
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 62-83:621.313:621.039

EDN *DNLEDL***ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОПУСТИМОЙ
ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ВКЛЮЧЕНИЯ
И ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК
ИНДУКТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ, РАБОТАЮЩЕГО
С ФОРСИРОВАННЫМ ТОКОМ****А.Ю. Смирнов**

ORCID: 0000-0002-2391-0942 e-mail: a_yu_smirnov@mail.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***Д.А. Кудряшов**

e-mail: kud1904@rambler.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***Д.А. Ульянов**

ORCID: 0000-0002-3328-8675 e-mail: klinkswwww@mail.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Рассмотрен тепловой процесс нагрева обмотки индукторного двигателя привода аварийной защиты ядерного реактора форсированным током. Сделано допущение об отсутствии теплоотвода во внешнюю среду. Представлены зависимости электромагнитного момента и времени достижения температуры обмоток, соответствующей классу нагревостойкости изоляции, от величины тока. Полученные зависимости использованы для определения допустимого времени работы двигателя без перегрева изоляции обмоток при требуемом повышенном электромагнитном моменте. В нештатных эксплуатационных режимах различного характера время работы двигателя может превышать допустимое. Рассмотрен остаточный ресурс изоляции обмоток при нагреве выше температуры, соответствующей классу нагревостойкости изоляции. Оценка выполнена по двум формулам. Первая содержит коэффициент, учитывающий класс изоляции, а вторая, упрощенная, использует правило «пятна-дцати градусов». Результаты расчетов для провода класса нагревостойкости 220°C почти полностью совпали. Отмечено, что даже небольшое превышение температуры

обмотки над классом нагревостойкости провода приводит к резкому снижению остаточного ресурса изоляции обмотки двигателя.

Ключевые слова: изоляция; индукторный двигатель; обмотка; остаточный перегрев; привод системы управления и защиты; ресурс.

Для цитирования: Смирнов А.Ю., Кудряшов Д.А., Ульянов Д.А. Определение допустимой продолжительности включения и остаточного ресурса изоляции обмоток индукторного двигателя, работающего с форсированным током // Интеллектуальная Электротехника. 2026. № 3. С. 4-14. EDN DNLEDL

DETERMINATION OF PERMISSIBLE SWITCH-ON TIME AND REMAINING LIFE OF WINDINGS INSULATION OF SWITCHED RELUCTANCE MOTOR OPERATING WITH FORCED CURRENT

A.Yu. Smirnov

ORCID: 0000-0002-2391-0942 e-mail: a_yu_smirnov@mail.ru
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

D.A. Kudryashov

e-mail: kud1904@rambler.ru
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

D.A. Ulyanov

ORCID: 0000-0002-3328-8675 e-mail: klinkswww@mail.ru
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. Heating of the switched reluctance motor operating with forced current was considered. The motor is a part of the emergency protection drive of a nuclear reactor. The assumption about the impossibility of heat dissipation was accepted. Dependencies of electromagnetic torque and the time (during which temperature of windings reach level of insulation heat resistance class) from value of current was represented. Obtained dependencies have been used to determine permissible switch-on time. During the time windings insulation don't have to overheat and the motor have to have the high value of electromagnetic torque. A motor switch-on time can increase over the permissible level in the emergency operational modes of a different nature. A remaining life of the winding's insulation has been considered. In this case temperature of the windings have to be higher than the level of insulation heat resistance class. The considering has been carried on by two functions. The first includes ratio considering heat resistance class. The second is a simplified function. It uses "the law of fifteen degrees". The wire which heats resistance class equals

two hundred and twenty degrees was used. The computational results have nearly coincided. A small overheating of windings can result in a huge decrease of remaining insulation life.

Keywords: insulation; switched reluctance motor; winding; overheating; drive of reactor control and safety system; resource.

For citation: A.Yu. Smirnov, D.A. Kudryashov and D.A. Ulyanov, “Determination of permissible switch-on time and remaining life of windings insulation of switched reluctance motor operating with forced current”, *Smart Electrical Engineering*, no. 3, pp. 4-14, 2026. EDN DNLEDL

I. Введение

К ответственным механизмам автоматического управления для позиционирования регулирующих органов (РО) системы управления и защиты ядерных энергетических установок предъявляется требование обеспечения функции перемещения РО в заданном направлении в различных нештатных режимах, в том числе аварийных, которые с большой вероятностью сопровождаются скачкообразным ростом момента нагрузки [1, 2].

Для наиболее полной реализации этого требования необходимо использовать двигатели с большой отдачей по моменту с увеличением (форсировкой) тока. На основе анализа различных типов бесконтактных машин, синхронных и асинхронных было установлено, что наиболее подходящими для этой цели являются бесконтактные двигатели с электромагнитным возбуждением индукторного типа. Эти двигатели наиболее надежны и обладают относительно низким магнитным сопротивлением путей прохождения потока, обеспечивающего создание увеличенного – форсированного момента [3]. Для того, чтобы рост тока не приводил к глубокому насыщению, препятствующему эффективному увеличению момента, двигатель должен быть спроектирован таким образом, чтобы максимальная индукция в магнитопроводе статора машины, подстраиваемая при проектировании выбором размера зазора между статором и ротором, принимала заранее выбранное предварительное значение, недалеко за «коленом» кривой намагничивания электротехнической стали [4]. Для большинства материалов это значение находится в пределах $B_{Fe\ max}=1,1 \dots 1,2$ Тл.

Анализ ненормальных и аварийных режимов работы предполагает определение повышенного уровня момента и наибольшей продолжительности работы, с которым двигатель и привод должен обеспечить принудительное перемещение регулирующего органа. Она определяется временем перемещения регулирующего органа из крайнего верхнего положения в крайнее нижнее положение – в положение минимальной реактивности с заданной скоростью.

Скорость поступательного перемещения стержня-поглотителя, и связанного с ней через механическую передачу скорость вращения ротора двигателя, прямо пропорциональна длине активной зоны, и обратно пропорциональна полной эффективности регулирующего органа, в долях от полной реактивности (с учетом коэффициента нелинейности в каждой конкретной точке). Полному перемещению регулирующего органа в активной зоне соответствует средняя его эффективность на протяжении движения.

Исходя из этой скорости можно определить наибольшую продолжительность работы двигателя и привода в аварийном режиме, как время, необходимое для полного перемещения регулирующего органа на всю длину активной зоны. При этом возникает задача определения наибольшего момента, с каким двигатель способен преодолевать броски нагрузки, которые могут возникнуть в механической передаче на стержень, например, в случае его искривления или деформации направляющих.

II. Материалы и методы

Расчеты конкретного механизма выполнены для привода с четырехфазным индукторным шаговым двигателем (рис. 1). Масса меди его обмотки составляет $m = 7,41$ кг. Температура в зоне расположения двигателя в режиме нормальной эксплуатации достигает $T_0 = 150$ °С. Применен провод ПНЭТ-имид с максимально допустимой температурой нагрева изоляции $T_{из} = 220$ °С.

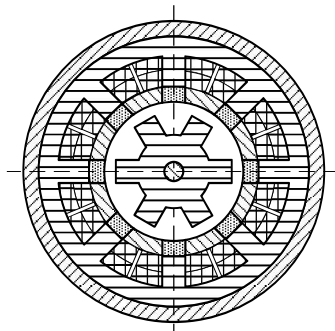


Рис. 1. Четырехфазный герметичный переменнo-полюсный индукторный двигатель

Fig. 1. Four-phases switched reluctance sealed motor with alternating poles

Для определения допустимой продолжительности включения и кратности момента по отношению к номинальному (перегрузочной способности), который двигатель способен развивать без недопустимого нагрева за указанный интервал времени, предварительно рассчитывается зависимость момента от форсированного тока динамическом режиме работы двигателя. В отсутствие экспериментальных зависимостей характеристики момента

рассчитываются методом конечных элементов по сеточной модели [5-8].

Затем, исходя из электрических потерь, массы обмоточных проводов и теплоемкости меди, определяется время, в течение которого двигатель должен переместить регулирующий орган на всю длину активной зоны реактора. Расчет выполняется при следующих допущениях:

- процесс тепловыделения является равномерным во времени;
- теплоотвод (теплопередача) во внешнее пространство отсутствует.

Тогда продолжительность работы двигателя до выхода из строя его изоляции определяется из термодинамического уравнения:

$$t = \frac{(T_{из} - T_0) \cdot C_m \cdot m}{P_m} [с], \quad (1)$$

где $T_{из}$ – класс нагревостойкости изоляции применяемого обмоточного провода по ГОСТ 8865-93 или МЭК 85–84, °С; T_0 – расчетная температура окружающей среды в зоне расположения двигателя, °С; C_m – теплоемкость меди, $C_m = 400$ Дж/кг/°С; m – масса меди обмоточных проводов, кг; P_m – электрические потери в меди обмотки двигателя, Вт.

В случаях более продолжительной, чем оцениваемая по (1), продолжительности работы в форсированном режиме, например, после ликвидации последствий проектных (и теоретически запроектных) аварий [9], следует оценивать остаточный ресурс изоляции двигателя. Исходной информацией для такой оценки является ресурс изоляции при номинальной температуре [10]. Тогда остаточный ресурс изоляции можно определить по формуле

$$D = D_n \cdot e^{-\frac{B - \Delta\tau}{\tau + 273}} [ч], \quad (2)$$

где B – безразмерный коэффициент, постоянный для одного класса нагревостойкости (для материалов класса H – 34,2, класса F – 29,7, класса B – 25,3, классов E и A – 25,1); D_n – срок службы (ресурс) изоляции при номинальной допустимой температуре $\tau_{доп}$ (для никелированного провода марки ПНЭТ-имид (ТУ 16-505.489-78): $D_n = 20\,000$ ч, $\tau_{доп} = 220$ °С); $\Delta\tau$ – превышение (перегрев) фактической или расчетной температуры нагрева изоляции τ над допустимой температурой $\Delta\tau = \tau - \tau_{доп}$.

Более простое выражение следует из правила «пятнадцати градусов» [11], в соответствии с которым при увеличении температуры на каждые 15 °С сверх допустимой температуры срок службы сокращается в e (основание натурального логарифма) раз:

$$D = D_n \cdot e^{-\frac{\Delta\tau}{15}} [ч]. \quad (3)$$

III. Результаты

Полученные результаты расчета плотности магнитного потока в сеточной модели индукторного двигателя при протекании форсированного

тока через две соседние фазы показаны на рис. 2

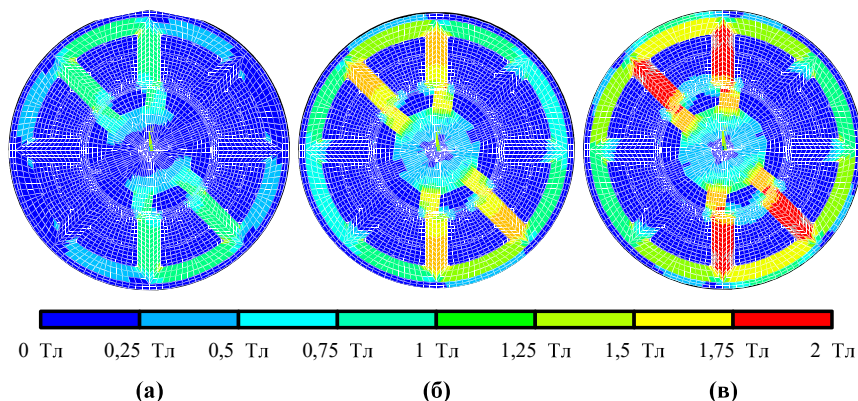


Рис. 2. Результаты расчета магнитной индукции в двигателе с помощью сеточной модели при различной величине тока: 5 А (а), 10 А (б), 50 А (в)

Fig. 2. The computational results of magnetic flux density in the grid model of the motor for the various values of current: 5 А (а), 10 А (б), 50 А (в)

В ходе проведения расчетов величина форсированного тока изменялась от 5 до 50 А. Отобрана тепловая карта плотности магнитного потока для трех значений форсированного тока: 5 А, 10 А и 50 А. При величине форсированного тока 5 А плотность магнитного потока в зубцах статора и ротора, а также в воздушном зазоре, составляла от 1,2 до 1,5 Тл. Данные результаты отображают, что стальные участки машины не насыщены. Потери в меди составляют небольшую величину, что позволяет двигателю длительно работать в данном режиме.

При увеличении тока в два раза (до 10 А) плотность магнитного потока на данных участках возрастает до значения в диапазоне от 1,5 до 1,8 Тл, причем присутствуют локальные участки насыщения в стержне статора, магнитная индукция в которых принимает значение в диапазоне от 1,8 до 2,1 Тл. Данные результаты демонстрируют, что с ростом тока в два раза возрастает плотность магнитного потока в воздушном зазоре на 0,3 Тл и, следовательно, форсируется электромагнитный момент. Также возрастает падение напряжения на стальных участках машины и возрастает влияние потоков рассеяния, которые создают локальные участки насыщения в стержне статора, которые препятствуют росту электромагнитного момента. При этом электрические потери в меди возрастают в 4 раза, что значительно со-

крашает допустимое время работы двигателя без перегрева изоляции обмоток.

При увеличении тока в 10 раз (до 50 А) плотность магнитного потока в воздушном зазоре возрастает до значения от 1,8 до 2,1 Тл, в то время как в стержне статора плотность магнитного потока больше и составляет от 2,1 до 2,4 Тл. Данные результаты показывают, что с ростом тока в 10 раз плотность магнитного потока в воздушном зазоре возрастает на 0,6 Тл, в то время как в стержне статора плотность магнитного потока увеличилась на 0,9 Тл. Потоки рассеяния достигают максимальных значений, при которых стальные участки зубцов статора входят в глубокое насыщение. Плотность магнитного потока возросла в два раза по сравнению с двухкратным увеличением тока, однако потери в меди возросли в 100 раз, что оказывает наихудшее влияние на тепловой режим. В данном режиме электромагнитные нагрузки не продуктивны, а время допустимой работы без перегрева изоляции обмоток достигает минимума.

Для определения оптимальной величины форсированного тока снимаются зависимости электромагнитного момента и допустимого времени работы двигателя без перегрева изоляции обмотки от величины форсированного тока (рис. 3).

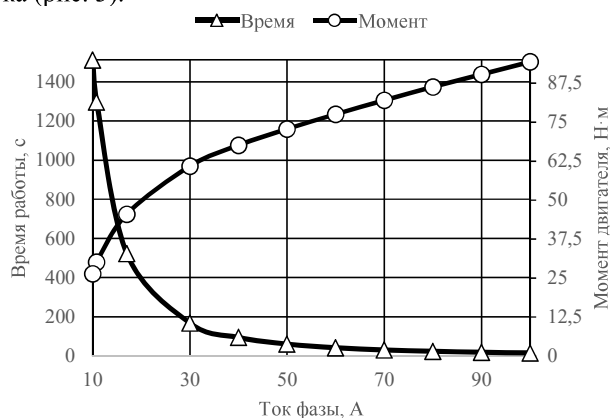


Рис. 3. Зависимости допустимого времени работы и электромагнитного момента двигателя от форсированного тока

Fig. 3. Dependencies of the motor permission switch-on time and the electromagnetic torque from the forced current

Из рисунка следует, что в отсутствие теплопередачи двигатель способен работать в течение 400 с без перегрева изоляции проводов при действующем значении тока в фазах не более 25 А, развивая при этом вращающий момент в форсированном режиме около 50 Н·м, что приблизительно в

два раза превышает номинальное его значение.

Можно отметить заметное снижение эффективности – отдачи по моменту двигателя с ротором тока выше уровня 30 А вследствие насыщения, сопровождающееся резким сокращением допустимой продолжительности форсированного режима до значений менее 120 с.

Зависимость остаточного ресурса от перегрева двигателя, обмотка которого намотана проводом ПНЭТ-имид, представлена на рис.4.

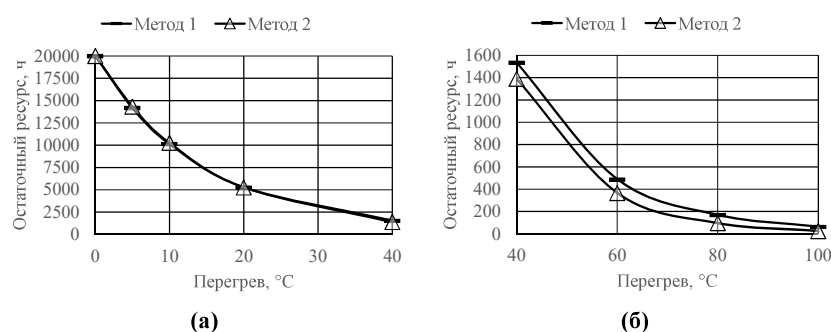


Рис. 4. Влияние перегрева на остаточный ресурс: в диапазоне от 0 до 40 °C (а); в диапазоне от 40 до 100 °C (б)

Fig. 4. Influence of the winding overheating at the remaining insulation life: in the range from 0 to 40°C (a); in the range from 40 to 100 °C (b)

Результаты расчетов показали высокую сходимость при перегреве до 40°C ($\tau \leq 40$ °C) и низкую сходимость при большем перегреве ($\tau > 40$ °C). Однако следует отметить, что в диапазоне большего перегрева ресурс изоляции падает до 2,5 % от номинального. Следовательно, в данном диапазоне не требуется высокая точность оценки, так как изоляция почти непригодна для повторного использования. Наибольшая скорость сокращения ресурса наблюдается в диапазоне перегрева изоляции до 40 °C. Даже незначительное превышение предельно допустимой температуры нагрева изоляции на 5-10 °C, которое может быть отнесено к методической погрешности измерений, приводит к значительному, вплоть до двукратного, сокращению остаточного ресурса изоляции обмотки двигателя.

Зависимости, рассчитанные по (2) и по упрощенной функции (3) в рассматриваемом образце двигателя практически совпадают. При этом расчет по (3) является более универсальным, так как не требует введения коэффициента, зависящего от класса изоляции, однако необходима проверка совпадения на конкретных изделиях.

IV. Заключение

Форсировка тока в рассматриваемом индукторном двигателе приводит к росту электромагнитного момента, однако с увеличением тока возрастает падение напряжения в стальных участках машины и увеличиваются потоки рассеяния, которые создают участки локального насыщения в стержнях статора, что уменьшает скорость роста электромагнитного момента, в то время как тепловые потери, наоборот, возрастают с увеличением скорости исходя из квадратичной зависимости. Все это требует нахождения оптимальной величины форсированного тока.

В отсутствие теплопередачи продолжительность работы двигателя при конкретном токе форсированного режима и температуре в месте установки определяется исключительно массой проводов обмотки. Учет теплопередачи облегчает условия нагрева, но требует обоснования, разработки и последующей проверки тепловых схем замещения, существенно усложняющих проектировочный расчет.

Любой перегрев изоляции выше своего класса, даже не зафиксированный средствами измерений в силу погрешности, приводит к резкому снижению остаточного ресурса изоляции обмотки и двигателя в целом. Вследствие этого нецелесообразно доводить температуру изоляции до ее класса нагревостойкости, а ограничить ее более низким пределом, например, допустимой температурой предыдущего, более низкого, класса.

© Смирнов А.Ю., 2026

© Кудряшов Д.А., 2026

© Ульянов Д.А., 2026

Поступила в редакцию 07.06.2026

Принята к публикации 10.07.2026

Received 07.06.2026

Accepted 10.07.2026

Библиографический список

- [1] Митенков Ф.М., Жучков И.И., Зайцев Б.И., Подтележников И.А. Исполнительные механизмы органов управления и защиты для натриевых реакторов на быстрых нейтронах. М.: Атомиздат, 1980. – 176 с.
- [2] Юркевич Г.П., Рабкин Ю.Е., Шапошников Л.А. Электроприводы регулирующих органов энергетических реакторов: Основы проектирования. М.: Энергоатомиздат, 1985. – 240 с.
- [3] Смирнов А.Ю., Ульянов Д.А., Стасюк П.Г., Уснунц-Кригер Т.Н. Проектирование индукторных двигателей для привода механизмов аварийной защиты ядерных реакторов // Интеллектуальная электротехника. 2024. № 4 (28). С. 4-20.
- [4] Смирнов А.Ю., Ульянов Д.А. Разработка индукторных двигателей для привода аварийной защиты ядерных энергетических установок // Электротехника. 2024. № 10. С. 16-22. DOI: 10.53891/00135860-2024-10-16-22

- [5] Смирнов А.Ю., Кудряшов Д.А., Ульянов Д.А., Уснунц-Кригер Т.Н. Моментные характеристики шаговых двигателей механизмов перемещения регулирующих органов ядерных реакторов // *Электричество*. 2025. № 3. С. 66-74. DOI: 10.24160/0013-5380-2025-3-66-74
- [6] Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. М.: Энергия, 1980. – 928 с.
- [7] Lipo T.A. Introduction to AC Machine Design. Wiley-IEEE Press, 2018. – 544 p.
- [8] Purhonen J., Jokinen T., Hrabovokova V. Design of rotating electrical machines. John Wiley & Sons, 2008. – 512 p.
- [9] Адамов Е.О. [и др.]. Машиностроение ядерной техники. М.: Машиностроение, 2005. – 960 с.
- [10] Бернштейн Л.М. Изоляция электрических машин общего назначения. М.: Энергоиздат, 1981. – 376 с.
- [11] Федоров М.М., Лужнев А.И., Боев А.Е. Оценка сроков службы изоляции электрических машин // *Труды Донецкого национального технического университета*. Серия: Электротехника и Энергетика. 2011. № 10 (180). С. 200-203.

References

- [1] F.M. Mitenkov, I.I. Zhuchkov, B.I. Zaitsev and I.A. Podtelezchnikov, *Ispolnitel'nye mekhanizmy organov upravleniya i zashchity dlya natrievykh reaktorov na bystrh nejtrony* [Control and protection actuation mechanisms for fast neutron sodium reactors]. Moscow: Atomizdat, 1980 (in Russian).
- [2] G.P. Yurkevich, Yu.E. Rabkin and L.A. Shaposhnikov, *Elektroprivody reguliruyushchih organov energeticheskikh reaktorov: Osnovy proektirovaniya* [Electric Drives for Control Elements of Power Reactors: Design Principles]. Moscow: Energoatomizdat, 1985 (in Russian).
- [3] A.Yu. Smirnov, D.A. Ulyanov, P.G. Stasyuk and T.N. Usnunts-Krieger, “Design of inductor motors for driving emergency protection mechanisms of nuclear reactors”, *Smart Electrical Engineering*, vol. 4, no. 28, pp. 4-20, 2024.
- [4] A.Yu. Smirnov and D.A. Ulyanov, “Development of induction motors for emergency protection drives of nuclear power plants”, *Elektrotehnika*, no. 10, pp. 16-22, 2024. DOI: 10.53891/00135860-2024-10-16-22
- [5] A.Yu. Smirnov, D.A. Kudryashov, D.A. Ulyanov and T.N. Usnunts-Krieger, “Torque characteristics of the stepper motors used in the nuclear reactor control rod drives”, *Elektrichestvo*, no. 3, pp. 66-74, 2025. DOI: 10.24160/0013-5380-2025-3-66-74
- [6] A.V. Ivanov-Smolensky, *E'lektricheskie mashiny* [Electric machines]. Moscow: Energiya, 1980 (in Russian).
- [7] T.A. Lipo, *Introduction to AC Machine Design*. Wiley-IEEE Press, 2018.
- [8] J. Purhonen, T. Jokinen and V. Hrabovokova, *Design of rotating electrical machines*. John Wiley & Sons, 2008.
- [9] E.O. Adamov et al., *Mashinostroenie yadernoj tekhniki* [Mechanical engineering of nuclear technology]. Moscow: Mashinostroenie, 2005 (in Russian).
- [10] L.M. Bernstein, *Izolyaciya ehlektricheskikh mashin obshchego naznacheniya* [Insulation of general purpose electrical machines]. Moscow: Energoizdat, 1981 (in Russian).

- [11] M.M. Fedorov, A.I. Luzhnev and A.E. Boev, “Ocenka srokov sluzhby izolyacii elektricheskikh mashin [Evaluation of service life of insulation of electrical machines]”, *Trudy Doneckogo nacional'nogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Elektrotekhnika i Energetika [Proceedings of Donetsk National Technical University. Series: Electrical Engineering and Power Engineering]*, vol. 10, no. 180, pp. 200-203, 2011 (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Смирнов Александр Юрьевич, доктор технических наук, профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Кудряшов Дмитрий Андреевич, кандидат технических наук, старший преподаватель Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Ульянов Данил Александрович, аспирант, ассистент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Alexander Y. Smirnov, D. Sci. (Eng.), professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Dmitry A. Kudryashov, Cand. Sci. (Eng.), senior lecturer of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Danil A. Ulyanov, postgraduate student (Eng.), assistant of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.