

Научная статья

УДК 621.313.333.1

<https://doi.org/10.35266/1999-7604-2025-1-4>



Моделирование режимов работы асинхронного двигателя с учетом несимметрии напряжения питающей сети

Евгений Юрьевич Кислицин[✉], Данил Сергеевич Лукашов, Иван Юрьевич Борисов, Анатолий Александрович Назаров

Сургутский государственный университет, Сургут, Россия

Аннотация. Асинхронные двигатели являются ключевыми элементами многих электроэнергетических систем, особенно систем электрификации технологических установок объектов нефтегазового комплекса. Повышение эффективности, надежности и безопасности работы асинхронных двигателей требует точного моделирования электромагнитных и механических процессов, особенно в условиях переходных режимов и при несимметрии питающего напряжения. В работе представлен обзор математической модели асинхронного двигателя с фазным ротором, разработанной на основе метода контурных токов для междуфазных напряжений. Модель учитывает влияние несимметрии напряжения питающей сети и позволяет исследовать переходные процессы, возникающие при различных режимах работы, включая пуск. Наличие качественной модели позволит спрогнозировать ресурс основных элементов машины и повысить качество работ по проведению диагностики неисправностей. В работе приведены результаты моделирования, выполнено сравнение с существующими моделями, показывающее эффективность предложенного метода.

Ключевые слова: асинхронный двигатель с фазным ротором, математическое моделирование, метод контурных токов, переходные процессы, релейная защита, несимметрия напряжения

Для цитирования: Кислицин Е. Ю., Лукашов Д. С., Борисов И. Ю., Назаров А. А. Моделирование режимов работы асинхронного двигателя с учетом несимметрии напряжения питающей сети // Вестник кибернетики. 2025. Т. 24, № 1. С. 26–30. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2025-1-4>.

Original article

Modeling of induction motor operation modes considering supply voltage asymmetry

Evgeny Yu. Kislitcin[✉], Danil S. Lukashov, Ivan Yu. Borisov, Anatoly A. Nazarov

Surgut State University, Surgut, Russia

Abstract. Induction motors are key elements of many electric power systems, especially electrification systems for technological installations of oil and gas facilities. Improving the efficiency, reliability and safety of induction motors requires accurate modelling of electromagnetic and mechanical processes, especially in transient conditions and with supply voltage asymmetry. This article presents a review of the mathematical model of a wound rotor induction motor based on the mesh-current method for interphase voltages. The model considers the influence of supply voltage asymmetry and provides an opportunity to study transients occurring in various operating modes, including starting. Using a proper model will enable prediction of machine main element service life and improved fault diagnostic work quality. This study provides modeling results, compares them to existing models, and demonstrates the effectiveness of the proposed method.

Keywords: wound rotor induction motor, mathematical modeling, mesh-current method, transients, relay protection, voltage asymmetry

For citation: Kislitcin E. Yu., Lukashov D. S., Borisov I. Yu., Nazarov A. A. Modeling of asynchronous motor operation modes considering supply voltage asymmetry. *Proceedings in Cybernetics*. 2025;24(1):26–30. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2025-1-4>.

ВВЕДЕНИЕ

Асинхронные двигатели (АД) являются ключевыми компонентами промышленных электроприводов, широко используемыми в различных отраслях. Их надежность и эффективность имеют решающее значение для непрерывности и экономичности производственных процессов. Однако реальные условия эксплуатации, нередко характеризующиеся неидеальным качеством электроэнергии, нелинейностью магнитных цепей, оказывают существенное влияние на характеристики и срок службы АД. Поэтому проблема разработки адекватных математических моделей, способных учитывать эти факторы, остается актуальной задачей современной энергетики [1, 2].

Существующие методы моделирования АД, например, основанные на преобразованиях Парка-Горева, широко используются, но могут иметь ограничения при анализе сложных режимов работы и при необходимости непосредственного определения токов в обмотках статора и ротора [3]. Метод контурных токов предоставляет альтернативный подход, позволяющий более детально учитывать особенности электрической цепи двигателя и ее взаимодействие с питающей сетью [4].

В настоящей работе представлен обзор усовершенствованной математической модели АДФР на основе метода контурных токов для междофазных напряжений.

Целью работы является разработка модели, адекватно описывающей переходные процессы при несимметричном напряжении питающей сети, а также при различных режимах работы, возникающих в процессе эксплуатации электрических машин. Наличие качественной модели позволит спрогнозировать ресурс основных элементов машины и повысить качество работ по проведению диагностики неисправностей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В последние годы наблюдается растущий интерес к моделированию АД с использованием различных математических подходов. Разработка точных и надежных математических моделей необходима для оптимизации параметров и прогнозирования поведения АД

в различных условиях эксплуатации. Различные подходы к моделированию АД, представленные в научной литературе, имеют свои преимущества и ограничения.

Многие исследования сосредоточены на создании моделей, способных адекватно описывать динамические режимы АД. Например, в работах А. В. Шестакова и соавт. представлена математическая модель, основанная на дифференциальных уравнениях в двухфазной ортогональной системе координат, учитывающая потери в железе, эффект вытеснения тока в стержнях ротора и насыщение магнитной цепи. Предложенная модель позволяет моделировать переходные процессы и обеспечивает удовлетворительную точность при сопоставлении с экспериментальными данными [1, 2].

Другое направление исследований связано с разработкой моделей для анализа специфических режимов работы АД. В работе А. V. Smolyaninov et al. рассмотрена система многомоторного частотно-каскадного электропривода, для которой получена динамическая модель и структурная схема АД с частотно-каскадным управлением [3]. В работе М. Y. Pustovetov предложена математическая модель трехфазного АД в системе отсчета трехфазного статора, позволяющая моделировать токи ротора на их фактической частоте [4].

Также актуальной задачей является моделирование АД в условиях несимметрии напряжения питающей сети. В статье А. С. Глазырина была разработана n -фазная имитационная модель АД для исследования обрыва стержня в беличьей клетке, позволяющая исследовать работу двигателя как в нормальном состоянии, так и при обрыве стержней [5].

Некоторые работы посвящены разработке более точных моделей АД с использованием метода конечных элементов (МКЭ) для учета нелинейности магнитопровода, скоса пазов ротора и индуктивности лобовых частей обмотки [6]. Такие модели позволяют более детально анализировать рабочие режимы АД и оптимизировать их конструкцию [6, 7].

Однако, несмотря на значительный прогресс в области моделирования АД, остаются нерешенные проблемы. Представленная

работа направлена на разработку усовершенствованной математической модели АДФР на основе метода контурных токов, пригодной для анализа широкого спектра режимов работы и диагностики неисправностей.

Математическая модель

Предлагаемая модель АДФР основана на эквивалентной схеме замещения, где статор и ротор представлены в виде взаимосвязанных контуров (рис. 1).

Уравнения, описывающие электрическую часть модели, составляются на основе второго закона Кирхгофа для каждого контура. С учетом рис. 1 дифференциальные уравнения для междофазных напряжений имеют вид (1):

$$\begin{aligned} U_{AB} &= (R_A + R_B) i_1 - R_B i_2 + \frac{d\psi_1}{dt}, \\ U_{BC} &= (R_B + R_C) i_2 - R_B i_1 + \frac{d\psi_2}{dt}, \\ 0 &= (R_A + R_b + 2R_{>l}) i_3 - (R_b + R_{>l}) i_4 + \frac{d\psi_3}{dt}, \\ 0 &= (R_b + R_c + 2R_{>l}) i_4 - (R_b + R_{>l}) i_3 + \frac{d\psi_4}{dt}. \end{aligned} \quad (1)$$

где U_{AB} , U_{BC} – мгновенные значения линейных напряжений;

i_1, i_2, i_3, i_4 – контурные токи;

i_3, i_4 – контурные токи ротора;
 R_A, R_B, R_C – активные сопротивления фаз статора;

R_a, R_b, R_c – активные сопротивления фаз статора;

$R_{доб}$ – добавочное сопротивление в роторной цепи;

$\Psi_1, \Psi_2, \Psi_3, \Psi_4$ – потокоцепления соответствующих контуров.

$$i_1 = i_A; i_2 = -i_C; i_3 = i_a; i_4 = -i_c.$$

Потокоцепления выражаются через контурные токи и индуктивности (2):

$$\begin{aligned} \psi_1 &= L_{11} i_1 + L_{12} i_2 + L_{13} i_3 + L_{14} i_4; \\ \psi_2 &= L_{21} i_1 + L_{22} i_2 + L_{23} i_3 + L_{24} i_4; \\ \psi_3 &= L_{31} i_1 + L_{32} i_2 + L_{33} i_3 + L_{34} i_4; \\ \psi_4 &= L_{41} i_1 + L_{42} i_2 + L_{43} i_3 + L_{44} i_4, \end{aligned} \quad (2)$$

где $L_{11} - L_{44}$ – индуктивности обмоток.

Представленная математическая модель АДФР дает возможность моделировать не только эксплуатационные, но и аварийные режимы работы электрической машины. Так, при переходном процессе к рассматриваемой математической модели следует добавить уравнения электромагнитных моментов (3):

$$M_M = \sum_{k=A,B,C} i_k \sum_{n=a,b,c} i_n \frac{dL_{kn}}{d\alpha_{kn}}, \quad (3)$$

где M_M – электромагнитный момент;

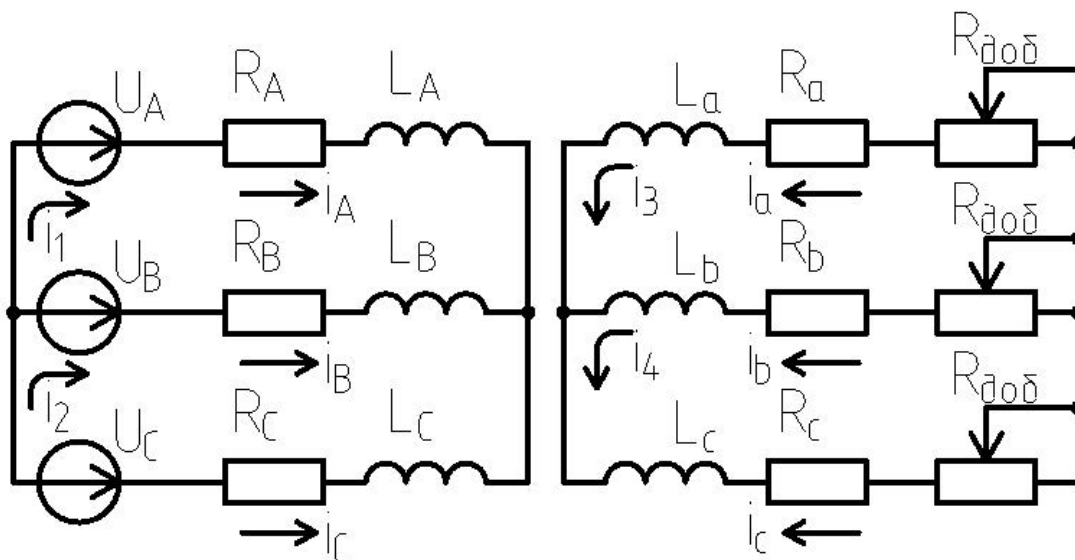


Рис. 1. Эквивалентная схема замещения АДФР с обозначением контурных токов, сопротивлений и индуктивностей

Примечание: составлено авторами.

M_c – момент нагрузки.

При моделировании режима запуска АДФР в i -м контуре, ток определяется как сумма токов i_{ni} периодической и i_{oi} аperiodической составляющей:

$$i_i = i_{ni} + i_{oi}.$$

Модель механической части АД описывается уравнением (вращательное движение) (4):

$$j \frac{d\omega_2}{dt} = M_M + M_A, \quad (4)$$

где j – момент инерции вращающихся частей двигателя и нагрузки;

ω_2 – угловая скорость вращения ротора.

Система уравнений (1)–(4) решается численными методами (например, методом Рунге-Кутты) в среде MatLab/Simulink [8].

Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными, полученными для аналогичного двигателя, демонстрирует адекватность разработанной модели. Погрешность не превышает 10%.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Представленная математическая модель АДФР на основе метода контурных токов

обладает рядом преимуществ по сравнению с существующими моделями:

Во-первых, она позволяет непосредственно получать токи в обмотках статора и ротора, что важно для задач релейной защиты.

Во-вторых, модель позволяет учитывать влияние несимметрии напряжения питающей сети, что особенно актуально для современных электроэнергетических систем.

В-третьих, возможность изменения параметров модели (индуктивностей, сопротивлений) позволяет исследовать различные режимы работы и диагностировать неисправности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная математическая модель АДФР на основе метода контурных токов для междуфазных напряжений является эффективным инструментом для исследования переходных процессов, возникающих при различных режимах работы и при наличии несимметрии напряжения питающей сети.

Результаты моделирования подтверждают адекватность разработанной модели и демонстрируют ее применимость для задач релейной защиты и диагностики АДФР.

Список источников

1. Шестаков А. В., Желнин В. В., Исмиев Р. Н. Экспериментальная проверка математической модели асинхронного двигателя при синусоидальном напряжении // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2015. № 1. С. 78–85.
2. Шестаков А. В. Математическая модель асинхронного двигателя, учитывающая реальные факторы, при ШИМ-питании // Общество. Наука. Инновации (НПК-2018) : сб. ст. XVIII Всероссийской науч.-практ. конф. в 3 томах, 02–28 апреля 2018 г. г. Киров. Киров : Вятский государственный университет, 2018. Т. 2. С. 1129–1136.
3. Smolyaninov A. V., Pochneva I. V., Chernenkaya L. V. Mathematical model of asynchronous motor with frequency-cascade regulation // Proceedings of International Russian Automation Conference “Rus-AutoCon”, September 8–14, 2019, Sochi. Sochi: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2019. p. 8867604. <https://doi.org/10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867604>.
4. Pustovetov M. Y. A mathematical model of the three-phase induction motor in three-phase stator reference frame describing electromagnetic and electromechanical processes. In: *Proceedings of “Dynamics of Systems,*

References

1. Shestakov A. V., Zhelnin V. V., Ismiyev R. N. Experimental Verification of Mathematical Model of the Induction Motor at Sinusoidal Voltage. *Russian Electromechanics*. 2015;(1):78–85. (In Russ.).
2. Shestakov A. V. Matematicheskaya model asinkhronnogo dvigatelya, uchityvayushchaya realnye faktory, pri ShIM-pitanii. In: *Proceedings of 18th All-Russian Research-to-Practice Conference “Obshchestvo. Nauka. Innovatsii (NPK-2018)”*, April 02–28, 2018, Kirov. Kirov: Vyatka State University; 2018. Vol. 2. p. 1129–1136. (In Russ.).
3. Smolyaninov A. V., Pochneva I. V., Chernenkaya L. V. Mathematical Model of Asynchronous Motor with Frequency-Cascade Regulation. In: *Proceedings of International Russian Automation Conference “Rus-AutoCon”*, September 8–14, 2019, Sochi. Sochi: Institute of Electrical and Electronics Engineers; 2019. p. 8867604. <https://doi.org/10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867604>.
4. Pustovetov M. Y. A mathematical model of the three-phase induction motor in three-phase stator reference frame describing electromagnetic and electromechanical processes. In: *Proceedings of “Dynamics of Systems,*

- cal processes // Proceedings of “Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics)”, November 15–17, 2016, Omsk. Omsk: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2017. p. 7819069. <https://doi.org/10.1109/Dynamics.2016.7819069>.
5. Глазырин А. С., Полищук В. И., Тимошкин В. В. и др. Математическая модель асинхронного двигателя в мультифазной системе координат при несимметрии роторных цепей // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332, № 10. С. 213–227.
 6. Кузнецов В. В., Николенко А. В. О моделях функционирования асинхронного двигателя в условиях некачественной электроэнергии // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2015. Т. 1, № 8. С. 8.
 7. Загребасв М. С., Звонецкий М. С., С’янов О. М. Математичне моделювання перехідних процесів в асинхронному двигуні з короткозамкнутою кліткою в польовій постановці // Математичне моделювання. 2024. № 2. С. 66–76.
 8. Яшин А. Н., Гильманов Э. А., Хакимьянов М. И. Моделирование механических характеристик асинхронного двигателя в пакете Matlab Simulink // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2021. Т. 17, № 2. С. 67–75.
 - Mechanisms and Machines (Dynamics)”, November 15–17, 2016, Omsk. Omsk: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.; 2017. p. 7819069. <https://doi.org/10.1109/Dynamics.2016.7819069>.*
 5. Glazyrin A. S., Polishchuk V. I., Timoshkin V. V. et al. Modelling of induction motor in multiphase coordinate system for asymmetry rotor cage. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2021;332(10):213–227. (In Russ.).
 6. Kuznetsov V. V., Nikolenko A. V. Models of operating asynchronous engines at poor-quality electricity. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2015;1(8):8. (In Russ.).
 7. Zagrebaev M. S., Zvonetsky M. S., Syanov O. M. Matematichne modelyuvannya perekhidnikh protsesiv v asinkhronnomu dviguni z korotkozamknutoyu klitkoyu v polyoviy postanovtsi. *Matematichne modelyuvannya*. 2024;(2):66–76. (In Ukrainian).
 8. Yashin A. N., Gilmanov E. A., Khakimyanov M. I. Simulation of mechanical characteristics of an induction motor in Matlab Simulink. *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*. 2021;17(2):67–75. (In Russ.).

Информация об авторах

Е. Ю. Кислицин – кандидат технических наук, доцент;

<https://orcid.org/0000-0002-9747-3917>,
kislitsin_eu@surgu.ru✉

Д. С. Лукашов – студент;
<https://orcid.org/0009-0005-7106-0216>,
lukashov_ds@edu.surgu.ru

И. Ю. Борисов – студент;
<https://orcid.org/0009-0003-1284-6660>,
borisov_iyu@edu.surgu.ru

А. А. Назаров – студент;
<https://orcid.org/0009-0006-7332-7380>,
nazarov2_aa@edu.surgu.ru

About the authors

E. Yu. Kislitsin – Candidate of Sciences (Engineering), Docent;

<https://orcid.org/0000-0002-9747-3917>,
kislitsin_eu@surgu.ru✉

D. S. Lukashov – Student;
<https://orcid.org/0009-0005-7106-0216>,
lukashov_ds@edu.surgu.ru

I. Yu. Borisov – Student;
<https://orcid.org/0009-0003-1284-6660>,
borisov_iyu@edu.surgu.ru

A. A. Nazarov – Student;
<https://orcid.org/0009-0006-7332-7380>,
nazarov2_aa@edu.surgu.ru