



АНАЛИЗ ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННУЮ НАДЁЖНОСТЬ НИЗКОВОЛЬТНЫХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

В.В. Романова¹, С.В. Хромов¹, К.В. Суслов²

¹Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия

²Иркутский 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/0000-0003-0484-2857>, souslov@istu.edu

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Основной целью работы является комплексное исследование внешних воздействий, влияющих на эксплуатационную надёжность низковольтных асинхронных электродвигателей. Акцентировано внимание на оценке эксплуатационной надёжности электродвигателей, систематизацию условий их эксплуатации, при одновременном воздействии группы эксплуатационных факторов. Среди указанных факторов, подлежащих детальному анализу, выделим следующие: несимметрия напряжений и её длительность, нагрузка электродвигателя, температура окружающей среды. В связи с этим, становится очевидным, задача повышения эксплуатационной надёжности низковольтных асинхронных электродвигателей зависит от качественного исследования количественных значений внешних воздействующих факторов в различных режимах работы электродвигателей. **МЕТОДЫ.** Инструментом реализации поставленной задачи является наглядное и эффективное средство имитационного моделирования Simulink интерактивной среды программирования Matlab. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Исследования выполнены на асинхронном электродвигателе с короткозамкнутым ротором АИР160S8 с $P_n = 7,5$ кВт, номинальной частотой вращения $n = 1500$ об/мин. Моделирование физических процессов исследуемого электродвигателя производилось путём изменения показателей: коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности (K_{2U}), нагрузки на валу электродвигателя (K_z), температуры окружающей среды ($t_{окр}$), длительности несимметрии напряжений по обратной последовательности (T). На основании полученных результатов моделирования построены группы плоскостей исследуемых величин. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Комплекс исследований, выполненный с использованием пакета программ Matlab, позволил оценить границы допустимых значений внешних факторов, выявить область допустимой работы асинхронных электродвигателей. Проведен анализ и обсуждение полученных результатов исследования, предложены мероприятия по повышению эксплуатационной надёжности асинхронных электродвигателей.

Ключевые слова: имитационное моделирование в среде Matlab/Simulink; асинхронный электродвигатель; эксплуатационная надёжность асинхронного электродвигателя.

Для цитирования: Романова В.В., Хромов С.В., Суслов К.В. Анализ воздействующих факторов, влияющих на эксплуатационную надёжность низковольтных асинхронных электродвигателей // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 3. С. 80-89. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-3-80-89.

ANALYSIS OF INFLUENCING FACTORS AFFECTING THE OPERATIONAL RELIABILITY OF LOW-VOLTAGE ASYNCHRONOUS ELECTRIC MOTORS

V.V. Romanova¹, S.V. Khromov¹, K.V. Suslov²

¹Trans-Baikal State University, Chita, Russia

²Irkutsk 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/0000-0003-0484-2857>, souslov@istu.edu

Abstract: THE PURPOSE. The main purpose of the work is a comprehensive study of external influences that affect the operational reliability of low-voltage asynchronous motors. Attention is focused on the evaluation of the operational reliability of electric motors, the systematization of their operating conditions, with the simultaneous impact of a group of operational factors. Among these factors that are subject to detailed analysis, we will highlight the following: the asymmetry of the stress and its duration, loading of the motor, the temperature of the environment. In this regard, it becomes obvious that the task of improving the operational reliability of low-voltage asynchronous electric motors depends on a qualitative study of the quantitative values of external influencing factors in various operating modes of electric motors. **METHODS.** The tool for implementing this task is a visual and effective simulation tool Simulink interactive programming environment Matlab. **RESULTS.** The research was performed on an asynchronous electric motor with a short-circuited rotor AIR160S8 with $P_H = 7,5$ kW, rated speed $n = 1500$ rpm. The physical processes of the electric motor under study were modeled by changing the following parameters: the coefficient of stress asymmetry in the reverse sequence (K_{2V}), the load on the motor shaft (K_z), the ambient temperature (t_{ocr}), and the duration of stress asymmetry in the reverse sequence (T). Based on the obtained simulation results, groups of planes of the studied quantities are constructed. **CONCLUSION.** A set of studies performed using the Matlab software package allowed us to estimate the limits of acceptable values of external factors and identify the area of acceptable operation of asynchronous motors. The analysis and discussion of the research results were carried out, and measures were proposed to improve the operational reliability of asynchronous electric motors.

Keywords: simulation in the Matlab/Simulink environment; asynchronous electric motor; operational reliability of an asynchronous electric motor.

For citation: Romanova VV, Khromov SV, Suslov KV. Analysis of influencing factors affecting the operational reliability of low-voltage asynchronous electric motors. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021;23(3):80-89. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-3-80-89.

Введение

Под надёжностью электрической машины понимают способность безотказно работать с неизменными техническими характеристиками в течение заданного промежутка времени при определённых режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования [1, 2]. Следует отметить, эффективность и надёжность функционирования асинхронных электродвигателей (АД) зависит не только от качества их проектирования и изготовления, но и от условий эксплуатации. В условиях реальной работы электродвигателей, в зависимости от различных факторов, имеет место значительное отклонение от номинальных режимов эксплуатации. Как показывают исследования и многолетний опыт эксплуатации [3-9], на срок службы электродвигателей оказывают влияние климатические, электромеханические факторы внешней среды, более 50% электродвигателей работают в условиях, параметры которых значительно отличаются от нормированных по ГОСТ Р 51137-98 «Электроприводы регулируемые асинхронные для объектов энергетики», ГОСТ ИЕС 60034-1-2014 «Машины электрические вращающиеся. Номинальные значения параметров и эксплуатационные характеристики».

Проведенный анализ работ [10-16] по исследованию работоспособности и качеству функционирования АД в различных режимах его работы, при разнообразных внешних воздействиях показывает, что в процессе эксплуатации на срок службы АД значительное влияние оказывают: качество питающего напряжения (более 60% отказов), вибрация, температура и влажность окружающего воздуха (более 20% отказов), нагрузка электродвигателя.

Среди указанных эксплуатационных факторов выделим следующие: несимметрия напряжений и её длительность, нагрузка АД, температура окружающей среды. Перечисленные факторы определяют уровень эксплуатационной надёжности АД, но только в совокупности, так как по статистике отказов [17-20] видно, что выход из строя электродвигателей чаще всего связан с несколькими факторами. Именно поэтому, при оценке эксплуатационной надёжности необходимо учитывать совместное влияние неблагоприятных факторов, что позволит более точно спрогнозировать реальный срок службы электродвигателей, тем самым обеспечить необходимый уровень надёжности АД.

Основной целью работы является систематизация условий эксплуатации АД, при одновременном воздействии группы эксплуатационных факторов.

Реализация предлагаемого подхода заключается в многофакторном анализе параметров внешних воздействий, влияющих на надёжность электродвигательной нагрузки. Концепция системного подхода, позволяет решать задачи обеспечения безопасного и эффективного функционирования АД в широком диапазоне внешних воздействий.

Материалы и методы исследования

Основной задачей исследования является количественная оценка внешних воздействующих факторов в различных режимах работы АД с короткозамкнутым ротором на виртуальной модели, реализованной в наглядном и эффективном средстве имитационного моделирования *Simulink* интерактивной среды программирования *Matlab* [21-26], характеризующих длительную работу АД.

Схема моделирования для исследования режимов работы АД с короткозамкнутым ротором, сформированная средствами имитационного моделирования в среде *Matlab/Simulink*, представлена на (рис.1).

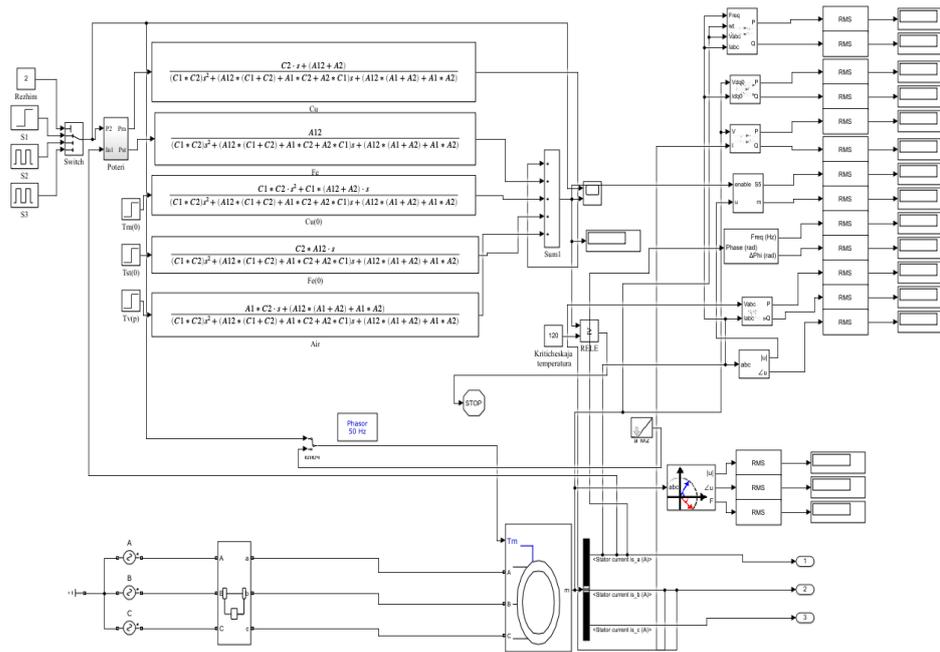


Рис. 1. Схема моделирования, реализованная в среде *Matlab/Simulink*

Fig. 1. Simulation scheme implemented in the *Matlab/Simulink* environment

Разработанная модель позволяет визуально моделировать физические процессы, происходящие в АД, исследовать его работоспособность и качество функционирования в различных режимах работы, при разнообразных внешних воздействиях. Изменяя начальные условия и параметры протекания процессов возможно наблюдать изменения в поведении модели АД разных серий и мощностей.

Исследования выполнены на асинхронном электродвигателе с короткозамкнутым ротором АИР160S8 с $P_n = 7,5$ кВт, номинальной частотой вращения $n = 1500$ об/мин [27].

Общепромышленные асинхронные электродвигатели АИР160S8 изготовлены для следующих условий эксплуатации:

- климатическое исполнение У;
- категория размещения – 2,3;
- режим работы - продолжительный, S1;
- допустимая температура окружающего воздуха от 40°C до - 45° С;
- класс изоляции Е, допустимая температура обмоток АД 120° С;
- степень защиты - IP54, 55 (содержание нетокопроводящей пыли в воздухе до 100 мг/м³, двигатель защищен от брызг воды с любого направления).

В результате статистического анализа временных диаграмм изменения величины коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности (K_{2U}), основанного на экспериментальных исследованиях показателей качества электрической энергии (ПКЭ) в распределительных сетях 0,4 кВ [28-30], установлено, что наиболее вероятными величинами длительности непрерывной несимметрии напряжений являются величины находящиеся в интервале 5 -15 минут.

Моделирование физических процессов исследуемого АД производилось путём изменения показателей:

- величина коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности (K_{2U}) – от 0 до 5 % с шагом в 1 %;
- величина нагрузки на валу электродвигателя (K_z) изменялась от 0 до 120 % с шагом 20 % при различных значениях K_{2U} ;
- величина температуры окружающей среды ($t_{окр}$) изменялась от 40°С до - 40° С с шагом 10° С;
- величина длительности несимметрии напряжений по обратной последовательности (Т) – от 0 до 15 минут с шагом в 5 минут.

Результаты исследования и их обсуждение

С использованием разработанной компьютерной модели получены данные комплексного влияния функционально не связанных параметров, на основании которых построены аналитические зависимости (рис. 2-5), характеризующие связь внешних факторов, определяющие уровень эксплуатационной надёжности АД.

На основании полученных результатов компьютерного моделирования построены группы плоскостей, позволяющие визуально оценить границы допустимых значений внешних факторов.

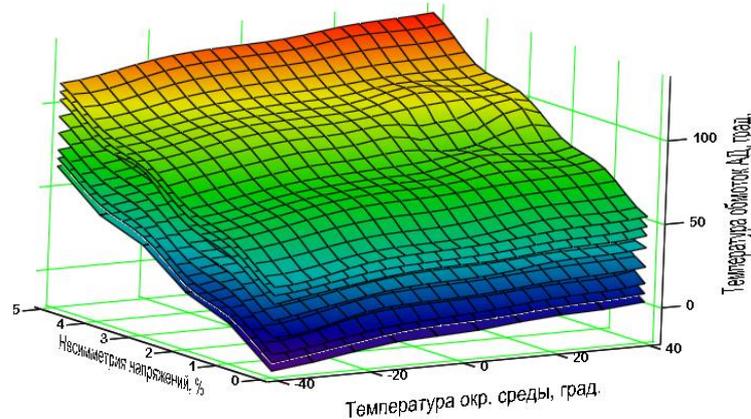


Рис.2. Зависимость температуры обмоток АД от внешних факторов при различных постоянных коэффициентах загрузки

Fig. 2. Dependence of the temperature of the AD windings on external factors at various constant load coefficients

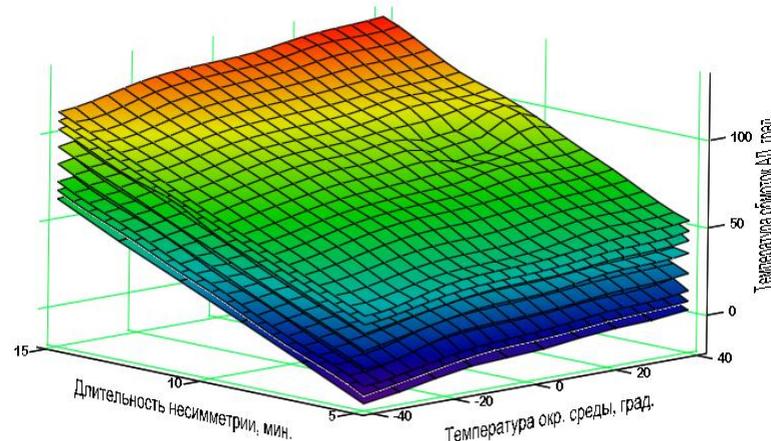


Рис.3. Зависимость температуры обмоток АД от внешних факторов при различных постоянных коэффициентах загрузки

Fig. 3. Dependence of the temperature of the AD windings on external factors at various constant load coefficients

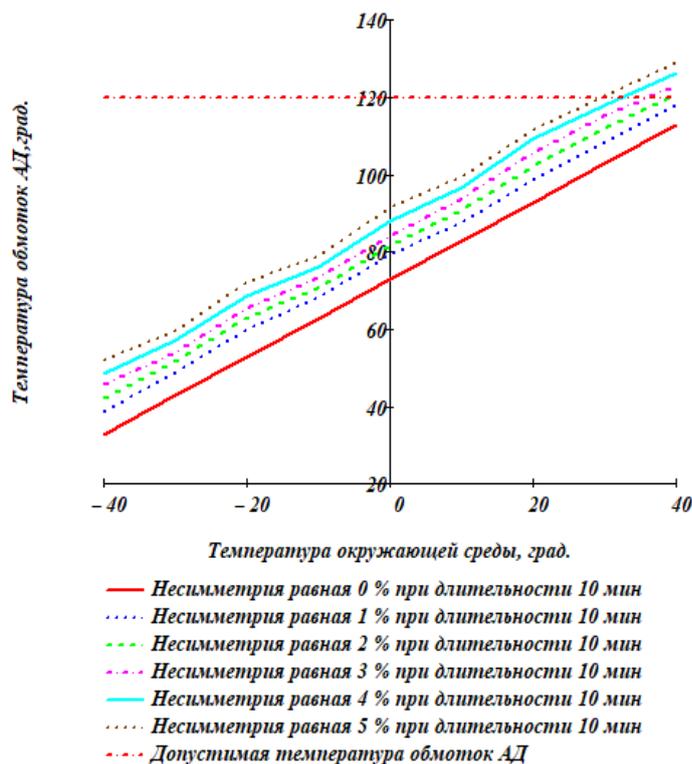


Рис. 4. Зависимость температуры обмоток АД от температуры окружающей среды при $K_{2U} = 0-5\%$ с постоянной величиной длительности несимметрии напряжений

Fig. 4. Dependence of the temperature of the AD windings on the ambient temperature at $K_{2U} = 0-5\%$ with a constant value of the duration of the voltage asymmetry

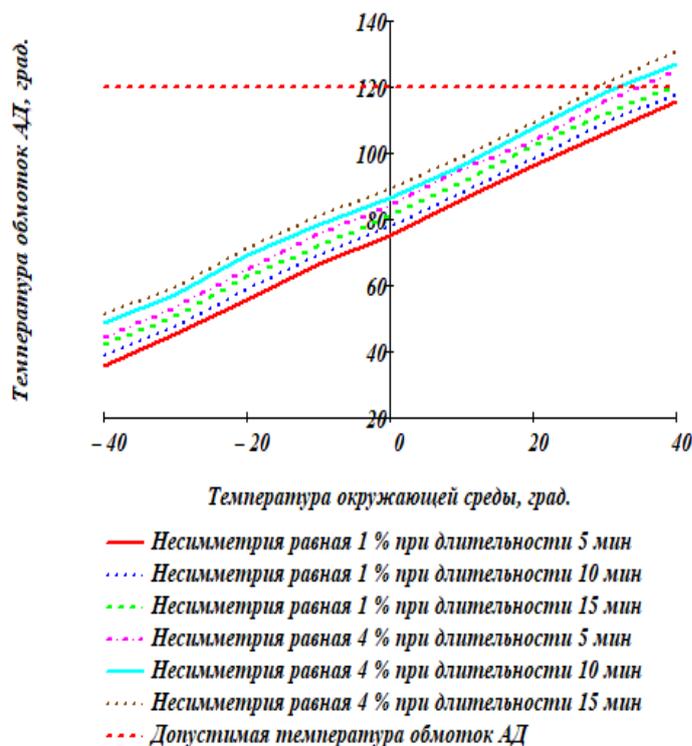


Рис. 5. Зависимость температуры обмоток АД от температуры окружающей среды при $K_{2U} = 1\%$; $K_{2U} = 4\%$ с различной длительностью несимметрии напряжений

Fig. 5. Dependence of the temperature of the AD windings on the ambient temperature at $K_{2U} = 1\%$; $K_{2U} = 4\%$ with different duration of voltage asymmetry

Обобщая экспериментальный материал выявлены следующие закономерности:

1) на эксплуатационную надёжность влияют не только внешние факторы непосредственно связанные с работой АД (несимметрия напряжений, нагрузка АД), но и климатические факторы (температура окружающей среды). Так, при $t_{окр} = 30^\circ\text{C}$, $K_{2U} = 4\%$ и $T = 10$ мин., температура обмоток АД превышает допустимую рабочую температуру электродвигателя. Тогда как, при тех же условиях, но при $t_{окр} = 20^\circ\text{C}$ температура обмоток АД не достигает допустимой рабочей температуры электродвигателя;

2) длительность несимметрии напряжений вносит значительный вклад в совокупное негативное влияние факторов. Так, например, при $K_{2U} = 1\%$ и $t_{окр} = 37^\circ\text{C}$, при $T = 5$ мин., температура обмоток АД составит 115°C ; тогда как, при тех же условиях, но при $T = 10$ мин., температура обмоток АД составит 118°C ; при $T = 15$ мин., температура обмоток АД составит 122°C ;

3) нагрузка АД является одним из факторов эксплуатационной надёжности электродвигателей. Так, например, при $K_z = 100\%$, $K_{2U} = 1\%$, $T = 10$ мин., при $t_{окр} = 40^\circ\text{C}$ будет обеспечена стабильная работа электродвигателя. При превышении значения нагрузки АД $K_z = 100\%$ необходимо скорректировать один из данных факторов с учётом реальных условий эксплуатации;

4) значительное снижение надёжности АД происходит при K_{2U} превышающее 4% . Чтобы исключить перегрев и преждевременный выход из строя АД, необходимо изменить один или несколько из исследуемых факторов. Так, например, при $K_{2U} = 3\%$, $T = 10$ мин., $t_{окр} = 34^\circ\text{C}$, $K_z = 88\%$ происходит начало перегрева изоляции обмоток АД, следовательно, следует уменьшить нагрузку АД не менее чем на 10% ;

5) отобразить влияние ряда факторов на эксплуатационную надёжность АД целесообразно ранжированием данных факторов по величине вклада (веса). Используя алгоритм Штейнгауза-Форда-Джонсона [31] получили следующие ранги по убыванию величины вклада: наибольшее влияние, из исследуемых факторов, оказывает величина несимметрии напряжений, следующим фактором является нагрузка АД, после чего длительность несимметрии напряжений и наименьшее влияние оказывает температура окружающей среды. Ранжирование факторов основано на диапазоне изменения температуры обмоток АД от воздействия исследуемых факторов.

Построенная графическая зависимость (рис.6) характеризует множество возможных режимов работы АД с различными величинами внешних воздействий. Поверхность, представленная на графике, иллюстрирует ряд граничных точек допустимой работы АД, например, таких как $K_z = 100\%$, $K_{2U} = 5\%$, $t_{окр} = 40^\circ\text{C}$. Эксплуатационный режим работы АД при различных величинах внешних воздействий представляет собой одну из точек поверхности, например, при $t_{окр} = 30^\circ\text{C}$ и $t_{окр} = 40^\circ\text{C}$. Несмотря на то, что теоретически область допустимых значений велика, в реальных условиях эксплуатации АД она значительно уменьшится, в зависимости от специфики технологического процесса, в котором задействован электродвигатель.

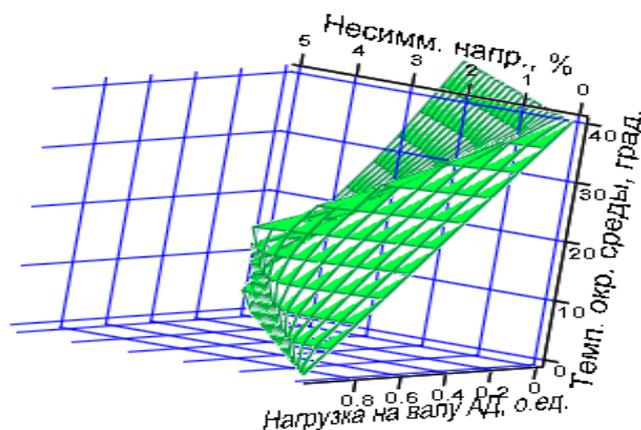


Рис. 6. Область допустимых значений исследуемых факторов

Fig. 6. The range of acceptable values of the studied factors

Таким образом, на основе комплекса исследований, выполненных с использованием имитационного моделирования в программной среде Matlab пакета Simulink сформулированы основные выводы:

- 1) воздействие неблагоприятных факторов кратно уменьшает надёжность асинхронных электродвигателей;
- 2) проведенные исследования показывают необходимость небольшой недогрузки АД при проектировании, эксплуатации объектов, содержащих электродвигательную нагрузку, для создания демпфера по нейтрализации негативного влияния внешних воздействий;
- 3) коридор колебаний температуры обмоток при изменении несимметрии напряжений и её длительности достигает 20°C , что значит даже при наличии недогрузки АД необходимо предусматривать мероприятия по снижению несимметрии напряжений при расположении объектов в зоне влияния мощной резко переменной несимметричной нагрузки;
- 4) экспериментальное исследование показало, что совокупное действие внешних факторов значительно превышает воздействие одного фактора;
- 5) количественный анализ внешних воздействующих факторов имеет ключевую роль при реализации технических решений (средств и методов), направленных на повышение надёжности асинхронных электродвигателей.

Систематизация условий эксплуатации АД, при одновременном воздействии группы эксплуатационных факторов, показывает, что для обеспечения надёжной работы электродвигателей необходимо не допускать одновременного превышения следующих факторов: $K_z = 100\%$, $t_{\text{окр}} = 40^{\circ}\text{C}$, $K_{2U} = 4\%$, при $T = 10$ мин. Допускается кратковременное превышение одного из факторов на 20% от критической величины.

Заключение

Эффективность использования электрических машин в значительной степени определяется уровнем их эксплуатационной надёжности. Именно поэтому, анализ влияния эксплуатационных факторов на надёжность АД, представляющий количественную оценку параметров внешних воздействий, позволяет определить фактический вклад каждого из параметров, определить область допустимой работы асинхронных электродвигателей, кроме того, разработать технические решения, обеспечивающие длительную эксплуатацию электродвигателей с максимальной вероятностью их безотказной работы.

Литература

1. Гольдберг О.Д. Надёжность электрических машин. М.: Издательский центр «Академия». 2010. 288 с.
2. Кузнецов Н.Л. Надёжность электрических машин. М.: Издательский дом МЭИ. 2006. 432 с.
3. Кожухов В.А., Стрижнев С.А. Обзор технологических отказов асинхронных двигателей в сельскохозяйственном производстве // Вестник КрасГАУ. Красноярск: Изд-во КрасГАУ. 2006. №11. С. 199-202.
4. Tabora J.M., Tostes M.E., de Matos E.O. et al. Assessing voltage unbalance conditions in IE2, IE3 and IE4 classes induction motors // IEEE Access. 2020. V.8. pp.186725-186739. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3029794>.
5. 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. 16935 - 16946.
6. 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.
7. Казаков Ю.Б., Андреев В.А. Влияние несимметрии напряжений на энергетические показатели асинхронного двигателя // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2007. № 9-10. С. 73-80.
8. Singh S., Ajay S. Voltage Unbalance and Its Impact on the Performance of Three Phase Induction Motor: A Review // International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology. 2019. V. 7. Issue. VII.
9. Романова В.В., Хромов С.В. Влияние несимметрии питающих напряжений на режимы работы асинхронных электродвигателей // Методические вопросы исследования надёжности больших систем энергетики. Надёжность развивающихся систем энергетики. Вып. 69. В 2-х книгах. Отв. ред. Н.И. Воропай. Иркутск: ИСЭМ СО РАН. 2018. С.402-411.
10. Tabora J.M., Tostes M.E., de Matos E.O., Soares T.M., Bezerra U.H. Voltage Harmonic Impacts on Electric Motors: A Comparison between IE2, IE3 and IE4 Induction Motor Classes // Energies. 2020. V. 13(13). 3333.

11. Tabora J.M., de Matos E.O., Soares T.M., 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 André, São Paulo, Brazil. 2020.
12. Ferreira F.J.T.E., Benoit Leprettre B., de Almeida A.T. Comparison of Protection Requirements in IE2-, IE3-, and IE4-Class Motors // IEEE Transactions on Industry Applications. 2016. V.52. Issue. 4. pp. 3603 – 3610.
13. 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. V.10. № 3.
14. Макаров В. Г. Идентификация параметров трёхфазного асинхронного двигателя // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2010. № 3-4. С. 88-101.
15. Воронин В.А. Анализ факторов, влияющих на помехоустойчивость асинхронных двигателей // Вестник КузГТУ. Кемерово: Изд-во КузГТУ. 2016. №5. С.67-73.
16. 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.
17. 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.
18. Пинчук О.Г. Оценка теплового состояния асинхронных двигателей в повторно-кратковременных режимах при несимметрии напряжения сети // Вестник СевДТУ. 2008. № 88. С. 97-103.
19. Федоров М.М. Особенности теплового состояния асинхронных двигателей при несимметричном питающем напряжении // Кременчуг: Изд-во Вестник Кременчугского государственного политехнического университета. 2004. №. 2 (25). С. 122-125.
20. Хомутов С.О., Кобозев Е.В. Прогнозирование вероятности безотказной работы электродвигателей на основе количественной оценки степени влияния воздействующих факторов // Вестник АлтГТУ им. И.И. Ползунова. Барнаул: Издательский центр АлтГТУ им. И.И. Ползунова. 2006. №2. С. 4-8.
21. Герман-Галкин С., Кардонов Г. Электрические машины: лабораторные работы на ПК. СПб.: Корона-принт. 2003. 256 с.
22. Paredes L., Molina M., Serrano B.R. Modeling of DSTATCOM devices to improve dynamic voltage stability in a microgrid with high penetration of motor loads // Revista Técnica Energía. 2020. №. 17. Issue. I. pp.32-42.
23. Boufadene M. Modeling and control of AC machine using MATLAB®/SIMULINK. Boca Raton: CRC Press. 2018. <https://doi.org/DOI: 10.1201/9780429029653>.
24. 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.
25. Omar A., Abdulrahman A., Rashed G. Direct on line operation of three phase induction motor using MATLAB // Journal of Zankoy Sulaimani. 2019. V.21(2). Part A. pp.21 – 24.
26. Оморов Т.Т., Такырбашев Б.К., Осмонова Р.Ч. К проблеме математического моделирования трёхфазной несимметричной распределительной сети // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22. № 1. С. 93 – 102.
27. Общепромышленные асинхронные электродвигатели Электронный ресурс. http://electronpo.ru/dvigatel_air160s.
28. Дед А.В. К проблеме современного состояния уровней показателей несимметрии напряжений и токов в сетях 0,4 кВ // Омский научный вестник. Омск: Изд-во ОмГТУ. 2017. № 2 (152). С. 63-65.
29. Prakash C., Saini R. IoT-based monitoring and controlling of crop field and induction motor protection from voltage fluctuation // Agricultural Journal. 2020. Vol.15(4). pp.49 – 56.
30. Протокол №5. Претензионных испытаний электрической энергии по показателям качества. Филиал ОАО «МРСК Сибири» - «Читаэнерго». Испытательная лаборатория по качеству электрической энергии. 2015. 27 с.
31. Ключникова Е.В., Шитова Е.М. Методические подходы к расчёту интегрального показателя, методы ранжирования // Научно-практический журнал «ИнноЦентр». Тверь: Изд-во Тверской ИнноЦентр. 2016. №1(10). С. 4 – 18.

Авторы публикации

Романова Виктория Викторовна – старший преподаватель кафедры «Энергетики», Забайкальский государственный университет, г. Чита. E-mail: romanova181@mail.ru.

Хромов Сергей Владимирович – старший преподаватель кафедры «Энергетики», Забайкальский государственный университет, г. Чита. E-mail: sergeixrom@inbox.ru/

Суслов Константин Витальевич – д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Электроснабжения и электротехники» Иркутского национального исследовательского технического университета, г. Иркутск. E-mail: souslov@istu.edu.

References

1. Goldberg OD. *Reliability of electric machines*. M.: Publishing center «Academy». 2010; 288 p.
2. Kuznetsov NL. *Reliability of electric machines*. M.: Publishing house MEI. 2006; 432 p.
3. Kozhukhov VA, Strizhnev SA. Review of technological failures of asynchronous motors in agricultural production. *Vestnik KrasGAU*. Krasnoyarsk: KrasGAU Publishing House. 2006; 11; 199 – 202.
4. Tabora JM, Tostes ME, de Matos EO, Bezerra UH, Soares TM, de Albuquerque BS. *Assessing voltage unbalance conditions in IE2, IE3 and IE4 classes induction motors*. IEEE Access. 2020;8;186725-186739. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3029794>.
5. 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. <https://doi.org/10.1007/s00500-020-04986-6>.
6. Campbell M, Arce G. *Effect of motor voltage unbalance on motor vibration: test and evaluation*. IEEE Transactions on Industry Applications. 2018; 54; 905–911. <https://doi.org/10.1109/TIA.2017.2759085>.
7. Kazakov YuB, Andreev VA. Influence of voltage asymmetry on the energy performance of an asynchronous motor. *Izvestiya vysshikh educational institutions. Energy problems*. 2007; 9-10; 73-80.
8. Singh S, Ajay S. Voltage Unbalance and Its Impact on the Performance of Three Phase Induction Motor: A Review. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*. 2019; 7 p. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2019.7016>.
9. Romanova VV, Khromov SV. Influence of supply voltage asymmetry on operating modes of asynchronous electric motors. *Methodological issues of research on the reliability of large energy systems. Reliability of developing energy systems*. Otv. red. N.I. Voropai. Irkutsk: ISEM SO RAN. 2018; 69:402-411.
10. Tabora JM, Tostes ME, de Matos EO, Soares TM, Bezerra UH. *Voltage Harmonic Impacts on Electric Motors: A Comparison between IE2, IE3 and IE4 Induction Motor Classes*. Energies. 2020; 13(13); 3333 p. <https://doi.org/10.3390/en13133333>.
11. Tabora JM, de Matos EO, Soares TM, Tostes ME. 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. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3029794>.
12. Ferreira FJTE, Benoit Lepretre B, de Almeida AT. *Comparison of Protection Requirements in IE2-, IE3-, and IE4-Class Motors*. IEEE Transactions on Industry Applications. Issue. 4. 2016; 52; 3603 – 3610. <https://doi.org/10.1109/TIA.2016.2545647>.
13. 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. <https://doi.org/http://doi.org/10.11591/ijece.v10i3.pp2259-2270>.
14. Makarov VG. Identification of the parameters of a three-phase asynchronous motor. *Izvestiya of higher educational institutions. Energy problems*. 2010;3-4; 88-101.
15. Voronin VA. Analysis of factors affecting the noise immunity of asynchronous motors. *Bulletin of KuzGTU*. Kemerovo: Izd-vo KuzGTU. 2016; 5; 67-73.
16. Romanova VV, Khromov SV. Operational reliability of low-voltage asynchronous electric motors in conditions of voltage asymmetry. *Problems of energy and resource saving. Tashkent: Publishing house of Tashkent state University*. 2019; 4; 136-148.
17. Khomutov SO. Analysis of the influence of external factors on the state of insulation electric motors. *Polzunovsky Vestnik*. Barnaul: Publishing center of AltSTU named after I.I. Polzunov. Pt 3. 2005; 4; 260-267.
18. Pinchuk OG. Estimation of the thermal state of asynchronous motors in repeated-short-term modes with network voltage asymmetry. *Vestnik SevDTU*. 2008; 88; 97-103.
19. Fedorov MM. *Features of the thermal state of asynchronous motors with asymmetric supply voltage*. Kremenchug: Publishing house of the Kremenchuksky state Politechnical University. 2004; 2 (25); 122-125.
20. Khomutov SO, Kobozev EV. *Predicting the probability of failure-free operation of electric motors based on a quantitative assessment of the degree of influence of influencing*

factors. Polzunovsky Vestnik. Barnaul: Publishing center of AltSTU named after I. I. Polzunov. 2006; 2; 4-8.

21. German-Galkin S, Kardonov G. *Electric machines: laboratory work on PC*. SPb.: Korona-print. 2003; 256 p.

22. Paredes L, Molina M, Serrano BR. *Modeling of DSTATCOM devices to improve dynamic voltage stability in a microgrid with high penetration of motor loads*. Revista Técnica Energía. Issue.I. 2020;7;32-42. <https://doi.org/10.37116/REVISTAENERGIA.V17.N1.2020.400>.

23. Boufadene M. *Modeling and control of AC machine using MATLAB®/SIMULINK*. Boca Raton: CRC Press. 2018. <https://doi.org/10.1201/9780429029653>.

24. Kholiddinov IKh, Musinova Gulasalkhon, Yulchiev ME., Tuychiev ZZ., Kholiddinova MM. *Modeling of calculation of voltage unbalance factor using Simulink (Matlab)*. The American Journal of Engineering And Techonology. 2020;2(10);33-37. <https://doi.org/10.37547/tajet/Volume02Issue10-07>.

25. Omar A, Abdulrahman A, Rashed G. *Direct on line operation of three phase induction motor using MATLAB*. Journal of Zankoy Sulaimani. Part A. 2019; 21(2); 21-24. <https://doi.org/10.17656/jzs.10754>.

26. Omorov TT, Takyrbashev BK, Osmonova RCh. *On the problem of mathematical modeling of a three-phase asymmetric distribution network*. Izvestiya vysshikh educational institutions. Energy problems. 2020;22(1); 93-102. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-1-93-102>.

27. *General industrial asynchronous electric motors* (Electronic resource). http://electronpo.ru/dvigatel_air160s.

28. Ded AV. *On the problem of the current state of the levels of voltage and current asymmetry indicators in 0.4 kV networks*. Omsk scientific bulletin. Omsk: Publishing house OmGTU. 2017;2(152);63-65.

29. Prakash C, Saini R. *IoT-based monitoring and controlling of crop field and induction motor protection from voltage fluctuation*. Agricultural Journal. 2020;15(4); 49-56. <https://doi.org/10.36478/aj.2020.49.56>.

30. *Protocol № 5. Claim tests of electric energy by quality indicators*. The branch of JSC «DGC of Siberia» – «Chitaenergo». Testing laboratory for the quality of electrical energy. 2015; 27 p.

31. Klyushnikova EV, Shitova EM. *Methodological approaches to calculating the integral indicator, ranking methods*. Scientific and practical journal «Innocenter». Tver: Tver Innocenter Publishing House. 2016;1 (10);4-18.

Authors of the publication

Victoria V. Romanova – Trans-Baikal State University, Chita, Russia. E-mail: romanova181@mail.ru.

Sergey V. Khromov – Trans-Baikal State University, Chita, Russia. E-mail: sergeixrom@inbox.ru.

Konstantin V. Suslov – Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia. E-mail: souslov@istu.edu.

Получено 23.04.2021

Отредактировано 12.05.2021

Принято 23.05.2021