

Методы диагностики обмотки статора асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором

М. А. Байдюк✉, К. В. Константинов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉ maximbay.196@gmail.com

Аннотация. В связи с широким распространением асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором остро стоит вопрос повышения надежности машин данного типа. По статистике к наиболее слабым по надежности узлам относится обмотка статора. В статье рассматриваются различные подходы к диагностике обмотки статора – одного из основных способов повышения безотказности работы машины. Анализируются такие методы, как испытания на перенапряжения, мониторинг эквивалентных значений параметров изоляции, диагностика частичных разрядов, анализ ответа на высокочастотный разряд. Определяются достоинства и недостатки каждого подхода, делается вывод о наиболее перспективных методах.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, обмотка статора, диагностика состояния изоляции, функциональная диагностика, паразитные емкости обмотки, частичные разряды

Для цитирования: Байдюк М. А., Константинов К. В. Методы диагностики обмотки статора асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2023. Т. 16, № 8. С. 87–98. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-8-87-98.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Diagnostic Methods of the Stator Winding of Asynchronous Motors with a Squirrel-Cage Rotor

M. A. Baidiuk✉, K. V. Konstantinov

Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

✉ maximbay.196@gmail.com

Abstract. Due to the widespread use of induction motors with a squirrel-cage rotor, the issue of increasing the reliability of machines of this type remains acute. According to statistics, the stator winding is the weakest node in terms of reliability. This article discusses various approaches to the diagnosis of the stator winding, which is seen as one of the main ways to improve the reliability of the machine. Such methods, as surge tests, monitoring of equivalent values of insulation parameters, diagnostics of partial discharges, and analysis of the response to a high-frequency discharge are analyzed. The advantages and disadvantages of each approach are discussed to identify the most promising methods.

Keywords: induction motor, stator winding, insulation condition diagnostics, functional diagnostics, parasitic winding capacitances, partial discharges

For citation: Baidiuk M. A., Konstantinov K. V. Diagnostic Methods of the Stator Winding of Asynchronous Motors with a Squirrel-Cage Rotor // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2023. Vol. 16, no. 8. P. 87–98. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-8-87-98.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Введение. В наши дни асинхронные двигатели находят широчайшее применение во многих областях промышленности и хозяйства. Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором используются в качестве приводных двигателей в деревообрабатывающей промышленности, подъемно-транспортных установках, компрессорных и вентиляторных, строительных инструментах и бытовых приборах. По статистике асинхронные двигатели потребляют 40 % вырабатываемой электроэнергии [1].

Столь широкое распространение асинхронных двигателей обусловлено простотой, дешевизной и относительно высокой надежностью машин подобного типа. Тем не менее, как всякая сложная техническая система, асинхронная машина подвержена отказам. Для анализа причин отказов асинхронных двигателей обратимся к статистике. Согласно исследованиям, описанным в [2], отказы асинхронных машин распределяются следующим образом: 31 % приходится на отказ обмотки статора, 46 % – на отказ подшипников, 7 % выходят из строя из-за дефектов ротора и 16 % по иным причинам. Исходя из данных результатов, можно сделать вывод, что наиболее подвержены отказам обмотка статора и подшипниковые узлы. Причем выход из строя любого из этих звеньев приведет к отказу машины, что повлечет необходимость ремонта или замены двигателя. Помимо затрат на ремонт, отказ машины выльется в простой оборудования, на которое работает двигатель. В связи с этим, а также с широким распространением асинхронных двигателей обеспечение безотказности работы машин данного типа – важная задача не только технически, но и экономической.

Типы дефектов обмотки статора. Рассмотрим подробнее обмотку статора. Следует обратить внимание на два основных типа отказов обмотки статора: асимметрию обмотки статора, вызванную отказом одной из фаз, и короткое замыкание нескольких витков в фазной обмотке. И если в первом случае машина продолжает работать с уменьшенным крутящим моментом, то короткое замыкание приводит к выходу обмотки из строя.

Асимметрия асинхронной машины или асимметрия питающих напряжений обнаруживается через отрицательную последовательность тока статора. Поведение машины не идеально, но в случае небольших асимметрий не следует предпринимать никаких существенных действий. Значительная электрическая асимметрия (к примеру,

разомкнутая фаза) вызывает токи отрицательной последовательности, соизмеримые с токами положительной последовательности. Таким образом, такую асимметрию легко обнаружить.

Короткое замыкание обнаружить гораздо сложнее. При наличии одного замыкания двигатель может продолжать работать. Однако нагрев в закороченной области приведет к критическому разрушению изоляции и распространению межвитковых замыканий по обмотке, что в итоге может привести к фазным замыканиям или замыканию фазы на землю. В последнем случае замыкание тока через заземление может привести к повреждению сердечника и выходу двигателя из строя [3].

Причины возникновения дефектов изоляции. Дефекты в изоляции, приводящие к замыканию, могут возникать как в пазовой области, так и в лобовых частях обмотки. Можно выделить следующие причины возникновения дефектов изоляции в обмотке статора: термическое старение, электрические перенапряжения, механические напряжения, а также факторы окружающей среды [4].

Ввиду того, что прохождение тока по обмотке сопряжено с нагревом последней, происходит термическое старение изоляции. Как правило, при каждом превышении температуры на 10 °С срок службы изоляции сокращается вдвое из-за термического старения. В процессе термического старения изоляция высыхает, в ней появляются микротрещины, в связи с чем она становится более уязвимой к другим влияющим факторам или напряжениям, которые фактически вызывают отказ.

На срок службы изоляции влияют также электрические перенапряжения. При выборе материалов и разработке конструкций катушек для обеспечения достаточного расчетного срока службы необходимо учитывать определенную взаимосвязь между сроком службы изоляции и напряжением, приложенным к изоляционным материалам. К электрическим факторам, негативно влияющим на изоляцию, можно отнести скачки тока, возникающие в обмотке при переходных процессах и коммутационные перенапряжения. Данные факторы приводят к дополнительному нагреву обмотки, эрозии и возникновению в ней нежелательных химических реакций, что приводит к деградации изоляции.

В процессе функционирования машины и вращения ротора в двигателе возникают вибрации, которые также можно рассматривать как негативный фактор, влияющий на срок службы

изоляции. Сила, действующая на катушки из-за тока обмотки статора, пропорциональна квадрату тока статора. Таким образом, данные усилия наиболее велики в момент пуска машины, когда ток статора максимален. Обмотка при этом вибрирует с частотой, вдвое превышающей частоту сети, как в радиальном, так и в тангенциальном направлениях. Подобные вибрации могут привести к повреждению изоляции катушки и проводников обмотки.

Наконец, немаловажным фактором, влияющим на срок службы изоляции, являются факторы внешней среды. Следует предпринимать меры для ограничения/минимизации воздействия влаги, химических веществ и посторонних частиц на обмотку статора. Также проблему представляет образование конденсата на обмотке статора, что может в итоге привести к замыканию обмотки. Это явление можно предотвратить, высушив обмотку с помощью обогревателей помещения или струйного нагрева.

Типы замыканий обмотки статора. Для того чтобы более четко понять, какие замыкания могут возникнуть в обмотке статора асинхронного двигателя, рассмотрим системы изоляции, применяемые в современных асинхронных машинах. Схема изоляции асинхронного двигателя с обмоткой, составленной из жестких секций, представлена на рис. 1.

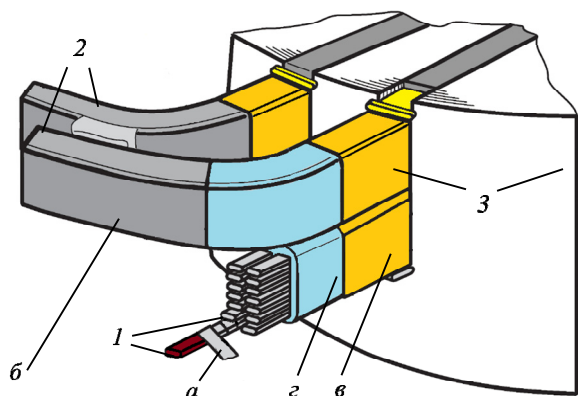


Рис. 1. Структура изоляции обмотки статора асинхронных двигателей и типы возможных замыканий

Fig. 1. Insulation structure of the stator winding of induction motors and types of possible short circuits

Изоляция жил витка («а» на рис. 1), как правило, представляет собой пленку из полиэтилентерефталата (ПЭТ или лавсана) и стеклоткани. Фазная изоляция («б» на рис. 1) в современных двигателях – это обычно композитный материал из лавсана и стеклоткани или слюдяной бумаги

(частицы слюды на пленке или подложке из ПЭТ и стеклоткани).

Пазовая изоляция («в» на рис. 1) направлена на отделение медных проводников от заземленного сердечника статора. На конце фазы обмотки пазовая изоляция подвергается воздействию полного значения фазного напряжения относительно земли. Почти во всех современных статорах двигателей используют ленты из слюдяной бумаги, скрепленные эпоксидной смолой, в качестве изоляции данного типа. Эти материалы почти всегда комбинируются с вакуумной пропиткой обмотки двигателя лаком либо компаундом. Поверх пазовой изоляции размещается полупроводниковый слой (лак или лента). Такое покрытие предотвращает частичный разряд, вероятный в любом воздушном зазоре, который неизбежно появится между поверхностью изоляции заземления и боковой стороной паза в статоре. Как правило, данный слой представляет собой ленту с углеродным наполнением. Большинство производителей двигателей используют данное покрытие в двигателях с номинальным напряжением 6 кВ и выше.

На участке 10–15 см от выхода из паза размещается еще один слой лака или ленты («г» на рис. 1). Цель этой изоляции состоит в том, чтобы линеаризовать электрическое напряжение вдоль поверхности катушки, в конце проводящего покрытия паза, чтобы снизить риск частичных разрядов. В настоящее время это покрытие обычно представляет собой ленту, содержащую порошок карбида кремния. Данный тип изоляции чаще всего используется в двигателях с преобразовательной мощностью 6 кВ и выше [5].

Исходя из рис. 1, можно сделать вывод, что при эксплуатации двигателя может возникнуть 3 вида замыканий обмотки статора:

- межвитковое (позиция 1 на рис. 1),
- межфазное (позиция 2 на рис. 1),
- корпусное (позиция 3 на рис. 1).

Наиболее вероятно при этом именно межвитковое замыкание. Согласно статистике, на такие замыкания приходится около 93 % отказов обмоток статора [1]. При его возникновении ввиду увеличения силы тока нарушается температурный режим в замкнутых витках, что приводит к ускорению термического старения изоляции, увеличению числа частичных разрядов, что в свою очередь приводит к появлению новых дефектов изоляции и в конечном счете может повлечь за

собой выход из строя корпусной или межфазной изоляции и соответствующее замыкание. Поэтому крайне важно вовремя отслеживать появляющиеся в изоляции дефекты.

Для предотвращения появления коротких замыканий необходимо проведение диагностики состояния изоляции в процессе функционирования машины. Существует четыре основных метода контроля изоляции [6]:

- 1) испытание на перенапряжение;
- 2) неразрушающий тест частичных разрядов;
- 3) тест реакции на высокочастотный сигнал;
- 4) мониторинг эквивалентных значений параметров изоляции.

Рассмотрим подробнее каждый из вышеуказанных методов диагностики.

Испытания на перенапряжения. Наиболее простым видом диагностики обмотки статора является испытание на перенапряжение. При испытании на перенапряжение к обмотке статора прикладываются импульсы напряжения с коротким временем нарастания и относительно высокой амплитудой. Таким образом обеспечивается нагрузка на изоляцию, аналогичная той, которая возникает при скачках перенапряжений во время эксплуатации. Прохождение испытания гарантирует, что двигатель способен выдерживать импульсы ниже соответствующего уровня напряжения и с большим временем нарастания [7]. Данная диагностика может проводиться как функционально, так и тестово. Рассмотрим тестовый вариант.

Установка для испытания на перенапряжение двигателя, выведенного из работы, представлена

на рис. 2. Принцип заключается в следующем: конденсатор C заряжается до определенного значения напряжения U_m , а затем посредством выключателя S замыкается на обмотку асинхронного двигателя АД и быстро разряжается, тем самым подавая на обмотку статора импульс с малым временем нарастания.

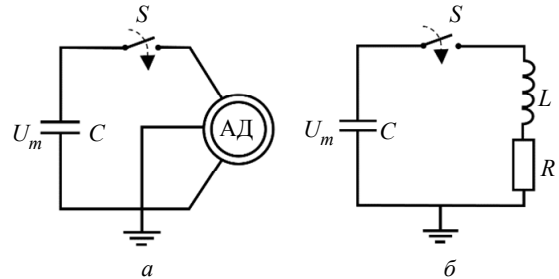


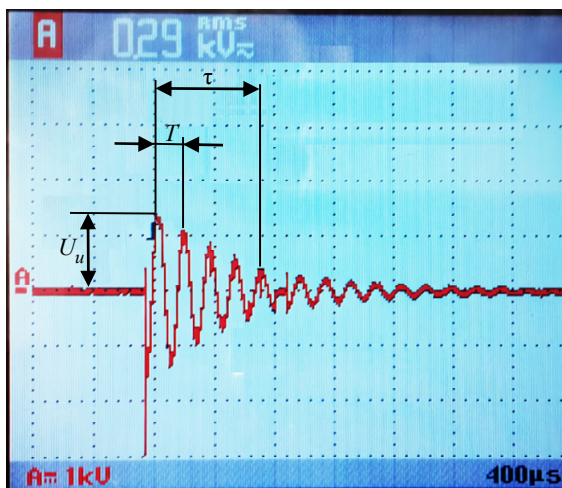
Рис. 2. Испытания на перенапряжение:
а – схема испытаний;
б – эквивалентная схема замещения

Fig. 2. Surge testing:
a – test circuit; б – equivalent replacement circuit

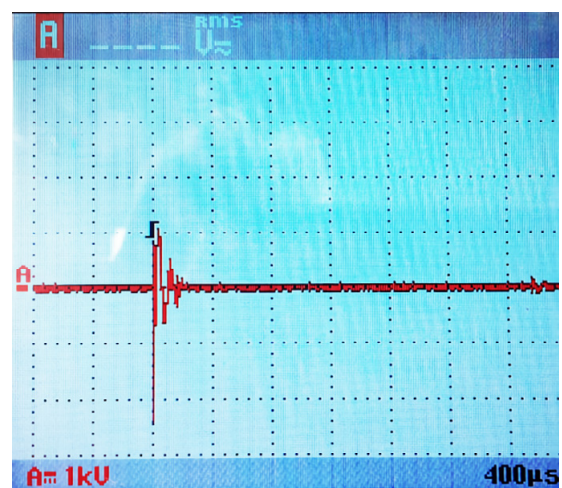
Эквивалентная схема замещения данной системы представляет собой колебательный RLC -контур. В случае, если произойдет пробой фрагмента обмотки, параметры контура изменятся, и это скажется на частоте.

Поскольку испытательное напряжение значительно выше номинального, оно позволяет выявить неисправности обмотки, которые не могут быть обнаружены при нормальной эксплуатации. Максимальное допустимое испытательное напряжение может быть определено, исходя из номинального напряжения машины $U_{\text{НОМ}}$, по формуле

$$U_{\text{max}} = 1000B + 2U_{\text{НОМ}}$$



а



б

Рис. 3. Испытания обмотки статора на перенапряжение:
а – исправная межвитковая изоляция; б – пробой межвитковой изоляции
Fig. 3. Surge tests of the stator winding:
а – serviceable inter-turn insulation; б – breakdown of inter-turn insulation

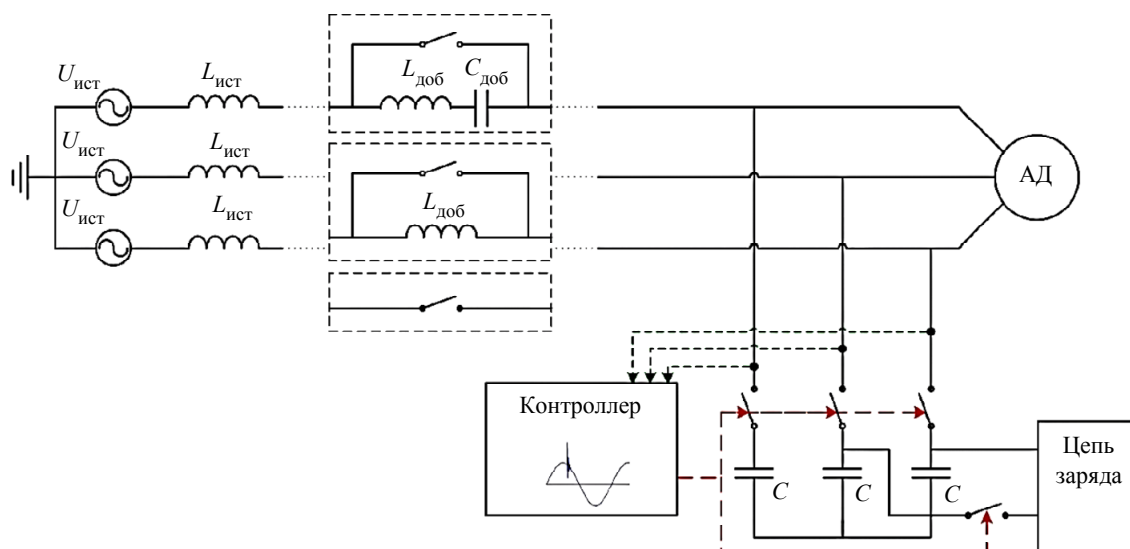


Рис. 4. Схема для функциональной диагностики двигателя методом испытания на перенапряжение
 Fig. 4. Scheme for functional diagnostics of the engine by the surge test method

На рис. 3 приведены осциллограммы, полученные в результате испытаний на перенапряжение обмоток с исправной и с дефектной межвитковой изоляцией, где $U_{и}$ – амплитуда импульса напряжения; T – период колебаний переходного процесса; τ – время затухания переходного процесса. Из осциллограмм видно, что при наличии дефектов период колебаний и время затухания переходного процесса, возникающего при подаче импульса напряжения на обмотку, уменьшаются.

Испытание на перенапряжение можно реализовать и в процессе эксплуатации машины. Схема, которая позволяет реализовать данный тип испытаний обмотки, представлена на рис. 4.

К обмотке статора, питаемой от источника напряжения $U_{ист}$, через переключатели подключаются три конденсатора C , соединенных в звезду. К конденсаторам подключена цепь заряда и измерительное оборудование. В момент проведения диагностики переключатели между фазами двигателя и конденсаторами замыкаются и импульс подается на обмотку статора.

Следует отметить, что помимо обмотки статора существует еще один возможный путь для прохождения импульса – через индуктивность источника $L_{ист}$. Причем как правило индуктивное сопротивление источника гораздо меньше, чем у обмотки статора. Таким образом, большая часть импульса уйдет в источник, что снижает точность диагностики. Для выхода из этой ситуации имеет смысл вводить в цепи фаз источника дополнительное реактивное сопротивление $L_{доб}$ и $C_{доб}$. Для

того чтобы вводимое сопротивление не оказывало влияние на функционирование двигателя, емкости и индуктивности необходимо сделать отключаемыми. Подбирать включаемые емкость и индуктивность следует таким образом, чтобы частота импульса перенапряжения была выше на 2 порядка или более, чем рабочая частота двигателя [8].

Несмотря на очевидные достоинства данного теста – относительную простоту реализации и универсальность, данный тест имеет один большой недостаток – он относится к разрушающим. При проведении диагностики наносится ущерб изоляции обмотки статора, что приводит к ускорению ее старения [6].

Диагностика частичных разрядов. Частичные разряды – это электрические разряды малой мощности, которые возникают в изоляции обмотки статора и могут считаться как причиной старения изоляции, так и индикатором, поскольку по мере старения изоляции усиливается активность частичных разрядов. Причины возникновения частичных разрядов можно разделить на две категории: эксплуатационные и дефекты при изготовлении [9].

Недостаточная пропитка обмотки – это дефект, допущенный при изготовлении, который может привести к частичным разрядам. Если не выполнена качественная пропитка, в процессе эксплуатации элементы изоляционной системы будут деформироваться под воздействием вибрации. Вследствие этого в изоляции будут возникать воздушные промежутки, и таким образом повысится вероятность возникновения частичных разрядов. Немаловажным фактором для борьбы с

этим нежелательным явлением служит дополнительная изоляция лобовых частей обмотки при помощи ленты или краски, содержащей карбид кремния. В случае некачественного покрытия лобовых частей вероятность разрядов возрастает.

К категории эксплуатационных причин можно отнести термическое старение обмотки. При длительной эксплуатации при температуре, превышающей 120 °С, эпоксидный связующий материал перестает связывать слои изолирующей ленты, что приводит к возникновению воздушных промежутков, в которых могут индуцироваться частичные разряды. Другой эксплуатационный фактор, способствующий появлению частичных разрядов, – появление на поверхности изоляции проводящих участков, по которым могут протекать незначительные токи. Эти проводящие дорожки могут состоять из пыли и влаги или смазки, попадающей из подшипникового узла.

Особняком среди эксплуатационных факторов, оказывающих влияние на активность частичных разрядов, стоит применение в приводах широтно-импульсной модуляции (ШИМ). При замыкании-размыкании ключей в ШИМ-преобразователе возникают импульсы перенапряжения по причине отличия волновых сопротивлений питающих кабелей и обмотки статора. Данные импульсы повышают вероятность возникновения частичных разрядов. Кроме того, ввиду высокой частоты подачи импульсов возникают емкостные токи, которые протекают между витками и также негативно влияют на изоляцию.

Как уже было отмечено, частичные разряды не только представляют собой нежелательное явление в обмотке статора, но и могут служить индикатором ее состояния. Однако при вычленинии информации об обмотке из частичных разрядов существует ряд проблем:

- отделение полезного сигнала от многочисленных шумов, обусловленных ШИМ;
- получение сигнала напряжения основной частоты для измерительного устройства для синхронизации с сигналом частичных разрядов.

Рассмотрим решение данных проблем на примере двигателя с мощностью 12.5 МВт и номинальным напряжением 3 кВ. Упрощенная схема измерения частичных разрядов представлена на рис. 5.

Измерение частичных разрядов осуществляется посредством датчика частичных разрядов (ДЧР) емкостью 80 пФ. Согласование измерительной аппаратуры с напряжением, вырабатываемым ШИМ-

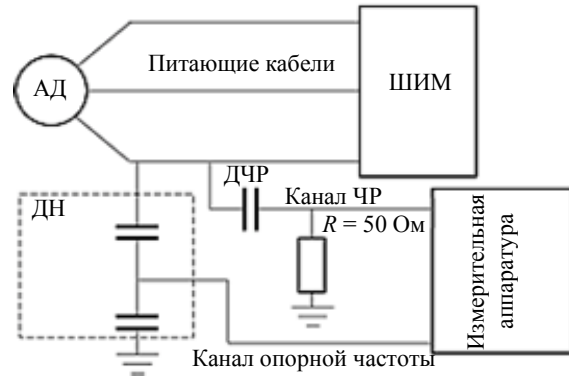


Рис. 5. Схема установки для измерения частичных разрядов

Fig. 5. Installation diagram for measuring partial discharges

источником, обеспечивается посредством делителя напряжения (ДН), реализованного при помощи двух конденсаторов. Для первичного решения задачи подавления помех используется фильтр верхних частот, реализуемый посредством уже упомянутого датчика совместно с резистором, имеющим сопротивление 50 Ом. Таким образом реализуется фильтр верхних частот с частотой среза

$$f_{\text{ср}} = \frac{1}{2\pi C_{\text{дат}} R} = \frac{1}{2 \cdot 3.14 \cdot 8 \cdot 10^{-12} \cdot 50 \text{ Ф} \cdot \text{Ом}} = 39\,788\,735 \text{ Гц} \approx 40 \text{ МГц}.$$

Данный фильтр позволяет отсеивать большую часть нежелательных шумов. В комплексе с ним можно анализировать форму импульсов предполагаемых частичных разрядов на основе полученных ранее данных эмпирических данных для отсеивания ложных сигналов. Сигнал напряжения основной частоты обеспечивается посредством емкостного делителя напряжения.

Диагностика частичных разрядов позволяет достаточно точно отследить степень старения изоляции и не требует больших вложений. Тем не менее, при диагностике подобным методом можно столкнуться с трудностями при вычленинии полезного сигнала из помех, обусловленных ШИМ.

Мониторинг эквивалентных значений параметров изоляции. Еще одним способом мониторинга состояния изоляции служит расчет эквивалентных значений параметров изоляции (емкость, сопротивление, коэффициент рассеяния) [10]. Существуют две вариации такого метода диагностики – тестовая и функциональная.

Тестовая диагностика предполагает вывод машины из эксплуатации для проведения испытания изоляции. В этом случае эквивалентные

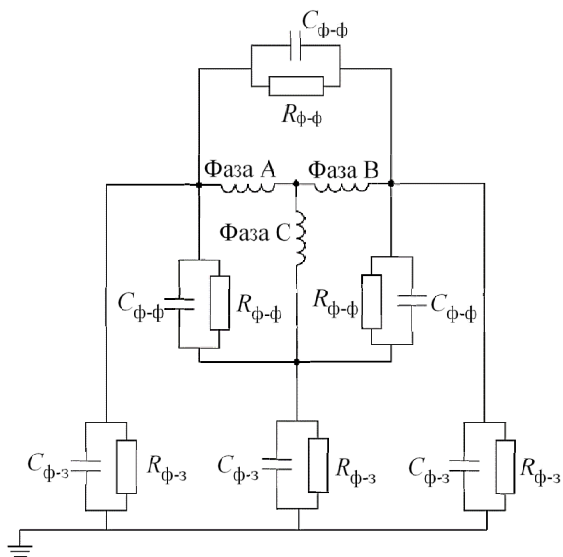


Рис. 6. Схема для тестовой диагностики двигателя методом расчета эквивалентных параметров изоляции

Fig. 6. Scheme for test diagnostics of the engine by calculating equivalent insulation parameters

параметры изоляции определяются на основании эквивалентной схемы замещения (рис. 6).

Данная схема включает в себя активные и емкостное сопротивления для межфазной ($R_{\phi-\phi}$ и $C_{\phi-\phi}$) и корпусной ($R_{\phi-3}$ и $C_{\phi-3}$) изоляции. Если предположить, что в процессе эксплуатации диэлектрические свойства изоляции фаз меняются одинаково, то в соответствии с вышеуказанной схемой эквивалентные значения емкости $C_{\text{экр. ф}}$, сопротивления $R_{\text{экр. ф}}$ а также значение коэффициента рассеяния DF для двигателя, питаемого напряжением с частотой f , можно определить через действительные емкости и сопротивления по следующим формулам:

$$C_{\text{экр. ф}} = 2C_{\phi-\phi} + C_{\phi-3};$$

$$R_{\text{экр. ф}} = \frac{R_{\phi-3}R_{\phi-\phi}}{2R_{\phi-3} + R_{\phi-\phi}};$$

$$DF = \frac{2R_{\phi-3} + R_{\phi-\phi}}{2\pi f R_{\phi-3} R_{\phi-\phi} (2C_{\phi-\phi} + C_{\phi-3})}.$$

Функциональный вариант диагностики предполагает определение параметров изоляции в процессе эксплуатации машины на основании тока утечки фаз $I_{\phi, \text{ут}}$ ($I_{a \text{ ут}}$, $I_{b \text{ ут}}$, $I_{c \text{ ут}}$) и напряжения между фазой и землей $U_{\phi-3}$ (U_{a-3} , U_{b-3} , U_{c-3}). Ток утечки может быть измерен посредством трансформатора тока согласно схеме, представленной на рис. 7.

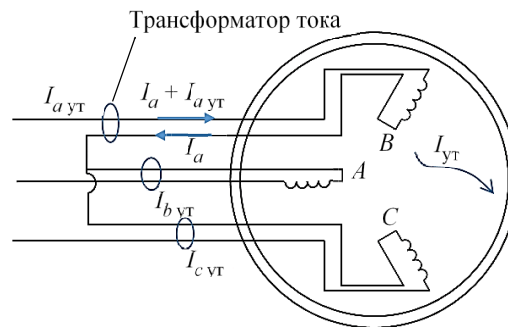


Рис. 7. Схема для функциональной диагностики двигателя методом расчета эквивалентных параметров изоляции

Fig. 7. Scheme for functional diagnostics of the engine by calculating equivalent insulation parameters

На основе полученных параметров эквивалентные параметры изоляции обмотки статора (емкость $C_{\text{экр. ф}}$, сопротивление $R_{\text{экр. ф}}$ и тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta_{\phi}$ изоляции для каждой фазы) могут быть определены по следующим формулам:

$$C_{\text{экр. ф}} = \frac{2|\tilde{I}_{\phi, \text{ ут}}| \cos \delta_{\phi}}{2\pi f |\tilde{U}_{\phi-3}|};$$

$$R_{\text{экр. ф}} = \frac{|\tilde{U}_{\phi-3}|}{2|\tilde{I}_{\phi, \text{ ут}}| \sin \delta_{\phi}};$$

$$\text{tg } \delta_{\phi} = \text{tg} [90^{\circ} - \angle(\tilde{U}_{\phi-3}, \tilde{I}_{\phi, \text{ ут}})].$$

Следует отметить, что значения параметров сопротивления изоляции при функциональной диагностике как правило отличается от параметров, измеренных на той же машине в ходе тестовой диагностики. Такое расхождение может быть объяснено тем, что распределение напряжения в обмотке в процессе эксплуатации отличается от распределения при испытаниях машины, выведенной из эксплуатации. Этот момент нужно иметь в виду при интерпретации полученных результатов.

Данный метод позволяет с высокой точностью отслеживать состояние изоляции. Его недостаток заключается в необходимости большого количества вспомогательного измерительного оборудования (синхронный усилитель для вывода сигнала, высокочувствительный трансформатор тока) [11].

Диагностика состояния изоляции по ответу на высокочастотный сигнал. Как уже было отмечено, при старении изоляции изменяются диэлектрические свойства ее материала. Как следствие, при этом изменяются паразитные емкости, возникающие между витками обмотки, секциями

обмотки, между фазами, а также между обмоткой и сталью статора. Это обусловлено тем, что изоляция фактически выступает в роли диэлектрика между обкладками конденсатора в данных емкостях.

Исходя из представленного анализа, можно сделать вывод, что межвитковые, межсекционные емкости, а также емкости между обмоткой и сердечником статора находятся в зависимости от состояния соответствующей изоляции. Таким образом, значения данных емкостей можно использовать в качестве параметра диагностики состояния изоляции.

Метод диагностики изоляции на основе анализа реакции обмотки на высокочастотный сигнал описывается в [12]. Для генерирования высокочастотного сигнала, подаваемого на обмотку, используется ШИМ-инвертор. При этом исследуется переходный процесс тока, протекающего через обмотку.

Первопричина возникновения переходного процесса в обмотке статора при переключении инвертора заключается в том, что индуктивное сопротивление машины значительно превосходит индуктивное сопротивление питающего кабеля. Таким образом, в теории импульс напряжения полностью отражается (коэффициент отражения близок к единице). Отраженный импульс напряжения приводит к переходному перенапряжению колебательного характера с затухающей амплитудой. Пиковое значение перенапряжения может в 2 или даже в 4 раза (для быстро следующих импульсов напряжения) превосходить напряжение звена постоянного тока, а частота колебаний находится в диапазоне от десятков килогерц до десятков мегагерц.

Изменения в системе изоляции машины приводят к изменениям характерных для машины

при высоких частотах колебаний. Предлагаемый метод диагностики состояния оценивает колебания тока, служащие реакцией на переключение напряжения, для того чтобы обнаружить изменения в поведении машины при высоких частотах. Анализ колебаний тока предпочтителен, поскольку датчики тока уже имеются в современных приводах для управления машиной. Для реализации этого метода на обмотку статора подается высокочастотный сигнал напряжения и посредством датчиков тока снимается ответный сигнал – токовая реакция. Из полученного сигнала вычитается установившаяся составляющая, после чего получается переходный процесс тока в чистом виде, который и подвергается анализу. Пример переходного процесса тока, полученного от асинхронного двигателя мощностью 1.5 МВт, представлен на рис. 8, а.

Далее колебания тока при переходном процессе анализируются в частотной области. Полученный сигнал из временной области переводится в частотную посредством быстрого преобразования Фурье. Исследуемое временное окно выбрано таким образом, чтобы оно начиналось в момент действительного переключения ключей до момента затухания колебаний. Так, например, для показанного на рис. 8, а сигнала длительность выбранного окна составляет 6.4 мс. Используемая частота дискретизации 40 млн точек в секунду. Таким образом, количество дискретных значений составляет 256 шт. Результирующий амплитудный спектр после преобразования Фурье, отнормированный по максимальному значению, изображен на рис. 8, б.

Амплитудный спектр, полученный в начале эксплуатации машины, считается эталонным и используется для сравнения со спектрами сигнала

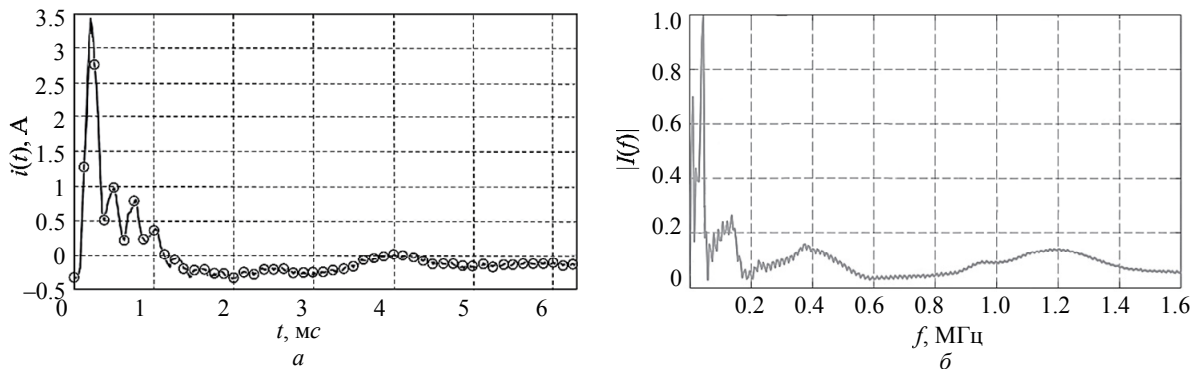


Рис. 8. Переходный процесс тока при подаче высокочастотного сигнала на обмотку статора:
а – во временной области; б – в частотной области

Fig. 8. Transient process of current when a high-frequency signal is applied to the stator winding:
а – in the time domain; б – in the frequency domain

лов, полученных на более поздних этапах эксплуатации. Показателем износа изоляции будет считаться отклонение спектра от этого эталона.

Следующим шагом является определение индикатора состояния изоляции (ISI). Данный параметр используется для оценки состояния изоляции в одной фазе. Он основан на количественной оценке изменения поведения машины на высоких частотах посредством сравнения амплитудного спектра, записанного для исправного состояния машины (референсного) $|I(f)|_{\text{реф}}$, и записанного при дальнейших оценках состояния фазы обмотки статора $|I(f)|_{\text{ф}}$. Среднеквадратичное отклонение (СКО) выбрано в качестве сравнительного значения и служит параметров диагностики для изоляции соответствующей фазной обмотки. Для повышения точности измерений спектр токовой реакции на высокочастотный сигнал и, следовательно, диагностический параметр ISI определяется k раз. Исследования показывают, что 30 повторений измерений более чем достаточно для получения достоверного результата (полноты контроля). Этот результат коррелирует с тем фактом, что статистически репрезентативная выборка больше или равна 30, если измеряемая величина нормально распределена, что предполагается в данном случае. Таким образом, индикатор состояния изоляции фазы для каждой итерации может быть определен по следующей формуле:

$$\begin{aligned} \text{ISI}_{\text{ф} k} &= \text{СКО}_{\text{ф} k} \left(|I(f)|_{\text{реф}}, |I(f)|_{\text{ф}} \right) = \\ &= \frac{\sqrt{\left(\sum_{g=n_{\min}}^{n_{\max}} \left(|I(f)|_{\text{реф} g} - |I(f)|_{\text{ф} g} \right)^2 \right)}}{n_{\max} - n_{\min}}, \end{aligned}$$

где $|I(f)|_{\text{реф} g}$ и $|I(f)|_{\text{ф} g}$ – значения спектра тока на шаге g для референсного спектра и спектра, записанного при дальнейших оценках состояния фазы соответственно; n_{\min} , n_{\max} – номера шагов расчета, на которых исследуемое временное окно начинается и заканчивается.

Итоговое значение диагностического параметра ISI рассчитывается как среднее арифметическое значений, полученных в результате измерений:

$$\text{ISI}_{\text{ф}} = \frac{\sum_{k=1}^m \text{ISI}_{\text{ф} k}}{m}.$$

Полученный параметр – это величина, которая позволяет оценить степень износа изоляции только для одной фазной обмотки. В качестве комплексного диагностического параметра используется так называемый пространственный индикатор состояния изоляции (SISI), который представляет собой суперпозицию параметров ISI для каждой фазы с учетом сдвига фаз:

$$\text{SISI} = \text{ISI}_A + \text{ISI}_B e^{j\frac{2\pi}{3}} + \text{ISI}_C e^{-j\frac{2\pi}{3}}.$$

Данный диагностический параметр позволяет определить состояние изоляции машины в целом. Однако необходимо учитывать, что он показывает только несимметричные изменения изоляции в фазах. Для учета симметричных изменений во всех трех фазах необходимо также анализировать параметры ISI для каждой фазы в отдельности.

Для экспериментальной проверки данного метода, как уже было отмечено ранее, использовался четырехполюсный двигатель мощностью 1.5 МВт. Для изменения паразитных емкостей параллельно к ним вводились добавочные конденсаторы. На рис. 9 в одной системе координат показаны ранее полученный референсный спектр ($|I(f)|_{\text{реф}}$) и спектр, полученный посредством подключения добавочной емкости 15 нФ параллельно фазе А ($|I(f)|_{\text{деф}}$), а также среднеквадратичное отклонение полученного спектра от референсного (σ).

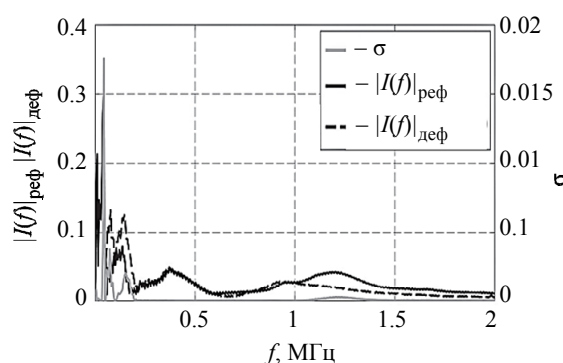


Рис. 9. Сравнение референсного спектра и спектра тока в обмотке с дефектной изоляцией

Fig. 9. Comparison of the reference spectrum and the current spectrum in a winding with defective insulation

Следует отметить, что введение добавочных конденсаторов параллельно паразитным емкостям приводит к увеличению суммарной емкости. Это отражается на амплитудных спектрах переходных процессов в части резонансных частот. Как видно из рис. 9, наблюдается некоторое сни-

жение резонансных частот. Данный факт полностью соотносится с теорией, поскольку значения резонансных частот обратно пропорциональны квадратному корню из емкости [13].

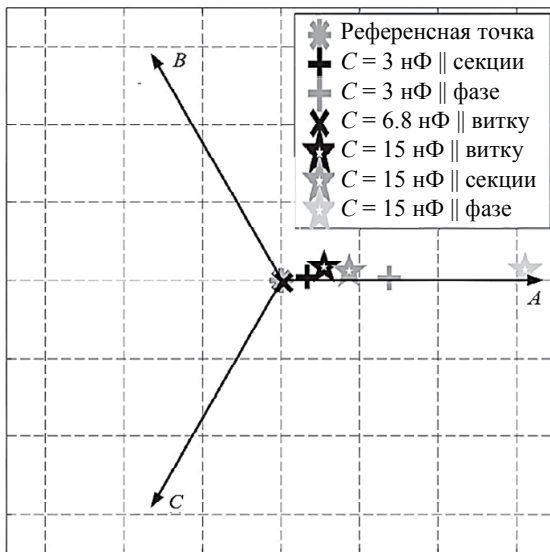


Рис. 10. Значения параметра SISI при различной степени дефектности изоляции
Fig. 10. Values of the SISI parameter for various degrees of insulation defects

Результаты расчета пространственного индикатора состояния изоляции представлены на рис. 10. Моделирование различной степени дефектности изоляции осуществлялось посредством внедрения в обмотку емкостей различных номиналов параллельно секции, витку или фазе.

Из рис. 10 видно, что при увеличении емкости конденсатора, подключаемого параллельно паразитным емкостям, равно как и при увеличении количества задействованных витков, значение диагностического параметра также возрастает. Таким образом, данный параметр действительно может демонстрировать состояние изоляции.

Однако у параметра SISI, равно как и у параметров ISI для каждой фазной обмотки, есть недостаток. Данные параметры показывают лишь отклонение от нормы. Теоретически может возникнуть такая ситуация, когда при увеличении и уменьшении паразитных емкостей данный индикатор будет выдавать одинаковые значения, если среднее отклонение спектра тока от референсного спектра будет одинаковым. Таким образом, необходимо выявить некоторый параметр, который будет давать однозначное понимание состояния паразитных емкостей и, как следствие, состояния изоляции.

Выводы. На основании анализа представленных методик диагностики обмотки статора асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором можно сделать вывод, что наиболее перспективен метод анализа токового ответа обмотки статора на воздействие напряжения высокой частоты. Несомненным преимуществом данного метода служит простота и отсутствие необходимости в дополнительном измерительном оборудовании. Однако данный метод не лишен недостатков. В частности, индикатор состояния изоляции, используемый в данном методе, не несет физического смысла и показывает лишь отклонение от нормы. Так, при увеличении и уменьшении паразитных емкостей в обмотке теоретически может быть получено одно и то же значение диагностического параметра.

В связи с вышеизложенным можно сказать, что анализ переходных процессов – это весьма перспективный метод оценки состояния изоляции, однако требуется ввести диагностический параметр, который будет однозначно определять изменение емкости и, как следствие, изменение состояния изоляции.

Список литературы

1. Кузнецов Н. Л. Надежность электрических машин: М.: Издательский дом МЭИ, 2006. 432 с.
2. Ferreira F., Baoming G., de Almeida A. Reliability and operation of high-efficiency induction motors // IEEE Trans. on Industry Appl. 2016. Vol. 52, no. 6. P. 4623–4633. doi: 10.1109/TIA.2016.2600677.
3. Advances in diagnostic techniques for induction machines / A. Bellini, F. Filippetti, C. Tassoni, G. A. Capolino // IEEE Trans. on Industrial Electronics. 2008. Vol. 55. P. 4109–4126. doi: 10.1109/TIE.2008.2007527.
4. Siddique A., Yadava G. S., Singh B. A review of stator fault monitoring techniques of induction motors // IEEE Trans. on Energy Conversion. 2005. Vol. 20, no. 1. P. 106–114. doi: 10.1109/TEC.2004.837304.
5. Stone G. C., Culbert I. M., Lloyd B. A. Stator insulation problems associated with low voltage and medium voltage PWM drives // IEEE Cement Industry Technical Conf. Record. Charleston, SC, 2007. P. 187–192. doi: 10.1109/CITCON.2007.358997.
6. Babel A. S., Strangas E. G. Condition-based monitoring and prognostic health management of electric machine stator winding insulation // Intern. Conf. on Electrical Machines, ICEM. Berlin, Germany IEEE, 2014. P. 1855–1861. doi: 10.1109/ICELMACH.2014.6960436.
7. Experimental evaluation of using the surge PD test as a predictive maintenance tool for monitoring turn insulation quality in random wound AC motor stator windings / J. Yang, T. Kang, B. Kim, S. B. Lee, Y. Yoon,

D. Kang, J. Cho, H. Kim // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 2012. Vol. 19, no. 1. P. 53–60. doi: 10.1109/TDEI.2012.6148502.

8. A new concept for online surge testing for the detection of winding insulation deterioration in low-voltage induction machines // IEEE Transactions on Industry Appl., Vol. 47, no. 5, 2011. P. 2051–2058. doi: 10.1109/TIA.2011.2161972.

9. Stone G. C., Sedding H. G., Chan C. Experience with on-line partial discharge measurement in high voltage inverter fed motors // 2016 Petroleum and Chemical Industry Technical Conf. (PCIC), 2016, Philadelphia, USA. P. 1–7. doi: 10.1109/PCICON.2016.7589241.

10. Lee S. B., Yang J., Younsi K., Bharadwaj R. An on-line groundwall and phase to phase insulation quality assessment technique for AC machine stator windings / S. Grubic, J. Restrepo, J. Aller M, B. Lu, T. G. Habetler // Fortieth IAS Ann. Meeting. Conf. Record of the 2005 Industry Appl. Conf. IEEE, 2005. P. 10–19. doi: 10.1109/

IAS.2005.1518285. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1658323> (дата обращения 20.04.2023).

11. Online capacitance and dissipation factor monitoring of AC motor stator insulation / K. Younsi, P. Neti, M. Shah, J. Y. Zhou, J. Krahn, K. Weeber, D. Whitefield // IEEE Intern. Power Modulator and High Voltage Conf. Atlanta, USA, 2010. P. 530–533. doi: 10.1109/IPMHVC.2010.5958411.

12. Nussbaumer P., Vogelsberger M. A., Wolbank T. M. Induction machine insulation health state monitoring based on online switching transient exploitation // IEEE Trans. Ind. Electr. 2015. Vol. 62, no. 3. P. 1835–1845. doi: 10.1109/TIE.2014.2361114.

13. Evaluation and current-response based identification of insulation degradation for high utilized electrical machines in railway application / C. Zoeller, M. A. Vogelsberger, R. Fasching, W. Grubelnik, T. M. Wolbank // IEEE Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED). 2015. Vol. 53, no. 3. P. 266–272. doi: 10.1109/DEMPED.2015.7303700.

Информация об авторах

Байдюк Максим Александрович – аспирант гр. 1043. СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: maximbay.196@gmail.com

Константинов Константин Витальевич – канд. техн. наук, доцент СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: Const.festu@mail.ru

References

1. Kuznecov N. L. Nadezhnost' jelektricheskikh mashin: M.: Izdatel'skij dom Mjel, 2006. 432 s. (In Russ.).

2. Ferreira F., Baoming G., de Almeida A. Reliability and operation of high-efficiency induction motors // IEEE Trans. on Industry Appl. 2016. Vol. 52, no. 6. P. 4623–4633. doi: 10.1109/TIA.2016.2600677.

3. Advances in diagnostic techniques for induction machines / A. Bellini, F. Filippetti, C. Tassoni, G. A. Capolino // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2008. Vol. 55. P. 4109–4126. doi: 10.1109/TIE.2008.2007527.

4. Siddique A., Yadava G. S., Singh B. A review of stator fault monitoring techniques of induction motors // IEEE Transactions on Energy Conversion. 2005. Vol. 20, no. 1. P. 106–114. doi: 10.1109/TEC.2004.837304.

5. Stone G. C., Culbert I. M., Lloyd B. A. Stator insulation problems associated with low voltage and medium voltage PWM drives // IEEE Cement Industry Technical Conference Record. Charleston, SC, 2007. P. 187–192. doi: 10.1109/CITCON.2007.358997.

6. Babel A. S., Strangas E. G. Condition-based monitoring and prognostic health management of electric machine stator winding insulation // Intern. Conf. on Electrical Machines, ICEM. Berlin, Germany IEEE, 2014. P. 1855–1861. doi: 10.1109/ICELMACH.2014.6960436.

7. Experimental evaluation of using the surge PD test as a predictive maintenance tool for monitoring turn insulation quality in random wound AC motor stator

windings / J. Yang, T. Kang, B. Kim, S. B. Lee, Y. Yoon, D. Kang, J. Cho, H. Kim // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 2012. Vol. 19, no. 1. P. 53–60. doi: 10.1109/TDEI.2012.6148502.

8. A new concept for online surge testing for the detection of winding insulation deterioration in low-voltage induction machines // IEEE Trans. on Industry Appl., Vol. 47, no. 5, 2011. P. 2051–2058. doi: 10.1109/TIA.2011.2161972.

9. Stone G. C., Sedding H. G., Chan C. Experience with on-line partial discharge measurement in high voltage inverter fed motors // 2016 Petroleum and Chemical Industry Technical Conference (PCIC), 2016, Philadelphia, USA. P. 1–7. doi: 10.1109/PCICON.2016.7589241.

10. An on-line groundwall and phase to phase insulation quality assessment technique for AC machine stator windings / S. Grubic, J. Restrepo, J. Aller M, B. Lu, T. G. Habetler // Fortieth IAS Ann. Meeting. Conf. Record of the 2005 Industry Appl. Conf. IEEE, 2005. P. 10–19. doi: 10.1109/IAS.2005.1518285. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1658323> (data obrasheniya 20.04.2023).

11. Online capacitance and dissipation factor monitoring of AC motor stator insulation / K. Younsi, P. Neti, M. Shah, J. Y. Zhou, J. Krahn, K. Weeber, D. Whitefield // IEEE Intern. Power Modulator and High Voltage Conf. Atlanta, USA, 2010. P. 530–533. doi: 10.1109/IPMHVC.2010.5958411.

12. Nussbaumer P., Vogelsberger M. A., Wolbank T. M. Induction machine insulation health state monitoring based on online switching transient exploitation // IEEE Trans. Ind. Electr. 2015. Vol. 62, no. 3. P. 1835–1845. doi: 10.1109/TIE.2014.2361114.

13 Evaluation and current-response based identification of insulation degradation for high utilized electrical

machines in railway application / C. Zoeller, M. A. Vogelsberger, R. Fasching, W. Grubelnik, T. M. Wolbank // IEEE Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDMPED). 2015. Vol. 53, no. 3. P. 266–272. doi: 10.1109/DEMPED.2015.7303700.

Information about the authors

Maksim A. Baidiuk – post-graduate student gr. 1043. Saint Petersburg State Electrotechnical University «LETI» them. V. I. Ulyanov (Lenin), st. Professor Popov, d. 5F, St. Petersburg, 197376, Russia.
E-mail: maximbay.196@gmail.com.

Konstantin V. Konstantinov – Cand. Sci. (Eng.), assistant professor. Saint Petersburg State Electrotechnical University «LETI» them. V. I. Ulyanov (Lenin), st. Professor Popov, d. 5F, St. Petersburg, 197376, Russia.
E-mail: Const.festu@mail.ru

Статья поступила в редакцию 27.06.2023; принята к публикации после рецензирования 20.07.2023; опубликована онлайн 19.10.2023.

Submitted 27.06.2023; accepted 20.07.2023; published online 19.10.2023.
