

ОЦЕНКА ДОБАВОЧНЫХ ПОТЕРЬ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

З. С. Темлякова¹, М. Е. Вильбергер¹, В. В. Гречкин¹, А. А. Темляков¹, Б. В. Малозёмов¹

¹ Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия

Аннотация: Асинхронные двигатели серии АДКВ широко используются в электроприводах скребковых конвейеров, расположенных в угольных шахтах горнодобывающей промышленности, и являются наиболее распространенными преобразователями электрической энергии в механическую. Они потребляют около 40% всей электроэнергии. Качество, надежность и уровень технического развития асинхронных двигателей оказывают существенное влияние на уровень реализации производственных процессов в горнодобывающей промышленности. Таким образом, усовершенствование и проработка аспектов, касающихся энергетических показателей и энергоэффективности электрических машин, является актуальной задачей. Статья посвящена оценке уровня добавочных потерь в стали магнитопровода асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, являющегося элементом электромеханической системы электрооборудования предприятия горнодобывающей промышленности. Рассматриваются поверхностные и пульсационные потери, обусловленные зубчатой структурой поверхностей, ограничивающих воздушный зазор электрической машины. Результаты работы основаны на законах электромеханического преобразования энергии и на уравнении энергетического баланса активной мощности. Объектом исследования являются асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором напряжением до 1000 В для нужд горнодобывающей отрасли. Изучено влияние добавочных потерь в стали на энергоэффективность двигателей. Проведен анализ поверхностных и пульсационных потерь в зависимости от числа зубцов статора и ротора. Показан алгоритм выбора количества зубцов для достижения наибольшей энергоэффективности. Полученные результаты моделирования обеспечивают максимальный КПД эксплуатации асинхронных двигателей в электроприводах скребковых конвейеров горнодобывающей промышленности, тем самым повышая общую энергоэффективность приводов шахтного оборудования.

Ключевые слова: горнодобывающая промышленность, шахтное электрооборудование, асинхронные двигатели, энергоэффективность, добавочные потери.

Для цитирования: Темлякова З. С., Вильбергер М. Е., Гречкин В. В., Темляков А. А., Малозёмов Б. В. Оценка добавочных потерь асинхронного двигателя для электрооборудования горнодобывающей промышленности // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 10-1. – С. 312–327. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_101_0_312.

Evaluation of additional losses of an asynchronous motor for electrical equipment of the mining industry

Z. S. Temlyakova¹, M. E. Vilberger¹, V. V. Grechkin¹, A. A. Temlyakov¹, B. V. Malozyomov¹

¹ Novosibirsk state technical university, Novosibirsk, K. Marks av., 20, Russia

Abstract: Asynchronous motors of the ADKV series are widely used in electric drives of scraper conveyors located in coal mines of the mining industry, and are the most common converters of electrical energy into mechanical energy. They consume about 40% of all electricity. The quality, reliability and level of technical development of asynchronous motors have a significant impact on the level of implementation of production processes in the mining industry. Thus, the improvement and elaboration of aspects related to energy performance and energy efficiency of electric machines is an urgent task. The article is devoted to the assessment of the level of additional losses in the steel of the magnetic circuit of an asynchronous motor with a short-circuited rotor, which is an element of the electromechanical system of electrical equipment of a mining enterprise. The surface and pulsation losses caused by the toothed structure of the surfaces limiting the air gap of the electric machine are considered. The results of the work are based on the laws of electromechanical energy conversion and on the equation of the energy balance of active power. The object of research is asynchronous motors with a short-circuited rotor with a voltage of up to 1000 V for the needs of the mining industry. The influence of additional losses in steel on the energy efficiency of engines has been studied. The analysis of surface and pulsation losses depending on the number of teeth of the stator and rotor is carried out. An algorithm for selecting the number of teeth to achieve the highest energy efficiency is shown. The obtained simulation results provide the maximum efficiency of operation of asynchronous motors in electric drives of scraper conveyors of the mining industry, thereby increasing the overall energy efficiency of the drives of mining equipment.

Key words: mining industry, mine electrical equipment, asynchronous motors, energy efficiency, additional losses.

For citation: Temlyakova Z. S., Vilberger M. E., Grechkin V. V., Temlyakov A. A., Malozyomov B. V. Evaluation of additional losses of an asynchronous motor for electrical equipment of the mining industry. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(10-1):312–327. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_101_0_312.

1. Введение

В настоящее время широкое применение в приводах шахтного оборудования находят электрические приводы переменного тока [1, 2]. В системах частотного регулирования в основном используются асинхронные двигатели [3, 4].

Одной из отраслей, развитие которой однозначно связано с использованием современного электрооборудования, является горнодобывающая отрасль [5]. Очевидно, что совершенствование такого электрооборудова-

ния должно основываться на анализе функциональных возможностей электрических машин [6, 7]. В связи с этим совершенствование электромеханических систем, к которым относится асинхронный двигатель, является актуальной научно-технической задачей [8–10].

В регулируемых электромеханических системах используются в основном асинхронные двигатели с короткозамкнутой обмоткой типа беличьей клетки как с напряжением до 1000 В, так и с напряжением свыше 1000 В.

Высоковольтные асинхронные двигатели чаще всего используются для привода скребковых конвейеров, расположенных в шахтах [11, 12].

Асинхронные двигатели являются наиболее распространенными преобразователями электрической энергии в механическую. Они потребляет около 40% всей электроэнергии. Качество, надежность и уровень технического развития асинхронных двигателей оказывают влияние на уровень реализации производственных процессов. Таким образом, усовершенствование и проработка аспектов, касающихся энергетических показателей и энергоэффективности электрических машин, является актуальной задачей [13, 14].

Одним из способов влияния на сумму потерь электрической машины является уменьшение поверхностных и пульсационных потерь, которые являются частью потерь в стали.

Целью данной работы является расчет и анализ поверхностных и пульсационных потерь асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором напряжением до 1000 В, а также оценка их влияния на коэффициент полезного действия и энергоэффективность [15, 16].

2. Математическое моделирование потерь асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

Усовершенствование и проработка аспектов, касающихся энергетических показателей электрической машины, является важной задачей при ее разработке. Основанием для расчета и анализа энергетических показателей (коэффициента полезного действия, коэффициента мощности) является математическая модель асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, ее энергетическая диаграмма,

аналитические выражения для расчета пульсационных (1) и поверхностных (2) потерь [17, 18].

Пульсационные потери определяют по формуле

$$P_{\text{пульс}} = 0.11 \cdot \left(\frac{Z_{2(1)} \cdot n_1}{1000} \cdot B_{\text{пульс}} \right)^2 \cdot m_{Z_{1(2)}}, \quad (1)$$

где $Z_{2(1)}$ – число зубцов ротора (статора); n_1 – частота вращения магнитного поля, об/мин; $B_{\text{пульс}}$ – амплитуда пульсаций магнитного поля статора (ротора), Тл; $m_{Z_{1(2)}}$ – масса стали зубцов статора (ротора), кг.

Поверхностные потери определяют по формуле

$$P_{\text{пов1(2)}} = p_{\text{пов1(2)}} \cdot (t_{1(2)} - b_{\text{ш1(2)}}) \cdot Z_{1(2)} \cdot l_{\text{см1(2)}}, \quad (2)$$

где $p_{\text{пов1(2)}}$ – удельные поверхностные потери статора (ротора), Вт/м²; $t_{1(2)}$ – зубцовые деления статора (ротора), м; $b_{\text{ш1(2)}}$ – открытие паза статора (ротора), м; $Z_{1(2)}$ – число зубцов статора (ротора); $l_{\text{см1(2)}}$ – длина сердечника магнитопровода, м.

В выражениях (1) и (2) $B_{\text{пульс}}$ и $p_{\text{пов1(2)}}$ определяются по следующим формулам:

$$B_{\text{пульс}} = \frac{\gamma_{\text{статор(ротор)}} \cdot \delta_{\text{возд}}}{2 \cdot t_{1(2)}} \cdot B_{Z_{1(2)}}; \quad (3)$$

$$p_{\text{пов1(2)}} = 0.5 \cdot k_{01(2)} \cdot \left(\frac{Z_{2(1)} \cdot n_1}{10000} \right)^{1.5} \cdot \left(B_{01(2)} \cdot t_{2(1)} \cdot 10^3 \right)^2, \quad (4)$$

где $k_{01(2)}$ – эмпирический коэффициент, учитывающий влияние марки стали и толщины листов магнитопровода; $\delta_{\text{возд}}$ – величина воздушного зазора; $B_{Z_{1(2)}}$ – расчётная индукция в зубцах статора (ротора), Тл; $\gamma_{\text{статор(ротор)}}$ – коэффициент воздушного зазора для зубца статора (ротора); $Z_{2(1)}$ – число

зубцов ротора (статора); n_1 – частота вращения магнитного поля, об/мин; $B_{01(2)}$ – амплитуда пульсаций индукции на статоре (роторе), Тл; $t_{2(1)}$ – зубцовые деления ротора (статора), м.

В выражении (4) $B_{01(2)}$ определяют по формуле

$$B_{01(2)} = \beta_{01(2)} \cdot k_\delta \cdot B_\delta, \quad (5)$$

где $\beta_{01(2)}$ – эмпирический коэффициент, учитывающий открытие паза; k_δ – коэффициент воздушного зазора; B_δ – значение расчетной индукции в воздушном зазоре, Тл.

В соответствии с энергетической диаграммой асинхронный двигатель имеет три группы потерь:

- 1) электрические потери;
- 2) потери в стали;
- 3) механические потери.

Одним из способов влияния на величину суммы потерь, а следовательно, и коэффициента полезного действия [19], является уменьшение поверхностных и пульсационных потерь, которые являются частью потерь в стали [20].

3. Алгоритм проведения исследования эффективности

Электрические машины характеризуются геометрическими формами и размерными соотношениями областей активного объема и зубцово-пазовых структур. Без аналитического моделирования этих процессов [21, 22], которые сопровождаются циклическими вычислениями по алгоритму, выйти на оптимальный вариант энергоэффективности не представляется возможным [23, 24]. Ниже приведен алгоритм исследования эффективности, критерием которого является коэффициент полезного действия [25]:

- 1) обосновывается число пазов статора;
- 2) определяется соответствующее значение числа пазов ротора;

- 3) выполняется полный электромагнитный расчет для каждого сочетания;
- 4) результаты исследования представляются в удобном для анализа виде.

4. Результаты расчетов

В работе рассматриваются двигатели мощностью 37 кВт и частотой вращения 1000 об/мин; мощностью 45 кВт и частотой вращения 1000 об/мин, а также их модификации, отличающиеся различным соотношением числа зубцов статора и ротора.

Результаты расчета асинхронного двигателя мощностью 37 кВт при изменении числа пазов статора приведены в табл. 1, а их графическая интерпретация – на рис. 1 и 2. В табл. 1 обозначено $P_{\text{сумм.доб}}$, – сумма добавочных потерь в стали, η – коэффициент полезного действия двигателя.

Анализ составляющих потерь, рассмотренных под углом максимального КПД, может быть обеспечен при равенстве постоянных и переменных потерь электрической машины [26].

Каждая из модификаций электрических машин заданной мощности имеет как свою совокупность численных значений активных и индуктивных сопротивлений обмоток, так и свою совокупность геометрических параметров, обеспечивающих заданный уровень энергоэффективности, посредством численных значений КПД (табл. 1 и 2).

Численные значения составляющих сумму потерь определены в результате электромагнитных расчетов, в данном случае – для четырех модификаций двигателей с числом зубцов статора 90, 72, 54, 36. Следует отметить, что модификации двигателей [27] имеют одни и те же значения электромагнитных нагрузок (линейная нагрузка, расчетное значение индукции в воздушном зазоре), одинаковые размеры внутрен-

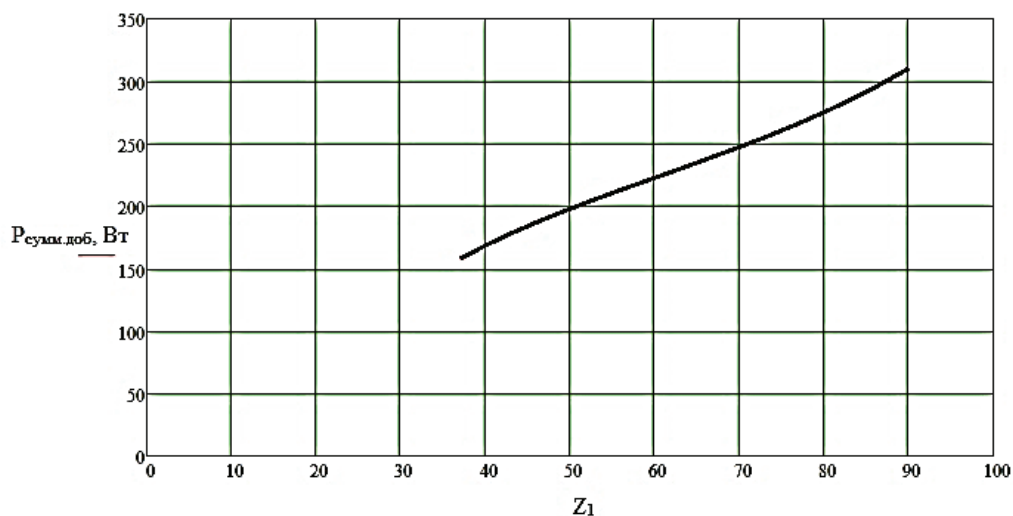


Рис. 1. Зависимость суммы дополнительных потерь от числа зубцов статора для двигателя мощностью 37 кВт
 Fig. 1. Dependence of the sum of additional losses on the number of stator teeth

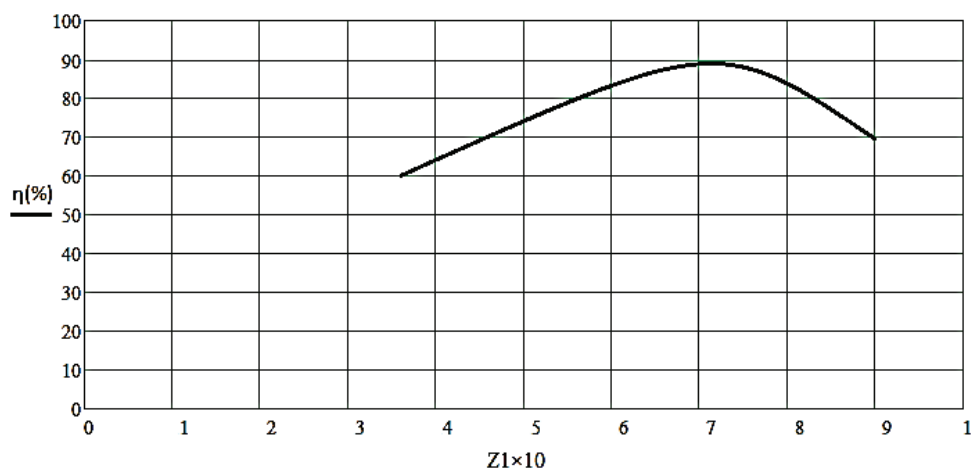


Рис. 2. Зависимость коэффициента полезного действия от числа зубцов статора для двигателя мощностью 37 кВт
 Fig. 2. Dependence of efficiency on the number of stator teeth

него диаметра статора и расчетной длины воздушного зазора.

Анализ рациональных соотношений чисел зубцов статора и ротора поверхностей, ограничивающих воздушный зазор, геометрических форм их пазов обусловлен следующими факторами.

При выборе чисел зубцов статора и ротора важным условием их рациональности является равенство потерь переменных и потерь постоянных, которое соответствует наилучшему значению коэффициента полезного действия.

Таблица 1

Результаты расчета коэффициента полезного действия и составляющих потерь
Calculation results of the efficiency factor and its loss components

Z_1	Z_2	$P_{\text{пов}}, \text{ Вт}$	$P_{\text{пул}}, \text{ Вт}$	$P_{\text{сумм.доб}}, \text{ Вт}$	$\Sigma P, \text{ Вт}$	$\eta, \%$
90	80	109,3	206,14	315,44	3547,2	69,97
72	64	80,65	169,75	250,4	2684,3	89,9
54	50	69,36	141,12	210,48	2258,6	77,4
36	26	55,24	111,7	166,94	1875,4	60

Таблица 2

Результаты расчета коэффициента полезного действия и составляющих потерь
Calculation results of the efficiency factor and its loss components

Z_1	Z_2	$P_{\text{пов}}, \text{ Вт}$	$P_{\text{пул}}, \text{ Вт}$	$P_{\text{сумм.доб}}, \text{ Вт}$	$\Sigma P, \text{ Вт}$	$\eta, \%$
90	78	44,673	519,268	563,941	3787,979	0,9
72	62	48,669	210,063	258,732	3493,569	0,906
54	44	55,575	59,649	115,224	3457,452	0,91
36	26	68,979	9,249	78,228	3562,07	0,897

Вторым основополагающим фактором формирования зубцово-пазовых структур статора и ротора является требование, при котором произведение линейной нагрузки и расчетной индукции есть величина постоянная. Выполнение этого условия обеспечивает равенство активных объемов для всех модификаций рассматриваемых электрических машин.

Дальнейший этап моделирования активного объема асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, используемых в электрооборудовании для горнодобывающей промышленности, предусматривается модификацией, учитывающей специфику его эксплуатации.

Результаты расчета асинхронного двигателя мощностью 45 кВт при изменении числа пазов статора [28] приведены в табл. 2, а их графическая интерпретация – на рис. 3 и 4.

Ниже приведены результаты расчета доли добавочных потерь в стали.

1. Для асинхронного двигателя мощностью 37 кВт и частотой вращения 1000 об/мин:

$$P_{\%36} = 1 - \frac{\Sigma P_{36} - P_{36\text{пул}+\text{нов}}}{\Sigma P_{36}} \cdot 100\% = 1 - \frac{1875.4 - 166.94}{1875.4} \cdot 100\% = 8.9\% ;$$

$$P_{\%54} = 1 - \frac{\Sigma P_{54} - P_{54\text{пул}+\text{нов}}}{\Sigma P_{54}} \cdot 100\% = 1 - \frac{2258.6 - 210.48}{2258.6} \cdot 100\% = 9.3\% ;$$

$$P_{\%72} = 1 - \frac{\Sigma P_{72} - P_{72\text{пул}+\text{нов}}}{\Sigma P_{72}} \cdot 100\% = 1 - \frac{2684.3 - 250.4}{2684.3} \cdot 100\% = 9.3\% ;$$

$$P_{\%90} = 1 - \frac{\Sigma P_{90} - P_{90\text{пул}+\text{нов}}}{\Sigma P_{90}} \cdot 100\% = 1 - \frac{3547.2 - 315.44}{3547.2} \cdot 100\% = 8.9\% .$$

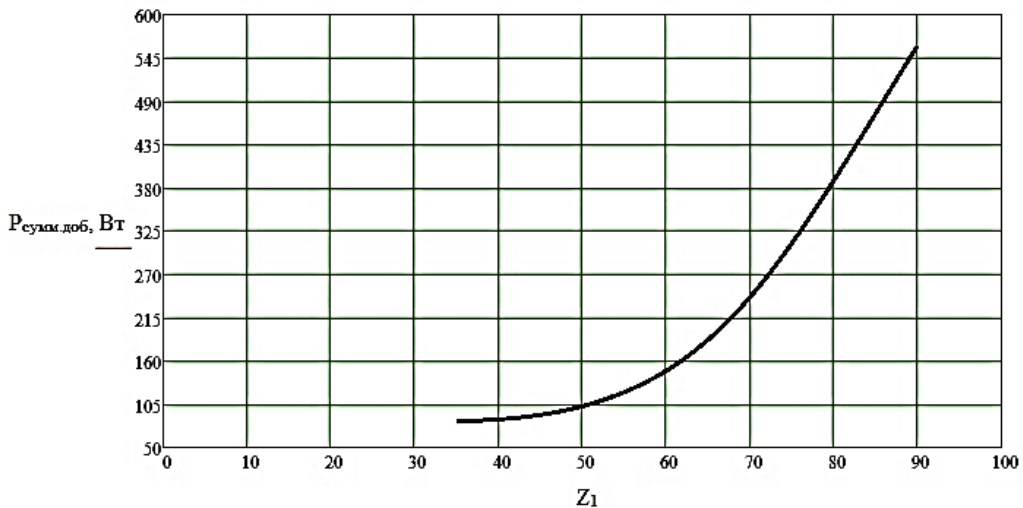


Рис. 3. Зависимость суммы добавочных потерь от числа зубцов статора для двигателя мощностью 45 кВт

Fig. 3. Dependence of the sum of additional losses on the number of stator teeth

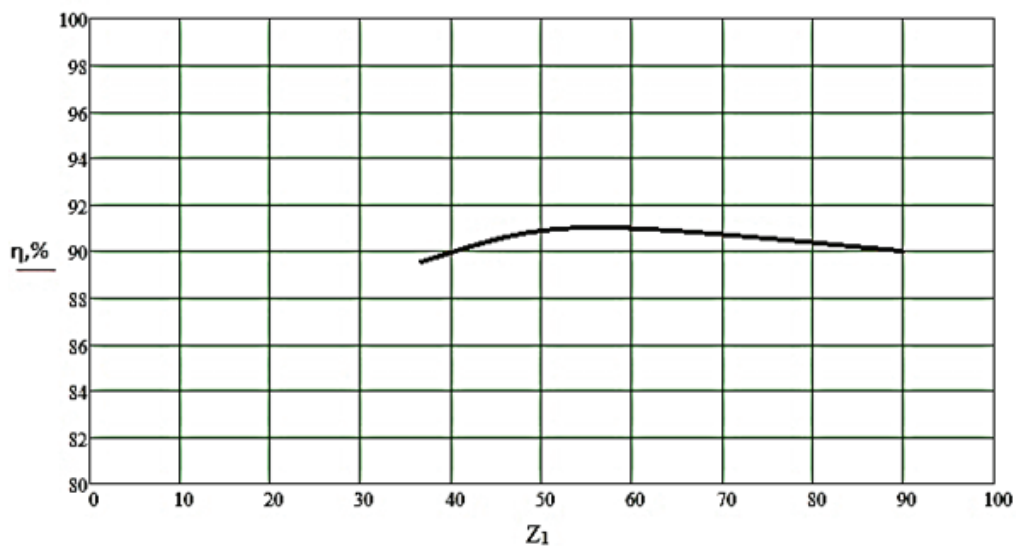


Рис. 4. Зависимость коэффициента полезного действия от числа зубцов статора для двигателя мощностью 45 кВт

Fig. 4. Dependence of efficiency on the number of stator teeth

2. Для асинхронного двигателя мощностью 45 кВт и частотой вращения 1000 об/мин:

$$P_{\%36} = 1 - \frac{\Sigma P_{36} - P_{36\text{пул+пов}}}{\Sigma P_{36}} \cdot 100\% = 1 - \frac{3562.07 - 78.228}{3562.07} \cdot 100\% = 2.19\% ;$$

$$P_{\%54} = 1 - \frac{\Sigma P_{54} - P_{54_{\text{нул+нов}}}}{\Sigma P_{54}} \cdot 100\% = 1 - \frac{3457.452 - 115.224}{3457.452} \cdot 100\% = 3.33\% ;$$

$$P_{\%72} = 1 - \frac{\Sigma P_{72} - P_{72_{\text{нул+нов}}}}{\Sigma P_{72}} \cdot 100\% = 1 - \frac{3493.569 - 258.732}{3493.569} \cdot 100\% = 7.4\% ;$$

$$P_{\%90} = 1 - \frac{\Sigma P_{90} - P_{90_{\text{нул+нов}}}}{\Sigma P_{90}} \cdot 100\% = 1 - \frac{3787.979 - 563.941}{3787.979} \cdot 100\% = 14.8\% .$$

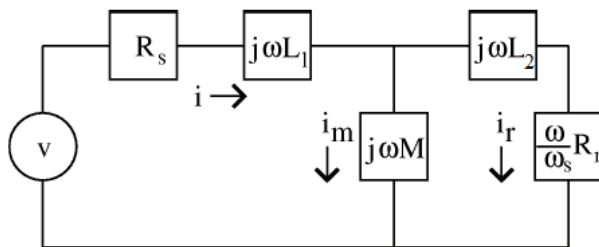


Рис. 5. Т-образная схема замещения асинхронного двигателя
Fig. 5. T-substitution diagram of an induction motor

Большое влияние на энергетические показатели электродвигателя оказывает геометрическое соотношение форм пазов и главных размеров [29]. Выполнен анализ для определения этого влияния.

В качестве приемлемой модели используется Т-образная схема замещения асинхронного двигателя, изображенная на рис. 5.

Эта модель представляет собой схему замещения фазы двигателя, работающего в установившемся режиме (с постоянной электрической частотой и постоянной механической частотой вращения). В этой модели L_1 — индуктивность рассеяния обмотки статора, L_2 — индуктивность рассеяния обмотки ротора, M — взаимная индуктивность, R_s — активное сопротивление обмотки статора, R_r — активное сопротивление обмотки ротора, v — фазное напряжение, i — фазный ток.

Символ ω представляет приложенную электрическую частоту (в рад/с). Величина ω_s представляет разницу

между механической частотой вращения ротора и электрической частотой. Если статор имеет p пар полюсов, то частоту скольжения ω_s можно определить через электрическую частоту и механическую частоту вращения ротора ω_R как

$$\omega_s = \omega - p \cdot \omega_r. \quad (1)$$

Теперь, когда имеется модель двигателя, можно использовать эту модель, чтобы получить несколько полезных соотношений.

$$Z_{\vartheta} = Z_1 + \frac{Z_0 Z_2}{Z_0 + Z_2}, \quad (2)$$

где Z_1 — полное сопротивление обмотки статора, Z_2 — полное сопротивление обмотки ротора, а Z_0 — полное сопротивление взаимоиндукции. Тогда напряжение связано с током как

$$U = Z \cdot I. \quad (3)$$

Формула (3) используется в качестве основы для определения параметров двигателя.

Для каждого участка магнитной цепи заданы свойства, соответствующие исследуемому асинхронному двигателю с короткозамкнутым ротором мощностью 18,5 кВт. Значение тока статора соответствует значению, полученному в ходе электромагнитного расчёта. Направление токов расставлено в соответствии со схемой обмотки. Все геометрические размеры взяты из электромагнитного расчета.

Используя формулу (4), рассчитывают индуктивность рассеивания обмотки фазы статора (следует иметь в виду, что здесь не учитываются лобовые части):

$$L_{\text{ос}} = \frac{U_A - U_B - U_C}{w \cdot i}, \quad (4)$$

где U_A, U_B, U_C – напряжения фазы А, В и С соответственно, которые получают при моделировании в FEMM, для случая, когда ток фазы А равен $I_A = 1\text{А}$, токи фазы В и С: $I_B = I_C = 0\text{А}$.

Индуктивность взаимной индукции получают по формуле, взятой из электромагнитного расчета и адаптированной к расчету в программе FEMM к следующему виду:

$$L_M = \frac{U_H}{I_\mu} \cdot \frac{1}{2\pi f} - L_{\sigma 1}. \quad (5)$$

Расчетные модели на рис. 6 представляют собой пазы статора и ротора.

Решение получается автоматически с применением программы FEMM. Для наглядности результаты представлены в виде диаграммы, показанной на рис. 7. На диаграмме представлены результаты расчета КПД для различных сочетаний 8 размерных соотношений пазов статора и 4 соотношений пазов ротора.

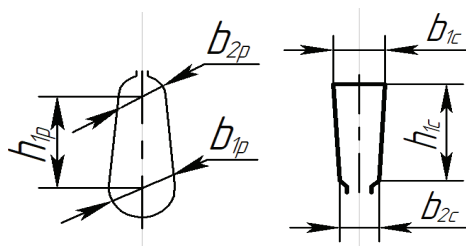


Рис. 6. Эскизы пазов статора и ротора
Fig. 6. Sketches of stator and rotor slots

На основании электромагнитных расчетов определен диаметр расточки статора D к расчетной длине l_δ , удовлетворяющий условию размещения на поточной линии.

В табл. 3 представлены численные значения размеров, соответствующих пространству разработанного асинхронного двигателя.

Использование преобразователя частоты и изменение глубины паза позволяет получить больший пусковой момент и механическую характеристику без снижения момента от пускового режима до номинального.

Нужная скорость задается оператором на панели управления вручную. Данная скорость определяется технологами.

При решении задачи поиска конструктивно-технических решений обеспечения энергоэффективности асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором диапазон изменения λ значительно расширен, $\lambda \in (0,4; 1,6)$ о.е.

Таблица 3
Размеры по чертежу разработанного двигателя
Dimensions according to the drawing of the designed motor

D , м	0,237
l_δ , м	0,21
λ , о.е.	1,128
A , м	0,3
B , м	0,4
C , м	0,5

Таблица 4

Зависимости $P_{эл.1}$, $\eta = (D)$ при условии $D \cdot l_{\delta} = \text{const}$

Dependencies $P_{эл.1}$, $\eta = (D)$ under the condition $D \cdot l_{\delta} = \text{const}$

D , м	0,214	0,237	0,261	0,284	0,308
l_{δ} , м	0,258	0,21	0,173	0,146	0,124
λ , о.е.	1,535	1,128	0,844	0,655	0,513
$P_{эл.1}$, Вт	1605,27	1706,87	1869,43	2031,99	2275,83
η , %	92,09	92,06	91,77	91,35	90,01

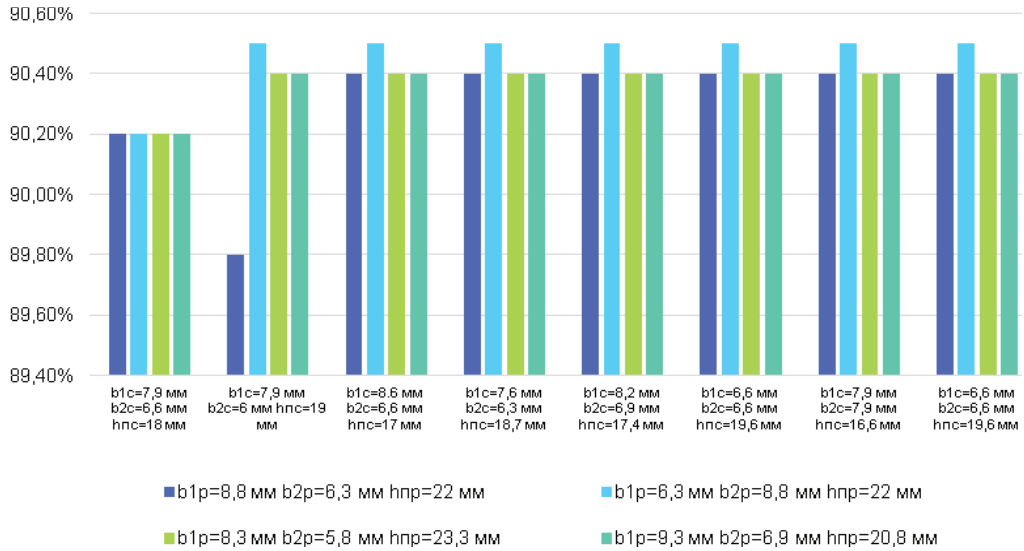


Рис. 7. Результаты расчета КПД для различных сочетаний пазов статора и ротора

Fig. 7. Efficiency results for different stator and rotor slot combinations

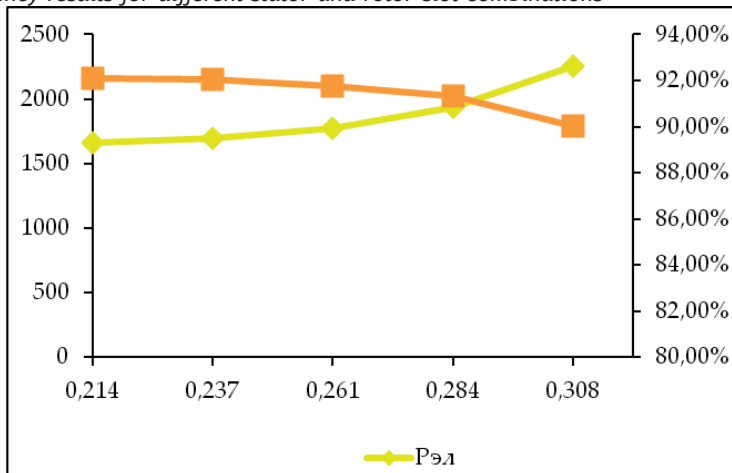


Рис. 8. Зависимости $P_{эл.1}$, $\eta = (D)$

Fig. 8. Dependencies of $P_{эл.1}$, $\eta = (D)$

Определение зависимости $\eta=(D)$ проведено при условии $D \cdot l_{\delta} = \text{const}$.

Результаты расчетов представлены в табл. 4. Зависимости $P_{эл.1}$, $\eta=(D)$ показаны на рис. 8.

5. Обсуждение результатов

Потери в асинхронном двигателе можно разделить на 3 категории: магнитные, электрические, механические. В свою очередь, к механическим потерям относят: потери на трение в подшипниковых узлах, вращающихся частей о воздух или другой охлаждающий газ, а также перемещение охлаждающего газа (вентиляция). Следовательно, что при прочих равных условиях (одинаковая скорость вращения магнитного поля, тип и конструкция подшипников, материалы при изготовлении двигателей) механические потери будут зависеть от выбора того или иного соотношения главных размеров (табл. 5).

Анализ результатов исследования получен на основании электромагнитных расчетов, при этом отношение расчетной длины воздушного зазора к полюсному делению относительно машин нормального исполнения значительно расширено. При уменьшении наружного диаметра ротора и увеличении его длины снижается жёсткость вала, увеличивается значение прогиба вала и, как следствие, статического эксцентриситета ротора, что, в свою очередь, может привести к соприкосновению поверхностей ротора

и статора, ограничивающих область воздушного зазора.

Технико-экономические показатели, размеры, масса, стоимость, а также надёжность в работе электрической машины зависят от её главных размеров — внутреннего диаметра сердечника якоря D (в машинах постоянного тока D — внешний диаметр якоря) и расчетной длины сердечника якоря l_{δ} . Поэтому определение D и l_{δ} следует рассматривать как основной этап в проектировании электрических машин. Основная задача данной работы заключалась в получении улучшенных энергетических показателей двигателя. Решением этой задачи явилось рациональное изменение соотношения главных размеров электрической машины, полученных в процессе расчёта и анализа альтернативных вариантов двигателя данной мощности.

6. Заключение

В статье проанализированы факторы, влияющие на профессиональный уровень обоснования геометрической структуры асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, предусмотренных для эксплуатации в горнодобывающей промышленности. Современные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором используют техническое решение, которое предусматривает наличие зубцов и пазов на поверхностях сердечников магнитопроводов статора и ротора. Наличие зубцово-пазовой зоны предо-

Таблица 5

Значения механических потерь от суммы общих потерь для различных альтернативных вариантов

Values of mechanical losses from the sum of total losses for the various alternatives

λ , о.е.	0,513	0,655	0,844	1,128	1,535
$\sum P$, Вт	4995	4261	4036	3852	3765
$P_{мех}$, Вт	960	600	420	280	180
$P_{мех}$, %	19,2	14,1	10,4	7,3	4,7

пределяет возникновение поверхностных и пульсационных потерь, которые относят к категории добавочных потерь в стали магнитопровода электрической машины.

В результате анализа расчетных величин установлено, что доля добавочных потерь непостоянна, варьируется в диапазоне 2 — 15% и зависит от геометрической формы зубцово-пазовой зоны статора и ротора асинхронного двигателя, что в свою очередь влияет как на уровень индукции в зубцах, так и на величину плотности тока и на основные потери двигателя.

Таким образом, необходимым условием при разработке электрических машин является рассмотрение различных альтернативных вариантов конструкции зубцово-пазовых зон с целью достижения максимального значения КПД, а следовательно, энергоэффективной эксплуатации двигателей в электроприводах скребковых конвейеров, расположенных в угольных шахтах. При этом эффект энергоэффективности достигается за счет перераспределения всех видов потерь в каждой из разработанных модификаций асинхронного двигателя заданной мощности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурков А. Ф., Юрин В. Н., Аветисян В. Р. Исследование возможностей повышения энергоэффективности асинхронных двигателей // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. — 2018. — Т. 20. — № 9–10 — С. 92–100.

2. Martyushev N. V., Malozyomov B., Sorokova S. N., Efremkov E. A., Valuev D. V., Qi M. Review Models and Methods for Determining and Predicting the Reliability of Technical Systems and Transport // Mathematics. 2023, vol. 11, 3317. DOI: 10.3390/math11153317.

3. Матвеев Ю. В. Энергосберегающие аспекты мощных регулируемых асинхронных каскадных электроприводов // Advanced Researching Technical Science. 2019, no. 16, pp. 87–91.

4. Малафеев С. И., Захаров А. В., Сафроненков Ю. А. Новая серия асинхронных частотно-регулируемых двигателей // Электротехника. — 2019. — № 4. — С. 7–12.

5. Malozyomov B. V., Martyushev N. V., Kukartsev V. V., Tynchenko V. S., Bukhtoyarov V. V., Wu X., Tyncheko Y. A., Kukartsev V. A. Overview of Methods for Enhanced Oil Recovery from Conventional and Unconventional Reservoirs // Energies. 2023, vol. 16, 4907. doi: 10.3390/en16134907.

6. Карх И. С., Ионова Л. В., Полузадов В. Н. Взаимосвязь энергоэффективности массогабаритных показателей асинхронных двигателей // Уральская горная школа — регионам. Сборник докладов Международной научно-практической конференции. — Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2018. — С. 309–310.

7. Брейдо И. В., Семькина И. Ю., Нурмаганбетова Г. С. Способы косвенной защиты от перегрева для электроприводов горно-шахтных установок // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2018. — Т. 329. — № 2. — С. 65–73.

8. Шайтор Н. М., Якимович Б. А., Горпинченко А. В., Соломенникова С. И. Влияние тепловых и электромагнитных процессов в двухслойных роторах на эффективность асинхронной машины // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. — 2021. — Т. 24. — № 2. — С. 114–123.

9. Барышников В. А., Рожков В. В., Федотов В. В. Асинхронный электропривод горных машин с импульсно-ключевым регулированием в роторной цепи // Горный журнал. — 2022. — № 2. — С. 64–72.

10. *Островляничик В. Ю., Поползин И. Ю., Кубарев В. А., Маршев Д. А.* Асинхронный электропривод шахтных подъемных установок с преобразователем частоты в цепи ротора // Научно-технические разработки и использования минеральных ресурсов. – 2021. – № 7. – С. 266–272.

11. *Щуров Н. И., Мятаж С. В., Малоземов Б. В.* Анализ и расчет неактивной мощности в сети питания электропотребителей рудничного транспорта // Горный информационно-аналитический бюллетень.–2022.– №12–2.– С.270–283. DOI:10.25018/0236_1493_2022_122_0_270.

12. *Martyushev N. V., Malozyomov B. V., Sorokova S. N., Efremkov E. A., Qi M.* Mathematical Modeling the Performance of an Electric Vehicle Considering Various Driving Cycles // Mathematics. 2023, vol. 11, 2586. DOI: 10.3390/math11112586.

13. *Абрамов Б. И., Иванов А. Г., Шиленьков В. А., Кузьмин И. К., Шевырев Ю. В.* Электропривод современных шахтных подъемных машин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2022. – № 5–2. – С. 145–162. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_52_0_145.

14. *Щуров Н. И., Мятаж С. В., Малоземов Б. В., Штанг А. А.* Определение реактивной мощности в сети тяговых подстанций шахтных электровозов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 12–2. – С. 284–300. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_122_0_284.

15. *Шестаков А. В.* Математическая модель характеристик асинхронных двигателей с частотным управлением // Электротехника. – 2011. – № 2 – С. 23а–29.

16. *Эшмуродов З. О., Исмоилов М. Т. У., Орипова У. З. К.* Математические модели конвейеров транспортировки руды горнотранспортных систем // Universum: технические науки. – 2021. – № 7–1(88). – С. 88–92.

17. *Каширский В. Г.* Обоснование упрощения математической модели асинхронного электродвигателя для динамической идентификации // Горное оборудование и электромеханика. – 2019. – № 5(145). – С. 33–37.

18. *Malozyomov B. V., Martyushev N. V., Sorokova S. N., Efremkov E. A., Qi M.* Mathematical Modeling of Mechanical Forces and Power Balance in Electromechanical Energy Converter // Mathematics. 2023, vol. 11, 2394. DOI: 10.3390/math11102394.

19. *Кононенко К. Е., Кононенко А. В., Крутских С. В., Мануковский С. М.* Повышение удельных характеристик асинхронных двигателей // Электричество. – 2020. – № 9. – С. 34–39.

20. *Васильев Д. А., Пантелеева Л. А., Грачева Е. И.* Оптимизации работы асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2022. – Т. 24. – № 6. – С. 92–101.

21. *Романенко И. Г., Данилов М. И.* Оценка влияния на энергоэффективность асинхронного двигателя конструктивных изменений без коррекции зубцовой зоны // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. – 2018. – № 5(65). – С. 19–25.

22. *Винтайкина Д. А., Астанаева Ю. Р.* Анализ методов повышения энергоэффективности электропривода с асинхронным двигателем // Тенденции развития науки и образования. – 2022. – № 92–12. – С. 74–76.

23. *Бурков А. Ф., Миханошин В. В., Нгуен В. Ха.* Повышение энергетической эффективности асинхронных электроприводов // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2021. – № 11. – С. 7–11.

24. *Самосейко В. Ф., Гуськов В. О.* Оптимальное управление асинхронным двигателем по критерию потерь энергии // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. – 2020. – Т. 12. – № 4. – С. 775–788.

25. *Манукян А. П.* Потери мощности и производительность асинхронных электроприводов при отклонениях напряжения // Вестник Национального политехнического университета Армении. Электротехника, энергетика. – 2018. – № 1. – С. 73–83.

26. Shchurov N. I., Myatezh S. V., Malozyomov B. V., Shtang A. A., Martyushev N. V., Klyuev R. V., Dedov S. I. Determination of Inactive Powers in a Single-Phase AC Network // *Energies*. 2021, vol. 14, 4814. DOI: 10.3390/en14164814.
27. Martyushev N. V., Malozyomov B. V., Khalikov I. H., Kukartsev V. A., Kukartsev V. V., Tynchenko V. S., Tynchenko Y. A., Qi M. Review of Methods for Improving the Energy Efficiency of Electrified Ground Transport by Optimizing Battery Consumption // *Energies*. 2023, vol. 16, 729. DOI: 10.3390/en16020729.
28. Shchurov N. I., Dedov S. I., Malozyomov B. V., Shtang A. A., Martyushev N. V., Klyuev R. V., Andriashin S. N. Degradation of Lithium-Ion Batteries in an Electric Transport Complex // *Energies*. 2021, vol. 14, 8072. DOI: 10.3390/en14238072.
29. Frank Z., Stepanek J. and Hruska K. Educational Test Rig for Non-Standard Electric Machines // 2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM), Gothenburg, Sweden, 2020, pp. 157–162. DOI: 10.1109/ICEM49940.2020.9270748. **PIAB**

REFERENCES

- Burkov A. F., Yurin V. N., Avetisyan V. R. Study of the possibilities of improving the energy efficiency of asynchronous motors. *News of higher educational institutions. Energy problems*. 2018, vol. 20, no. 9–10, pp. 92–100. [In Russ].
- Martyushev N. V., Malozyomov B., Sorokova S. N., Efremkov E. A., Valuev D. V., Qi M. Review Models and Methods for Determining and Predicting the Reliability of Technical Systems and Transport. *Mathematics*. 2023, vol. 11, 3317. DOI: 10.3390/math11153317.
- Matveev Yu. V. Energy-saving aspects of powerful adjustable asynchronous cascade electric drives. *Advanced Researching Technical Science*. 2019, no. 16, pp. 87–91. [In Russ].
- Malafeev S. I., Zakharov A. V., Safronenkov Yu. A. A new series of asynchronous frequency-controlled motors. *Electrical engineering*. 2019, no. 4, pp. 7–12. [In Russ].
- Malozyomov B. V., Martyushev N. V., Kukartsev V. V., Tynchenko V. S., Bukhtoyarov V. V., Wu X., Tyncheko Y. A., Kukartsev V. A. Overview of Methods for Enhanced Oil Recovery from Conventional and Unconventional Reservoirs. *Energies*. 2023, vol. 16, 4907. DOI: 10.3390/en16134907.
- Karkh I. S., Ionova L. V., Poluzadov V. N. Relationship between energy efficiency of mass-dimensional parameters of asynchronous motors. *Ural Mining School to the regions. Collection of reports of the International Scientific and Practical Conference*. 2018, pp. 309–310 [In Russ].
- Breido I. V., Semykina I. Yu., Nurmaganbetova G. S. Methods of indirect protection against overheating for electric drives of mining installations. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Engineering of georesources*. 2018, vol. 329, no. 2, pp. 65–73. [In Russ].
- Shaitor N. M., Yakimovich B. A., Gorpinchenko A. V., Solomennikova S. I. Influence of thermal and electromagnetic processes in two-layer rotors on the efficiency of an asynchronous machine. *Bulletin of IzhGTU named after M. T. Kalashnikov*. 2021, vol. 24, no. 2, pp. 114–123 [In Russ].
- Baryshnikov V. A., Rozhkov V. V., Fedotov V. V. Asynchronous electric drive of mining machines with pulse-key regulation in the rotor circuit. *Mining Journal*. 2022, no. 2, pp. 64–72. [In Russ].
- Ostrovlyanchik V. Yu., Popolzin I. Yu., Kubarev V. A., Marshev D. A. Asynchronous electric drive of mine hoisting installations with a frequency converter in the rotor circuit. *Science-intensive technologies for the development and use of mineral resources*. 2021, no. 7, pp. 266–272. [In Russ].
- Shchurov N. I., Myatezh S. V., Malozemov B. V. Analysis and calculation of inactive power in the power supply network of electric consumers of mining transport. *MIAB. Mining*

Inf. Anal. Bull. 2022, no. 12–2, pp. 270–283. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_122_0_270

12. Martyushev N. V., Malozyomov B. V., Sorokova S. N., Efremenkov E. A., Qi M. Mathematical Modeling the Performance of an Electric Vehicle Considering Various Driving Cycles. *Mathematics*. 2023, vol. 11, 2586. DOI: 10.3390/math11112586.

13. Abramov B. I., Ivanov A. G., Shilenkov V. A., Kuzmin I. K., Shevyrev Yu. V. Electric drive of modern mine-hoisting machines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 5–2, pp. 145–162. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_52_0_145.

14. Shchurov N. I., Myatezh S. V., Malozemov B. V., Shtang A. A. Determination of reactive power in the network of traction substations of mine electric locomotives. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 12–2, pp. 284–300. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_12_2_0_284.

15. Shestakov A. V. Mathematical model of the characteristics of asynchronous motors with frequency control. *Electrical Engineering*. 2011, no. 2, pp. 23a–29.

16. Eshmurodov Z. O., Ismoilov M. T. U., Oripova U. Z. K. Mathematical models of ore transportation conveyors in mining transport systems. *Universum: technical sciences*. 2021, no. 7–1 (88), pp. 88–92.

17. Kashirsky V. G. Justification for simplifying the mathematical model of an asynchronous electric motor for dynamic identification. *Mining equipment and electromechanics*. 2019, no. 5 (145), pp. 33–37.

18. Malozyomov B. V., Martyushev N. V., Sorokova S. N., Efremenkov E. A., Qi M. Mathematical Modeling of Mechanical Forces and Power Balance in Electromechanical Energy Converter. *Mathematics*. 2023, vol. 11, 2394. DOI: 10.3390/math11102394.

19. Kononenko K. E., Kononenko A. V., Krutskikh S. V., Manukovsky S. M. Improving the specific characteristics of asynchronous motors. *Electricity*. 2020, no. 9, pp. 34–39.

20. Vasiliev D. A., Panteleeva L. A., Gracheva E. I. Optimization of the operation of an asynchronous motor with a squirrel-cage rotor. *Izvestia of higher educational institutions. Energy problems*. 2022, vol. 24, no. 6, pp. 92–101.

21. Romanenko I. G., Danilov M. I. Evaluation of the impact on the energy efficiency of an asynchronous motor of design changes without correction of the tooth zone. *Bulletin of the North Caucasian Federal University*. 2018, no. 5 (65), pp. 19–25.

22. Vintaikina D. A., Astanaeva Yu. R. Analysis of methods for improving the energy efficiency of an electric drive with an asynchronous motor. *Trends in the development of science and education*. 2022, no. 92–12, pp. 74–76.

23. Burkov A. F., Mikhanoshin V. V., Nguyen V. Ha. Improving the energy efficiency of asynchronous electric drives. *Electrical equipment: operation and repair*. 2021, no. 11, pp. 7–11.

24. Samoseiko V. F., Guskov V. O. Optimal control of an asynchronous motor according to the criterion of energy losses. *Bulletin of the State University of Marine and River Fleet named Admiral S. O. Makarov*. 2020, vol. 12, no. 4, pp. 775–788.

25. Manukyan A. P. Power losses and performance of asynchronous electric drives with voltage deviations. *Bulletin of the National Polytechnic University of Armenia. Electrical engineering, energy*. 2018, no. 1, pp. 73–83.

26. Shchurov N. I., Myatezh S. V., Malozyomov B. V., Shtang A. A., Martyushev N. V., Klyuev R. V., Dedov S. I. Determination of Inactive Powers in a Single-Phase AC Network. *Energies*. 2021, vol. 14, 4814. DOI: 10.3390/en14164814.

27. Martyushev N. V., Malozyomov B. V., Khalikov I. H., Kukartsev V. A., Kukartsev V. V., Tynchenko V. S., Tynchenko Y. A., Qi M. Review of Methods for Improving the Energy Efficiency of Electrified Ground Transport by Optimizing Battery Consumption. *Energies*. 2023, vol. 16, 729. DOI: 10.3390/en16020729.

28. Shchurov N. I., Dedov S. I., Malozyomov B. V., Shtang A. A., Martyushev N. V., Klyuev R. V., Andriashin S. N. Degradation of Lithium-Ion Batteries in an Electric Transport Complex. *Energies*. 2021, vol. 14, 8072. DOI: 10.3390/en14238072.

29. Frank Z., Stepanek J. and Hruska K. Educational Test Rig for Non-Standard Electric Machines. *2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Gothenburg, Sweden, 2020, pp. 157–162. DOI: 10.1109/ICEM49940.2020.9270748.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Темлякова Зоя Савельевна*¹ — докт. техн. наук, профессор, e-mail: Temlyakova@corp.nstu.ru, ORCIDID: 0000-0002-3692-5035;

*Вильбергер Михаил Евгеньевич*¹ — канд. техн. наук, доцент, декан факультета мехатроники и автоматизации, e-mail: Vilberger@corp.nstu.ru, ORCIDID: 0000-0001-8762-9917;

*Гречкин Владимир Викторович*¹ — канд. техн. наук, доцент, e-mail: Grechkin@corp.nstu.ru, ORCIDID: 0000-0002-2272-2050;

*Темляков Антон Александрович*¹ — аспирант факультета мехатроники и автоматизации, e-mail: maksidor@inbox.ru, ORCIDID: 0000-0002-2026-3129;

*Малозёмов Борис Витальевич*¹ — канд. техн. наук, доцент, e-mail: mbv5@mail.ru, Scopus AuthorID: 10239844500, ResearcherID: J-1723-2016, РИНЦ AuthorId: 176629, ORCID: 0000-0001-8686-9556.

¹ Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, проспект К. Маркса, 20, Россия.

Для контактов: *Малозёмов Б. В.*, e-mail: mbv5@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Temlyakova Z. S.*¹, Dr. Sci. (Eng.), professor, e-mail: Temlyakova@corp.nstu.ru, ORCID ID: 0000-0002-3692-5035;

*Vilberger M. E.*¹, Cand. Sci. (Eng.), assistant professor, dean of mechatronic and automation faculty, e-mail: Vilberger@corp.nstu.ru, ORCIDID: 0000-0001-8762-9917;

*Grechkin V. V.*¹, Cand. Sci. (Eng.), assistant professor, e-mail: Grechkin@corp.nstu.ru, ORCIDID: 0000-0002-2272-2050;

*Temlyakov A. A.*¹, *graduate* student of mechatronic and automation faculty, e-mail: maksidor@inbox.ru, ORCIDID: 0000-0002-2026-3129;

*Malozyomov B. V.*¹, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, e-mail: ma-lozyomov@corp.nstu.ru, Scopus Author ID: 10239844500, ResearcherID: J-1723-2016, ORSCI Authorid: 176629, ORCID: 0000-0001-86-9556;

¹ Novosibirsk state technical university, Novosibirsk, K. Marks av., 20, Russia.

Corresponding author: *Malozyomov B. V.*, e-mail: mbv5@mail.ru.

Получена редакцией 18.04.2023; получена после рецензии 24.07.2023; принята к печати 10.10.2023.

Received by the editors 18.04.2023; received after the review 24.07.2023; accepted for printing 10.10.2023.

