

УДК 621.313.333.2

DOI: 10.35211/2500-0586-2024-2-47-13-18

*А. В. Стрижиченко, В. В. Ефимов***МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАРЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ АСИНХРОННЫХ
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ОТВЕТСТВЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ
ТЕПЛОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ В СРЕДЕ SIMINTECH****Филиал «НИУ «МЭИ» (г. Волжский)**

Strizhichenko@vfmei.ru, EfimVlad999@yandex.ru

Автор, ответственный за переписку:

Александр Васильевич Стрижиченко, Strizhichenko@vfmei.ru

В настоящее время актуальными являются вопросы надежности ответственного силового электрооборудования, к которому можно отнести электрические асинхронные и синхронные двигатели. Регламентируемый заводом-изготовителем срок службы асинхронного двигателя составляет 15–25 лет при условии работы в нормальном режиме. В течении эксплуатации электродвигатель испытывает ряд негативных воздействий, отличающихся между собой интенсивностью и временем возмущения, что приводит к нарушению механической прочности и ускоренному старению изоляции, что в свою очередь уменьшает срок службы оборудования.

Целью данных исследований является разработка математического аппарата описания ускоренного старения изоляции асинхронных двигателей, которое выражено повышением температуры обмоток электрических машин, что приводит к ускоренному старению изоляции.

Алгоритм расчета основан на приведении внешних возмущений, таких как температура обмоток, несинусоидальность и несимметрия потребляемого машиной электрического тока, повышение температуры окружающей среды на состояние обмотки статора, что в свою очередь уменьшает срок службы асинхронного двигателя.

По окончании исследований программный комплекс будет предназначен для расчета и корректировки времени ближайшего обслуживания машины на основании технического состояния агрегата.

Ключевые слова: асинхронные электродвигатели, ускоренное старение изоляции, SimInTech, долговечность, качество электроэнергии, прогнозирование

*A. V. Strizhichenko, V. V. Efimov***MODELING OF INSULATION AGING OF ASYNCHRONOUS
ELECTRIC MOTORS OF RESPONSIBLE CONSUMERS
OF THERMAL POWER PLANTS IN SIMINTECH ENVIRONMENT****Branch of "MPEI" (Volzhskiy)**

Nowadays the questions of reliability of the responsible power electrical equipment, to which electric asynchronous and synchronous motors can be referred, are actual. The service life of induction motor regulated by the manufacturer is 15–25 years under condition of operation in normal mode. During operation, the electric motor experiences a number of negative effects, differing between themselves intensity and time perturbation, which leads to a violation of mechanical strength and accelerated aging of insulation, which in turn reduces the service life of the equipment.

The purpose of this research is to develop a mathematical apparatus to describe the accelerated aging of the insulation of induction motors, which is expressed by an increase in the temperature of the windings of electrical machines, which leads to accelerated aging of insulation.

The calculation algorithm is based on bringing external perturbations such as winding temperature, non-sinusoidality and asymmetry of the electric current consumed by the machine, increasing ambient temperature on the state of the stator winding, which in turn reduces the service life of the induction motor.

At the end of the research, the software package will be designed to calculate and adjust the time of nearest machine maintenance based on the technical condition of the machine.

Keywords: induction motors, accelerated insulation aging, SimInTech, durability, power quality, forecasting

Расчеты качественного влияния повышения температуры на деградацию изоляции осуществлены с помощью общих законов кинетики

химических реакций уравнения Вант – Гоффа и Аррениуса, в котором постоянная скорость протекания реакции является величиной, опре-

деляющей относительное число эффективных столкновений частиц, завершающихся химическим взаимодействием [9, 107 с]:

$$K = A \exp \left[\frac{-E_A}{R \cdot Q} \right], \quad (1)$$

где A – коэффициент; E_A – энергия активации, Дж/моль; $R = 8,317$ Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная; Q – абсолютная температура, °С.

Приведем формулу (1) к времени достижения изоляцией предельного состояния вследствие старения:

$$\ln \tau = \frac{-E_A}{R \cdot Q} - G \quad (2)$$

$$G = \ln A - \ln \ln \left(\frac{C_0}{C} \right), \quad (3)$$

где C_0 – начальная концентрация молекул, м⁻³; C – конечная концентрация молекул, м⁻³.

Если известна кривая изменения температуры машины от времени, то можно рассчитать уточненный срок службы изоляции:

$$\tau_2 = \tau_1 \cdot \exp \left[B \cdot \left(\frac{1}{\theta_2} - \frac{1}{\theta_1} \right) \right], \quad (4)$$

где τ_2 – уточненный срок службы изоляции, ч; θ_1 – первоначальная температура машины при τ_1 , °С; θ_2 – температура машины на участке времени τ_2 , °С; $B = \frac{E_A}{R}$ – табличный параметр изоляции, 10⁻⁴ °С.

Формула расчета уточненного срока службы изоляции является приближенной ввиду неоднородности конструкции асинхронного двигателя, параметры переменных E_A , B и G получены экспериментально, значения которых для каждого типа изоляции приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры срока службы изоляции

Класс изоляции	$B, 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}$	$G, \text{ м}^{-3}$	$E_A, \text{ Дж/моль}$	Класс изоляции	$B, 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}$	$G, \text{ м}^{-3}$	$E_A, \text{ Дж/моль}$
A	0,95	15,3	7,9	F	1,27	19,7	10,55
E	0,985	15,1	8,19	H	1,55	24,2	12,89
B	1,02	15,5	8,48	C	1,55	21,8	12,89

К повышению температуры обмоток могут привести не только увеличение осевого момента и температуры окружающей среды, но и ухудшение качества электроэнергии, а именно, несимметрия и несинусоидальность напряжений. На сегодняшний день имеет место тенденция роста потребления нагрузки с нелинейной вольт-амперной характеристикой. Несинусоидальные режимы негативно сказываются на работе систем автоматики и релейной защиты, приводят к увеличению погрешности устройств учета электроэнергии, вызывают дополнительный нагрев силового оборудования и усиление ионизационных процессов, тем самым уменьшая его срок службы.

Провалы и пики напряжений имеют кратковременный фронт воздействия, при этом приводят к скачкообразному переходу в новый установившийся режим с временным увеличением протекающего тока и роста температуры обмоток. Основная доля потерь в электрической машине от высокочастотных гармоник приходится на обмотки статора и ротора, при этом дополнительными потерями в стали ротора и статора можно пренебречь ввиду их незначительного воздействия. Влияние высших гармоник на рост дополнительных потерь для

асинхронных машин представлен на рис. 1 [5], на котором построена характеристика зависимости средних дополнительных потерь от номера гармоники n .

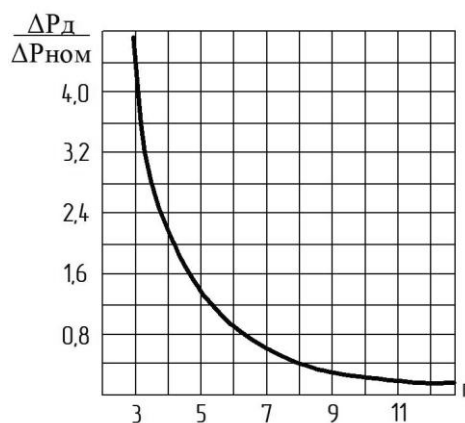


Рис. 1. Влияние высших гармоник на дополнительные потери в асинхронных двигателях

Как видно из графика, наибольшее влияние оказывают гармоники низкого порядка, когда последующими можно пренебречь ввиду их незначительного воздействия, при этом значение удельных дополнительных потерь также зависит от последовательности чередования векторов.

Дополнительные потери от высших гармоник рассчитаем по формуле:

$$\Delta P_{\text{м.п.}} = 2 \cdot \Delta P_{\text{м.ном.}} \cdot K_I^2 \sum \left(k_{U(n)}^2 \cdot \frac{1}{n \cdot \sqrt{n}} \right), \quad (5)$$

где $\Delta P_{\text{м.ном.}}$ – паспортные потери в меди статора, кВт; $\Delta P_{\text{м.п.}}$ – дополнительные потери в меди статора, вызванные n -ной гармоникой тока, кВт; K_I – кратность пускового тока; n – номер гармонической составляющей; $k_{U(n)}$ – коэффициент n -ной гармонической составляющей в относительных единицах.

Расчет дополнительных потерь от токов обратной последовательности при несимметрии напряжений рассчитывается согласно:

$$\Delta P_{\text{м.нс.}} = 2,41 \cdot \Delta P_{\text{м.ном.}} \cdot K_I^2 \cdot \varepsilon_U^2, \quad (6)$$

где ε_U – коэффициент несимметрии напряжения, заданный в относительных единицах.

Прирост температуры от токов высших гармоник и обратной последовательности:

$$\Delta t_1 = \theta_{\text{ном.}} \cdot \frac{\Delta P_{\text{м.п.}} + \Delta P_{\text{м.нс.}}}{\Delta P_{\text{м.ном.}}}, \quad (7)$$

где Δt_1 – прирост температуры от воздействия токов высших гармоник и обратной последовательности, °C; $\theta_{\text{ном.}}$ – паспортная температура работы двигателя, °C.

Подставим дополнительные коэффициенты в формулу (4), получим уточненную формулу расчета старения изоляции:

$$\tau_2 = \tau_1 \cdot \exp \left[B \cdot \left(\frac{1}{\theta_1 + \Delta t_{\text{окр}} + \Delta t_1} - \frac{1}{\theta_1} \right) \right], \quad (8)$$

где $\Delta t_{\text{окр}}$ – прирост температуры окружающей среды сверх номинальной, °C.

1. Моделирование в среде SimInTech

Для моделирования принят питательный насос ПЭ 580-185-3, применяемый для подачи воды с температурой до 165 °C тепловых электрических станций с номинальными параметрами и условиями работы, приведенными ниже:

электрическая мощность
коэффициент мощности
нормальный срок службы
рабочая температура работы
кратность пускового тока
номинальное напряжение
коэффициент 2 гармоники
коэффициент 3 гармоники
коэффициент несимметрии напряжения

$P_{\text{ном}} = 2000$ кВт;
 $\cos(\varphi) = 0,92$;
 $\tau_1 = 25000$ час;
 $\theta_{\text{ном}} = 75$ °C;
 $K_I = 5,1$;
 $U_{\text{ном}} = 380$ В
 $k_{U(3)} = (0 \div 1)$ %;
 $k_{U(5)} = (0 \div 0,7)$ %;
 $\varepsilon_U = (0 \div 1,5)$ %.

На основе представленных параметров разработана модель в программном комплексе SimInTech, позволяющая моделировать влия-

ние указанных факторов на скорость старения изоляции электрической машины, изображенной на рис. 2:

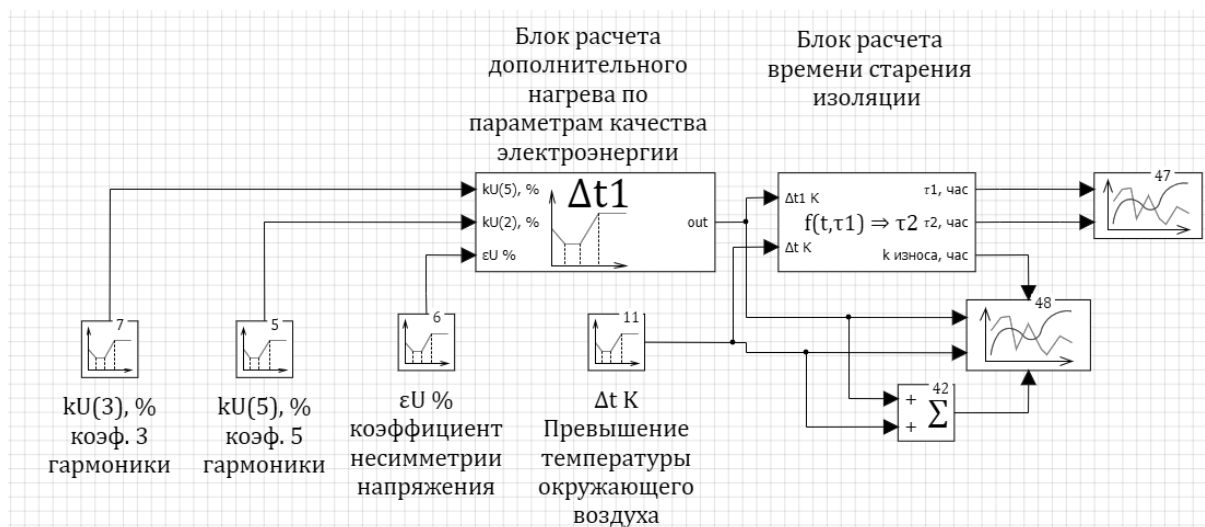


Рис. 2. Схема модели влияния дополнительного нагрева на скорость старения изоляции электрической машины в среде SimInTech

Схема состоит из двух субмоделей, блока расчета дополнительного нагрева по параметрам качества электроэнергии, представленного

на рис. 3, и блока расчета скорости старения изоляции на рис. 4.

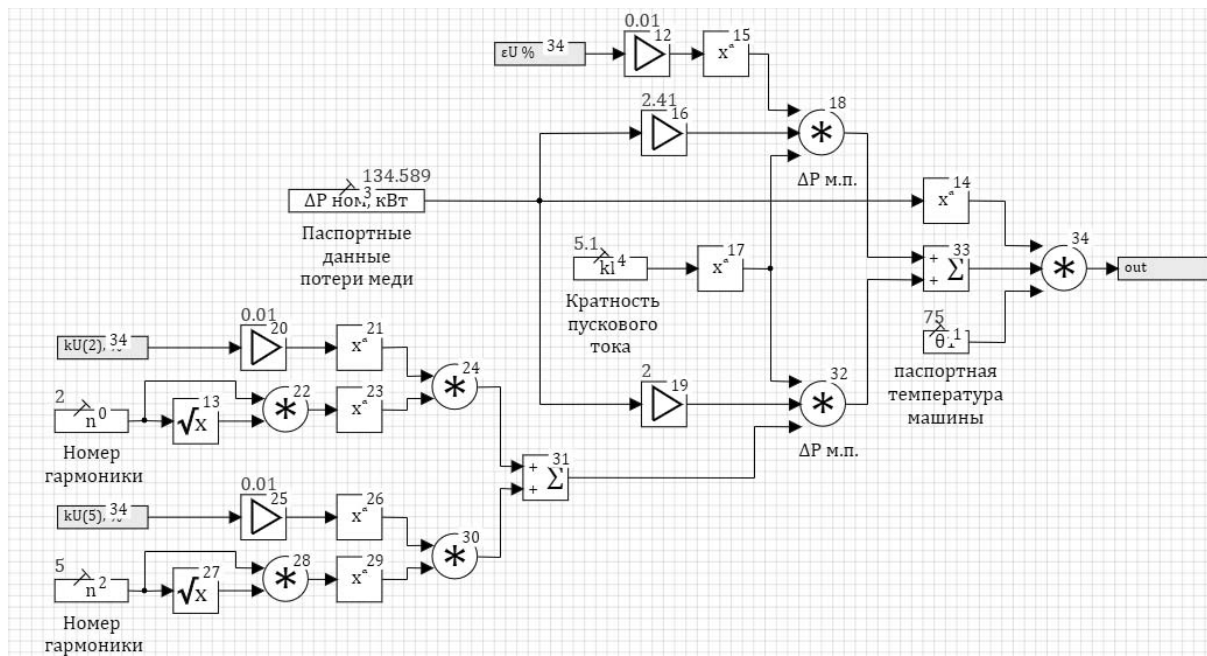


Рис. 3. Схема блока расчета влияния качества электроэнергии на скорость износа изоляции электрической машины в среде SimInTech

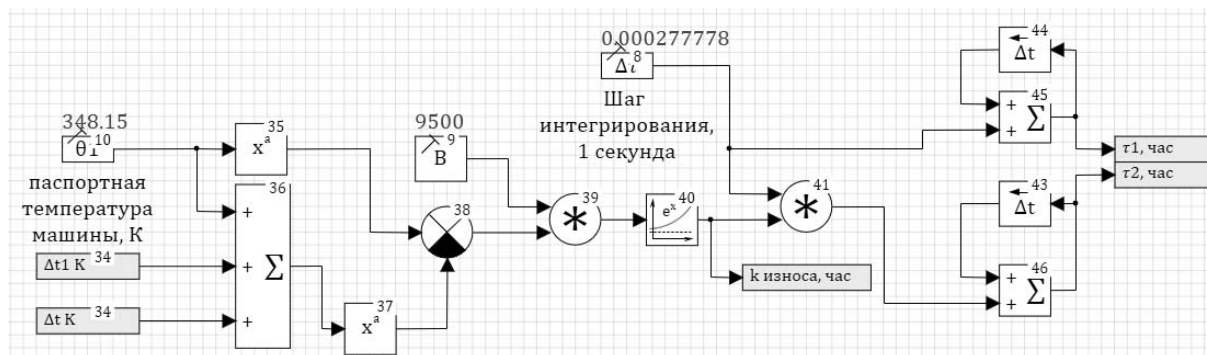


Рис. 4. Схема блока расчета скорости износа изоляции электрической машины в среде SimInTech

На рис. 5 приведены результаты моделирования зависимости коэффициента ускорения износа изоляции от влияющих факторов в соответствии с суточным графиком работы электроустановки. Базовым значением коэффициента принята единица, дополнительный нагрев увеличивает данное значение.

Для проверки модели расчета коэффициента износа, представленного на рис. 5, на участ-

ке времени 0–2 часа выключено внешнее воздействие, при этом прогнозируемый коэффициент равен стандартному, вследствие чего можно заключить, что модель не искажает кривую износа изоляции при отсутствии внешнего воздействия.

На рис. 6 представлен накопительный эффект воздействия дополнительного нагрева в часах нормального износа.

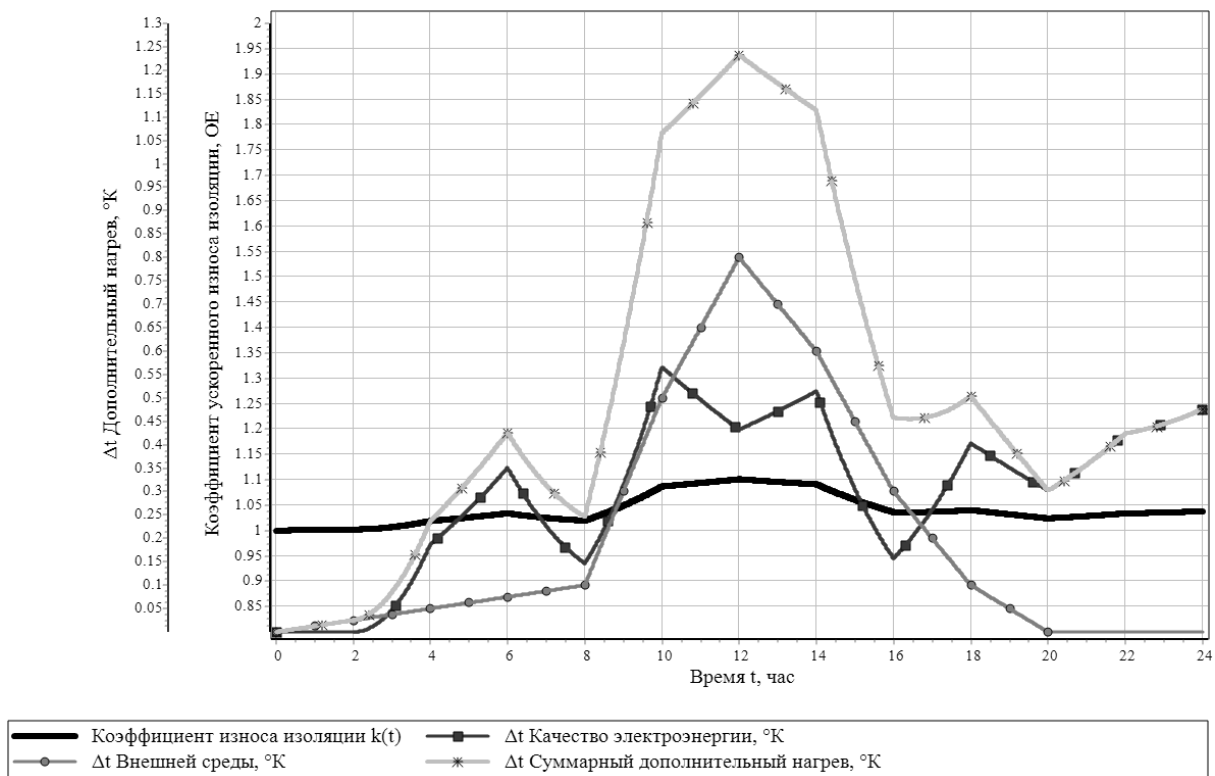


Рис. 5. Результаты моделирования зависимости коэффициента ускорения износа изоляции от влияющих факторов в соответствии с суточным графиком

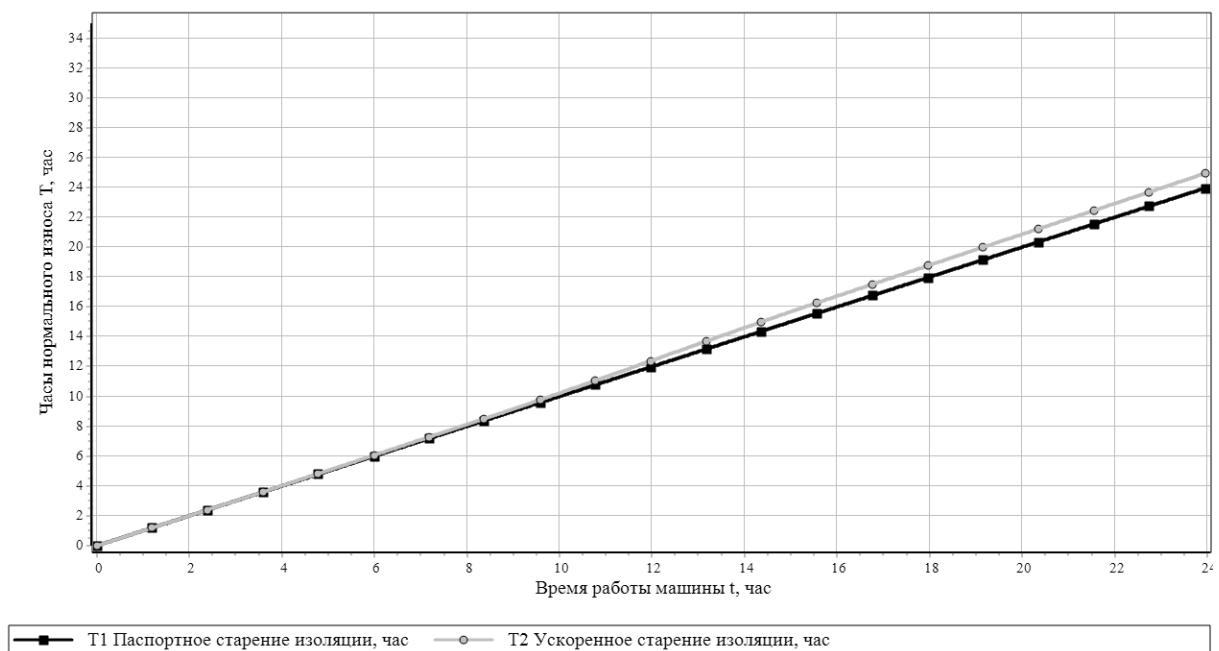


Рис. 6. Результаты моделирования сокращения остаточного ресурса изоляции электрической машины от влияющих факторов в соответствии с суточным графиком

На основе моделирования 24 часов работы насоса питательной воды ПЭ 580-185-3 можно сделать вывод о том, агрегат отработал 25 часов нормального износа, что в перспективе со-

ответствует сокращению на 1000 часов нормального срока службы данного агрегата. Данный математический комплекс поможет спрогнозировать действительное время выхода из

стройка оборудования и своевременно вывести насос в ремонт.

Предложенная методика позволит оценивать скорость износа изоляции электрических машин и прогнозировать остаточный ресурс по изоляции, что особенно актуально при эксплуатации ответственных электродвигателей, например, в системе собственных нужд электростанции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 32144-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
2. Губин, М. Д. Влияние качества электроэнергии на скорость износа оборудования / М. Д. Губин, А. В. Стрижиченко // Энергетика будущего: городская научно-практическая конференция, г. Волжский, 21 апреля 2017 г. / тезисы докладов. – Волжский: Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Волжском, 2017. – 41 с.
3. Губин, М. Д. Оценка влияния коэффициента несимметрии напряжений на нагрев асинхронного двигателя / М. Д. Губин, А. В. Стрижиченко // Управление качеством электрической энергии: Сборник трудов Международной научно-практической конференции. (Москва, 05–07 декабря 2018 г.) – М.: ООО «Центр полиграфических услуг “Радуга”», 2018. – 188 с.

4. Зенина Е. Г., Стрижиченко А. В., Ефимов В. В. Математическая модель оценки технического состояния и прогнозирования аварийных режимов энергетического оборудования электростанций на примере силового трансформатора / The third conference «Problems of thermal physics and power engineering» / Journal of physics: conference series. – 2020. – № 1683. – Р. 1–10.
5. Кузнецов, Н. Л. Надежность электрических машин: учеб. пособие для вузов / Н. Л. Кузнецов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 432 с.
6. Правила устройства электроустановок ПУЭ. – 7-е изд. – М.: Изд-во НПЭ ЭНАС, 2003.
7. Султанов, М. М. Оценка надежности работы электрооборудования при наличии высших гармоник токов и напряжения / М. М. Султанов, Е. Г. Зенина, А. В. Стрижиченко, В. Г. Кульков, О. И. Желяскова // Электротехника. – 021. – № 8. – С. 61–67.
8. Султанов, М. М. Анализ влияния несинусоидальности напряжений в электросетях многоквартирных домов на надежность и эффективность работы трансформаторов / М. М. Султанов, А. В. Стрижиченко, С. А. Янченко // Надежность и безопасность энергетики. – 2022. – Т. 15. – № 4. – С. 278–283.
9. Жежеленко, И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И. В. Жежеленко. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 331 с.
10. Электромагнитная совместимость потребителей [Текст]: моногр. / И. В. Жежеленко, А. К. Шидловский, Г. Г. Пивняк и др. – М.: Машиностроение, 2012. – 351 с.