



## АНАЛИЗ СТЕПЕНИ ВЛИЯНИЯ НЕСИММЕТРИИ ПИТАЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННУЮ НАДЁЖНОСТЬ НИЗКОВОЛЬТНЫХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Романова<sup>1</sup> В.В., Хромов<sup>1</sup> С.В., Батухтин<sup>1</sup> А.Г., Сулов<sup>2</sup> К.В.

<sup>1</sup>Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия

<sup>2</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Россия

<http://orcid.org/0000-0002-3465-4315>, romanova181@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0002-1234-9934>, sergeixrom@inbox.ru

<http://orcid.org/0000-0002-3798-3675>, batuhitina\_ir@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0003-0484-2857>, souslov@istu.edu

**Резюме:** ЦЕЛЬ. Актуальность исследования заключается в комплексном обосновании вопросов, направленных на обеспечение эффективного функционирования электротехнического комплекса с наличием электродвигательной нагрузки в условиях некачественного питающего напряжения. Целью работы является исследование влияния несимметрии питающего напряжения на срок службы асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором. Основное внимание уделено динамике изменения срока службы низковольтных асинхронных электродвигателей различных серий в зависимости от уровня несимметрии напряжений. В качестве объекта исследования выделены асинхронные электродвигатели классической серии (4А, АИ) и модернизированной (5А, АИ'). Как известно, эффективное и надёжное функционирование электродвигателей характеризуется сроком службы изоляции обмоток. Количественная оценка эксплуатационной надёжности АД определяется точностью прогнозирования реального срока их службы. Именно поэтому, становится очевидным, задача адекватной оценки эксплуатационной надёжности низковольтных асинхронных электродвигателей, работающих в условиях некачественного питающего напряжения, напрямую зависит от комплекса исследований такого внешнего воздействующего фактора, как несимметрия питающего напряжения. МЕТОДЫ. Достижение задач исследования осуществлено с использованием пакета программ «SimPowerSystems» интерактивной среды программирования Matlab/Simulink. РЕЗУЛЬТАТЫ. Исследования выполнены на асинхронных электродвигателях с короткозамкнутым ротором: классической серии (4А132S4, АИР160S8), модернизированной серии (5А132М6, АИР132S4) с  $P_n = 7,5$  кВт, номинальной частотой вращения  $n = 1500$  об/мин. Моделирование физических процессов исследуемых электродвигателей производилось путём изменения коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности ( $K_{2U}$ ) от 0 до 5% с шагом в 1%. На основании полученных результатов моделирования построены диаграммы изменения срока службы АД от величины воздействующего фактора. Исследования, выполненные с применением компьютерного моделирования на основе пакета программ «SimPowerSystems» системы Matlab/Simulink, позволили спрогнозировать изменения срока службы АД, оценить границы допустимых значений коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности, сравнить исследуемые электродвигатели по уровню устойчивости к внешнему воздействующему фактору. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Комплексное решение вопросов, связанных с повышением эксплуатационной надёжности низковольтных асинхронных электродвигателей, является одним из приоритетных направлений, главным образом, направленных на обеспечение эффективного функционирования электротехнического комплекса с электродвигательной нагрузкой. В процессе исследования выполнена детальная оценка и анализ степени влияния несимметрии питающего напряжения на эксплуатационную надёжность низковольтных асинхронных электродвигателей. Проведено обсуждение полученных результатов исследования, сформулированы рекомендации по применению асинхронных электродвигателей в условиях наличия несимметрии питающего напряжения.

**Ключевые слова:** компьютерное моделирование на основе пакета программ «SimPowerSystems» системы Matlab/Simulink; асинхронный электродвигатель; несимметрия питающего напряжения; эксплуатационная надёжность асинхронного электродвигателя.

**Благодарности:** работа выполнена в рамках реализации научного гранта Совета по научной и инновационной деятельности ФГБОУ ВО «Забайкальский государственный университет» №349 – ГР от 03.02.2022 г.

**Для цитирования:** Романова В.В., Хромов С.В., Батухтин А.Г., Суслов К.В. 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.

## ANALYSIS OF THE DEGREE OF INFLUENCE OF SUPPLY VOLTAGE ASYMMETRY ON THE OPERATIONAL RELIABILITY OF LOW-VOLTAGE ASYNCHRONOUS ELECTRIC MOTORS

VV. Romanova<sup>1</sup>, SV. Khromov<sup>1</sup>, AG. Batukhtin<sup>1</sup>, KV. Suslov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Trans-Baikal State University, Chita, Russia

<sup>2</sup> Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

<http://orcid.org/0000-0002-3465-4315>, romanova181@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0002-1234-9934>, sergeixrom@inbox.ru

<http://orcid.org/0000-0002-3798-3675>, batukhtina\_ir@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0003-0484-2857>, souslov@istu.edu

**Abstract:** *THE PURPOSE.* The relevance of research is that the comprehensive substantiation of issues aimed at ensuring the effective functioning of the electrical complex with the presence of an electric motor load in conditions of low-quality supply voltage. The aim of the work is to study the effect of the asymmetry of the supply voltage on the service life of an asynchronous motor with a short-circuited rotor. The main attention is paid to the dynamics of changes in the service life of low-voltage asynchronous electric motors of various series, depending on the level of voltage asymmetry. Asynchronous electric motors of the classic series (4A, AI) and the upgraded (5A, AI') are identified as the object of research. As is known, the efficient and reliable operation of electric motors is characterized by the service life of the insulation of the windings. A qualitative assessment of the operational reliability of AM is determined by the accuracy of forecasting the real life of their service. That is why, it becomes obvious, the task of an adequate assessment of the operational reliability of low-voltage asynchronous electric motors operating under conditions of low-quality supply voltage directly depends on the complex of studies of such an external influencing factor as the asymmetry of the supply voltage. *METHODS.* The realization of the research objectives was carried out using the software package "SimPowerSystems" of the interactive programming environment Matlab/Simulink. *RESULTS.* The research was carried out on asynchronous motors with a short-circuited rotor: classic series (4A132S4, AIR160S8), upgraded series (5A132M6, AIR132S4) with  $P_H = 7,5$  kW, rated speed  $n = 1500$  rpm. Modeling of the physical processes of the studied electric motors was carried out by changing the voltage asymmetry coefficient in the reverse sequence ( $K_{2U}$ ) from 0 to 5% in increments of 1%. Based on the obtained simulation results, diagrams of the change in the service life of AM from the magnitude of the influencing factor are constructed. The studies performed using computer modeling based on the "SimPowerSystems" software package of the Matlab/Simulink system made it possible to predict changes in the service life of AM, estimate the limits of permissible values of the voltage asymmetry coefficient in the reverse sequence, compare the studied electric motors by the level of resistance to an external influencing factor. *CONCLUSION.* A comprehensive solution to issues related to improving the operational reliability of low-voltage asynchronous electric motors is one of the priority areas, mainly aimed at ensuring the effective functioning of the electrical complex with an electric motor load. In the course of the study, a detailed assessment and analysis of the degree of influence of the asymmetry of the supply voltage on the operational reliability of low-voltage asynchronous electric motors was carried out. The results of the study were discussed, recommendations for the use of asynchronous electric motors in the presence of asymmetry of the supply voltage were formulated.

**Keywords:** computer modeling based on the software package "SimPowerSystems" of the Matlab/Simulink system; asynchronous electric motor; operational reliability of an asynchronous electric motor.

**Acknowledgements:** the work was carried out within the framework of the implementation of the scientific grant of the Council for Scientific and Innovative Activities of the Trans-Baikal State University № 349 – GR dated 03.02.2022.

**For citation:** Romanova VV., Khromov SV., Batukhtin AG., Suslov KV. Analysis of the degree of influence of supply voltage asymmetry on the operational reliability of low-voltage asynchronous electric motors. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022;24(4):131-141. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-4-131-141.

### **Введение**

В современных условиях рыночных отношений первоочередным фактором принятия технических решений, направленных на повышение энергоэффективности электротехнических комплексов (ЭТК) предприятий, является минимизация издержек производственного процесса. Эффективное функционирование ЭТК предприятий напрямую зависит от надёжной и стабильной работы отдельных его элементов, связанных общностью технологического процесса. Соответственно, чем больше срок службы электрооборудования ЭТК предприятий, тем меньше эксплуатационные издержки на реновацию оборудования.

В электротехнических комплексах и системах различного назначения широко используется асинхронный электропривод с большим диапазоном номинальных мощностей электродвигателей. Основной парк низковольтных общепромышленных асинхронных электродвигателей (АД) составляют электродвигатели классической серии (4А, АИ) и пришедшие им на замену АД модернизированной серии (5А, АИ') [1].

Следует отметить, что срок службы асинхронных электродвигателей зависит как от условий их эксплуатации, так и от качества проектирования и изготовления. В процессе эксплуатации электродвигателей на их надёжность и долговечность оказывают влияние различные факторы, такие как: условия окружающей среды (температура, влажность, атмосферное давление, пыль, иней и т.д.), режимы работы, воздействующие факторы, техническое обслуживание и ремонт [2-4].

Анализ и исследование эксплуатационной надёжности, выполненный авторами Campbell M. et al. (2018), Palácios R.S. et al. (2020) [5,6] показывает, что высокая аварийность АД обусловлена особенностями их эксплуатации. Доминирующей причиной отказов АД является повреждение изоляции обмоток статора в силу теплового воздействия, вызванного несимметрией питающего напряжения.

Проведенные исследования низковольтных общепромышленных асинхронных электродвигателей в работах авторов Рубцовой Е. И. и др. (2018), Стрижиченко А. В. и др. [7,8], указывают на негативное влияние несимметрии питающего напряжения на их эксплуатацию. В результате воздействия несимметрии напряжения происходит ускоренное старение изоляции обмоток, следствием которого является её постепенное разрушение, и последующее значительное сокращение реального срока службы АД по сравнению с номинальным.

Основной целью работы является исследование влияния несимметрии питающего напряжения на срок службы асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором. Особое внимание уделено динамике изменения срока службы низковольтных асинхронных электродвигателей различных серий в зависимости от уровня несимметрии напряжений.

В рамках данной работы требуется рассмотреть степень влияния несимметрии питающего напряжения на эксплуатационную надёжность низковольтных асинхронных электродвигателей. Достижение задач исследования осуществляется на основе прогнозирования изменения реального срока службы электродвигателя в зависимости от величины воздействующего фактора. Решение подобной задачи позволяет выявить уровень устойчивости АД с короткозамкнутым ротором разных серий к воздействию несимметрии напряжений.

Научная значимость результатов исследования заключается в разработке методологической концепции решения задач количественной оценки надёжности и долговечности АД, при влиянии внешнего воздействующего фактора, путём прогнозирования реального срока их службы. Принципиально отличающаяся от существующих ранее подходов [6-8], взаимосвязью варьирования срока службы АД от воздействия неперемежающейся несимметрии питающего напряжения.

Практическая значимость результатов исследования заключается в обосновании технических решений, ориентированных на повышение энергоэффективности

функционирования электротехнического комплекса с наличием электродвигательной нагрузки, посредством увеличения срока службы АД.

#### Материалы и методы исследования

Методология исследования надёжности электрических машин достаточно обширна и многообразна, состоит из множества методов и подходов, которые позволяют реализовать поставленные задачи исследования. Среди которых, следует выделить, наиболее эффективный метод математического исследования электрических машин, основанный на использовании интерактивного инструмента моделирования [9]. Позволяющий с минимальной затратой времени и ресурсов обеспечить процедуру автоматизации математических операций: моделирование, симуляцию и анализ поведения АД в разнообразных сценариях его работы, различной сложности.

С применением компьютерного моделирования, на основе пакета программ «SimPowerSystems» системы Matlab/Simulink, сформирована модель исследования (рис. 1). Построенная модель позволяет имитировать физические процессы, происходящие в АД, исследовать его работоспособность и качество функционирования в различных режимах работы, отслеживать динамику эксплуатационных величин, изменяемых при наличии воздействующего фактора. Варьируя исходные условия моделирования, возможно наблюдать динамику протекания процессов и характер изменения выходных параметров АД разных серий.

Исследования выполнены на асинхронных электродвигателях с короткозамкнутым ротором: классической серии (4A132S4, АИР160S8), модернизированной серии (5A132M6, АИР132S4) с  $P_n = 7,5$  кВт, номинальной частотой вращения  $n = 1500$  об/мин. [10].

Компьютерная имитация физических процессов, рассматриваемых электродвигателей, выполнена в двух режимах работы АД (х.х., 100% загрузка электродвигателя), путём изменения следующих параметров эксперимента:

- величина коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности ( $K_{2U}$ ) изменялась от 0 до 5% с шагом 1%, оставалась неизменной на протяжении одной итерации моделирования;

- величина загрузки электродвигателя ( $K_z$ ) составляла 100%, оставалась неизменной во всех итерациях, за исключением опыта холостого хода.

Эксперимент в режиме холостого хода АД выполнен с целью подтверждения корректности параметров разработанной компьютерной модели.

Исследование динамики изменения надёжности асинхронных двигателей, работающих в условиях несимметрии напряжений, проведено с помощью отслеживания изменения величин токов в фазах АД и их взаимосвязи с воздействующим фактором.

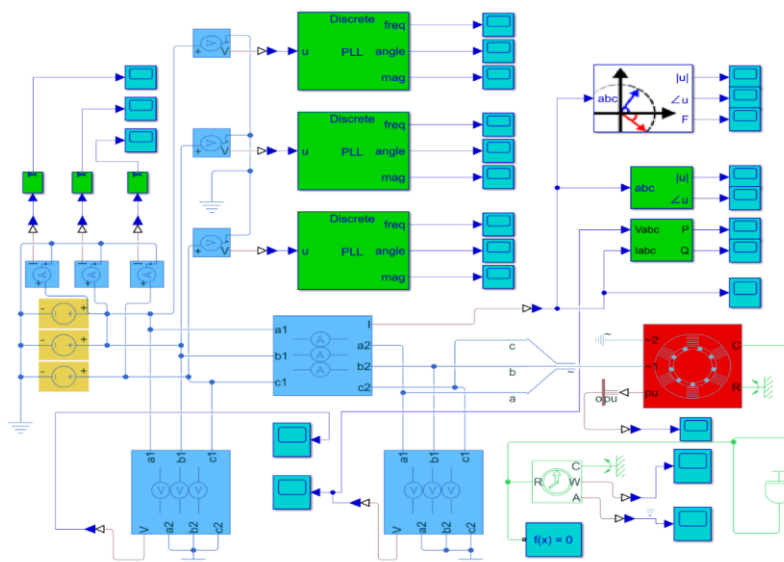


Рис. 1. Схема моделирования, реализованная на основе пакета программ «SimPowerSystems» системы Matlab/Simulink

Fig. 1. Simulation scheme implemented on the basis of the "SimPowerSystems" software package of the Matlab/Simulink system

#### Результаты исследования и их обсуждение

Реализация экспериментальных операций выполнена на основе использования разработанной компьютерной модели, с помощью которой получены результаты исследования изменения величин токов в фазах АД при увеличении величины несимметрии

напряжений, количественно определяющие варьирование срока службы АД, характеризующие уровень эксплуатационной надёжности АД. Необходимо отметить, что при выполнении исследований учтена контрольная величина допустимого тока перегрузки равная 1,1 номинального тока [11].

Интерпретация полученных результатов динамики изменения величин токов в фазах АД наглядно изображена на построенных аналитических зависимостях (рис. 2).

Построенные зависимости (рис.2) характеризуют изменение величин токов в фазах АД, их взаимосвязь с величиной  $K_{2U}$ . Значительное снижение надёжности АД происходит при  $K_{2U}$  превышающее 3%, при величине фазных токов преимущественно превосходящее 1,1ном. Значение  $K_{2U}$  в момент достижения наибольшего фазного тока электродвигателя контрольной величины равной 1,1ном определяется показателем допустимого коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности ( $K_{2U\text{доп}}$ ).

Согласно [12], величина  $K_{2U\text{доп}}$  АД индивидуальна для каждого типоразмера электродвигателя, различается не только по сериям АД, но и внутри серии, определяет оптимальный режим работы электродвигателя. При превышении значения  $K_{2U\text{доп}}$  происходит нарушение температурного режима работы электродвигателя, вследствие, повышения величин фазных токов АД.

Так, для рассматриваемых АД классической и модернизированной серии, величины  $K_{2U\text{доп}}$  составили, соответственно, электродвигатели серии 4A132S4  $K_{2U\text{доп}} = 1,7\%$ , серии 5A132M6  $K_{2U\text{доп}} = 1,9\%$ , серии АИР160S8  $K_{2U\text{доп}} = 1,8\%$ , серии АИР132S4  $K_{2U\text{доп}} = 2,1\%$ . Очевидно, изменение величин токов в фазах АД прямо пропорционально изменению величины  $K_{2U}$ , приводящее к сокращению срока службы АД.

Полученные зависимости (рис.2) отображают приближённую оценку изменения эксплуатационной надёжности АД. Для более точного анализа требуется реализация количественного расчёта реального срока службы АД. Наиболее оптимальный метод учёта несимметрии напряжений, при определении срока службы АД разработан [13].

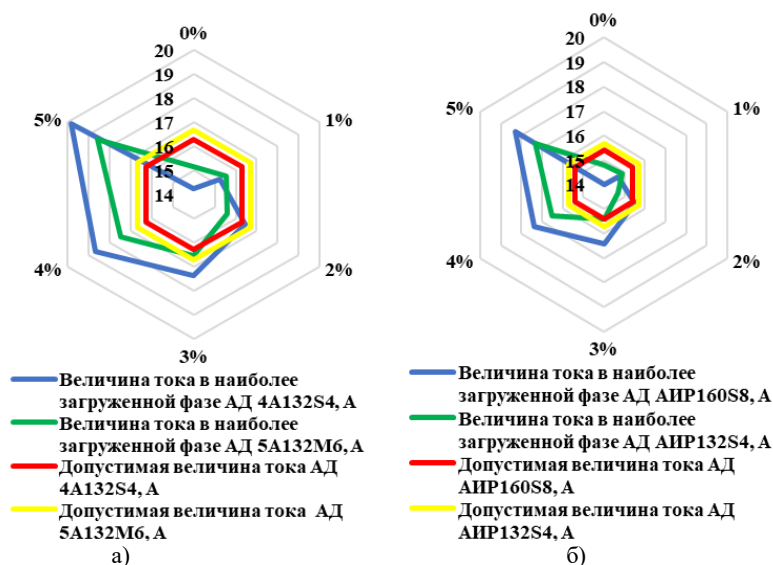


Рис. 2. Зависимость изменения значений токов в фазах АД от величины несимметрии напряжения:  
а) АД 4A132S4, 5A132M6  
б) АД АИР160S8, АИР132S4

Fig. 2. Dependence of changes in the values of currents in the phases of AM on the value of voltage asymmetry:  
a) AM 4A132S4, 5A132M6  
b) AM AIR160S8, AIR132S4

Срок службы АД в первую очередь определяется сроком службы изоляции обмоток электродвигателя, поэтому необходимо рассмотреть изменение этого параметра.

Продолжительность жизни изоляции обмоток АД, вследствие несинусоидальности и несимметрии питающего напряжения, согласно методике расчёта [13]:

$$\Delta z = e^{\left[ -280(1,55 \cdot K_{2U}^2) + 1,39 \sum_{v=2}^{\infty} \frac{U_v^2}{v \sqrt{v}} \right]} \quad (1)$$

Формула (1) применима в случае перемежающейся несимметрии напряжений характерной для потребителей, питающихся от систем тягового электроснабжения. Для остальных потребителей электроэнергии характер несимметрии напряжений является преимущественно неперемежающийся. Следовательно, необходимо выполнить ряд



расчётов для случая непеременяющейся несимметрии, тем самым уточнив исходную формулу.

Повышение температуры в наиболее загруженной фазе обмотки статора АД, обусловленной несимметрией и несинусоидальностью напряжений, определяется из выражения [13]:

$$\Delta\tau = \frac{\Delta P_{\text{М1ном}} * I_{\text{п}}^2 * 10^{-4}}{B} k_{\text{иск}}^2, \quad (2)$$

где  $\Delta P_{\text{М1ном}}$  – потери в меди статора электродвигателя при номинальных параметрах, кВт;

$I_{\text{п}}$  – кратность пускового тока к номинальному;

$B$  – тепловой параметр АД;

$k_{\text{иск}}$  – коэффициент увеличения нагрева АД от искажения напряжения.

Коэффициент увеличения нагрева АД от искажения напряжения определяется по следующей формуле:

$$k_{\text{иск}} = \sqrt{K_{\text{внес}} * K_{2U}^2 + \sum_{v=3}^{\infty} U_v^2 \frac{\sqrt{v+0,39\sqrt{v\pm 1}}}{v^2}} \quad (3)$$

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

$v$  – номер высшей гармоники;

$U_v$  – отношение напряжения  $v$ -й гармоники к номинальному;

$K_{\text{внес}}$  – коэффициент, зависящий от вида несимметрии напряжений, для перемежающейся несимметрии равен 1,55 [13], для непеременяющейся определяется расчётным путём.

Так согласно [13] составляющая выражения (2) равна:

$$\frac{\Delta P_{\text{М1ном}} * I_{\text{п}}^2 * b}{B} = 280 \quad (4)$$

где  $b$  – постоянный коэффициент изоляции обмотки статора АД (электроизоляционный лак), определяется на основании правила Монтзингера [14]:  $e^{-8b} = 0,5$ , откуда  $b = 0,0866$ .

Тогда выражение (4) представим следующим образом:

$$\frac{\Delta P_{\text{М1ном}} * I_{\text{п}}^2}{B} = 3233,256 \quad (5)$$

Второе слагаемое в (3)  $\sum_{v=3}^{\infty} U_v^2 \frac{\sqrt{v+0,39\sqrt{v\pm 1}}}{v^2} = 0$  т.к. рассматриваем случай без несинусоидальности напряжения.

Подставим известные величины в выражения (2), (3), учитывая, что допустимая величина  $K_{2U}$  – для непеременяющейся несимметрии равна 2% [13]; превышение температуры в наиболее загруженной фазе обмотки статора АД, в соответствии с межгосударственным стандартом ГОСТ ИЕС 60034-1-2014  $\Delta\tau = 10^\circ\text{C}$ , упростив выражение получим:

$$K_{\text{внес}} = 13,73$$

Продолжительность жизни изоляции обмоток АД, вследствие несимметрии питающего напряжения, будет иметь вид:

$$\Delta z = e^{\left[-280(13,73 * K_{2U}^2)\right]} \quad (6)$$

Показатели надёжности и долговечности для асинхронных двигателей серии 4А, АИ [15]:

– средний срок службы более 15 лет при наработке 40000 часов; – средний срок службы до первого капитального ремонта – 8 лет, при наработке 20000 часов, вероятность безотказной работы более 0,9 за 10000 часов.

Принимаем расчётный срок службы АД  $T = 15$  лет, считаем, что сокращением срока службы АД до достижения допустимой величины  $K_{2U\text{доп}}$  можно пренебречь. Соответственно, снижение срока службы АД начинается при достижении допустимой величины  $K_{2U\text{доп}}$ .

Тогда,

$$\Delta z = e^{\left[-280\left(13,73 * (K_{2U} - K_{2U\text{доп}})^2\right)\right]} \quad (7)$$

Подставив значения  $K_{2U_{доп}}$  для рассматриваемых электродвигателей и известные показатели надёжности и долговечности АД в формулу (7), получим данные об изменении срока службы, представленные на диаграммах (рис. 3-8).

$$\Delta z = e^{\left[ -280 \left( 13,73 \cdot (3 - 1,9)^2 \right) \right]}$$

$$z = \Delta z \cdot T = 0,538 \cdot 15 = 8,07 \text{ лет}$$

В качестве примера приведён расчёт для электродвигателя серии 4A132S4, для остальных АД расчёт аналогичен.

Из вышеизложенного следует, что величина  $K_{2U_{доп}}$  оказывает значительный вклад при определении прогнозируемого срока службы АД. Так, например, для электродвигателей серий 4A и 5A разница значений  $K_{2U_{доп}}$  составляющая 0,4%, приводит к практически двойному отличию снижения срока службы АД. Так при  $K_{2U} = 3\%$  снижение срока службы АД составляет, соответственно,  $\Delta Z = 6,93$  и  $\Delta Z = 3,86$  года.

На основании полученных результатов расчёта построены диаграммы изменения срока службы АД от величины несимметрии напряжений (рис. 3-8), позволяющие визуально оценить изменение срока службы АД от величины влияния воздействующего фактора, провести сравнение АД разных серий по устойчивости воздействию несимметрии напряжений. На диаграммах (рис. 3-6) изображено соотношение взаимосвязанных величин, прогнозируемого срока службы АД и его снижение, вследствие несимметрии напряжений. На диаграммах (рис. 7,8) приведено сравнение прогнозируемых сроков службы АД классической (4A132S4, АИР160S8) и модернизированной (5A132M6, АИР132S4) серий.

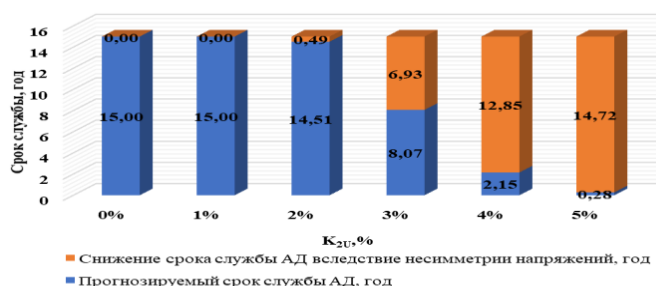


Рис. 3. Диаграмма изменения срока службы АД 4A132S4 от величины несимметрии напряжений

Fig. 3. Diagram of the change in the service life of AM 4A132S4 from the magnitude of the voltage asymmetry

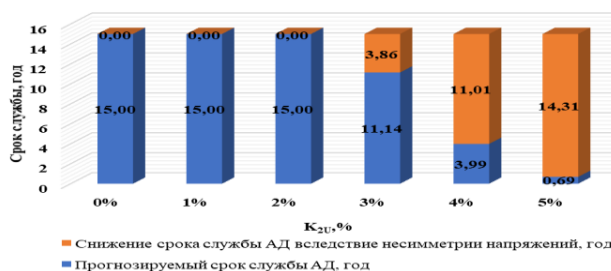


Рис. 4. Диаграмма изменения срока службы АД 5A132M6 от величины несимметрии напряжений

Fig. 4. Diagram of the change in the service life of AM 5A132M6 from the magnitude of the voltage asymmetry

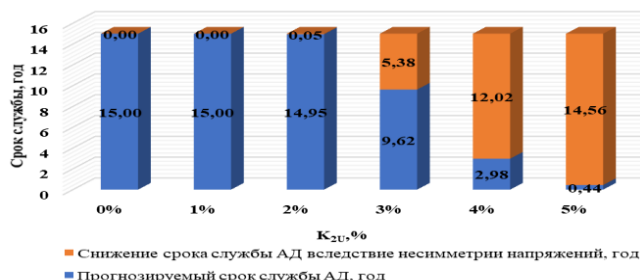


Рис. 5. Диаграмма изменения срока службы АД АИР160S8 от величины несимметрии напряжений

Fig. 5. Diagram of the change in the service life of AM AIR160S8 from the value of the voltage asymmetry

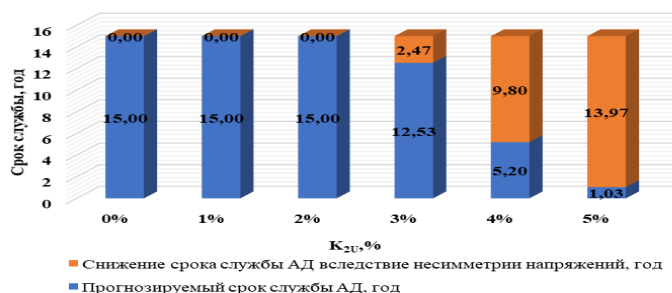


Рис. 6. Диаграмма изменения срока службы АД АИР132S4 от величины несимметрии напряжений

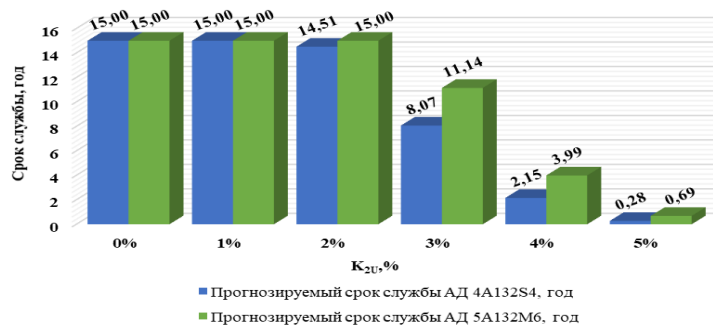


Рис. 7. Диаграмма сравнения изменения срока службы АД от величины несимметрии напряжений

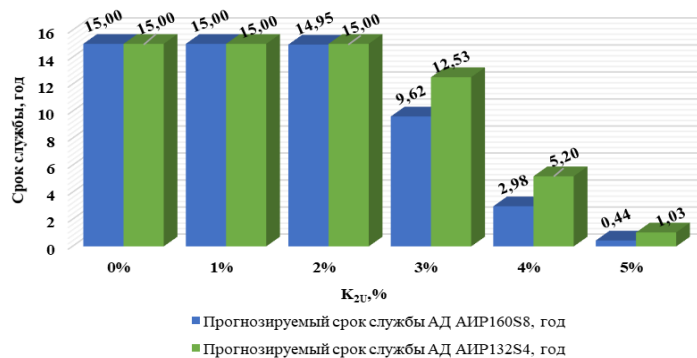


Рис. 8. Диаграмма сравнения изменения срока службы АД от величины несимметрии напряжений

Диаграммы, изображённые на (рис. 3-6), ярко иллюстрируют прямую зависимость изменения срока службы электродвигателя от величины несимметрии напряжения. Ощутимое снижение срока службы наблюдается после превышения величины  $K_{2U} = 2\%$ . Так, например, для АД серии 4A132S4 при  $K_{2U} = 2\%$  снижение срока службы составило  $\Delta Z = 0,49$  года, а при  $K_{2U} = 3\%$  снижение срока службы АД составило  $\Delta Z = 6,93$  года. Критическое снижение срока службы электродвигателей происходит при  $K_{2U} = 4\%$ . Так, например, для АД 4A132S4 при  $K_{2U} = 4\%$  снижение срока службы составило  $\Delta Z = 12,85$  года, для АД 5A132M6  $\Delta Z = 11,01$  года, для АД АИР160S8  $\Delta Z = 12,02$  года, для АД АИР132S4  $\Delta Z = 9,8$  года.

Важно заметить, что значительное снижение эксплуатационной надёжности АД наблюдается при достижении  $K_{2U} = 3\%$ . В связи с этим, во избежание превышения допустимых температурных режимов работы АД и последующего нарушения целостности изоляции обмоток, необходим контроль и поддержание величины питающего напряжения в определённом диапазоне, путём его корректировки.

Построенные диаграммы (рис.7-8) показывают изменение прогнозируемого срока службы АД от величины несимметрии напряжений. Экспериментальное исследование показало, АД модернизированной серии, в большей степени, устойчивы к воздействию несимметрии напряжений, чем АД классической серии. Так, для АД классической серии прогнозируемый срок службы при  $K_{2U} = 3\%$  составил  $z = 8,07$  и  $z = 9,62$  года



соответственно. Для модернизированной серии АД, при  $K_{2U} = 3\%$ , величины прогнозируемого срока службы составили  $z = 11,14$  и  $z = 12,53$  года.

Анализ, формализация результатов исследования, реализованных с использованием компьютерного моделирования на основе пакета программ «SimPowerSystems» системы Matlab/Simulink, позволили аргументировать следующие выводы:

1) комплекс исследований оценки эксплуатационной надёжности низковольтных асинхронных электродвигателей, работающих в условиях некачественного питающего напряжения, выполнен путём прогнозирования реального срока их службы. Данный аспект исследования является принципиальным методологическим подходом решения задач количественной оценки надёжности и долговечности АД, при влиянии внешнего воздействующего фактора. Следует отметить, что основное внимание уделено динамике изменения срока службы асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором различных серий в зависимости от уровня неперемежающейся несимметрии питающего напряжения;

2) необходимо подчеркнуть, что воздействие несимметрии питающего напряжения значительно снижает надёжность и уменьшает срок службы асинхронных электродвигателей;

3) полученные результаты исследования демонстрируют значительное сокращение срока службы АД при воздействии несимметрии питающего напряжения. Так, например, АД серии 4A132S4 при  $K_{2U} = 4\%$  снижение срока службы составило  $\Delta Z = 12,85$  года, для 5A132M6  $\Delta Z = 11,01$  года, а для АИР160S8  $\Delta Z = 12,02$  года, для АИР132S4 составило  $\Delta Z = 9,8$  года, при заявленном заводом-изготовителем среднем сроке службы 15 лет;

4) степень влияния несимметрии питающего напряжения на эксплуатационную надёжность низковольтных асинхронных электродвигателей зависит от уровня их устойчивости, который характеризуется допустимым значением  $K_{2U\text{доп}}$ . Экспериментальные исследования показали, что допустимое значение  $K_{2U\text{доп}}$  АД индивидуально для каждого типоразмера электродвигателя, различается не только по сериям АД, но и внутри серии;

5) сравнение уровней устойчивости асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором классической и модернизированной серий показало, что электродвигатели модернизированной серии более устойчивы к воздействию несимметрии напряжений;

6) для обеспечения длительной безаварийной эксплуатации АД в ЭТК предприятий необходим контроль и поддержание величины  $K_{2U}$  в диапазоне от 0% до 2%. В случае превышения величины  $K_{2U}$  более 2% в сети внешнего электроснабжения ЭТК требуется предусмотреть демпферы по нейтрализации негативного влияния воздействующего фактора;

7) практическое применение результатов исследования заключается в следующем:

- предложенный подход исследования возможно использовать на стадии предпроектной оценки оптимального состава электрооборудования ЭТК предприятий. При этом следует отметить, что подобный подход требует предварительных экспериментальных исследований уровней искажения питающего напряжения;

- количественный анализ степени влияния несимметрии питающего напряжения на эксплуатационную надёжность низковольтных асинхронных электродвигателей имеет особое значение при реализации и внедрении технических мероприятий, ориентированных на повышение их надёжности и долговечности;

- повышение энергоэффективности и улучшение технико-экономических показателей работы электротехнического комплекса с наличием электродвигательной нагрузки достигается увеличением срока службы электрооборудования, снижением эксплуатационных затрат на планово-предупредительные ремонты электрооборудования.

### **Заключение**

Комплексное решение вопросов, связанных с повышением эксплуатационной надёжности низковольтных асинхронных электродвигателей, является одним из приоритетных направлений, главным образом, направленных на обеспечение эффективного функционирования электротехнического комплекса с электродвигательной нагрузкой. Исследования, выполненные с применением компьютерного моделирования на основе пакета программ «SimPowerSystems» системы Matlab/Simulink, позволили спрогнозировать изменения срока службы АД, оценить границы допустимых значений коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности, сравнить исследуемые электродвигатели по уровню устойчивости к внешнему воздействующему фактору. В процессе исследования выполнена детальная оценка, формализация и анализ

степени влияния несимметрии питающего напряжения на эксплуатационную надёжность низковольтных асинхронных электродвигателей. Сформулированы рекомендации по применению асинхронных электродвигателей в условиях наличия несимметрии питающего напряжения.

#### Литература

1. Кравчик А.Э., Крутиков О.В., Лазарев М.В., и др. Перспективы разработки и производства стандартных асинхронных электродвигателей на предприятиях группы компаний «ВЭМЗ» // Электротехника. 2005. № 5. С. 3-8.
2. Полевой В.Е., Ежова М.С. Влияние эксплуатационных факторов на показатели надёжности асинхронных двигателей // Известия ТулГУ. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2013. Вып. 9. Ч.1. С. 143 – 147.
3. Prasad K. K., Myneni H., Kumar G. S. Power Quality Improvement and PV Power Injection by DSTATCOM With Variable DC Link Voltage Control from RSC-MLC // IEEE Transactions on Sustainable Energy. 2019. V. 10. № 2. pp. 876-885.
4. Ratering-Schnitzler B., Harke R., Schroeder M, et al. Voltage quality and reliability from electrical energy-storage systems // Journal of Power Sources. 1997. V. 67. № 1-2. pp. 173-177.
5. Campbell M., Arce G. Effect of motor voltage unbalance on motor vibration: test and evaluation // IEEE Transactions on Industry Applications. 2018. V. 54. Issue.1. pp. 905-911.
6. Palácios R.S., da Silva I.N., Godoy W.F., et al. Voltage unbalance evaluation in the intelligent recognition of induction motor rotor faults // Soft Computing. 2020. V. 24. pp. 1693-16946.
7. Рубцова Е. И., Афанасьев М. А., Урядов Н. В. Динамика старения изоляции электрических машин // Сборник статей XIII Международного научно-практического конкурса. Пенза: Изд-во МЦНС «Наука и Просвещение». 2018. С. 55-58.
8. Стрижиченко А. В., Пахомова А. А. Оценка влияния качества электроэнергии на сокращение срока службы электродвигателей собственных нужд тепловых электростанций // Аллея науки. 2020. Т. 2. № 6(45). С. 46-49.
9. Kholiddinov I. Kh, Musinova Gulasalkhon, Yulchiev M.E., et al. Modeling of calculation of voltage unbalance factor using Simulink (Matlab) // The American Journal of Engineering And Techonology. 2020. V.2. № 10. pp. 33-37.
10. Технические характеристики асинхронных электродвигателей серии. Номинальная частота вращения 1500 об/мин [Электронный ресурс]. URL: <http://www.elektrikii.ru/publ/6-1-0-55>. Ссылка активна на 27 мая 2022.
11. Popa G., Dinis C. Complex Electronic Protection for Low-voltage Three-phase Induction Motors. // WSEAS Transactions on Electronics. 2020. V. 11. pp. 11-17.
12. Романова В.В., Хромов С.В. Эксплуатационная надёжность низковольтных асинхронных электродвигателей в условиях несимметрии напряжений // Проблемы энерго - и ресурсосбережения. Ташкент: Изд-во ТашГТУ. 2019. № 4. С. 136-148.
13. Церазов А. Л. Исследование влияния несимметрии и несинусоидальности напряжения на работу трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором: Автореферат дис. на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва. 1963. 27 с.
14. Koeva D.Y., Rachev S.R., Dimitrov L. D. Analysis of the power transformer operation supplying a combined non-linear load in the public sector – part ii: influence of the current harmonics // Industry 4.0. 2020. Vol.5. Issue.1. pp. 37-40.
15. Zhao K., Cheng L., Zhang C., et al. Induction motors lifetime expectancy analysis subject to regular voltage fluctuations // IEEE Electrical Power and Energy Conference. 2017. V. 1. № 6. pp. 1-6.

#### Авторы публикации

**Романова Виктория Викторовна** – старший преподаватель кафедры «Энергетики» Забайкальского государственного университета. E-mail: [romanova181@mail.ru](mailto:romanova181@mail.ru).

**Хромов Сергей Владимирович** – старший преподаватель кафедры «Энергетики» Забайкальского государственного университета. E-mail: [sergeixrom@inbox.ru](mailto:sergeixrom@inbox.ru).

**Батухтин Андрей Геннадьевич** – канд. техн. наук, доцент, декан энергетического факультета Забайкальского государственного университета. E-mail: [batuhtina\\_ir@mail.ru](mailto:batuhtina_ir@mail.ru).

**Суслов Константин Витальевич** – д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Электроснабжения и электротехники» Иркутского национального исследовательского

технического университета. E-mail: [souslov@istu.edu](mailto:souslov@istu.edu).

### References

1. Kravchik AE, Krutikov OV, Lazarev MV, et al. Perspektivy razrabotki i proizvodstva standartnykh asinkhronnykh elektrodvigatelyi na predpriyatiyakh gruppy kompanii VEMZ. *Elektrotehnika*. 2005; 5:3-8.
2. Polevoi VE, Ezhova MS. Vliyaniye ekspluatatsionnykh faktorov na pokazateli nadezhnosti asinkhronnykh dvigatelei. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki*. Tula: Izd-vo TulGU. 2013; 9(1):143-147.
3. Prasad KK, Myneni H, Kumar GS. Power Quality Improvement and PV Power Injection by DSTATCOM With Variable DC Link Voltage Control from RSC-MLC. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. 2019; 10(2):876-885.
4. Ratering-Schnitzler B, Harke R, Schroeder M, et al. Voltage quality and reliability from electrical energy-storage systems. *Journal of Power Sources*. 1997; 67(1,2):173-177.
5. Campbell M, Arce G. Effect of motor voltage unbalance on motor vibration: test and evaluation. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2018; 54(1):905-911.
6. Palácios RS, da Silva IN, Godoy WF, et al. Voltage unbalance evaluation in the intelligent recognition of induction motor rotor faults. *Soft Computing*. 2020; 24:16935-16946.
7. Rubtsova EI, Afanas'ev MA, Uryadov NV. Dinamika stareniya izolyatsii elektricheskikh mashin. *Sbornik statei XIII Mezhdunarodnogo nauchno-prakticheskogo konkursa*. Penza: Izd-vo MTsNS «Nauka i Prosveshchenie». 2018; 55-58.
8. Strizhichenko AV, Pakhomova AA. Otsenka vliyaniya kachestva elektroenergii na sokrashcheniye sroka sluzhby elektrodvigatelyi sobstvennykh nuzhd teplovykh elektrostantsii. *Alleya nauki*. 2020; 2(6):46-49. (In Russ).
9. Kholiddinov IKh, Musinova Gulasalkhon, Yulchiev ME, et al. Modeling of calculation of voltage unbalance factor using Simulink (Matlab). *The American Journal of Engineering And Techonology*. 2020; 2(10):33-37.
10. *Tekhnicheskie kharakteristiki asinkhronnykh elektrodvigatelyi serii. 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: 27 May 2022.
11. Popa G., Dinis C. Complex Electronic Protection for Low-voltage Three-phase Induction Motors. *WSEAS Transactions on Electronics*. 2020; 11:11-17.
12. Romanova VV, Khromov SV. Ekspluatatsionnaya nadezhnost' nizkovol'tnykh asinkhronnykh elektrodvigatelyi v usloviyakh nesimmetrii napryazhenii. *Problemy energo - i resursosbezpecheniya. Tashkent: Izd-vo TashGTU*. 2019; 4:136-148.
13. Tserazov AL. *Issledovanie vliyaniya nesimmetrii i nesinusoidal'nosti napryazheniya na rabotu trekhfaznykh asinkhronnykh dvigatelei s korotkozamknutym rotorom*. Moscow. 1963.
14. Koeva DY, Rachev SR, Dimitrov LD. Analysis of the power transformer operation supplying a combined non-linear load in the public sector – part ii: influence of the current harmonics. *Industry 4.0*. 2020; 5(1):37-40.
15. Zhao K, Cheng L, Zhang C, et al. Induction motors lifetime expectancy analysis subject to regular voltage fluctuations // *IEEE Electrical Power and Energy Conference*. 2017; 1(6):1-6.

### Authors of the publication

**Victoria V. Romanova** – Trans-Baikal State University, Chita, Russia.

**Sergey V. Khromov** – Trans-Baikal State University, Chita, Russia.

**Andrey G. Batukhtin** – Trans-Baikal State University, Chita, Russia.

**Konstantin V. Suslov** – Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.

**Получено** 18.06.2022 г.

**Отредактировано** 26.06.2022 г.

**Принято** 02.07.2022 г.