

# ВЛИЯНИЕ УРОВНЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НЕСИММЕТРИИ НА КАЧЕСТВЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ НУЖД ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Е. О. Лавренов<sup>1</sup>, З. С. Темлякова<sup>1</sup>, М. Е. Вильбергер<sup>1</sup>, В. В. Гречкин<sup>1</sup>, А. А. Темляков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

**Аннотация:** Статья посвящена оценке влияния уровня несимметрии фазы ротора на качество работы асинхронного двигателя, являющегося элементом электропривода механизмов горнодобывающей промышленности. Результаты работы основаны на фундаментальных теоремах и уравнениях электродинамики, численном расчете дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами с применением метода последовательных приближений. Проведен анализ видов несимметрии, имеющих место при эксплуатации асинхронных двигателей, и причин их появления в тяжелых условиях горнодобывающего предприятия. Выполнено ранжирование указанных типов несимметрии по частоте их возникновения в высоковольтных асинхронных двигателях горнодобывающей промышленности. Отражены проблемы и характерные особенности моделирования несимметричных режимов асинхронного двигателя с учетом насыщения стали магнитопровода. Представлена математическая модель асинхронного двигателя, модифицированная относительно ее классической записи, построенная на базе трехфазной естественной системы координат, позволяющая рассчитывать токи и электромагнитный момент при наличии несимметрии активных сопротивлений фаз обмотки ротора, приведены итоги моделирования этого режима. Выполнен анализ особенностей указанного режима по отношению к симметричному режиму, а также его влияния на поведение машин горной промышленности при эксплуатации.

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель, электрическая несимметрия, обрыв фазы, математическая модель, численное моделирование, насыщение стали, эффект Гергеса, электромагнитный момент, трехфазная система координат.

**Для цитирования:** Лавренов Е. О., Темлякова З. С., Вильбергер М. Е., Гречкин В. В., Темляков А. А. Влияние уровня электрической несимметрии на качественные показатели асинхронного двигателя нужд горнодобывающей промышленности // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 12-2. – С. 174–189. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_122\_0\_174.

## The influence of the electric asymmetry level on the qualitative indicators of an asynchronous motor for the needs of the mining industry

E. O. Lavrenov<sup>1</sup>, Z. S. Temlyakova<sup>1</sup>, M. E. Vilberger<sup>1</sup>, V. V. Grechkin<sup>1</sup>, A. A. Temlyakov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

**Abstract:** The article is devoted to assessing the influence of the level of rotor phase asymmetry on the quality of the operation of an asynchronous motor, which is an element of the electric drive of mechanisms in the mining industry. The main results of the work were obtained on the basis of fundamental theorems and equations of electrodynamics, numerical calculation of differential equations of the first order with variable coefficients using the method of successive approximations. The analysis of the main types of asymmetric modes of asynchronous motors and the reasons for their occurrence in severe operating conditions of a mining enterprise is carried out. Groups of asymmetric modes, most often occurring in high-voltage asynchronous motors in the mining industry, are singled out. The problems and characteristic features of modeling asymmetric modes of an asynchronous motor are reflected, taking into account the saturation of the steel of the magnetic circuit. A mathematical model of an induction motor modified with respect to the classical notation in a three-phase natural coordinate system for calculating currents and electromagnetic torque under conditions of asymmetry of the active resistances of the phases of the rotor winding is presented, the results of numerical simulation of such a mode are shown. The analysis of the distinctive features of the selected mode in comparison with the symmetrical mode of operation and the impact on the behavior of mining machines during operation was carried out.

**Key words:** Induction motor, electrical asymmetry, phase failure, mathematical model, numerical simulation, steel saturation, Gerges effect, electromagnetic torque, three-phase coordinate system.

**For citation:** Lavrenov E. O., Temlyakova Z. S., Vilberger M. E., Grechkin V. V., Temlyakov A. A. The influence of the electric asymmetry level on the qualitative indicators of an asynchronous motor for the needs of the mining industry. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(12-2):174–189. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_122\_0\_174.

---

## 1. Введение

При эксплуатации асинхронных двигателей часто имеет место появление несимметрии активных сопротивлений обмоток ввиду ряда причин, поэтому необходимость решения научных задач в области несимметричных режимов работы обусловлена целью исследования поведения асинхронных двигателей в подобных режимах и накопления требуемого для этого объема статистической информации. Полученные сведения могут быть использованы при проектировании принципиально новых способов организации автоматической защиты от несимметричных режимов работы в области горного дела, а также других областях промышленности с непрерывным циклом производства. Примером могут служить двигатели привода шахтных подъемников, не допускающие остановок в процессе работы, так как это проявляется в зна-

чительных материальных издержках, а также в вероятном появлении опасности для персонала.

Неисправности асинхронных двигателей могут быть следствием ряда причин, приводящих, в конечном счете, к их выходу из строя. Обращаясь к классической теории электромеханики, можно выделить две основные группы повреждений — электрические и механические. Остановливаясь более подробно на повреждениях электрического характера, необходимо отдельно выделить повреждения обмоток двигателя, так как они являются самой распространенной причиной возникновения аварий асинхронных двигателей при эксплуатации, достигая 85–90% всех случаев отказов. Такая статистика обусловлена уязвимостью обмотки, которая является, пожалуй, наиболее слабым местом в конструкции асинхронных двигателей, поскольку ее

изготовление связано с рядом сложных технологических процессов и сопряжено с применением ряда материалов, качество каждого из которых напрямую влияет на показатели надежности катушек как конечного изделия. По этим причинам аварийные ситуации, вызванные повреждениями обмоток асинхронных двигателей при эксплуатации, все еще носят постоянный характер. Так, межвитковое короткое замыкание — один из наиболее распространенных (до 93% всех случаев повреждений обмоток) случаев проявления электрических неисправностей асинхронных двигателей [1,2].

Следствием возникновения таких неисправностей зачастую является дальнейшее прогрессирование аварии и возникновение электрической несимметрии в обмотках статора и/или ротора электрической машины. Подобные нарушения могут быть устранены только посредством проведения дорогостоящего капитального ремонта с заменой обмотки. Кроме этого, при работе двигателя в несимметричном режиме наблюдается ряд негативных воздействий несимметрии на качественные показатели асинхронного двигателя, в частности, на величину электромагнитного момента. Следовательно, необходима разработка средств и методов, позволяющих временно устранить негативное влияние несимметрии до завершения рабочей операции. Поэтому результаты подобных исследований влияния электрической несимметрии на эксплуатационные характеристики асинхронных двигателей могут быть применимы для машин, используемых в электроприводах горной промышленности с непрерывным циклом производства, а также приводах удаленных автономных объектов, имеющих ограниченный доступ [3].

Одной из задач проведенного исследования является оценка влияния уровня несимметрии активных сопротивлений обмотки ротора на качественные показатели работы асинхронного двигателя, используемого для привода механизмов в горнодобывающей промышленности. Учитывая особенности рассматриваемых режимов, особую роль играет выбор в пользу определенной системы координат, так как от этого выбора зависит точность и адекватность достигаемых результатов.

## **2. Математическое моделирование**

При осуществлении математического моделирования определяющее значение в достижении цели получения достоверных результатов, удобстве их интерпретации играет выбор в пользу той или иной координатной системы, характеризующей протекающие в машине процессы. Несмотря на то, что этот выбор не влияет на электромагнитные процессы, происходящие в двигателе, некоторые из вариантов систем координат могут оказаться наиболее целесообразными при решении определенного рода задач, в том числе связанных с решением проблем исследования несимметричных режимов с учетом насыщения стали магнитопроводов.

За базу выбрана общеизвестная модель асинхронной машины в трехфазной естественной системе координат. При составлении математической модели были приняты следующие допущения [12,13]:

- бесконечно большая мощность питающей сети;
- равномерность воздушного зазора;
- сосредоточенность энергии магнитного поля в воздушном зазоре, т.е. бесконечно большая магнитная проницаемость стали;
- потери в стали и механические потери пренебрежимо малы.

Эквивалентная схема трехфазной асинхронной машины в фазовых координатах представлена на рис. 1.

Несмотря на широкое распространение и ряд преимуществ, базовая математическая модель не способна в своей исходной записи эффективно решать задачу расчета электромагнитных процессов в асинхронном двигателе при наличии несимметрии обмоток фаз при одновременном учете насыщения стали магнитопроводов. Это обусловлено тем, что отдельные части магнитопровода в этом случае находятся в различных условиях по насыщению и вычисление результирующей взаимной индуктивности, являющейся одним из составляющих представленных уравнений, в этом случае оказывается невозможным.

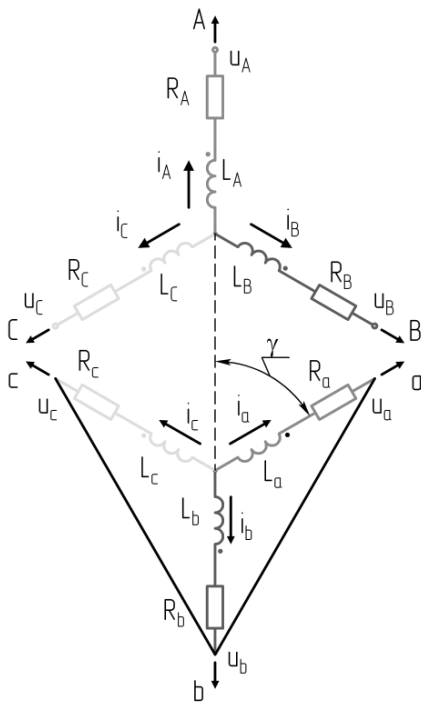


Рис. 1. Эквивалентная схема трехфазной асинхронной машины в фазовых координатах  
Fig. 1. Equivalent circuit of a three-phase asynchronous machine in phase coordinates

Для устранения данной проблемы в предлагаемой модификации модели были выполнены следующие подходы:

- запись уравнений через контуры двух соседних фаз (фаз A и B, фаз B и C). Результатом решения первого уравнения является ток фазы A, второго — ток фазы B, третье уравнений — первый закон Кирхгофа — для нахождения тока фазы C;

- уровень насыщения каждой фазы определяется путем умножения эквивалентной взаимной индуктивности  $L_m$  на коэффициенты, характеризующие уровень насыщения каждой фазы магнитопроводов статора и ротора.

Выполненная модификация математической модели, решающая поставленные задачи, состоит из двух блоков уравнений: блок для статора и блок для ротора.

Система уравнений для блока статора в данном случае имеет вид

$$\begin{cases} u_A - i_A \cdot R_A - \frac{d\Phi_A}{dt} - u_B + i_B \cdot R_B + \frac{d\Phi_B}{dt} = 0 \\ u_B - i_B \cdot R_B - \frac{d\Phi_B}{dt} - u_C + i_C \cdot R_C + \frac{d\Phi_C}{dt} = 0 \\ i_A + i_B + i_C = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Система уравнений для блока ротора в данном случае имеет вид

$$\begin{cases} -i_a \cdot R_a - \frac{d\Phi_a}{dt} + i_b \cdot R_b + \frac{d\Phi_b}{dt} = 0 \\ -i_b \cdot R_b - \frac{d\Phi_b}{dt} + i_c \cdot R_c + \frac{d\Phi_c}{dt} = 0, \\ i_a + i_b + i_c = 0 \end{cases} \quad (2)$$

где  $u_A, u_B, u_C$  — мгновенные значения напряжений на зажимах фаз статора;  $i_A, i_B, i_C, i_a, i_b, i_c$  — мгновенные значения токов обмоток фаз статора и ротора;  $\Psi_A, \Psi_B, \Psi_C, \Psi_a, \Psi_b, \Psi_c$  —

полные потокосцепления фаз статора и ротора;  $R_A, R_B, R_C, R_a, R_b, R_c$  — активные сопротивления фаз статора и ротора.

В системах уравнений (1) и (2) потокосцепления определяются как [14]:

$$\begin{aligned} \mathcal{O}_A &= L_A \cdot i_A + M_{AB} \cdot i_B + M_{AC} \cdot i_C + \\ &+ M_{Aa} \cdot i_a \cdot \cos(\gamma) + M_{Ab} \cdot i_b \cdot \cos\left(\gamma + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) + M_{Ac} \cdot i_c \cdot \cos\left(\gamma - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right); \\ \mathcal{O}_B &= M_{BA} \cdot i_A + L_B \cdot i_B + M_{BC} \cdot i_C + \\ &+ M_{Ba} \cdot i_a \cdot \cos\left(\gamma - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) + M_{Bb} \cdot i_b \cdot \cos(\gamma) + M_{Bc} \cdot i_c \cdot \cos\left(\gamma + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right); \\ \mathcal{O}_C &= M_{CA} \cdot i_A + M_{CB} \cdot i_B + L_C \cdot i_C + \\ &+ M_{Ca} \cdot i_a \cdot \cos\left(\gamma + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) + M_{Cb} \cdot i_b \cdot \cos\left(\gamma - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) + M_{Cc} \cdot i_c \cdot \cos(\gamma); \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \mathcal{O}_a &= M_{aA} \cdot i_A \cdot \cos(\gamma) + M_{aB} \cdot i_B \cdot \cos\left(\gamma - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) + M_{aC} \cdot i_C \cdot \cos\left(\gamma + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) + \\ &+ L_a \cdot i_a + M_{ab} \cdot i_b + M_{ac} \cdot i_c \\ \mathcal{O}_b &= M_{bA} \cdot i_A \cdot \cos\left(\gamma + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) + M_{bB} \cdot i_B \cdot \cos(\gamma) + M_{bC} \cdot i_C \cdot \cos\left(\gamma - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) + \\ &+ M_{ba} \cdot i_a + L_b \cdot i_b + M_{bc} \cdot i_c \\ \mathcal{O}_c &= M_{cA} \cdot i_A \cdot \cos\left(\gamma - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) + M_{cB} \cdot i_B \cdot \cos\left(\gamma + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) + M_{cC} \cdot i_C \cdot \cos(\gamma) + \\ &+ M_{ca} \cdot i_a + M_{cb} \cdot i_b + L_c \cdot i_c \end{aligned}$$

где  $\gamma$  — угол между осями одноименных обмоток фаз статора и ротора;  $L_A, L_B, L_C, L_a, L_b, L_c$  — индуктивности обмоток фаз статора и ротора;  $M_{AB}, M_{AC}, M_{BA}, M_{BC}, M_{CA}, M_{CB}$  — взаимные индуктивности между обмотками фаз статора;  $M_{ab}, M_{ac}, M_{ba}, M_{bc}, M_{ca}, M_{cb}$  — взаимные индуктивности между обмотками фаз ротора;  $M_{Aa}, M_{Ba}, M_{Ca}, \dots$  — взаимные индуктивности между обмотками соответствующих фаз статора и ротора.

Электромагнитный момент асинхронного двигателя может быть определен как частная производная от электромагнитной энергии по геометрическому углу. На основании законов преобразования энергии электромагнитная энергия может быть найдена по выражению

$$W_{\mathcal{O}} = \frac{1}{2} \cdot [\psi_A \cdot i_A + \psi_B \cdot i_B + \psi_C \cdot i_C + \psi_a \cdot i_a + \psi_b \cdot i_b + \psi_c \cdot i_c]. \quad (4)$$

Следовательно, электромагнитный момент

$$M = \frac{\partial W_{\mathcal{O}}}{\partial \gamma} \cdot Z_p, \quad (5)$$

где  $Z_p$  — число пар полюсов двигателя.

С учетом момента сопротивления уравнение движения запишется в виде

$$M - M_C = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (6)$$

где  $M_C$  – момент сопротивления;  $J$  – суммарный момент инерции двигателя и приводимого механизма;  $\omega$  – угловая частота вращения ротора, рад/с.

После подстановки выражения (3) для потокосцеплений в исходные системы (1) и (2) и проведения необходимых математических преобразований, представив полученные результаты в матричной форме записи, искомая система уравнений для выполнения расчетов параметров электродвигателя при наличии электрической несимметрии обмоток запишется в виде

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_A \\ \dot{i}_B \\ \dot{i}_a \\ \dot{i}_b \end{bmatrix} = -A^{-1} \times B, \quad (7)$$

где

$$A = \begin{bmatrix} -L_{1\sigma} - 3 \cdot \frac{L_m}{2} & L_{1\sigma} + 3 \cdot \frac{L_m}{2} & -3 \cdot \cos(\varphi + \frac{\pi}{3}) \cdot L_m & -3 \cdot \cos(\varphi + \frac{2\pi}{3}) \cdot L_m \\ -L_{1\sigma} - 3 \cdot \frac{L_m}{2} & -2 \cdot L_{1\sigma} - 3 \cdot L_m & 3 \cdot \cos(\varphi + \frac{2\pi}{3}) \cdot L_m & -3 \cdot \cos(\varphi) \cdot L_m \\ 3 \cdot \cos(\varphi + \frac{2\pi}{3}) \cdot L_m & -3 \cdot \cos(\varphi + \frac{4\pi}{3}) \cdot L_m & -L_{2\sigma} - 3 \cdot \frac{L_m}{2} & L_{2\sigma} + 3 \cdot \frac{L_m}{2} \\ 3 \cdot \cos(\varphi + \frac{4\pi}{3}) \cdot L_m & -3 \cdot \cos(-\varphi) \cdot L_m & -L_{2\sigma} - 3 \cdot \frac{L_m}{2} & -2 \cdot L_{2\sigma} - 3 \cdot L_m \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} u_A - u_B - i_A \cdot R_A + i_B \cdot R_B + i_a \cdot \omega_r \cdot L_m \cdot 3 \cdot \sin(\varphi + \frac{\pi}{3}) + i_b \cdot \omega_r \cdot L_m \cdot 3 \cdot \sin(\varphi + \frac{2\pi}{3}) \\ u_B - u_C - i_A \cdot R_C - i_B \cdot (R_B + R_C) + i_a \cdot \omega_r \cdot L_m \cdot (-3 \cdot \sin(\varphi + \frac{2\pi}{3})) + i_b \cdot \omega_r \cdot L_m \cdot 3 \cdot \sin(\varphi) \\ -i_a \cdot R_a + i_b \cdot R_b + i_A \cdot \omega_r \cdot L_m \cdot (-3 \cdot \sin(\varphi + \frac{2\pi}{3})) + i_B \cdot \omega_r \cdot L_m \cdot 3 \cdot \sin(\varphi + \frac{4\pi}{3}) \\ -i_a \cdot R_c - i_b \cdot (R_b + R_c) + i_A \cdot \omega_r \cdot L_m \cdot (-3 \cdot \sin(\varphi + \frac{4\pi}{3})) + i_B \cdot \omega_r \cdot L_m \cdot 3 \cdot \sin(\varphi) \end{bmatrix}$$

Система уравнений (7) и уравнения (4)–(6) представляют собой полную запись модифицированной математической модели двигателя, обладающей возможностью рассчитывать несимметричные режимы работы асинхронного двигателя.

Как говорилось ранее, насыщение стали магнитопровода при появлении электрической несимметрии в обмотках двигателя выполняется умножением эквивалентной взаимной индуктивности  $L_m$  на коэффициенты, характеризующие степень воздействия насыщения на каждую фазу.

В результате система уравнений (7) должна быть записана в виде

$$\begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_a \\ i_b \end{bmatrix} = -A^{-1} \times K \times B, \quad (8)$$

где  $K = \begin{bmatrix} K_A \\ K_B \\ K_a \\ K_b \end{bmatrix}$  — матрица коэффициен-

тов изменения эквивалентной взаимной индуктивности вследствие наличия насыщения стали магнитопровода.

Определение указанных коэффициентов реализуется на основании описанных ниже положений [17].

В основе первого положения лежит понятие индуктивности и закон полного тока. Известно, что индуктивность — это отношение потокосцепления к току. Взаимная индуктивность потокосцепления, созданного током фазы статора и сцепленного с катушкой фазы ротора, можно определить по выражению

$$L_{12} = \frac{\Psi_2}{I_1} = W_2 \cdot S \cdot \frac{B}{l_{cp}} = \frac{W_2 \cdot W_1 \cdot S}{l_{cp}} \cdot \frac{B}{H}, \quad (9)$$

где  $W_1, W_2$  — число витков первой и второй обмотки соответственно;  $I_1$  — ток первой обмотки;  $\Psi_2$  — потокосцепление второй обмотки, созданное током первой;  $S$  — площадь сечения витка фазы ротора;  $l_{cp}$  — средняя длина сердечника магнитопровода;  $B$  — магнитная индукция в зубце ротора;  $H$  — напряженность для используемой марки стали.

Анализируя формулу (9), можно заметить, что ее составляющие отражают конструктивно-геометрические параметры электрической машины. Также очевидно, что характеристики магнитного поля — магнитная напряженность и магнитная индукция — связаны с взаимной индуктивностью:

$$L_{12} = f\left(\frac{B}{H}\right). \quad (10)$$

В основе второго положения лежит принцип учета ответвления магнитного потока в паз при насыщении. При этом не весь магнитный поток замыкается через зубец, в случае роста насыщения зубцовой зоны доля потока, проходящего через паз, значительно возрастает (рис. 2).

Эту долю можно оценить и без выполнения расчета поля, следующим образом. На основании первого закона Кирхгофа для узла магнитной схемы замещения зубцового деления ротора при его насыщении поток  $\Phi_{t_z}$  на зубцовом делении  $t_z$  складывается из магнитного потока в зубце  $\Phi_Z$  и магнитного потока в пазу  $\Phi_{II}$ :

$$\Phi_{t_z} = \Phi_Z + \Phi_{II}. \quad (11)$$

Разделив выражение (11) на площадь сечения зубца  $S_{Zx} = b_{Zx} \cdot l_{\delta}$  и умножив и разделив второе слагаемое правой части на площадь паза  $S_{IIx} = b_{IIx} \cdot l_{\delta}$ , получим:

$$\frac{\Phi_{t_z}}{S_{Zx}} = \frac{\Phi_Z}{S_{Zx}} + \frac{\Phi_{II}}{S_{Zx}} \cdot \frac{S_{IIx}}{S_{IIx}}, \quad (12)$$

или

$$B'_{Zx} = B_{Zx} + B_{IIx} \cdot \frac{S_{IIx}}{S_{Zx}}, \quad (13)$$

где  $B'_{Zx}$  — расчетная индукция, определяемая полным потоком в сечении зубца  $S_{Zx}$  при условии отсутствия потока в пазу;  $B_{Zx}$  — индукция в сечении зубца  $S_{Zx}$ , определенная с учетом вытеснения части потока из зубца в паз;  $B_{IIx}$  — индукция в сечении паза  $S_{IIx}$ , создаваемая частью потока, вытесненной в паз.

Из выражения (13) следует, что в первой составляющей правой части выражения содержится индукция зуб-

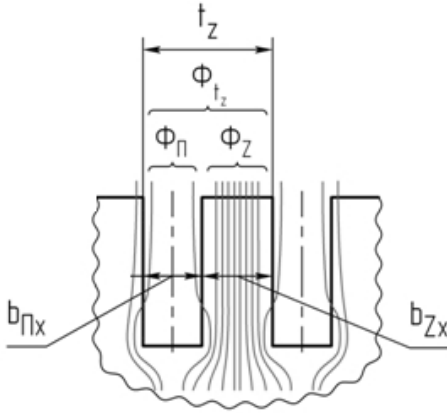


Рис. 2. Распределение магнитного потока в насыщенной зубцовой зоне  
Fig. 2. Magnetic flux distribution in a saturated tooth zone

цовой зоны, подверженной насыщению, а во второй части — составляющая, характеризующая индукцию в немагнитном пазу, которая линейно зависит от напряженности магнитного поля.

Соответственно, учитывая вышесказанное и выражение (10), можно выделить две составляющие взаимной индуктивности:

$$L_m = L_{лин} + L_{нелин}, \quad (14)$$

где  $L_{лин}$  — определяемая геометрическими размерами паза линейная составляющая индуктивности;  $L_{нелин}$  — нелинейная составляющая индуктивности, пропорциональная отношению магнитной индукции в зубцовой зоне и напряженности магнитного поля.

Чтобы перейти к безразмерным величинам (здесь и далее — на примере фазы А статора), необходимо выполнить нормирование выражения (14) величиной  $L'_m$  — взаимной индуктивностью в случае отсутствия насыщения:

$$\frac{L_m}{L'_m} = \frac{L_{лин}}{L'_m} + \frac{L_{нелин}}{L'_m} = k_{лин} \cdot K_{лин\_A} + k_{нелин} \cdot K_{нелин\_A} = K_A \quad (15)$$

В математической модели для удобства выполнения учета насыщения стали магнитопровода использованы безразмерные линейные  $K_{лин}$  и нелинейные коэффициенты взаимной индуктивности фаз А и В статора  $K_{нелин\_A}$ ,  $K_{нелин\_B}$  и ротора  $K_{нелин\_a}$ ,  $K_{нелин\_в}$ . Так, нелинейные коэффициенты характеризуют свойства стали магнитопроводов и могут быть представлены в виде отношения:

$$K_{нелин\_A} = \frac{L_{нелин\_A}}{L'_{нелин\_A}} \propto \frac{B_1}{B'_1} \propto \frac{B_1 \cdot H_1}{B'_1 \cdot H_1}, \quad (16)$$

где  $B_1$  — магнитная индукция магнитопровода, подвергаемого насыщению, при напряженности магнитного поля  $H_1$  (рис. 3);  $B'_1$  — магнитная индукция магнитопровода, не подвергаемого насыщению (с линейной характеристикой), при напряженности магнитного поля  $H_1$  (рис. 3).

Индуктивность насыщаемого магнитопровода при малых значениях магнитной индукции очень близка к индуктивности магнитопровода без насыщения, поэтому

$$L'_{нелин\_A} = \frac{W_2 \cdot W_1 \cdot S}{l_{cp}} \cdot \frac{B_0}{H_0} = \frac{W_2 \cdot W_1 \cdot S}{l_{cp}} \cdot \frac{B'_1}{H_1} \quad (17)$$

и можно переписать выражение для динамического коэффициента взаимной индуктивности (16) с учетом глубины насыщения стали магнитопровода:

$$K_{нелин\_A} = \frac{L_{нелин\_A}}{L'_{нелин\_A}} \propto \frac{B_1}{B'_1} \propto \frac{B_1}{B_0} \propto \frac{B_1 \cdot H_0}{B_0 \cdot H_1} \quad (18)$$



Другой коэффициент может быть определен как отношение индуктивности зазора к взаимной индуктивности магнитопровода без насыщения:

$$K_{\text{лин}_A} = \frac{L_{\text{лин}}}{L'_m}. \quad (19)$$

Следовательно, на примере фазы А статора полный коэффициент, характеризующий изменение взаимной индуктивности, можно выразить выражением

$$\begin{aligned} K_A &= k_{\text{лин}} \cdot K_{\text{лин}_A} + k_{\text{нелин}} \cdot K_{\text{нелин}_A} = \\ &= k_{\text{лин}} \cdot K_{\text{лин}_A} + k_{\text{нелин}} \cdot \frac{B_1 \cdot H_0}{B_0 \cdot H_1}. \end{aligned} \quad (20)$$

### 3. Результаты тестовых расчетов

Объектом исследования был выбран асинхронный двигатель с фазным ротором типа ФАЗМ-800/6000-4 У2,5, который является элементом электромеханической системы в горнодобывающей промышленности. Питающее напряжение двигателя  $U_1 = 6 \text{ кВ}$ , номинальная мощность  $P_{2\text{ном}} = 800 \text{ кВт}$ , частота вращения вала ротора  $n_1 = 750 \text{ об / мин}$ . При переходе к системе базисных величин параметры симметричного режима работы двигателя, сообщаемые в программе, следующие:

– напряжения фаз статора

$$U_{SA} = U_{SB} = U_{SC} = 1 \text{ о.е.};$$

– активные сопротивления фаз статора  $R_{SA} = R_{SB} = R_{SC} = 0.015 \text{ о.е.};$

– активные сопротивления фаз ротора  $R_{ra} = R_{rb} = R_{rc} = 0.018 \text{ о.е.};$

– индуктивность рассеяния обмотки статора  $L_{1\sigma} = 0.091 \text{ о.е.};$

– индуктивность рассеяния обмотки ротора  $L_{2\sigma} = 0.127 \text{ о.е.};$

– эквивалентная взаимная индуктивность  $L_m = 3.0 \text{ о.е.};$

– число пар полюсов  $p = 4;$

– приведенный момент инерции  $J = 1537.$

Величина момента нагрузки при этом принята равной 25% от номинала,

поскольку пуск двигателя моделируется без использования пусковых реостатов.

Моделирование выполнялось с использованием среды MatLab, в основе модели лежат уравнения, полученные в предыдущем разделе статьи. Выполнен расчет режима пуска асинхронного двигателя с учетом наличия электрической несимметрии в обмотке ротора, проявляющегося в неравенстве активных сопротивлений фаз. Результаты для частного случая такой несимметрии – обрыва одной фазы ротора – представлены на рис. 4,5.

Результаты расчетов для нескольких вариантов уровня несимметрии фазы ротора сведены в семейство характеристик и представлены на рис. 5, где отчетливо просматривается зависимость величины провала электромагнитного момента от величины неравенства активных сопротивлений фаз ротора.

В известной литературе в качестве рекомендации по снижению провала момента при появлении несимметрии обмотки ротора упоминается вариант с увеличением сопротивления в двух

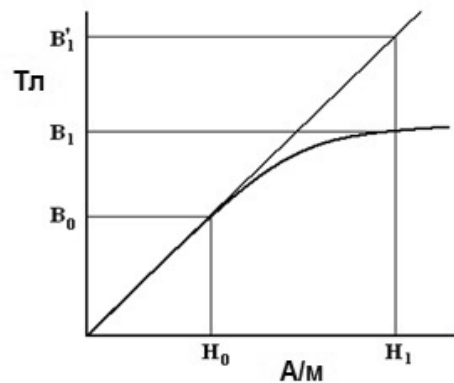


Рис. 3. Определение магнитной индукции стали магнитопровода

Fig. 3. Definition of the magnetic induction of the steel of the magnetic circuit

неповрежденных фазах, к примеру, с помощью реостата. Эффективность данного метода проверена с использованием разработанных инструментальных средств, результаты приведены на рис. 6.

#### 4. Обсуждение результатов

Анализируя принципиальные отличия, проявляющиеся в поведении двигателя при наличии электрической несимметрии обмотки ротора (обрыва фазы), можно отметить следующие основные особенности:

- уменьшение коэффициента полезного действия и рост температуры обмоток. Основным негативным последствием этого неизбежно становится снижение ресурса двигателя,

ведь известно, что превышение показателей температуры изоляции обмотки на  $8^{\circ}\text{C}$  над максимально допустимой величиной для используемого класса нагревостойкости приводит к снижению срока службы асинхронного двигателя примерно в 2 раза [18,19];

- модуляция токов обмотки статора паразитными токами с частотой  $2 \cdot f_1 \cdot s$ , появляющимися там из-за действия поля обратной последовательности ротора. Именно эти паразитные токи и являются причиной появления провала электромагнитного момента, проявляющегося в окрестности скольжения 0.5 о.е., в результате которого двигатель при определенной величине нагрузки может прекратить набор скорости на уровне половины от синхронной;

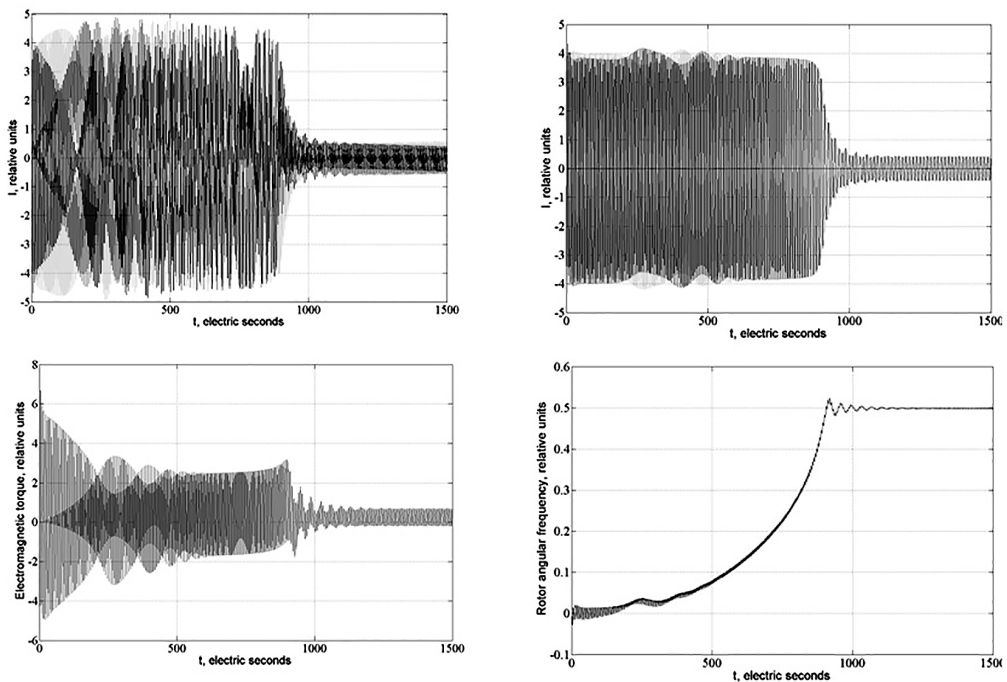


Рис. 4. Токи статора (вверху слева), токи ротора (вверху справа), электромагнитный момент (внизу слева) и угловая частота вращения ротора (внизу справа) в режиме обрыва фазы ротора

Fig. 4. Stator currents (top left), rotor currents (top right), electromagnetic torque (bottom left) and angular frequency of rotation of the rotor (bottom right) in the rotor phase failure mode

– повышенная вибрация электродвигателя, приводящая к сокращению срока службы отдельных деталей и узлов двигателя. Причина — пульсации электромагнитного момента, заметные на рис. 4. В тяжелых условиях предприятий горнодобывающей промышленности особенно подвержены перегрузкам подшипниковые узлы двигателей, что зачастую более опасно, чем повышение температуры обмоток;

– отмечен рост величины провала момента с ростом неравенства в сопротивлениях фаз обмотки ротора. При определенной величине нагрузки на валу момент двигателя может оказаться недостаточным для продолжения набора скорости. Также при этом растет и величина скольжения двигателя, что проявляется в росте уровня электрических потерь и температуры обмоток;

– описанный в источниках способ увеличения активного сопротивления

до значений  $(5..8) \times R_{ном}$  для снижения уровня провала электромагнитного момента действительно является работоспособным методом. Из рис. 5 видно, что при этом провал момента перемещается из области отрицательных значений, благодаря чему становится возможным хотя бы достичь частоты вращения вала, близкой к номинальной, однако такая возможность зависит от уровня и характера нагрузки на валу. Следует отметить, что увеличение активного сопротивления свыше указанных значений не является эффективным.

### 5. Заключение

В результате проведенных работ получена модифицированная математическая модель, обладающая возможностью расчета режимов работы асинхронного двигателя, связанных с несимметрией, которая, к тому же, обладает функционалом учета нели-

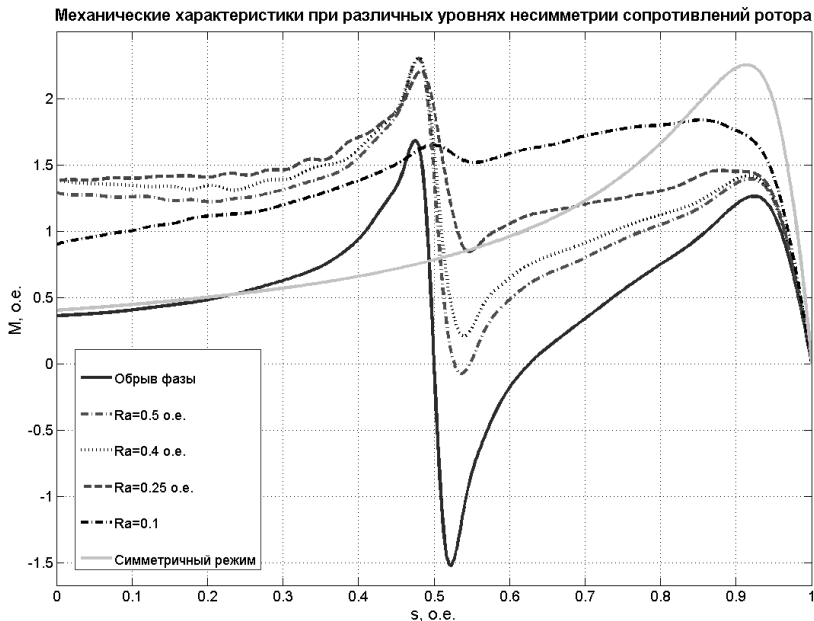


Рис. 5. Механические характеристики асинхронного двигателя при различных уровнях несимметрии активных сопротивлений фазы ротора

Fig. 5. Mechanical characteristics of the induction motor at different levels of active resistances asymmetry of one of the rotor phase

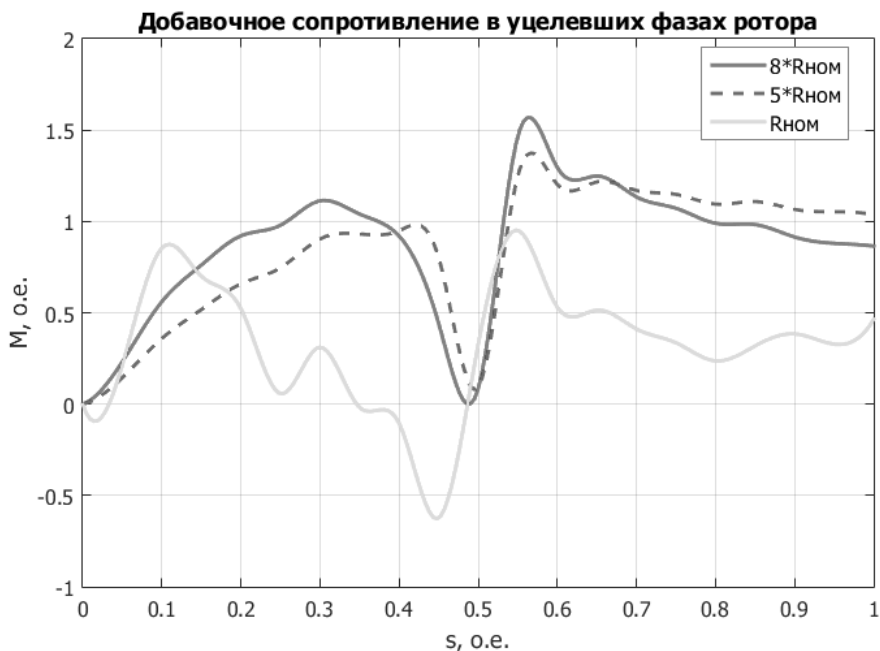


Рис. 6. Влияние величины активного сопротивления в уцелевших фазах на провал момента при обрыве фазы ротора

Fig. 6. The value of active resistance in the surviving phases influence on the torque deep value in the event of a phase failure of the rotor

нейных свойств стали магнитопровода. Предложенная компьютерная программа, реализующая на практике описанный метод расчета несимметричных режимов асинхронных двигателей, успешно внедрена в рабочий процесс промышленных предприятий, осуществляющих разработку крупных электрических машин для нужд горнодобывающей промышленности, в частности для решения задач определения величины электромагнитного момента, а также токов с учетом пульсаций при несимметричных режимах. Указанные инструментальные средства могут успешно применяться для диагностики электроприводов горнодобывающего оборудования и получения своевременных сигналов об их техническом состоянии.

Для электродвигателя ФАЗМ-800/6000-4 У2,5, выступающего в качестве элемента электропривода механизмов в области горного дела, выполнена оценка влияния эффекта Гергеса, являющегося следствием обрыва фазы ротора и появления в обмотке статора токов обратной последовательности, на величину провала кривой электромагнитного момента. На практике отражено влияние уровня неравенства сопротивлений фаз ротора на величину провала электромагнитного момента. Отмечено, что в тяжелых условиях эксплуатации предприятий горнодобывающего комплекса указанные величины следует определять индивидуально, поскольку очевидна их зависимость от параметров нагрузки, ее типа и уровня, а также ряда других факторов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соркин Д. М. Асинхронные электродвигатели 0.4 кВ. Аварийные режимы работы // Новости электротехники. — 2005. — № 2 (32).
2. Tavner P., Ran L., Penman J., Sedding H. Condition monitoring of rotating electrical machines. London, the Institution of Engineering and Technology, 2008, 306 p.
3. Lavrenov E. O., Temlyakova Z. S., Vilberger M. E., Toporkov D. M., Temlyakov A. A. Electrical asymmetry level influence on quality attributes of an induction motor // Journal of Physics: Conference Series. 2020 International Conference on Information Technology in Business and Industry, ITBI 2020. Bristol, England, 2020, 012118. DOI: 10.1088/1742-6596/1661/1/012118.
4. Yang X., Gu J., Zheng T. Q., Zhao Z. Faults and reliability analysis of negative resistance converter traction power system // Microelectronics Reliability. 2020, vol. 114, DOI: 10.1016/j.microrel.2020.113911.
5. Haiyang Li, Xiuquan Sun, Fengshou Gu, Andrew D. Ball. Influence of manufactory asymmetrical squirrel rotor on motor current responses // 26th International Conference on Automation and Computing (ICAC), 2021. DOI: 10.23919/ICAC50006.2021.9594195.
6. Raziee S. M., Misir O., Ponick B. Winding Function Approach for Winding Analysis // IEEE Transactions on Magnetics. 2017, vol. 53, no. 10, pp. 1–9. DOI: 10.1109/TMAG.2017.2712570.
7. Lane M. The use of efficiency indicators for the detection of combined motor asymmetry faults and their effectiveness when used on inverter driven motor systems. Doctoral thesis, University of Huddersfield. 2021, 302 p.
8. Gritli Y., Rossi C., Rizzoli G., Zarri L., Tani A., Casadei D. Detection and localization of incipient high resistance connection for asymmetrical twelve-phase induction motor drives // IEEE 13th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED). 22–25 Aug. 2021. DOI: 10.1109/SDEMPED51010.2021.9605521.
9. Абрамов Б. И., Иванов А. Г., Шленков В. А., Кузьмин И. К., Шевырев Ю. В. Электропривод современных шахтных подъемных машин // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 5–2. — С. 145–162. DOI: 10.25018/0236\_149\_3\_2022\_52\_0\_145.
10. Алексанян И. Э., Кожмякин А. И. Анализ влияния несимметричного режима электрической сети на работу асинхронного электродвигателя. // Энергетика, информатика, инновации. Сборник трудов VII-й Международной научно-технической конференции. Смоленск, 2017. — С. 3–6.
11. Пронина А. К., Путилин К. П. К вопросу построения защиты асинхронного двигателя от внутренней несимметрии и внутренних коротких замыканий // Journal of Advanced Research in Technical Science. — 2019. — № 17–1. — С. 96–101. DOI: 10.26160/2474-5901-2019-17-96-101.
12. Виноградов А. Б. Векторное управление электроприводами переменного тока. –Иваново: ИГЭУ, 2008. — 298 с.
13. Никиян Н. Г. Многофазная реальная асинхронная машина: математическое моделирование, методы и средства диагностики. — Оренбург: ГОУ ВПО ОГУ, 2003. — 334 с.
14. Лавренев Е. О., Тюков В. А. Численное моделирование несимметрии статора и ротора асинхронного двигателя // Электротехника. — 2017. — № 1. — С. 7–12.
15. Суворов И. Ф., Романова В. В., Хромов С. В. Исследование влияния несимметрии фазных напряжений на режимы работы асинхронных двигателей в среде имитационного моделирования MATLAB/SIMULINK // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. — 2016. — Т. 16. — № 3. — С. 72–83. DOI: 10.14529/power160309.

16. Никьян Н. Г., Митрофанов С. В. Методы расчета токов и потерь асинхронной машины с несимметричной клеткой ротора. — Оренбург: ОГУ, 1999. — 49 с.
17. Лавренов Е. О. Способы учета насыщения магнитопровода в имитационном моделировании асинхронного двигателя с использованием численных методов // Сборник научных трудов НГТУ. — 2014. — № 2. — С. 58–63.
18. Кривонос В. Е., Карполюк И. Т., Василенко С. В. Срок службы изоляции при отклонениях напряжений и учете отклонений активных сопротивлений обмоток статора асинхронного двигателя // Знание. — 2019. — № 10–1 (74). — С. 57–65.
19. Бабочкин Г. И., Шпрехер Д. М., Колесников Е. Б. Метод повышения безопасной эксплуатации горного электрооборудования путем прогнозирования сопротивления изоляции // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 2. — С. 34–45. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0-34-45.
20. Kuznetsov S. M., Orlova I. V., Lisichko O. I. Theory and a posteriori practical methods for calculating the reliability of electrical equipment // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, Novosibirsk, 12–14 Dec. 2018. 2019, vol. 560. DOI:10.1088/1757-899X/560/1/012135. **МИАБ**

## REFERENCES

1. Sorkind M. Asynchronous electric motors 0.4kV. Emergency operating modes. *Electrical engineering news*. 2005, no. 2 (32). [In Russ].
2. Tavner P., Ran L., Penman J., Sedding H. Condition monitoring of rotating electrical machines. London, the Institution of Engineering and Technology. 2008, 306 p.
3. Lavrenov E. O., Temlyakova Z. S., Vilberger M. E., Toporkov D. M., Temlyakov A. A. Electrical asymmetry level influence on quality attributes of an induction motor. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020 *International Conference on Information Technology in Business and Industry, ITBI 2020*. Bristol, England. 2020.
4. Yang X., Gu J., Zheng T. Q., Zhao Z. Faults and reliability analysis of negative resistance converter traction power system. *Microelectronics Reliability*, 2020, vol. 114. DOI: 10.1016/j.microrel.2020.113911.
5. Haiyang Li, Xiuquan Sun, Fengshou Gu, Andrew D. Ball. Influence of manufactory asymmetrical squirrel rotor on motor current responses. *26th International Conference on Automation and Computing (ICAC)*. 2021. DOI: 10.23919/ICAC50006.2021.9594195.
6. Raziee S. M., Misir O., Ponick B. Winding Function Approach for Winding Analysis. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2017, vol. 53, no. 10, pp. 1–9. DOI: 10.1109/TMAG.2017.2712570.
7. Lane M. The use of efficiency indicators for the detection of combined motor asymmetry faults and their effectiveness when used on inverter driven motor systems. Doctoral thesis, University of Huddersfield. 2021, 302 p.
8. Gritli Y., Rossi C., Rizzoli G., Zarri L., Tani A., Casadei D. Detection and localization of incipient high resistance connection for asymmetrical twelve-phase induction motor drives. *IEEE 13th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED)*. 22–25 Aug. 2021. DOI: 10.1109/SDEMPED51010.2021.9605521.
9. Abramov B. I., Ivanov A. G., Shilenkov V. A., Kuz'min I. K., Shevryev Ju. V. Electric drive of modern mine lifting machines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 5–2, pp. 145–162. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_52\_0\_145.
10. Aleksanjan I. Je., Kozhemjakin A. I. Analysis of the influence of the asymmetric mode of the electrical network on the operation of an asynchronous electric motor. *Energy, informatics, innovations. Proceedings of the VII-th International Scientific and Technical Conference*. Smolensk, 2017. pp. 3–6. [In Russ].

11. Pronina A. K., Putilin K. P. On the issue of building protection of an asynchronous motor from internal asymmetry and internal short circuits. *Journal of Advanced Research in Technical Science*. 2019, no. 17–1, pp. 96–101. [In Russ]. DOI: 10.26160/2474-5901-2019-17-96-101.
12. Vinogradov A. B. Vector equation of an AC drive. Ivanovo, Ivanovo State Power University. 2008, 298 p. [In Russ].
13. Nikijan N. G. Polyphase real asynchronous Machine: Mathematical modeling, diagnostic methods and tools. Orenburg, GOU VPO OGU. 2003, 334 p. [In Russ].
14. Lavrenov E. O., Tjukov V. A. Numerical modeling of asymmetry of the stator and rotor of an asynchronous motor. *Elektrotehnika*. 2017, no. 1, pp. 7–12. [In Russ].
15. Suvorov I. F., Romanova V. V., Hromov S. V. Investigation of the effect of phase voltage asymmetry on the operation modes of asynchronous motors in the MATLAB/SIMULINK simulation environment. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Energy*. 2016, vol. 16, no. 3, pp. 72–83. [In Russ]. DOI: 10.14529/power160309.
16. Nikijan N. G., Mitrofanov S. V. Methods for calculating the currents and losses of an asynchronous machine with an asymmetric rotor cage. Orenburg, OGU. 1999, 49 p. [In Russ].
17. Lavrenov E. O. Methods for taking into account the saturation of the magnetic circuit in simulation modeling of an asynchronous motor using numerical methods. *Collection of scientific papers of the NSTU*. 2014, no. 2, pp. 58–63. [In Russ].
18. Krivonosov V. E., Karpoljuk I. T., Vasilenko S. V. Insulation service life with voltage deviations and taking into account deviations of active resistances of the stator windings of an asynchronous motor. *Knowledge*. 2019, no. 10–1 (74), pp. 57–65. [In Russ].
19. Babokin G. I., Shpreher D. M., Kolesnikov E. B. Method for improving the safe operation of mining electrical equipment by predicting insulation resistance. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 2, pp. 34–45. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0-34-45.
20. Kuznetsov S. M., Orlova I. V., Lisichko O. I. Theory and a posteriori practical methods for calculating the reliability of electrical equipment. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems 2018*, Novosibirsk, 12–14 Dec. 2018. 2019, vol. 560. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012135.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Лавренев Евгений Олегович<sup>1</sup> — канд. техн. наук,

инженер кафедры Электромеханика,

e-mail: e.lavrenov@inbox.ru,

ORCID ID: 0000-0002-1669-5148;

Темлякова Зоя Савельевна<sup>1</sup> — докт. техн. наук, профессор,

e-mail: Temlyakova@corp.nstu.ru,

ORCID ID: 0000-0002-3692-5035;

Вильбергер Михаил Евгеньевич<sup>1</sup> — канд. техн. наук, доцент,

декан факультета мехатроники и автоматизации,

e-mail: Vilberger@corp.nstu.ru,

ORCID ID: 0000-0001-8762-9917;

Гречкин Владимир Викторович<sup>1</sup> — канд. техн. наук, доцент,

e-mail: Grechkin@corp.nstu.ru,

ORCID ID: 0000-0002-2272-2050;

Темляков Антон Александрович<sup>1</sup> — студент факультета мехатроники и автоматизации,

e-mail: maksidor@inbox.ru,

ORCID ID: 0000-0002-2026-3129;

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, проспект К. Маркса, 20, Россия.

**Для контактов:** *Лавренов Евгений Олегович*, e-mail: e.lavrenov@inbox.ru.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Lavrenov E. O.*<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.), engineer of electromechanic branch,  
e-mail: e.lavrenov@inbox.ru,

ORCID ID: 0000-0002-1669-5148;

*Temlyakova Z. S.*<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.), professor,

e-mail: Temlyakova@corp.nstu.ru,

ORCID ID: 0000-0002-3692-5035;

*Vilberger M. E.*<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.), assistant professor,  
dean of mechatronic and automation faculty,

e-mail: Vilberger@corp.nstu.ru,

ORCID ID: 0000-0001-8762-9917;

*Grechkin V. V.*<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.), assistant professor,

e-mail: Grechkin@corp.nstu.ru,

ORCID ID: 0000-0002-2272-2050;

*Temlyakov A. A.*<sup>1</sup>, student of mechatronic and automation faculty,

e-mail: maksidor@inbox.ru,

ORCID ID: 0000-0002-2026-3129;

<sup>1</sup> Novosibirsk state technical university, Novosibirsk, K.Marks av.,20, Russia.

**Corresponding author:** *Lavrenov E. O.*, e-mail: e.lavrenov@inbox.ru.

Получена редакцией 24.01.2022; получена после рецензии 27.09.2022; принята к печати 10.11.2022.

Received by the editors 24.01.2022; received after the review 27.09.2022; accepted for printing 10.11.2022.

