are compared with the results of field simulation of the SynRM in the Ansys Maxwell environment.](https://translate.yandex.ru/" \t "_blank)

**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 at various conditions of power supply and mechanical load.

**[Keywords:](https://translate.yandex.ru/" \t "_blank)** [synchronous reluctance motor, TLA rotor, damper winding, parametric model, steady–state and transient operating modes.](https://translate.yandex.ru/" \t "_blank)

**Введение**

Синхронные реактивные двигатели с TLA-ротором получили большее распространение в системах автоматического управления [1], [2], [15], [17]. Достоинства СРД: низкая стоимость, высокий КПД, возможность точного регулирования скорости в широком диапазоне [3], небольшие пульсации вращающего момента [4]. В [5], [6], [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. Алюминиевая демпферная обмотка располагается в немагнитных пазах ротора. 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] и [18] 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] и [16] 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 расчётов электромагнитного поля.

В [19] показано, что при моделировании процессов в СРД с TLA-ротором может быть использована классическая модель СРД, основанная на теории двух реакций. Представлен метод расчёта индуктивных сопротивлений реакции якоря по продольной и поперечной осям xad и xaq, основанный на результатах полевых расчётов 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 расчёта установившихся и переходных режимов работы двигателя. Параметры демпферной обмотки следует определять исходя из расчётов электромагнитного поля, что позволяет учесть особенности её конструкции.

В настоящей статье представлен метод расчёта активного и индуктивного сопротивлений рассеяния приведённых продольной и поперечной демпферных обмоток. Параметры демпферных обмоток вычисляются на основе полевых расчётов, моделирующих опыт однофазного питания двух фаз. Описаны полевые модели исследуемого СРД при продольном и поперечном положениях ротора. Приведены формулы для расчёта параметров демпферных обмоток.

Расчёты 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 расчётов сопоставлены с результатами полевого моделирования СРД с TLA-ротором и демпферной обмоткой в среде Ansys Maxwell.

**Конструкция**

На рис. 1. представлена конструкция и материалы исследуемого СРД с TLA-ротором и демпферной обмоткой. 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.

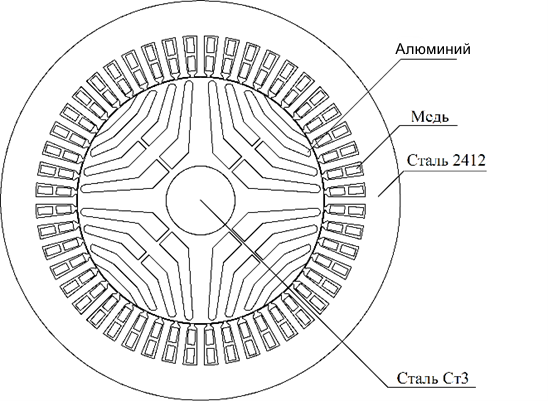


Рис. 1. Конструкция СРД с TLA-ротором и демпферной обмоткой

**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)

ud = + id·r1 + ψq·ω,

uq = + iq·r1 - ψd·ω,

,

0 = + ikd·rkd,

0 = + ikq·rkq,

, ,

**,** (1)

,

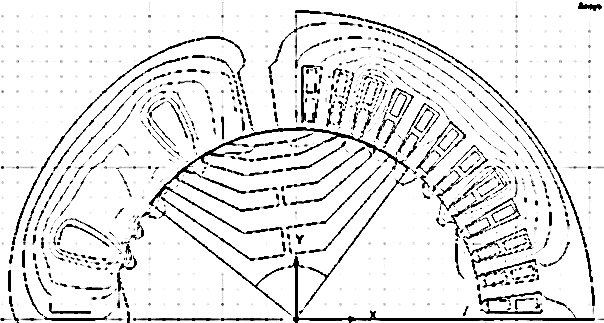
,

Mэм = 1,5·p·(id· ψq - iq· ψd).

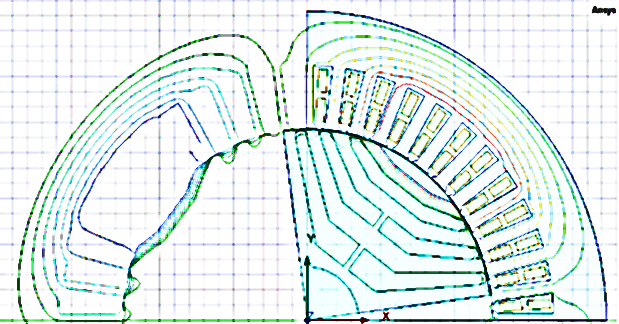
Сопротивления, используемые в уравнениях (1), являются параметрами СРД с TLA-ротором. Индуктивные сопротивления реакции якоря по продольной и поперечной осям xad(id) и xaq(iq) зависят от конструкции TLA-ротора, от насыщения магнитной цепи и, соответственно, от величины тока якоря. Зависимости xad(id) и xaq(iq) рассчитываются согласно методу, представленному в [19]. Активное и индуктивное сопротивление рассеяния продольной демпферной обмотки (rkd, xkd) и поперечной демпферной обмотки (rkq, xkq) не зависят от насыщения магнитной цепи.

**Расчёт параметров демпферной обмотки**

Параметры демпферной обмотки rkd, xkd и rkq, xkq 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 создаёт пульсирующий магнитный поток, направленный по поперечной оси ротора (рис. 2,а) и по продольной оси ротора (рис. 2,б).



а)

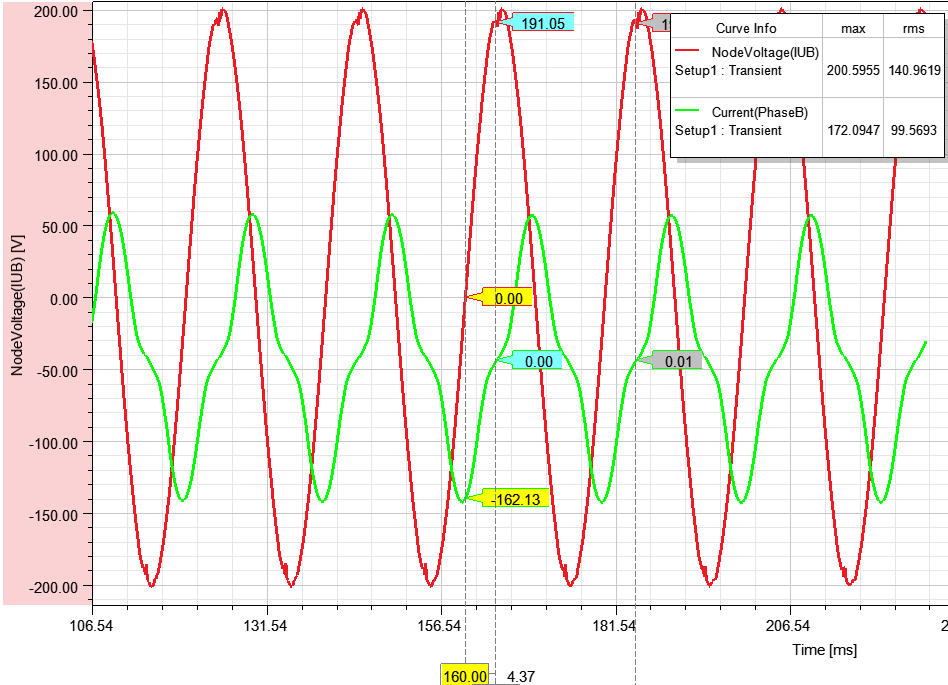


б)

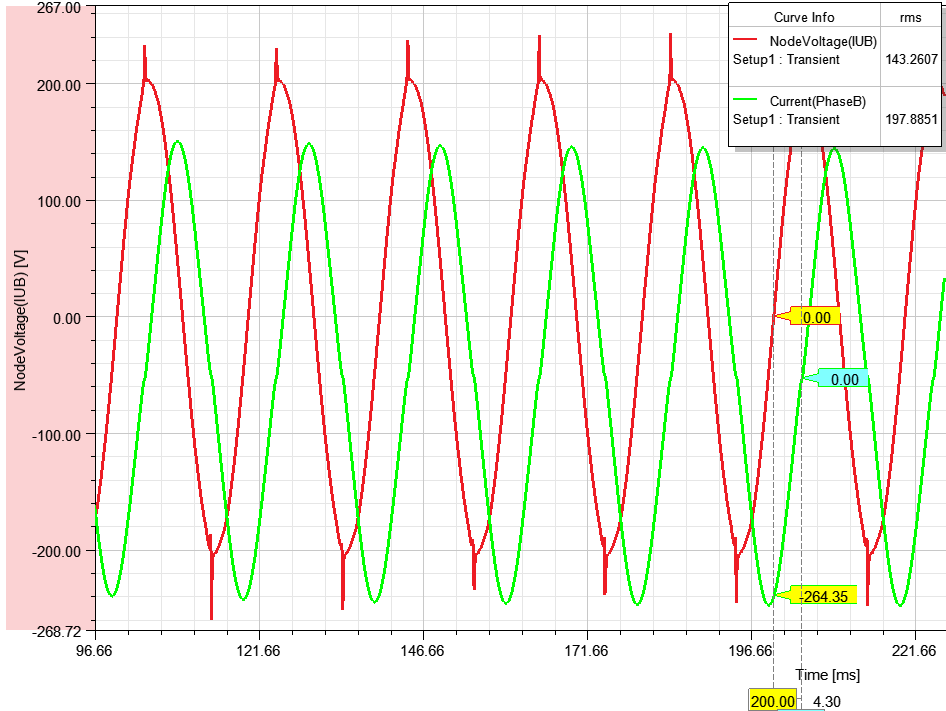
Рис. 2. Пульсирующий магнитный поток, направленный: а) по поперечной оси ротора; б) по продольной оси ротора.

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.



а)



б)

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

Из осциллограмм рис. 3,а найдены: действующие значения напряжения и тока обратной последовательности в фазе статора (U2q, I2q); сдвиг по фазе кривых напряжения и тока (ᵠq). Рассчитано сопротивление фазы для тока обратной последовательности I2q: полное (z2q), активное (r2q) и индуктивное (x2q).

Параметрическая модель СРД с демпферной обмоткой при пульсации магнитного потока по поперечной оси ротора имеет вид

|  |  |
| --- | --- |
| а) | б |
|  |  |

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

Соответственно активное и индуктивное сопротивление рассеяния фазы приведённой поперечной демпферной обмотки рассчитаны по формулам

rkq=r2q-r1 = 0.254 Ом; xkq=x2q -xϭ1= 0.876 Ом,

где r1 и xϭ1 – активное сопротивление проводов и индуктивное сопротивление рассеяния фазы статора.

Аналогично, с помощью осциллограммы рисунка 3.б, рассчитаны активное и индуктивное сопротивление рассеяния фазы приведённой продольной демпферной обмотки rkd = 0.121 Ом и xkd = 0.304 Ом.

**Расчёт переходных процессов в СРД при симметричном питании**

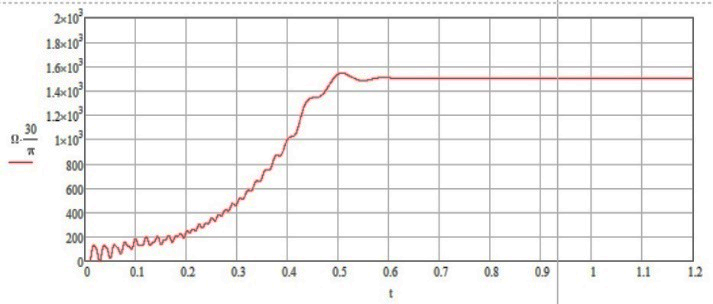
Переходные и установившиеся процессы в СРД рассчитываются путём численного интегрирования системы дифференциальных уравнений (1). Используются зависимости xad(id) и xaq(iq), представленные на рис. 5, и неизменные по величине сопротивления r1, xϭ1, rkd, xkd, rkq, xkq.



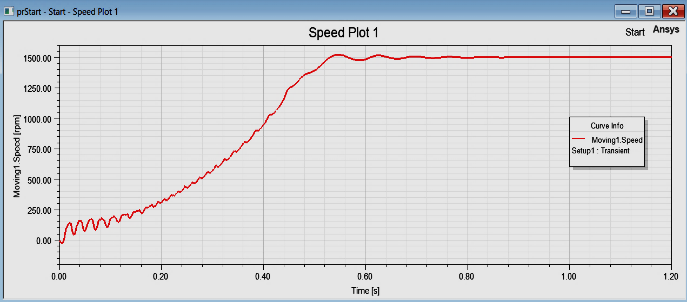
Рис. 5. Зависимости xad(id) и xaq(iq)

Выполнен расчёт электромеханического процесса прямого пуска СРД с TLA-ротором и демпферной обмоткой при номинальном тормозном моменте на валу Mн = 478 Н·м.

Потери в стали и механические - не учитывались. Результаты расчёта параметрической модели СРД (инженерный расчёт), сопоставлены с аналогичными результатами полевых расчетов в Ansys Maxwell.



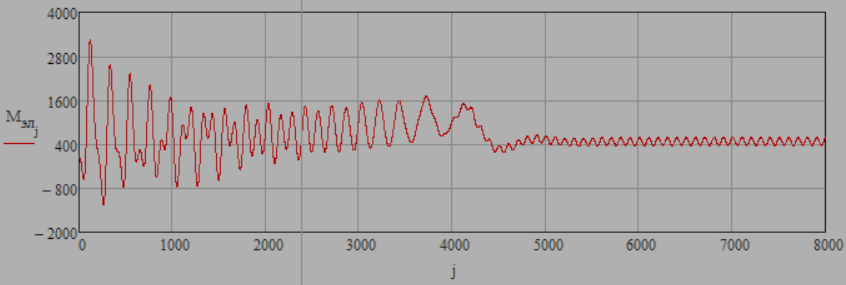
а)



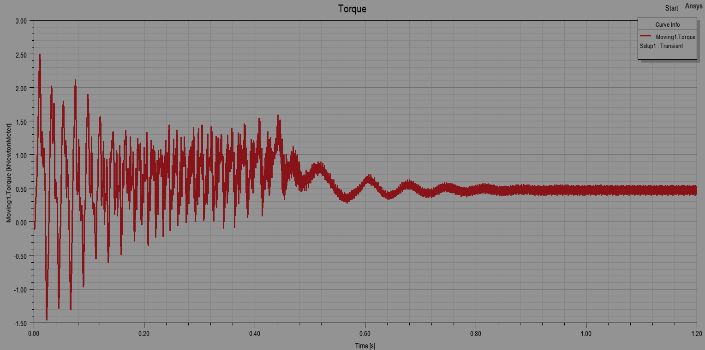
б)

Рис. 6. Частота вращения ротора: а) инженерный расчет; б) полевой расчёт 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.

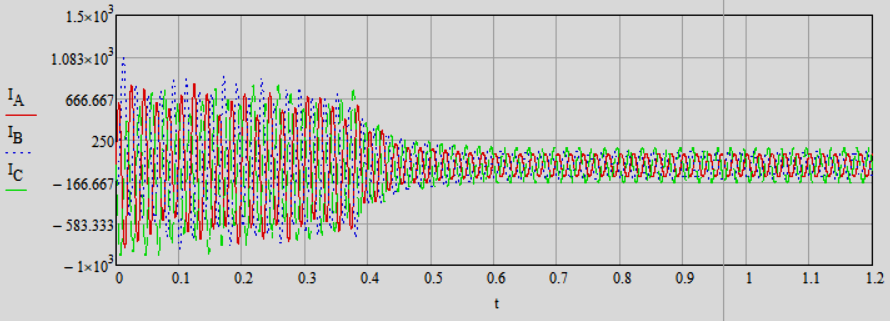


а)

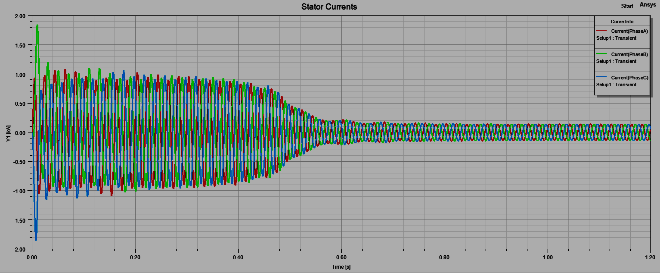


б)

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



а)

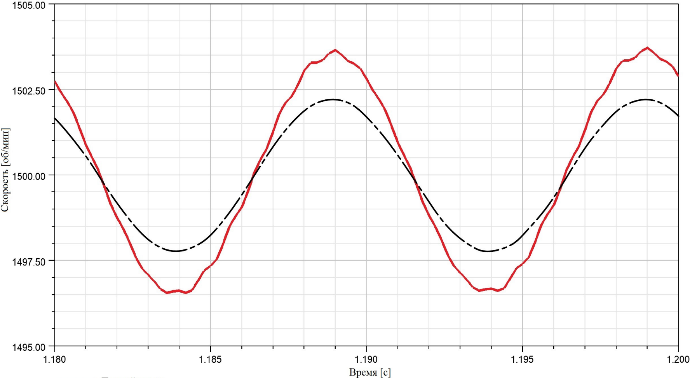


б)

Рис. 8. Изменение тока в фазах статора: а) инженерный расчет; б) полевой расчёт в Ansys Maxwell

**Расчёт установившихся процессов в СРД при несимметричном питании**

На рис. 9-11 и в таблице 1 представлены результаты расчёта 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 расчёта параметрической модели СРД (инженерный расчёт), сопоставлены с аналогичными результатами полевых расчетов в Ansys Maxwell.



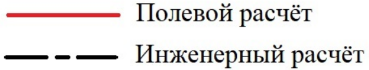
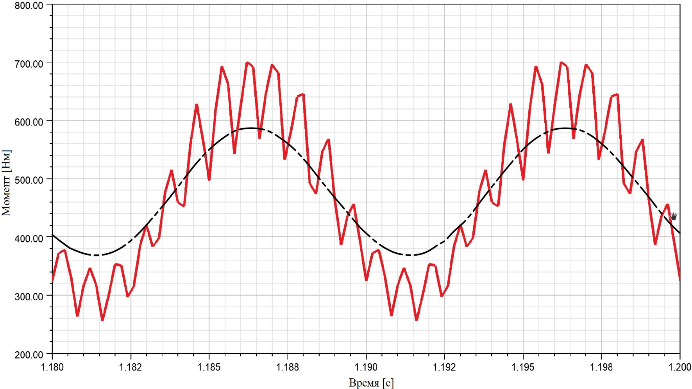


Рис. 9. Частота вращения ротора



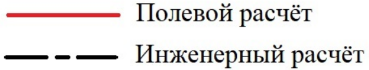
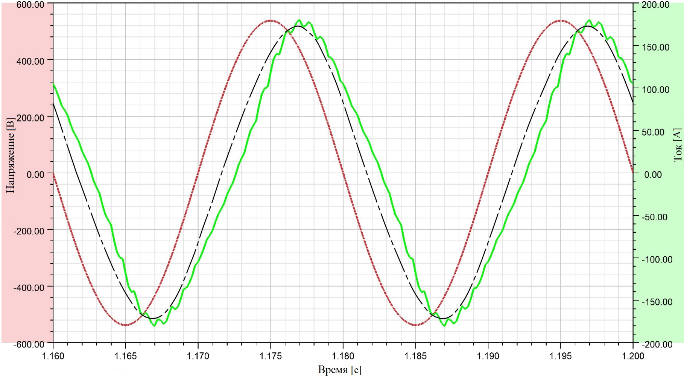


Рис. 10. Электромагнитный момент СРД



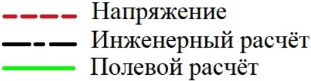


Рис. 11. Напряжение и ток в фазе статора

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

.

Таблица 1 – Энергетические показатели в установившемся режиме работы при несимметричном питании

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Энергетическое показатели | Инженерный расчет | Ansys Maxwell |
| η | 0,974 | 0,964 |
| cos(φ) | 0.665 | 0.6827 |

**Заключение**

Показано, что 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 нагрузки.

Представлен метод расчёта параметров демпферной обмотки, основанный на результатах полевых расчётов при двух положениях ротора.

**Список литературы**

1. **Шульга, Р.Н.** Синхронный реактивный двигатель в современном электроприводе / Р.Н. Шульга // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2023. – № 1. – С. 44-55 – EDN JMGRWE.
2. **Тихомиров, О. И.** Синхронные реактивные электродвигатели для создания энергоэффективных решений класса IE5 / О. И. Тихомиров // 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 / И. И. Митрофанов // 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 / Г. К. Птах // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2019. – Т. 62. – № 5. – С. 24-30. – DOI 10.17213/0136-3360-2019-5-24-30. – EDN ISPZZZ.
5. **A. V. Zakharov, S. I. Malafeev and A. L. Dudulin**, "Synchronous reluctance motor: Design and experimental research," 2018 X International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS), Novocherkassk, Russia, 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICEPDS.2018.8571500.
6. **Murataliyev, Mukhammed & Degano, Michele & Di Nardo, Mauro & Bianchi, N. & Gerada, Chris**. (2022). Synchronous Reluctance Machines: A Comprehensive Review and Technology Comparison. Proceedings of the IEEE. 110. 1-18. 10.1109/JPROC.2022.3145662.
7. 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 Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной памяти проф. Данилова Н. И. (1945-2015) - Даниловских чтений, Екатеринбург, 09–13 декабря 2019 года
8. **Han, Yaofei, Wu, Xuanqin, He, Guofeng** et al. (2 more authors) (2020) Nonlinear magnetic field vector control with time-varying parameters for high-power electrically excited synchronous motor. IEEE Transactions on Power Electronics. pp. 11053-11063. ISSN 0885-8993
9. **J. -s. Choi, J. -s. Ko and D. -h. Chung**, "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. **Казакбаев В. М.** Расчет рабочих характеристик синхронного реактивного двигателя в приводе насоса / В. М. Казакбаев, В. А. Прахт, В. А. Дмитриевский // Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий (АПЭЭТ-2014) : материалы III международной конференции, 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.** Идентификация параметров реактивного электродвигателя с анизотропной магнитной проводимостью ротора / В. Ф. Самосейко, С. В. Шарашкин, Ф. А. Гельвер // 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. **M. Tursini, M. Villani, G. Fabri, A. Credo, F. Parasiliti and A. Abdelli**, "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, Jan & Ondrusek, Cestmir**. (2015). Rotor design and optimization of synchronous reluctance machine. MM Science Journal. 2015. 555-559. 10.17973/MMSJ.2015\_03\_201504.
14. **Суворкова Е. Е.** Расчет магнитных полей и индуктивных параметров синхронных реактивных двигателей / Е. Е. Суворкова, Ю. Н. Дементьев, Л. К. Бурулько // Фундаментальные исследования.
15. **Chaelim Jeong** (2024) Performance Analysis of Dual Three-Phase Synchronous Reluctance Motor According to Winding Configuration. Proceedings of the IEEE. Science Journal IEEE transactions on magnetics.
16. **Jianguo Zhu** (2024) Shape Design Optimization and Comparative Analysis of a Novel Synchronous Reluctance Machine. IEEE Transactions on Magnetics. Science Journal IEEE transactions on electronics.
17. **Antonio Fiorito.** Rotor Optimization of a Synchronous Reluctance Machine for Railway Applications (2024) DOI:10.1109/ICEM60801.2024.10700068 Conference: 2024 International Conference on Electrical Machines (ICEM) MM Science Journal
18. **Romain Delpoux, Zohra Kader, Thomas Huguet**. (2024) Observer-Based Flux Controller for Synchronous Reluctance Motor Including Magnetic Saturation. Science Journal IEEE transactions on magnetics.
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.

**List of literature**

1. **Shulga, R.N.** Synchronous reluctance engine in a private electric drive / R.N. Shulga // Electrical equipment: operation and repair. - 2023. - No. 1. - P. 44-55 - EDN JMGRWE.

2. **Tikhomirov, O. I.** Synchronous reluctance motors for creating energy-efficient solutions of class IE5 / O. I. Tikhomirov // Automation in industry. - 2022. - No. 1. - P. 42-44. – DOI 10.25728/avtprom.2022.01.09. – EDN UNYBKL.

3. **Mitrofanov I. I.** Optimal control of the angular velocity of a synchronous jet engine in terms of accuracy / I. I. Mitrofanov // Izvestiya Tula State University. Technical sciences. - 2012. – No. 11-1. – PP. 186-190. – EDN PYURRB.

4. **Ptah G. K.** 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 / G. K. Ptah // 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. **A. V. Zakharov, S. I. Malafeev and A. L. Dudulin**, "Synchronous reluctance motor: Design and experimental research," 2018 X International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS), Novocherkassk, Russia, 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICEPDS.2018.8571500.

6. **Murataliyev, Mukhammed & Degano, Michele & Di Nardo, Mauro & Bianchi, N. & Gerada, Chris**. (2022). Synchronous Reluctance Machines: A Comprehensive Review and Technology Comparison. Proceedings of the IEEE. 110. 1-18. 10.1109/JPROC.2022.3145662.

7. Comparison of power consumption of asynchronous and synchronous jet engines in a pumping application / **A. S. Paramonov, V. M. Kazakbayev, S. H. Oshurbekov, V. A. Prakht** // Energy and resource conservation. Energy supply. Unconventional and renewable energy sources. Nuclear power engineering : 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) - Danilovsky Readings, Yekaterinburg, December 09-13, 2019

8. **Han, Yaofei, Wu, Xuanqin, He, Guofeng** et al. (2 more authors) (2020) Nonlinear magnetic field vector control with time-varying parameters for high-power electrically excited synchronous motor. IEEE Transactions on Power Electronics. pp. 11053-11063. ISSN 0885-8993

9. **J. -s. Choi, J. -s. Ko and D. -h. Chung**, "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. **Kazakbayev V. M.** Calculation of the performance characteristics of a synchronous jet engine in a pump drive / V. M. Kazakbayev, V. A. Prakht, V. A. Dmitrievsky // Actual problems of energy-saving electrical technologies (APEET-2014) : proceedings of the III International Conference, Yekaterinburg, March 17-20, 2014 / Ural Federal University named after the first President of Russia B. N.Yeltsin. – Yekaterinburg: Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Professional Education Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, 2014. – pp. 238-243. – EDN VULCJB.

11. **Samoseiko V. F.** Identification of parameters of a reactive electric motor with anisotropic magnetic conductivity of the rotor / V. F. Samoseiko, S. V. Sharashkin, F. A. Gelver // Bulletin of the Admiral S.O. Makarov State University of Marine and River Fleet. – 2017. – Vol. 9. – No. 3. – pp. 637-644. – DOI 10.21821/2309-5180-2017-9-3-637-644. – EDN YTXYGX.

12. **M. Tursini, M. Villani, G. Fabri, A. Credo, F. Parasiliti and A. Abdelli**, "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, Jan & Ondrusek, Cestmir.** (2015). Rotor design and optimization of synchronous reluctance machine. MM Science Journal. 2015. 555-559. 10.17973/MMSJ.2015\_03\_201504.

14. **Suvorkova E. E.** Calculation of magnetic fields and inductive parameters of synchronous jet engines / E. E. Suvorkova, Yu. N. Dementiev, L. K. Burulko // Fundamental research.

15. **Chaelim Jeong** (2024) Performance Analysis of Dual Three-Phase Synchronous Reluctance Motor According to Winding Configuration. Proceedings of the IEEE. // Science Journal IEEE transactions on magnetics – Issue 2. – pp. 99-193.

**16. Jianguo Zhu** (2024)Shape Design Optimization and Comparative Analysis of a Novel Synchronous Reluctance Machine. IEEE Transactions on Magnetics. // Science Journal IEEE transactions on electronics – Issue 5. – pp. 33-95.

17. **Antonio Fiorito.** Rotor Optimization of a Synchronous Reluctance Machine for Railway Applications (2024) DOI:10.1109/ICEM60801.2024.10700068 Conference: 2024 International Conference on Electrical Machines (ICEM) // MM Science Journal – Issue 3. – pp. 59-78.

**18. Romain Delpoux, Zohra Kader, Thomas Huguet.** (2024) Observer-Based Flux Controller for Synchronous Reluctance Motor Including Magnetic Saturation. // Science Journal IEEE transactions on magnetics – Issue 1. – pp. 23-85.

**19. Karaulov V.N., Dorzhinkevich A.F.** Parametric model of a synchronous jet engine with a TLA rotor in steady-state and transient modes. // ISPU Bulletin.- 2023. – Issue 4. – pp. 46-53.

*Караулов Виктор Николаевич,*

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина,

кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики,

e-mail: karaulov@em.ispu.ru

*Karaulov Viktor Nikolaevich*

Ivanovo State Power Engineering University

Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of the Department of Electromechanics

e-mail: wiktor2012@mail.ru

*Курлаков Евгений Александрович*

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина,

магистрант кафедры электромеханики,

e-mail: tukkto@gmail.com

*Kurlakov Evgeniy Aleksandrovich*

Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin,

Master's student of the Department of Electromechanics,

e-mail: [tukkto@gmail.com](mailto:tukkto@gmail.com)