

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ



УДК 621.313:622.23.05

DOI:10.30724/1998-9903-2024-26-5-3-18

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ФАКТОРОВ, ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННУЮ НАДЁЖНОСТЬ НИЗКОВОЛЬТНЫХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ УГЛЕДОБЫВАЮЩЕГО КОМПЛЕКСА

Романова В.В.^{1,2}, Батухтин А.Г.¹, Суслов К.В.^{1,3}, Хромов С.В.¹, Галятин В.А.¹

¹Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия

²Филиал Национального исследовательского университета «Московский энергетический институт», г. Волжский, Россия

³Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», г. Москва, Россия
romanova181@mail.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ данного исследования заключается в решении проблемы надёжного функционирования элементов систем энергетики и обеспечение их эффективной эксплуатации при ведении открытых горных работ. В работе представлен методический подход, который позволяет оценить уровень надёжности низковольтных асинхронных электродвигателей в условиях угольного разреза со сложными горно-геологическими и климатическими условиями добычи. ЦЕЛЬ работы состоит в количественной оценке эксплуатационных факторов, воздействующих на срок службы асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором. Сосредоточено внимание, как разные по физической основе воздействующие факторы, среди которых выделены электрические параметры – коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности, коэффициенты гармонических составляющих напряжения и параметры окружающей среды – температура, влажность воздуха и запылённость, влияют на динамику изменения срока службы асинхронного электродвигателя. В качестве объекта исследования рассмотрены асинхронные электродвигатели, применяемые на одном из предприятий компании АО «СУЭК» Забайкальского края. МЕТОДЫ. Основным инструментом, для реализации задач исследования, использовано компьютерное моделирование на основе программного комплекса Matlab. РЕЗУЛЬТАТЫ. Исследования выполнены на асинхронном электродвигателе с короткозамкнутым ротором с $P_n = 3$ кВт, номинальной частотой вращения 1500 об/мин. Моделирование режима работы, исследуемого электродвигателя, выполнено путём изменения параметров эксперимента: величины суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (K_U) – от 4 до 12% с диапазоном в 2%; величины коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности (K_{2U}) – от 0 до 4% с диапазоном в 1%; величины температуры окружающей среды ($\Delta T_{окр}$) – от -30°C до $+30^\circ\text{C}$ с диапазоном в 10°C ; величины влажности воздуха (V_ϵ) – 20% и 60%; величины коэффициента теплопроводности пыли (K_m) – 0,12 и 0,28. Основываясь на полученные результаты исследования, построены диаграммы, наглядно иллюстрирующие динамику изменения срока службы асинхронного электродвигателя в зависимости от совокупности воздействующих факторов. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Тенденции решения вопросов надёжного функционирования угледобывающего предприятия с наличием асинхронных электродвигателей и обеспечение их эффективной эксплуатации являются наиболее приоритетными, главным образом, ориентированными на поддержание стабильности технологических процессов и сохранения объёмов добычи угледобывающего предприятия. Оценена устойчивость электродвигателя к определённым воздействующим факторам и установлены их критические значения. Сформулированы рекомендации по использованию асинхронных электродвигателей с учётом условий их эксплуатации.

Ключевые слова: асинхронный электродвигатель; компьютерное моделирование на основе системы Matlab/Simulink; внешние воздействующие факторы; эксплуатационная надёжность асинхронного электродвигателя.

Благодарности: авторский коллектив выражает благодарность С.В. Ковшову – к.т.н., доценту, заместителю директора Института целевых образовательных программ по методической работе ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II» за оказанную помощь и ценные рекомендации в ходе выполнения данного исследования. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 123102000012-2 «Комплексное исследование аэродинамических характеристик плазменных систем термохимической подготовки топлива», соглашение № 075-03-2023-028/1 от 05.10.2023 г.).

Для цитирования: Романова В.В., Батухтин А.Г., Суслов К.В., Хромов С.В., Галятин В.А. Комплексная оценка факторов, воздействующих на эксплуатационную надёжность низковольтных асинхронных электродвигателей угледобывающего комплекса // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т. 26. № 5. С. 3-18. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-5-3-18.

COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF FACTORS AFFECTING THE OPERATIONAL RELIABILITY OF LOW-VOLTAGE ASYNCHRONOUS ELECTRIC MOTORS OF A COAL MINING COMPLEX

Romanova V.V.^{1,2}, Batukhtin A.G.¹, Suslov K.V.^{1,3}, Khromov S.V.¹, Galyatin V.A.¹

¹Trans-Baikal State University, Chita, Russia

²Branch of the National Research University «Moscow Power Engineering Institute»,
Volzhsky, Russia

³National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russia
romanova181@mail.ru

Abstract: THE RELEVANCE of this study lies in solving the problem of reliable functioning of elements of energy systems and ensuring their effective operation during open-pit mining. The paper presents a methodological approach that allows us to assess the level of reliability of low-voltage asynchronous electric motors in a coal mine with complex mining, geological and climatic conditions of production. THE PURPOSE of the work is to quantify the operational factors affecting the service life of an asynchronous electric motor with a short-circuited rotor. Attention is focused on how influencing factors, different in physical basis, among which electrical parameters are highlighted – the coefficient of voltage asymmetry in the reverse sequence, the coefficients of harmonic voltage components and environmental parameters – temperature, air humidity and dustiness, affect the dynamics of changes in the service life of an asynchronous electric motor. Asynchronous electric motors used at one of the enterprises of JSC SUEK in the Trans-Baikal Territory are considered as an object of research. METHODS. The main tool for the implementation of research tasks is computer modeling based on the Matlab software package. RESULTS. The studies were performed on an asynchronous electric motor with a short-circuited rotor with $P_n = 3$ kW, rated speed 1500 rpm. The simulation of the operating mode of the electric motor under study was performed by changing the experimental parameters: the values of the total coefficient of harmonic voltage components (K_U) – from 4 to 12% with a range of 2%; the values of the voltage asymmetry coefficient in the reverse sequence (K_{2U}) – from 0 to 4% with a range of 1%; the ambient temperature ($\Delta T_{окр}$) – from -30°C to $+30^{\circ}\text{C}$ with a range of 10°C ; air humidity values (V_c) – 20% and 60%; dust thermal conductivity coefficient values (K_m) – 0,12 and 0,28. Based on the obtained research results, diagrams are constructed that clearly illustrate the dynamics of changes in the service life of an asynchronous electric motor depending on the combination of influencing factors. CONCLUSION. The trends in solving the issues of reliable functioning of a coal mining enterprise with the presence of asynchronous electric motors and ensuring their efficient operation are the most priority, mainly focused on maintaining the stability of technological processes and maintaining the production volumes of a coal mining enterprise. The stability of the electric motor to certain influencing factors is estimated and their critical

values are established. Recommendations on the use of asynchronous electric motors are formulated, taking into account their operating conditions.

Keywords: asynchronous electric motor; computer simulation based on the Matlab/Simulink system; external influencing factors; operational reliability of an asynchronous electric motor.

Acknowledgements: the author's team expresses its gratitude to S.V. Kovshov, Ph.D., Associate Professor, Deputy Director of the Institute of Targeted Educational Programs for Methodological Work of the St. Petersburg Mining University of Empress Catherine II for the assistance and valuable recommendations during the implementation of this study. The research was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme № 123102000012-2 «Comprehensive study of aerodynamic characteristics of plasma systems of thermochemical fuel preparation», agreement № 075-03-2023-028/1 of 05.10.2023).

For citation: Romanova V.V., Batukhtin A.G., Suslov K.V., Khromov S.V., Galyatin V.A. Comprehensive assessment of factors affecting the operational reliability of low-voltage asynchronous electric motors of a coal mining complex. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2024; 26 (5): 3-18. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-5-3-18.

Введение и литературный обзор (Introduction and Literature review)

Эффективное функционирование угледобывающего предприятия зависит от стабильной и безаварийной работы отдельных его элементов, в частности асинхронных электродвигателей (АД), служащих электрическим приводом подавляющего большинства ответственных механизмов. Следует заметить, что роль низковольтных асинхронных электродвигателей в технологической цепочке угледобывающих комплексов очевидна и значима, выход из строя одного «звена» приводит к нарушению сложных технологических процессов, простоя технологической цепи, и в результате к снижению объёмов добычи [1].

Специфика работы предприятий угольной промышленности сопряжена сложными горно-геологическими и климатическими условиями добычи, соответственно, эксплуатация электрооборудования в подобных условиях обусловлена наличием агрессивной среды и повышенной запыленности [1]. Наряду с этим, необходимо выделить проблему низкого качества электрической энергии (КЭЭ) в электрических сетях, питающих предприятия минерально-сырьевого комплекса. Так, в результате проведённых инструментальных исследований в электрических сетях Забайкальской электроэнергетической системы [2] установлено следующее, что показатели качества электрической энергии (ПКЭ), такие как несимметрия и несинусоидальность напряжения, отклонение напряжения превышают в 2-3 раза нормируемое ГОСТ 32144 – 2013 [3] значение. Как отмечено в работах [2, 4], значительное отклонение от регламентируемых норм наблюдается по следующим показателям: K_{2U} , $K_{U(3)}$, $K_{U(5)}$, $K_{U(15)}$, $K_{U(21)}$. Очевидно, что особенности работы Забайкальской электроэнергетической системы с комплексом неблагоприятных факторов приводят к увеличению аварийности электрооборудования потребителей края, кроме того, к снижению надёжности и эффективности их функционирования.

Литературный обзор существующих проблем надёжности АД в условиях текущей эксплуатации [5-7] показывает, что техническое состояние и уровень надёжности асинхронных электродвигателей зависит от состояния изоляции обмоток. Согласно авторским сведениям отмечено следующее, что одной из причин выхода из строя электродвигателей является повреждение изоляции обмоток статора вследствие теплового воздействия.

Выполненные в работах авторов исследования особенностей [8-10] и условий эксплуатации асинхронных электродвигателей [11-13] указывают, что ряд внешних воздействующих факторов, таких как неудовлетворительное качество питающего напряжения, температура и влажность воздуха, атмосферное давление, запыленность, способствуют уменьшению охлаждения асинхронных электродвигателей, что неизбежно влечёт за собой дополнительный рост температуры отдельных частей электродвигателя, в конечном итоге приводит к перегреву изоляции обмоток. В связи с этим становится очевидным, что, нарушение теплового режима работы электродвигателей, при наличии сложных условий эксплуатации, неизбежно приводит к снижению срока службы АД. Согласно многочисленным исследованиям, проведённым авторами [8-10], установлено, что совокупное воздействие эксплуатационных факторов, существенно влияет на изменение срока службы электродвигателей.

Исходя из вышеизложенного, аргументируем, что, несмотря на наличие современных взглядов и достаточно глубокую проработку данной тематики, остаётся ряд нерешённых вопросов в контексте проблемы совокупного влияния факторов. Вследствие этого, требуется разработка новых направлений и подходов к оценке степени надёжности АД в условиях текущей эксплуатации на угольных разрезах со сложными горно-геологическими и климатическими условиями добычи, которым посвящена данная работа.

Основная цель работы заключается в количественной оценке эксплуатационных факторов, воздействующих на срок службы асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором.

Для достижения цели работы решены следующие задачи:

- проведён анализ проблемы эксплуатационной надёжности асинхронных электродвигателей, при этом определены факторы, оказывающие наибольшее влияние на стабильную работу электродвигателей, применяемых на предприятии компании АО «СУЭК» Забайкальского края;

- выполнен критический анализ фактического состояния КЭЭ электрических сетей 0,4; 6; 35 кВ электроэнергетической системы Забайкальского региона;

- разработаны методические основы реализации подхода, направленного на оценку, кроме того, обеспечение эффективной и безаварийной эксплуатации асинхронных электродвигателей, работающих на угольных разрезах открытого способа добычи.

Как известно, работа предприятий минерально-сырьевого комплекса неотъемлемо связана с рядом технологических сложностей, одной из которых является наличие повышенной запыленности атмосферы угольных разрезов [1]. Соответственно, в данных условиях особое внимание приобретает исследование и анализ процессов пылеобразования на предприятиях угольной промышленности.

В работе сосредоточено внимание на изучении изменения срока службы АД в зависимости от разных по физической основе факторов: электрических параметров – коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности, коэффициентов гармонических составляющих напряжения; параметров окружающей среды – температуры и влажности воздуха, запылённости.

Ключевым содержательным моментом в контексте реализации задач исследования является прогнозирование изменения реального срока службы электродвигателя в зависимости от совокупного воздействия факторов. Совершенно очевидно, что решение подобной задачи позволяет выявить уровень устойчивости АД к влиянию эксплуатационных факторов, установить их критические значения.

Именно поэтому, формализация комплексной оценки и анализ степени влияния эксплуатационных факторов являются основополагающими элементами в концепции обеспечения эффективной и безаварийной эксплуатации электродвигателей.

Научная значимость результатов исследования заключается в разработке методического подхода решения задач оценки надёжности АД, при влиянии внешних воздействующих факторов, путём прогнозирования реального срока их службы. Предлагаемый подход позволяет оценить уровень надёжности низковольтных асинхронных электродвигателей, эксплуатируемых на угольных разрезах открытого способа добычи.

Практическая значимость результатов исследования заключается в выявлении критических значений параметров эксплуатации низковольтных асинхронных электродвигателей, кроме того, в определении рекомендуемых режимов работы, способствующих продлению срока службы АД, при воздействии группы эксплуатационных факторов.

Материалы и методы (Materials and methods)

Развитие концептуального видения реализации методического подхода, позволяющего оценить уровень надёжности низковольтных асинхронных электродвигателей при работе в условиях угледобывающего комплекса со сложными горно-геологическими и климатическими условиями добычи, является основной задачей данного исследования.

В качестве объекта исследования рассмотрены асинхронные электродвигатели, применяемые на одном из предприятий компании АО «СУЭК» Забайкальского края. Основным видом деятельности предприятия является добыча бурого угля открытым способом.

В технологическом процессе угледобывающего предприятия задействованы одноковшовые шагающие экскаваторы (драглайны) ЭШ-10/70, необходимые для выемки большого объёма горных пород на вскрышных работах и отвалах карьера. Для

электроприводов главных механизмов шагающих экскаваторов (тяги, подъёма и шагания) применяются электродвигатели постоянного тока типа МПЭ 450-900, для электроприводов главных механизмов шагающих экскаваторов (поворота) электродвигатели постоянного тока типа МПВЭ 400-900. В процессе работы электродвигателей постоянного тока предусмотрен их обдув асинхронными электродвигателями с короткозамкнутым ротором серии АИР100S4.

В соответствии с изложенным в данной работе требуется выполнить исследование и детальный анализ режимов работы АД серии АИР100S4 с $P_n = 3$ кВт, номинальной частотой вращения 1500 об/мин. [14].

Как известно [15], показатели надёжности асинхронных электродвигателей имеют следующие значения – средний срок службы более 15 лет при наработке 40000 часов. Наряду с этим отметим, что стабильная и безаварийная работа асинхронных электродвигателей возможна при определенных условиях эксплуатации, обеспечивающих допустимый тепловой режим работы, установленный заводом изготовителем.

Методический подход, позволяющий оценить степень надёжности низковольтных асинхронных электродвигателей, эксплуатируемых на угольных разрезах открытого способа добычи, включает в себя: аналитический обзор эксплуатационных факторов, оказывающих наибольшее влияние на тепловой режим работы электродвигателей, методику определения теплового баланса АД, анализ экспериментальных исследований физико-химического состава пыли вблизи и на поверхности электродвигателей, компьютерное моделирование на основе системы Matlab/Simulink.

Предлагаемый методический подход представлен в следующей последовательности:

Шаг 1. Выполнение аналитического обзора эксплуатационных факторов, оказывающих наибольшее влияние на тепловой режим работы низковольтных асинхронных электродвигателей, эксплуатируемых в условиях угольного разреза со сложными горно-геологическими и климатическими условиями добычи, включающего детальный анализ экспериментальных исследований физико-химического состава пыли.

Принципы исследования запыленности на предприятии компании АО «СУЭК» Забайкальского края следующие:

- проанализирована запыленность на добычном и вскрышном участках, на постоянных автодорогах;
- измерения проводились счётным методом с помощью счётчика пылевых частиц DT9880 и весовым методом с применением сильфонного аспиратора, фильтров АФА-20.

Шаг 2. Уравнение теплового баланса АД для установившегося режима при искажениях напряжения выглядит следующим образом:

$$\sum \Delta P + \sum \Delta P_{ад} = K_{тo} \cdot \sum S_{п} \cdot (\Delta T_{дв} - \Delta T_{окр}), \quad (1)$$

где:

$\sum \Delta P$ – потери в АД в условиях отсутствия искажений напряжения, Вт;

$\sum \Delta P_{ад}$ – дополнительные потери в АД при искажениях напряжения, Вт;

$S_{п}$ – площадь поверхности теплоотдачи АД, м²;

$\Delta T_{дв}$ – температура на поверхности АД, °С;

$\Delta T_{окр}$ – температура окружающей среды, °С;

$K_{тo}$ – коэффициент теплоотдачи АД, Вт/(м²·°С).

Шаг 3. Определение потерь мощности в АД при условии отсутствия искажений напряжения.

Согласно [16], потери мощности в АД рассчитываются следующим образом:

$$\sum \Delta P = P_{з1} + P_{з2} + \Delta P_{мех}, \quad (2)$$

где:

$P_{з1}$ – электрические потери в обмотке статора АД, Вт;

$P_{з2}$ – электрические потери в обмотке ротора АД, Вт;

$\Delta P_{мех}$ – механические потери в АД, Вт.

Далее определим отдельные слагаемые формулы (2):

1) определение электрических потерь в обмотке статора

$$P_{з1} = 3 \cdot I_1^2 \cdot r_1, \quad (3)$$

2) определение электрических потерь в обмотке ротора

$$P_{з2} = 3 \cdot I_2^2 \cdot r_2, \quad (4)$$

где r_1 и r_2 – активные сопротивления обмоток фаз статора и ротора, в пересчёте на рабочую температуру $\theta_{раб}$:

$$r_1 = r_{1a} [1 + \alpha (\theta_{раб} - 20)]; \quad (5)$$

$$r_2 = r_{2a} [1 + \alpha (\theta_{рас} - 20)],$$

где:

r_{1a} и r_{2a} – активные сопротивления обмоток при температуре $\theta_{рас} = 20$ °C;

α – температурный коэффициент, для меди $\alpha = 0,004$;

3) определение механических потерь в АД согласно [15], по формуле:

$$\Delta P_{мех} = 1,3 \cdot (1 - D_a) \cdot \left(\frac{ng}{10}\right) D_a^4, \quad (6)$$

где:

ng – номинальная частота вращения АД, об/мин;

D_a – внешний диаметр обода ротора АД, м.

Шаг 4. Определение дополнительных тепловых потерь мощности в электродвигателе вследствие искажения напряжений.

Выполним расчёт дополнительных тепловых потерь мощности в АД согласно формуле Шидловского [17]:

$$\Delta P_{ад} = \frac{r_1 \cdot I_n^2}{\eta \cdot \cos \varphi} (2,41 \cdot K_{2U}^2 + 2 \sum_{v=2}^{\infty} \frac{U_v^2}{v \sqrt{v}}), \quad (7)$$

где:

r_1 – активные сопротивления обмоток фаз статора, Ом;

η – КПД АД, %;

K_{2U} – коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности, %;

U_v – отношение напряжения -й гармоники к номинальному;

v – порядковый номер гармоники;

I_n – пусковой ток АД, А.

Шаг 5. Определение изменения процесса теплоотдачи в результате потерь мощности АД. При этом требуется отследить динамику изменения коэффициента теплоотдачи при наличии пыли на корпусе электродвигателя.

Стоит отметить, что охлаждение электродвигателя осуществляется двумя способами – непосредственно теплоотдача с поверхности электродвигателя в окружающую среду, помимо этого, теплопередача с поверхности электродвигателя в окружающую среду через слой пыли. Принимаем, что в одной произвольной точке поверхности АД может быть только один способ передачи тепла. Следовательно, для отслеживания динамики изменения коэффициента теплоотдачи, необходимо ввести коэффициент, характеризующий величину покрытия пылью асинхронного электродвигателя (K_m). Соответственно, правая часть уравнения (1) будет состоять из двух слагаемых, расчёт которых необходимо выполнить в данном пункте работы.

Вследствие этого, рассмотрим слой пыли как однослойную плоскую стенку постоянной толщины [18], тогда:

$$Q = K_m / h \cdot \sum S_n \cdot (\Delta T_{дв} - \Delta T_{окр}), \quad (8)$$

где:

K_m – коэффициент теплопроводности пыли, Вт/(м °C);

h – толщина пыли, принятая 10 мм [19].

Тогда правая часть уравнения (1) примет следующий вид:

$$Q = \frac{K_m}{h} \cdot \sum S_n \cdot (\Delta T_{дв} - \Delta T_{окр}) \cdot K_{пп} + K_{то} \cdot \sum S_n \cdot (\Delta T_{дв} - \Delta T_{окр}) \cdot (1 - K_{пп}). \quad (9)$$

Кроме того, необходимо учесть влияние влажности воздуха на работу АД, для этого рассчитаем коэффициент теплоотдачи с поверхности электродвигателя:

$$K_{то} = \frac{Q_n}{\sum S_n (\Delta \vartheta_n)}, \quad (10)$$

где Q_n – количество теплоты, определяемое по формуле:

$$Q_n = \Delta \vartheta_n (c_n V), \quad (11)$$

где:

c_n – удельная теплоёмкость воздуха зависит от влажности воздуха (V_c), определяется в соответствии с [20];

V – необходимое количество охлаждающего воздуха, м³/с;

$\Delta \vartheta_n$ – превышение температуры охлаждающей среды.

$$V = m (n_k l_k + 100) \frac{n}{1000} \left(\frac{D_{мш}}{100}\right) \cdot 10^{-4}, \quad (12)$$

где:

n – количество пар полюсов;

m – коэффициент размерности электродвигателя, при $n = 2$, $m = 2,6$, а при $n = 4, 6, 8, 10$, $m = 3,15$;

n_k, l_k – число и длина радиальных вентиляционных каналов (при их отсутствии $n_k l_k = 0$);
 $D_{вн}$ – внешний диаметр АД, м.

Подставляя известные выражения в (1), получим уравнение следующего вида:

$$3 \cdot I_2^2 \cdot r_2 + \left(\frac{3 \cdot I_2^2 \cdot r_2}{s} - \eta \cdot P_1 \right) + 3 \cdot I_1^2 \cdot r_1 + \frac{r_1 \cdot I_1^2}{(\eta \cdot \cos \varphi)(2,41 \cdot K_{2U}^2 + 2 \sum_{v=3}^{\infty} \frac{U_v^2}{v \sqrt{v}})} =$$

$$= \frac{K_m}{h} \cdot \sum S_{\pi} \cdot (\Delta T_{дв} - \Delta T_{окр}) \cdot K_{\pi\pi} + K_{то} \cdot \sum S_{\pi} \cdot (\Delta T_{дв} - \Delta T_{окр})(1 - K_{\pi\pi}). \quad (13)$$

Шаг 6. Определение динамики изменения срока службы электродвигателя путём прогнозирования реального срока его службы в зависимости от сочетания воздействующих эксплуатационных факторов.

Учитывая полученные выше зависимости, выразим изменение срока службы асинхронного электродвигателя в виде:

$$z = e^{\frac{3 \cdot I_2^2 \cdot r_2 + \left(\frac{3 \cdot I_2^2 \cdot r_2}{s} - \eta \cdot P_1 \right) + 3 \cdot I_1^2 \cdot r_1 + \frac{r_1 \cdot I_1^2}{(\eta \cdot \cos \varphi)(2,41 \cdot K_{2U}^2 + 2 \sum_{v=3}^{\infty} \frac{U_v^2}{v \sqrt{v}})}{\frac{K_m}{h} \cdot S_{\pi} \cdot K_{\pi\pi} + S_{\pi}(c_B V)(1 - K_{\pi\pi})}}}$$

$$\quad (14)$$

Динамику изменения срока службы асинхронного электродвигателя относительно нормативного рассчитаем по следующей формуле:

$$\Delta Z = Z(1 - z), \quad (15)$$

где $Z = 15$ лет – нормативный срок службы электродвигателя.

Итак, после процедуры подготовки необходимых исходных параметров приступаем к процессу моделирования теплового режима работы АД.

Шаг 7. Выполним процесс моделирования теплового режима работы АД при его эксплуатации с наличием внешних воздействующих факторов, предварительно сформировав модель исследования (рис. 1).

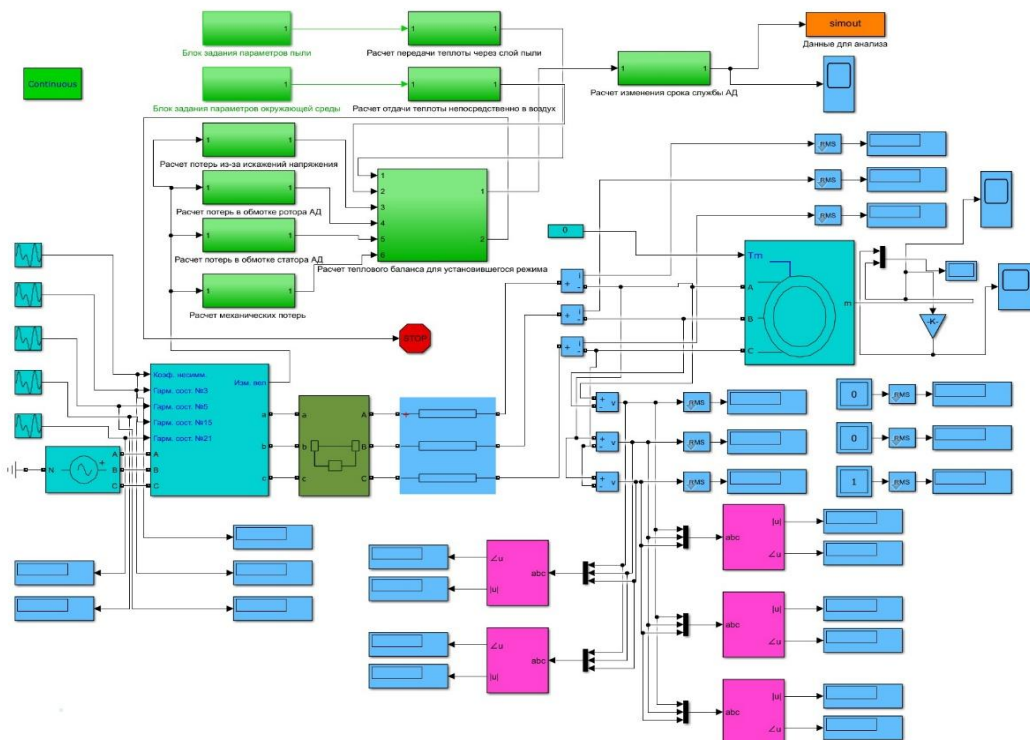


Рис. 1. Компьютерная модель исследования

Fig. 1. Computer model of the study

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Разработанная модель исследования позволяет выполнять процедуру имитации работы электродвигателя при различных заданных условиях эксплуатации.

Моделирование режима работы, исследуемого электродвигателя, выполнено путём изменения следующих параметров эксперимента:

– величины суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (K_U) – от 4 до 12% с диапазоном в 2%;

- величины коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности (K_{2U}) – от 0 до 4% с диапазоном в 1%;
- величины температуры окружающей среды ($\Delta T_{окр}$) – от - 30⁰С до + 30⁰С с диапазоном в 10⁰С;
- величины влажности воздуха (V_c) – 20% и 60%;
- величины коэффициента теплопроводности пыли (K_m) – 0,12 и 0,28, принятые в соответствии с [21].

При этом в исследованиях приняты условия:

- величина суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения состоит из следующих слагаемых $K_{U(3)}$, $K_{U(5)}$, $K_{U(15)}$, $K_{U(21)}$, определяемая согласно [22];
- величина коэффициента теплопроводности пыли, прежде всего, зависит от состава пыли.

Исходя из этого, в исследованиях рассмотрены два типа пыли, образовавшиеся в результате вскрышных работ, это каменноугольная пыль с коэффициентом теплопроводности, составляющим 0,12 и каменноугольная пыль с включениями кварцевой пыли, с коэффициентом теплопроводности, составляющим 0,28.

В ходе экспериментов исследуемые параметры оставались неизменными на протяжении одной итерации моделирования.

Результаты и обсуждение (Results and discussions)

Опираясь на полученные результаты моделирования, построены графические интерпретации (рис. 2-9), наглядно иллюстрирующие динамику изменения срока службы асинхронного электродвигателя в зависимости от совокупности воздействующих эксплуатационных факторов, позволяющие выявить уровень устойчивости электродвигателя к влиянию определённых эксплуатационных факторов, установить их критические значения.

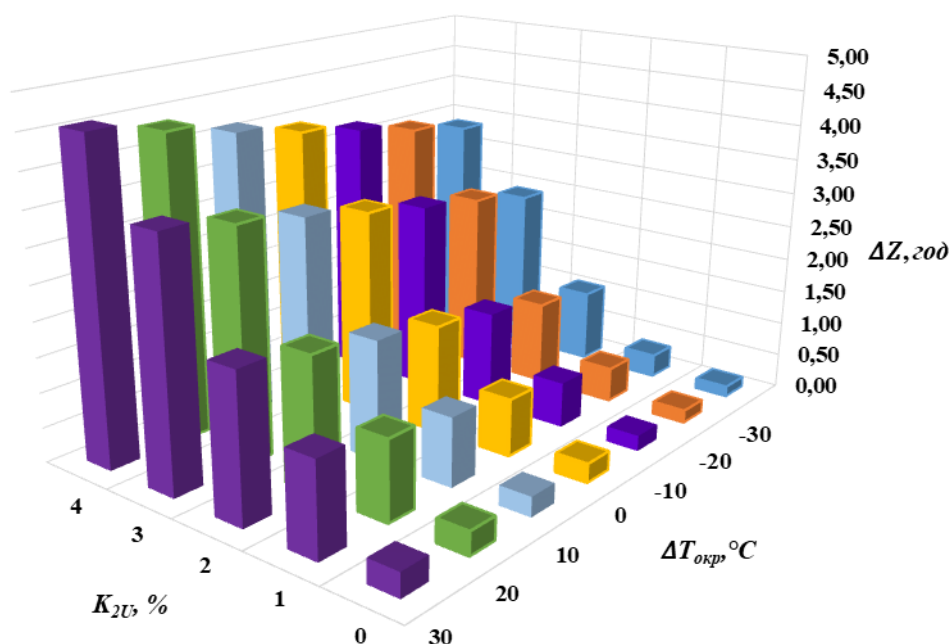


Рис. 2. Графическая интерпретация варьирования срока службы асинхронного электродвигателя от K_{2U} , при различной температуре окружающей среды с $K_m = 0,12$, $V_c = 20\%$

Fig. 2. Graphical interpretation of the variation in the service life of an asynchronous electric motor from K_{2U} , at different ambient temperatures with $K_m = 0,12$, $V_c = 20\%$

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

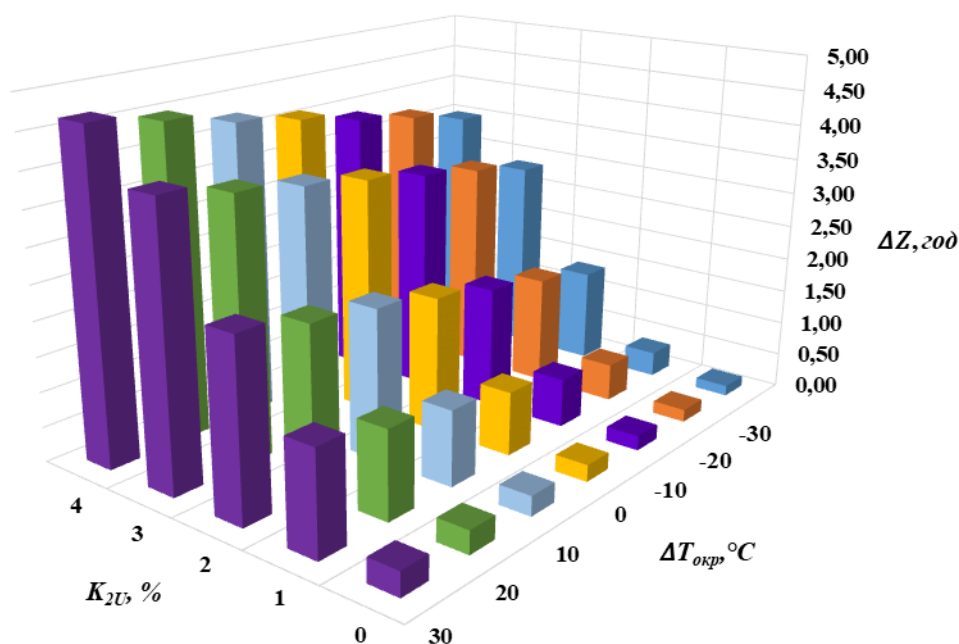


Рис. 3. Графическая интерпретация варьирования срока службы асинхронного электродвигателя от K_{2U} , при различной температуре окружающей среды с $K_m = 0,28$, $V_c = 20\%$

Fig. 3. Graphical interpretation of the variation in the service life of an asynchronous electric motor from K_{2U} , at different ambient temperatures with $K_m = 0,28$, $V_c = 20\%$

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

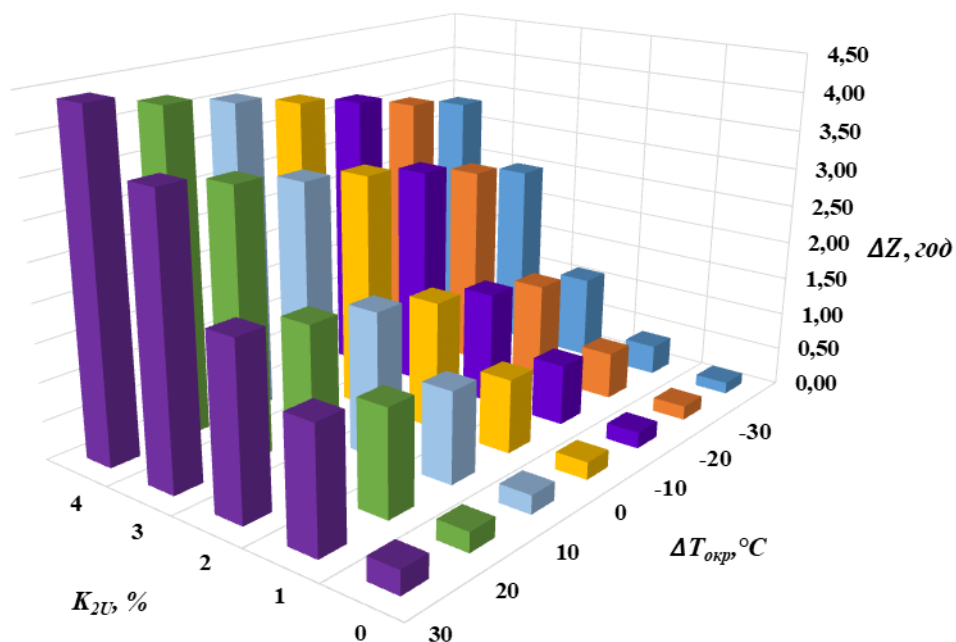


Рис. 4. Графическая интерпретация варьирования срока службы асинхронного электродвигателя от K_{2U} , при различной температуре окружающей среды с $K_m = 0,12$, $V_c = 60\%$

Fig. 4. Graphical interpretation of the variation in the service life of an asynchronous electric motor from K_{2U} , at different ambient temperatures with $K_m = 0,12$, $V_c = 60\%$

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

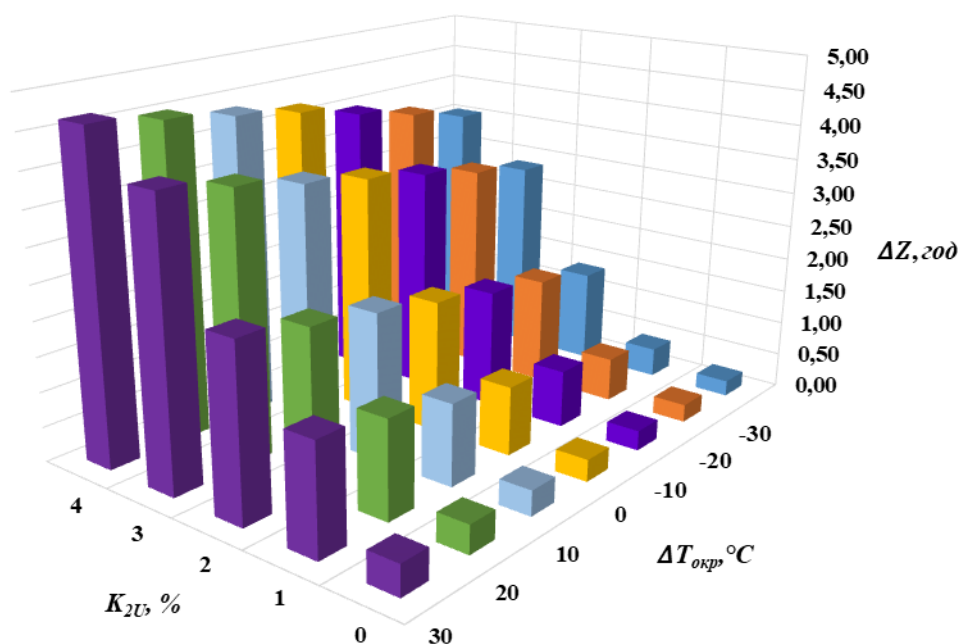


Рис. 5. Графическая интерпретация варьирования срока службы асинхронного электродвигателя от K_{2U} , при различной температуре окружающей среды с $K_m = 0,28$, $V_c = 60\%$

Fig. 5. Graphical interpretation of the variation in the service life of an asynchronous electric motor from K_U , at different ambient temperatures with $K_m = 0,28$, $V_c = 60\%$

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

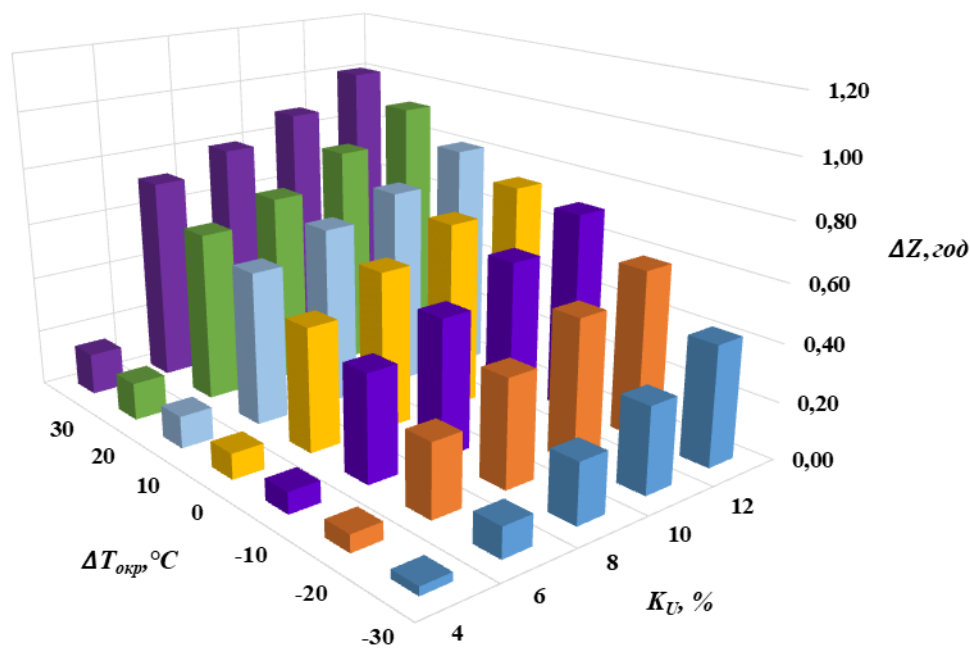


Рис. 6. Графическая интерпретация варьирования срока службы асинхронного электродвигателя от K_U , при различной температуре окружающей среды с $K_m = 0,12$, $V_c = 20\%$

Fig. 6. Graphical interpretation of the variation in the service life of an asynchronous electric motor from K_U , at different ambient temperatures with $K_m = 0,12$, $V_c = 20\%$

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

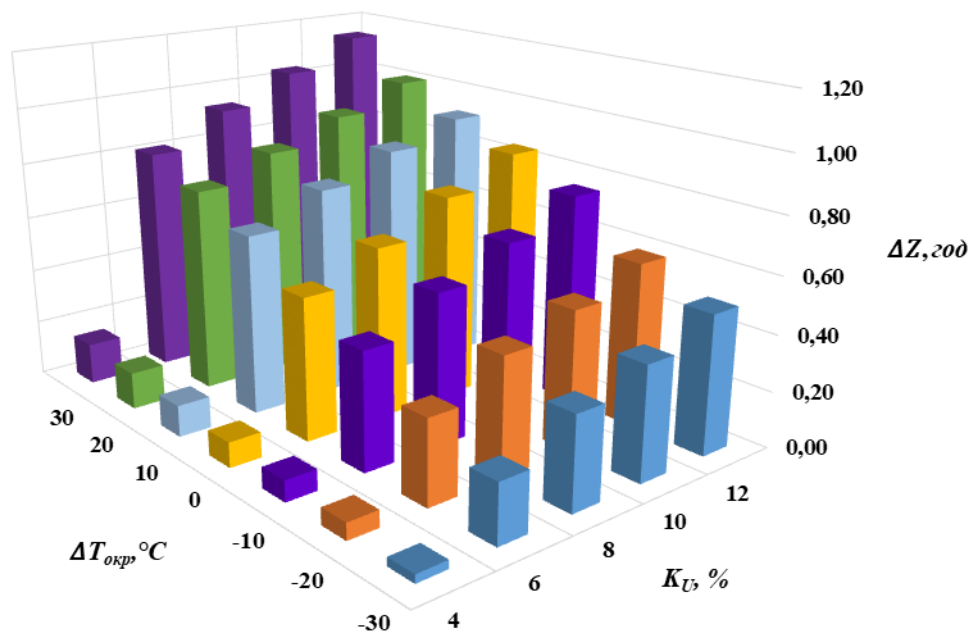


Рис. 7. Графическая интерпретация варьирования срока службы асинхронного электродвигателя от K_U , при различной температуре окружающей среды с $K_m = 0,28$, $V_c = 20\%$

Fig. 7. Graphical interpretation of the variation in the service life of an asynchronous electric motor from K_U , at different ambient temperatures with $K_m = 0,28$, $V_c = 20\%$

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

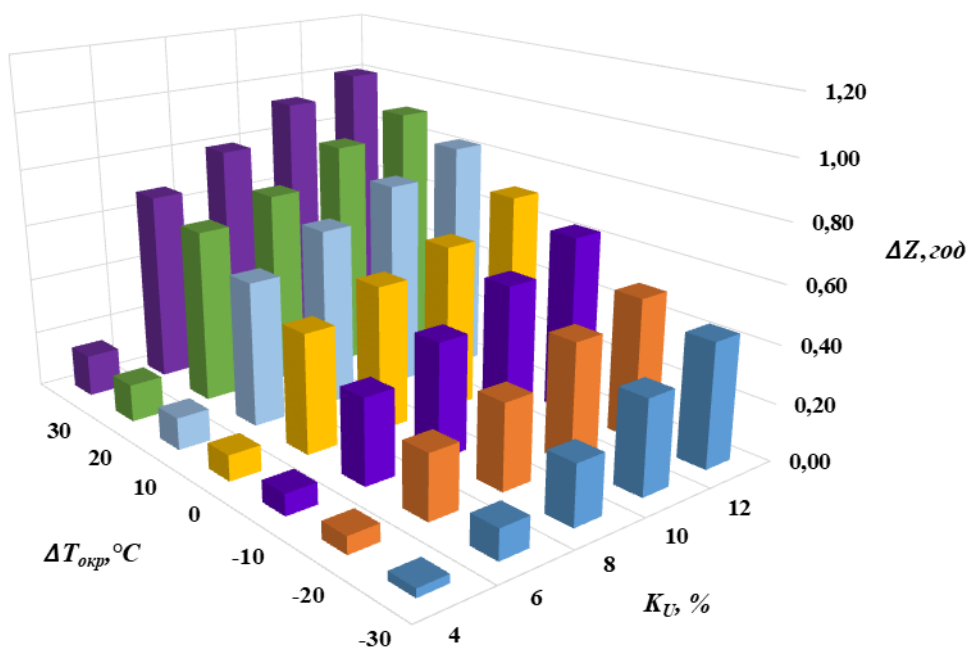


Рис. 8. Графическая интерпретация варьирования срока службы асинхронного электродвигателя от K_U , при различной температуре окружающей среды с $K_m = 0,12$, $V_c = 60\%$

Fig. 8. Graphical interpretation of the variation in the service life of an asynchronous electric motor from K_U , at different ambient temperatures with $K_m = 0,12$, $V_c = 60\%$

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

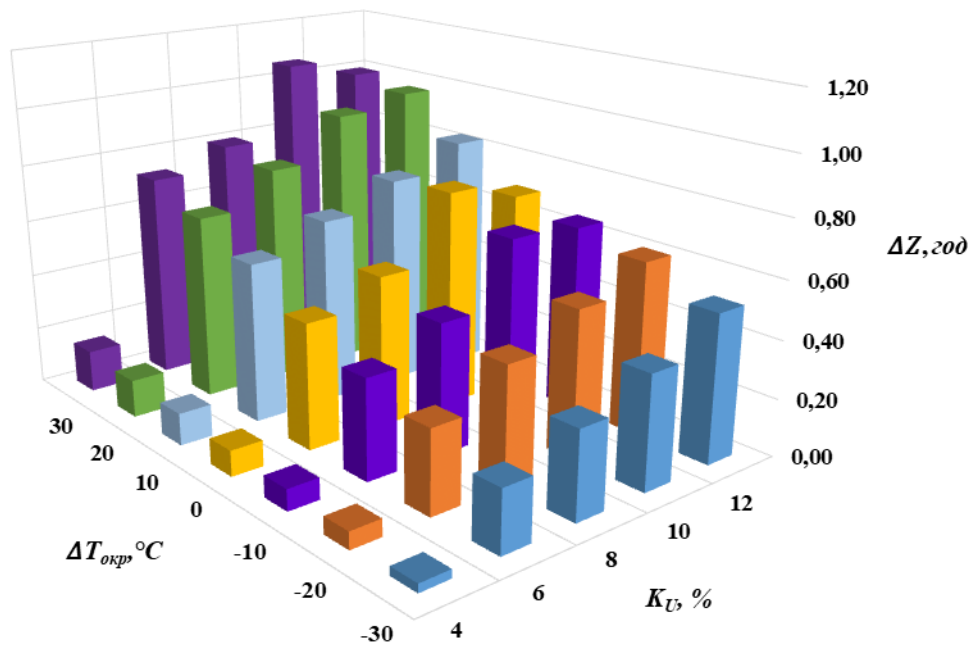


Рис. 9. Графическая интерпретация варьирования срока службы асинхронного электродвигателя от K_U , при различной температуре окружающей среды с $K_m = 0,28$, $V_c = 60\%$

Fig. 9. Graphical interpretation of the variation in the service life of an asynchronous electric motor from K_U , at different ambient temperatures with $K_m = 0,28$, $V_c = 60\%$

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Анализ изображённых на (рис. 2-5) графических интерпретаций свидетельствует о том, что снижение срока службы АД:

1) в случае каменноугольной пыли с $K_m = 0,12$ и $V_c = 20\%$ составляет, соответственно:

- при $\Delta T_{окр} = -30^\circ\text{C}$ с $K_{2U} = 2\%$ $\Delta Z = 1,58$ года, при $K_{2U} = 4\%$ $\Delta Z = 3,72$ года;
- при $\Delta T_{окр} = -30^\circ\text{C}$ с $K_{2U} = 2\%$ $\Delta Z = 1,59$ года, при $K_{2U} = 4\%$ $\Delta Z = 3,77$ года;
- при $\Delta T_{окр} = 0^\circ\text{C}$ с $K_{2U} = 2\%$ $\Delta Z = 1,97$ года, при $K_{2U} = 4\%$ $\Delta Z = 4,1$ года;
- при $\Delta T_{окр} = 0^\circ\text{C}$ с $K_{2U} = 2\%$ $\Delta Z = 1,98$ года, при $K_{2U} = 4\%$ $\Delta Z = 4,2$ года;
- при $\Delta T_{окр} = +30^\circ\text{C}$ с $K_{2U} = 2\%$ $\Delta Z = 2,48$ года, при $K_{2U} = 4\%$ $\Delta Z = 4,65$ года;
- при $\Delta T_{окр} = +30^\circ\text{C}$ с $K_{2U} = 2\%$ $\Delta Z = 2,54$ года, при $K_{2U} = 4\%$ $\Delta Z = 4,67$ года;

2) в случае каменноугольной пыли с $K_m = 0,28$ и $V_c = 60\%$ составляет:

- при $\Delta T_{окр} = -30^\circ\text{C}$ с $K_{2U} = 2\%$ $\Delta Z = 1,05$ года, при $K_{2U} = 4\%$ $\Delta Z = 3,35$ года;
- при $\Delta T_{окр} = -30^\circ\text{C}$ с $K_U = 2\%$ $\Delta Z = 1,11$ года, при $K_{2U} = 4\%$ $\Delta Z = 3,38$ года;
- при $\Delta T_{окр} = 0^\circ\text{C}$ с $K_{2U} = 2\%$ $\Delta Z = 1,56$ года, при $K_{2U} = 4\%$ $\Delta Z = 3,92$ года;
- при $\Delta T_{окр} = 0^\circ\text{C}$ с $K_{2U} = 2\%$ $\Delta Z = 1,71$ года, при $K_{2U} = 4\%$ $\Delta Z = 3,98$ года;
- при $\Delta T_{окр} = +30^\circ\text{C}$ с $K_{2U} = 2\%$ $\Delta Z = 2,1$ года, при $K_{2U} = 4\%$ $\Delta Z = 4,56$ года;
- при $\Delta T_{окр} = +30^\circ\text{C}$ с $K_{2U} = 2\%$ $\Delta Z = 2,22$ года, при $K_{2U} = 4\%$ $\Delta Z = 4,57$ года.

Графические отображения, проиллюстрированные на (рис. 6 - 9), показывают, что снижение срока службы АД:

1) в случае каменноугольной пыли с включениями кварцевой пыли с $K_m = 0,12$ и $V_c = 20\%$ составляет:

- при $\Delta T_{окр} = -30^\circ\text{C}$ с $K_U = 8\%$ $\Delta Z = 0,39$ года;
- при $\Delta T_{окр} = -30^\circ\text{C}$ с $K_U = 8\%$ $\Delta Z = 0,41$ года;
- при $\Delta T_{окр} = 0^\circ\text{C}$ с $K_U = 8\%$ $\Delta Z = 0,74$ года;
- при $\Delta T_{окр} = 0^\circ\text{C}$ с $K_U = 8\%$ $\Delta Z = 0,76$ года;
- при $\Delta T_{окр} = +30^\circ\text{C}$ с $K_U = 8\%$ $\Delta Z = 1,04$ года;
- при $\Delta T_{окр} = +30^\circ\text{C}$ с $K_{UU} = 8\%$ $\Delta Z = 1,06$ года;

2) в случае каменноугольной пыли с включениями кварцевой пыли с $K_m = 0,28$ и $V_c = 60\%$ составляет:

- при $\Delta T_{окр} = -30^\circ\text{C}$ с $K_U = 8\%$ $\Delta Z = 0,3$ года;

- при $\Delta T_{\text{окр}} = -30^{\circ}\text{C}$ с $K_U = 8\%$ $\Delta Z = 0,33$ года;
- при $\Delta T_{\text{окр}} = 0^{\circ}\text{C}$ с $K_U = 8\%$ $\Delta Z = 0,59$ года;
- при $\Delta T_{\text{окр}} = 0^{\circ}\text{C}$ с $K_U = 8\%$ $\Delta Z = 0,66$ года;
- при $\Delta T_{\text{окр}} = +30^{\circ}\text{C}$ с $K_U = 8\%$ $\Delta Z = 0,89$ года;
- при $\Delta T_{\text{окр}} = +30^{\circ}\text{C}$ с $K_U = 8\%$ $\Delta Z = 1,06$ года.

Проведенные исследования доказали влияние эксплуатационных факторов на срок службы асинхронного электродвигателя, наряду с этим установлено, что максимальная величина варьирования срока службы наблюдается при наличии каменноугольной пыли $K_m = 0,12$ с сочетанием следующих параметров $K_{2U} = 4\%$, $V_c = 20\%$, $\Delta T_{\text{окр}} = +30^{\circ}\text{C}$ и составляет $\Delta Z = 4,67$ года.

Исходя из полученных результатов исследования, сформулируем следующие выводы:

1. Исследования в контексте оценки факторов, воздействующих на эксплуатационную надёжность низковольтных асинхронных электродвигателей угледобывающего предприятия выполнены на основе прогнозирования изменения срока службы АД. Следует отметить, что сосредоточено внимание на изменении срока службы АД в зависимости от разных по физической основе факторов: электрических параметров – коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности, коэффициентов гармонических составляющих напряжения; параметров окружающей среды – температуры и влажности воздуха, запылённости. Соответственно, концепция данного исследования является принципиальным методическим подходом, позволяющим оценить степень надёжности низковольтных асинхронных электродвигателей, эксплуатируемых на угольных разрезах открытого способа добычи.

2. Необходимо подчеркнуть, что воздействие эксплуатационных факторов значительно снижают уровень надёжности асинхронных электродвигателей, уменьшая срок их службы. Так, в работе реализована оценка влияния различных эксплуатационных факторов, в результате которой выявлен показатель качества электрической энергии – K_{2U} , имеющий наибольшее воздействие на изменение срока службы АД. Кроме того, установлено, что величина воздействия пыли на срок службы АД зависит от её физико-химического состава. Так, например, максимальное изменение срока службы электродвигателей при каменноугольной пыли с $K_m = 0,12$, и $V_c = 60\%$ составило $\Delta Z = 4,65$ года, а для каменноугольной пыли с включениями кварцевой пыли с $K_m = 0,28$ и $V_c = 60\%$ составило $\Delta Z = 4,56$ года. Отмечено, что максимальная величина варьирования срока службы наблюдается при наличии каменноугольной пыли $K_m = 0,12$ с сочетанием следующих параметров $K_{2U} = 4\%$, $V_c = 20\%$, $\Delta T_{\text{окр}} = +30^{\circ}\text{C}$ и составляет $\Delta Z = 4,67$ года.

Следовательно, аргументируем следующее, что степень устойчивости электродвигателей к воздействию запыленности зависит от состава пыли, который определяет совокупную величину её теплопроводности.

3. Согласно проведённым исследованиям рекомендуемый режим работы АД, эксплуатируемых на угольных разрезах открытого способа добычи при одновременном воздействии факторов составляет следующие значения – $K_{2U} \leq 2\%$, $K_U \leq 8\%$, $20 \leq V_c \leq 50\%$, $-30^{\circ}\text{C} \leq \Delta T_{\text{окр}} \leq +20^{\circ}\text{C}$.

Следственно, с учётом изложенного отметим, что на основании разработанного подхода выявлены критические значения параметров эксплуатации низковольтных асинхронных электродвигателей.

4. Очевидно, что необходимо придерживаться соблюдения рекомендуемых параметров эксплуатации электродвигателей при их работе. В случае выхода из строя электродвигателей, с целью сохранения объёмов добычи угледобывающего предприятия, должно предусматриваться быстрое восстановление работоспособности электроприводных механизмов, которое обеспечивается за счёт «горячего резерва» электродвигателей на предприятии.

5. Стабильная и безаварийная работа асинхронных электродвигателей несомненно зависит от условий их эксплуатации, в связи с этим внедрение системы организационных и технических воздействий, направленных на поддержание технического состояния путём коррекции искажений напряжения, кроме того, визуальный осмотр и своевременное обслуживание, способствуют их длительной работе.

Заключение (Conclusions)

В работе представлено концептуальное видение реализации методического подхода, позволяющего оценить уровень надёжности низковольтных асинхронных электродвигателей при работе в условиях угледобывающего комплекса со сложными горно-

геологическими и климатическими условиями добычи. Становится очевидным, что тенденции решения вопросов надёжного функционирования угледобывающего предприятия с наличием асинхронных электродвигателей и обеспечение их эффективной эксплуатации являются наиболее приоритетными, главным образом, ориентированными на поддержание стабильности технологических процессов и сохранения объёмов добычи угледобывающего предприятия.

Литература

1. Афанасьев В. Я. Уголь России: состояние и перспективы: Монография / В.Я. Афанасьев, Ю.Н. Линник, В.Ю. Линник. М.: НИЦ ИНФРА-М. 2017. 271 с.
2. Коверникова Л.И., Шамонов Р.Г., Суднова В.В. Качество электрической энергии, современное состояние, проблемы, предложения по их решению: монография / отв. ред. Н.И. Воропай. Новосибирск: Наука. 2017. 219 с.
3. ГОСТ 32144 – 2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014. 19 с.
4. Zapanov O.V., Kovernikova L.I. On the power quality of electrical energy supplied to joint stock company «Aleksandrovsky mine» / E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 209 (07012). p.6. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020907012>.
5. Назарычев А.Н. Надёжность и оценка технического состояния оборудования систем электроснабжения / А.Н. Назарычев, Д.С. Крупенёв. Новосибирск: Наука. 2020. 224 с.
6. Хомутов С.О. Анализ влияния внешних воздействующих факторов на состояние изоляции электродвигателей // Ползуновский вестник. Барнаул: Издательский центр АлтГТУ им. И.И. Ползунова. 2005. №4. Ч.3. С. 260 – 267.
7. Sebok M., Guttien M., Kucera M., Korenciak D. Condition analysis of electrical machines by thermovision. Przegląd Elektrotechniczny. 2020. 96(8). pp. 47 – 50. DOI: <https://doi.org/10.15199/48.2020.08.10>.
8. Romanova V.V., Suslov K.V., Khromov S.V. Multi-factor analysis of external effects influencing the operational reliability of asynchronous electric motors // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 216 (01084). p.4. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021601084>.
9. Mohammed J.A-K., Al-Sakini S.R., Hussein A.A. Assessment of disturbed voltage supply effects on steady-state performance of an induction motor // International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE). 2020. Vol. 10. № 3. pp. 2259 – 2270. DOI: <http://doi.org/10.11591/ijece.v10i3.pp2259-2270>.
10. Sorin Deleanu, Mihai Iordache, Marilena Stanculescu, Dragos Niculae. The Induction Machine Operating from a Voltage Supply, Unbalanced and Polluted with Harmonics: A Practical Approach, 15th International Conference on Engineering of Modern Electric Systems (EMES), Oradea, Romania. 2019. pp. 181 – 184.
11. Романова В.В., Суслов К.В., Хромов С.В., Батухтин А.Г. Анализ степени влияния несимметрии питающего напряжения на эксплуатационную надёжность низковольтных асинхронных электродвигателей // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2022. Т.24. № 4. С.131 – 141. DOI:10.30724/1998-9903-2022-24-4-131-141.
12. Tabora J.M., de Matos E.O., Soares T.M., Tostes M.E. Voltage unbalance effect on the behavior of IE2, IE3 and IE4 induction motor classes // Proc. on VII Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE). Santo André, São Paulo, Brazil. 2020. p.6. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3029794>.
13. Romanova V.V., Suslov K.V., Khromov S.V. Ensuring the reliability of power supply systems by improving the quality of electrical energy // AIP Conference Proceedings. 2023. Vol. 2552 (070017). 7 p. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0117210>.
14. Технические характеристики асинхронных электродвигателей серии АИР. Номинальная частота вращения 1500 об/мин [Электронный ресурс]. URL: <http://www.elektrikii.ru/publ/6-1-0-55>. Ссылка активна на 08 июня 2024.
15. Копылов И. П. Проектирование электрических машин, 4-е изд., перераб. и доп. М.: Издательство Юрайт. 2024. 828 с.
16. Шайтор Н. М. Расчёт и анализ температурных полей асинхронных двигателей / Н. М. Шайтор, А. С. Велияев // Энергетические установки и технологии. 2021. Т. 7. № 2. С. 112 – 118.
17. Шидловский А.К. Повышение качества энергии в электрических сетях / А.К. Шидловский, В.Г. Кузнецов. Киев: Наукова думка. 1985. 268 с.
18. Кудинов В. А. Техническая термодинамика и теплопередача / В. А. Кудинов, Э. М. Карташов, Е. В. Стефанюк. М.: Издательство Юрайт. 2024. 454 с.
19. Sharov N.A., Dudayev R.R., Krishchuk D.I., Liskova M.Yu. Dust suppression methods in coal mines of the Far North. Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering. 2019. Vol.19. №2. pp.184 – 200. DOI: 10.15593/2224-9923/2019.2.8.
20. ГОСТ IEC 60034-2A-2012. Машины электрические вращающиеся. Часть 2 – Методы определения потерь и коэффициента полезного действия вращающихся электрических машин при испытаниях (исключая машины для тяговых транспортных средств). Измерение потерь калориметрическим методом. М.: Стандартинформ, 2014. 19 с.
21. Краснощеков Е.А., Сукомел А.С. Задачник по теплопередаче: Учеб. пособие для вузов. – 4-е изд., перераб. М.: Энергия. 1980. 288 с.
22. ГОСТ 30804.4.7 – 2013 (IEC 61000-4-7:2009). Совместимость технических средств электромагнитная. Общее руководство по средствам измерений и измерениям гармоник и

интергармоник для систем электроснабжения и подключаемых к ним технических средств. М.: Стандартинформ, 2013. 34 с.

Авторы публикации

Романова Виктория Викторовна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Энергетики» Забайкальского государственного университета; канд. техн. наук, доцент кафедры «Энергетики» филиала Национального исследовательского университета «Московский энергетический институт» в г. Волжском. ORCID*: <http://orcid.org/0000-0002-3465-4315>. E-mail: romanova181@mail.ru

Батухтин Андрей Геннадьевич – д-р техн. наук, доцент, декан Энергетического факультета Забайкальского государственного университета. ORCID*: <http://orcid.org/0000-0002-3798-3675>. E-mail: batuhtina_ir@mail.ru

Сулов Константин Витальевич – д-р техн. наук, доцент кафедры «Гидроэнергетика и возобновляемые источники энергии» Национального исследовательского университета «Московский энергетический институт»; гл. науч. сотр. научно-исследовательской лаборатории «Энергосбережения и плазменных технологий» Забайкальского государственного университета. ORCID*: <http://orcid.org/0000-0003-0484-2857>. E-mail: dr.souslov@yandex.ru

Хромов Сергей Владимирович – ст. преподаватель кафедры «Энергетики» Забайкальского государственного университета. ORCID*: <http://orcid.org/0000-0002-1234-9934>. E-mail: sergeixrom@inbox.ru

Галятин Владислав Алексеевич – студент кафедры «Строительство» Забайкальского государственного университета. ORCID*: <http://orcid.org/0000-0003-4358-7633>. E-mail: galiatin01@mail.ru

References

1. Afanasyev VYa. *Ugol' Rossii: sostojanie i perspektivy*. М.: SIC INFRA-M. 2017; 271 p. (In Russ).
2. Kovernikova LI, Shamonov RG, Sudnova VV. *Kachestvo jelektricheskoy jenerгии, sovremennoe sostojanie, problemy, predlozheniya po ih resheniju*. ed. by N.I. Voropai. Novosibirsk: Nauka. 2017; 219 p. (In Russ).
3. GOST 32144 – 2013. Electrical energy. Electromagnetic compatibility of technical means. Standards of quality of electric energy in general-purpose power supply systems. Moscow: Standartinform. 2014; 19 p. (In Russ).
4. Zapanov OV, Kovernikova LI. On the power quality of electrical energy supplied to joint stock company «Aleksandrovsky mine». *E3S Web of Conferences*. 2020; 209 (07012): 6. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020907012>.
5. Nazarychev AN. Reliability and assessment of the technical condition of the equipment of power supply systems. 2020; 224 p. (In Russ).
6. Khomutov SO. Analysis of the influence of external influencing factors on the state of insulation of electric motors. *Polzunovskiy vestnik*. 2005; 4(3): 260 – 267. (In Russ).
7. Sebok M, Gutten M, Kucera M, et al. Condition analysis of electrical machines by thermovision. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2020; 96(8): 47 – 50. DOI: <https://doi.org/10.15199/48.2020.08.10>.
8. Romanova VV, Suslov KV, Khromov SV. Multi-factor analysis of external effects influencing the operational reliability of asynchronous electric motors. *E3S Web of Conferences*. 2020; 216 (01084): 4. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021601084>.
9. Mohammed JA-K, Al-Sakini SR, Hussein AA. Assessment of disturbed voltage supply effects on steady-state performance of an induction motor. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. 2020; 10(3): 2259 – 2270. DOI: <http://doi.org/10.11591/ijece.v10i3.pp2259-2270>.
10. Sorin D, Mihai I, Marilena S, et al. The Induction Machine Operating from a Voltage Supply, Unbalanced and Polluted with Harmonics: A Practical Approach, *15th International Conference on Engineering of Modern Electric Systems (EMES)*, Oradea, Romania. 2019; 181 – 184.
11. Romanova VV, Suslov KV, Khromov SV, Batukhtin AG. Analysis of the degree of influence of the asymmetry of the supply voltage on the operational reliability of low-voltage asynchronous electric motors. *Proceedings of the higher educational institutions. Energy sector problems*. 2022; 24(4): 131 – 141. DOI: [10.30724/1998-9903-2022-24-4-131-141](https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-4-131-141). (In Russ).
12. Tabora JM, de Matos EO, Soares TM, et al. Voltage unbalance effect on the behavior of IE2, IE3 and IE4 induction motor classes. *Proc. on VII Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE)*. Santo 2020; 6. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3029794>.
13. Romanova VV, Suslov KV, Khromov SV. Ensuring the reliability of power supply systems by improving the quality of electrical energy. *AIP Conference Proceedings*. 2023; 2552 (070017): 7. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0117210>.

14. *Tekhnicheskie kharakteristiki asinkhronnykh elektrodvigateli serii AIR. Nominal'naya chastota vrashcheniya 1500 ob/min* [Electronic resource]. URL: [http:// www.elektrikii.ru/publ/6-1-0-55](http://www.elektrikii.ru/publ/6-1-0-55). Accessed: 08 June 2024. (In Russ).
15. Kopylov IP. *Proektirovanie jelektricheskikh mashin*. M.: Yurayt Publishing House. 4th ed. 2024; 828 p. (In Russ).
16. Shaitor NM. Calculation and analysis of temperature fields of asynchronous motors. *Power plants and technologies*. 2021; 7(2): 112 – 118. (In Russ).
17. Shidlovsky AK. *Povyshenie kachestva jenerгии v jelektricheskikh setjah*. Kiev: Naukova dumka. 1985; 268 p. (In Russ).
18. Kudinov VA. *Tekhnicheskaja termodinamika i teploperedacha*. M.: Yurayt Publishing House. 4th ed. 2024; 454 p. (In Russ).
19. Sharov NA, Dudayev RR, Krishchuk DI, Liskova MYu. Dust suppression methods in coal mines of the Far North. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*. 2019; 19(2): 184 – 200. DOI: 10.15593/2224-9923/2019.2.8.
20. GOST IEC 60034-2A-2012. Electric rotating machines. Part 2 – Methods for determining losses and efficiency of rotating electric machines during tests (excluding machines for traction vehicles). Measurement of losses by the calorimetric method. Moscow: Standartinform, 2014; 19 p. (In Russ).
21. Krasnoshchekov EA, Sukomel AS. *Zadachnik po teploperedache*. 4th ed. M.: Energy. 1980; 288 p. (In Russ).
22. GOST 30804.4.7 – 2013 (IEC 61000-4-7:2009). Electromagnetic compatibility of technical means. General guidance on measuring instruments and measurements of harmonics and interharmonics for power supply systems and technical means connected to them. Moscow: Standartinform, 2013; 34 p. (In Russ).

Authors of the publication

Victoria V. Romanova – Trans-Baikal State University, Chita, Russia; Branch of the National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Volzhsky, Russia. ORCID*: <http://orcid.org/0000-0002-3465-4315>. E-mail: romanova181@mail.ru

Andrey G. Batukhtin – Trans-Baikal State University, Chita, Russia. ORCID*: <http://orcid.org/0000-0002-3798-3675>. E-mail: batuhtina_ir@mail.ru

Konstantin V. Suslov – National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russia; Trans-Baikal State University, Chita, Russia. ORCID*: <http://orcid.org/0000-0003-0484-2857>. E-mail: dr.souslov@yandex.ru

Sergey V. Khromov – Trans-Baikal State University, Chita, Russia. ORCID*: <http://orcid.org/0000-0002-1234-9934>. E-mail: sergeixrom@inbox.ru

Vladislav A. Galyatin – Trans-Baikal State University, Chita, Russia. ORCID*: <http://orcid.org/0000-0003-4358-7633>. E-mail: galiatin01@mail.ru

Шифр научной специальности: 2.4.2 Электротехнические комплексы и системы

Получено	29.07.2024 г.
Отредактировано	21.08.2024 г.
Принято	02.09.2024 г.