

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1073-1085

## ANALYSIS OF METHODS OF DIAGNOSTICS OF HIGH VOLTAGE APPARATUS

**A. V. Saushev, D. A. Sherstnev, N. V. Shirokov**

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,  
St. Petersburg, Russian Federation

*The efficiency providing of electro-technical devices that perform important functions and which are installed on the objects of national purpose is considered in the paper. It is shown that the main problems have on the high-voltage equipment failure and incorrect operation which leads to large economic over-spending, and often is the cause of emergencies in the workplace. The paper presents the structure and operation of the automated system of control and monitoring electrical substation. The principle of introduction of the automated system of control and monitoring, both on new equipment and equipment in operation is given. Presents a method of contactless monitoring, which is to use patterns of change in the external magnetic field, accompanying the process of compatible. The considered neural network is used as defuzzification to build hybrid networks, assessment of technical condition of high voltage equipment at substations. It is shown that one of the possible methods for the determination of characteristic functions of accessories of apparatuses, high voltage, is the method of using linguistic variables, i.e., using qualitative assessments of equipment. This paper provides a brief description of the devices of high voltage, as part of high voltage equipment. The analysis of failures of devices of high voltage. The method of monitoring the insulation resistance, the method of UV control, thermal imaging method, method of acoustic emission, gas chromatography method, a method of testing a high voltage with the registration parameters of partial discharges, an optical method of indication defects. The conclusion about necessity of system creation, which includes all modern methods of diagnostics of high voltage devices, allowing to analyze and control the status of these devices in real time is made.*

*Keywords: diagnostic methods, high voltage devices, electrical equipment failures, neural networks.*

**For citation:**

Saushev, Alexander V., Denis A. Sherstnev, and Nikolaj V. Shirokov. "Analysis of methods of diagnostics of high voltage apparatus." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.5 (2017): 1073–1085. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1073-1085.

**УДК 621.31**

## АНАЛИЗ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ АППАРАТОВ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

**А. В. Саушев, Д. А. Шерстнев, Н. В. Широков**

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,  
Санкт-Петербург, Российская Федерация

*Статья посвящена вопросу обеспечения работоспособности выполняющих важные функции электротехнических устройств, установленных на промышленных объектах Российской Федерации. Показано, что основные проблемы приходятся на высоковольтное оборудование, отказ и некорректная работа которого ведет к большим экономическим затратам, а зачастую является причиной аварийных ситуаций на производстве. В статье представлены состав и принцип работы автоматизированной системы контроля и мониторинга электрооборудования подстанции. Приведен принцип внедрения автоматизированной системы контроля и мониторинга как на новое электрооборудование, так и на оборудование, находящееся в эксплуатации. Представлен метод бесконтактного мониторинга, который заключается в использовании закономерностей изменения внешних магнитных полей, сопровождающих процесс его токопотребления. Рассмотрены нейронные сети, используемые в качестве дефазификатора при создании гибридных сетей и оценке технического состояния высоковольтного оборудования на подстанциях. Показано, что одним из возможных методов определения характеристических функций принадлежности аппаратов высокого напряжения является метод с использованием лингвистических переменных, т. е. с использованием качественных оценок состояния оборудования. В работе приводится краткая характеристика аппаратов высокого напряжения как части высоко-*

вольтного оборудования. Выполнен анализ отказов аппаратов высокого напряжения. Рассмотрен метод контроля сопротивления изоляции, метод ультрафиолетового контроля, тепловизионный метод, метод акустической эмиссии, газохроматографический метод, метод испытания повышенным напряжением с регистрацией параметров частичных разрядов, оптический метод индикации дефектов. Сделан вывод о необходимости создания систем, включающих в себя все современные методы диагностики аппаратов высокого напряжения, позволяющих выполнять анализ и контроль состояния данных аппаратов в реальном времени.

*Ключевые слова:* методы диагностики, аппараты высокого напряжения, отказы электрооборудования, нейронные сети.

**Для цитирования:**

Саушев А. В. Анализ методов диагностики аппаратов высокого напряжения / А. В. Саушев, Д. А. Шерстнев, Н. В. Широков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 5. — С. 1073–1085. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1073-1085.

### Введение

В последние годы, в связи с усложнением состава электрооборудования, обострилась проблема обеспечения работоспособности выполняющих важные функции электротехнических устройств, установленных на объектах ответственного назначения. К таким объектам, например, относятся объекты водного транспорта: суда, судоходные шлюзы, морские и речные порты, судоремонтные и судостроительные предприятия. Анализ показывает, что основные проблемы приходится на высоковольтное оборудование, требующее специального подхода при его обслуживании. Отказы и некорректная работа аппаратов высокого напряжения (АВН) служат главной причиной остановки производства, которая, в свою очередь, ведет к большим экономическим затратам, а зачастую является причиной аварийных ситуаций на производстве. Поддержание необходимой степени работоспособности высоковольтного оборудования в процессе его эксплуатации обеспечивается системой технического обслуживания и ремонтов. Традиционно эта система базируется на периодическом проведении плановых профилактических работ и является системой обслуживания по времени наработки. Более перспективным является переход к техническому обслуживанию по действительному состоянию оборудования [1], [2]. Это обусловлено тем, что аварийные ситуации, связанные с отказом АВН, достаточно часто напрямую не связаны с их наработкой. Они являются следствием незначительной поломки (неисправности), раннее обнаружение которой могло бы защитить аппаратуру и все электрооборудование от отказа. Кроме того, обслуживание АВН по времени обработки приводит к неоправданным отключениям работоспособного оборудования. Таким образом, единственным надежным способом защиты от отказов является диагностирование АВН в реальном времени [3].

Для диагностирования АВН используются различные методы. Как известно, методом диагностирования называется совокупность операций и действий, позволяющих дать объективное заключение о состоянии объекта исследования. Определение состояния объекта предусматривает наличие обоснованных алгоритмов диагностирования, которые реализуются средствами диагностирования [4]. Диагностирование позволяет решать следующие задачи: определение технического состояния объекта; поиск дефектов, т. е. определение их наличия, характера и местонахождения; прогнозирование изменения состояния объекта.

Поиск источников для научного обзора осуществлялся в Российской научной электронной библиотеке E-Library ([www.elibrary.ru](http://www.elibrary.ru)). Запрос проводился по словам «методы диагностики», «аппараты высокого напряжения», «отказы электрооборудования», «нейронные сети» в названиях публикаций, аннотациях и ключевых словах во всех видах публикаций. Всего было проанализировано 230 источников. Конечный отбор источников для научного обзора проведен на основании соответствия тематики источника рассматриваемой проблеме. В итоге в список литературы вошла 31 публикация (29 отечественных и 2 иностранных источника).

### **Системы контроля и мониторинга высоковольтного электрооборудования**

Автоматизированные системы диагностики и мониторинга (АСДМ) электрооборудования предназначены для своевременного обнаружения неисправностей, предупреждения аварийных ситуаций на ранних этапах, регистрации и измерения диагностических параметров, включая аварийные и предаварийные режимы работы высоковольтного оборудования в процессе эксплуатации [5]. Система мониторинга позволяет своевременно принимать необходимые меры в предаварийных ситуациях, осуществлять контроль режимов работы, анализировать и прогнозировать техническое состояние, а также планировать объемы и сроки технического обслуживания оборудования [6]. Наиболее часто АСДМ, устанавливаемая в системах электроснабжения на подстанциях, где происходит преобразование электрической энергии, решает следующие основные задачи [7]:

- мониторинг коммутационного оборудования;
- мониторинг трансформаторов с контролем газо- и влагосодержания масла, системы охлаждения, температуры масла и обмоток, устройства регулирования напряжения под нагрузкой;
- контроль состояния линий электропередач (механической и токовой нагрузки, а также провеса проводов), определение и локализация повреждений в них.

АСДМ устанавливается как на новое электрооборудование, так и на оборудование, находящееся в эксплуатации. Так как все системы имеют возможность выдавать информацию в стандартизированном виде, включая OPC-сервер, протоколы Modbus, МЭК 870-5-101/104, формат осциллограмм Comtrade, их согласование с регистрирующими приборами и диагностическим оборудованием не требует специальных действий и представляет собой достаточно простую задачу. Механизмы передачи информации являются открытыми (имеются описания принципов передачи данных) и могут быть использованы для занесения информации в базу данных системы диагностирования. Для большинства видов электрооборудования, включая и высоковольтную аппаратуру, разработаны математические модели для оценки их состояния. При этом необходимо адаптировать эти модели для использования в системе диагностирования с учетом принципа функционирования системы, а также с учетом общего числа диагностических параметров, которые может обработать система диагностирования. Программная среда должна предоставлять все необходимые данные в удобном для пользователя виде и иметь возможность осуществлять ввод исходной и дополнительной информации, например, для корректировки данных после проведения ремонтов оборудования [8].

АСДМ позволяет осуществлять настройки систем диагностирования для сопровождения оборудования в эксплуатации, производить предварительную обработку, форматирование и сбор данных путем настройки конфигурации под конкретную единицу оборудования с использованием оптоволоконных систем связи, устойчивых к электромагнитным помехам и обеспечивающих высокую скорость передачи данных [9]. Примером необходимости разработки и внедрения новых методов диагностики силового электрооборудования, включая АВН, может служить диагностика устройств регулирования падения напряжения (РПН) на обмотках трансформатора. В настоящее время диагностика РПН осуществляется классическим методом — вскрытием его бака и сливом из него трансформаторного масла. Такой метод диагностики является трудоемким, дорогостоящим и весьма продолжительным. При нарушении технологии откачки масла и последующей его заливки может произойти ухудшение его диэлектрических свойств, снижение сопротивления изоляции бакелитового цилиндра бака РПН и сопротивления изоляции обмоток трансформатора в целом, а также увеличение вероятности загрязнения окружающей среды и т. п. Кроме того, при повышенной влажности атмосферы и отрицательных температурах вскрытие бака РПН недопустимо. Таким образом, актуальной является разработка методов диагностики регуляторов напряжения под нагрузкой без вскрытия бака и откачки из него диэлектрической жидкости [10].

Для оценки технического состояния высоковольтного электрооборудования все шире используют метод бесконтактного мониторинга, который заключается в использовании закономерностей изменения внешних магнитных полей, сопровождающих процесс его токопотребления.

Датчики магнитного поля при этом размещаются непосредственно на электропитающих проводах (шинах) без ориентации их осей чувствительности в пространстве. При использовании метода бесконтактного мониторинга в элементах и устройствах не происходит каких-либо изменений, влияющих на параметры и характеристики электрооборудования, не требуется проведение специальных монтажных работ, затрагивающих структуру изменяющих его конфигурацию. Метод бесконтактного мониторинга позволяет по косвенным признакам обнаружить скрытые дефекты, выявить особенности, влекущие за собой потенциальную неисправность аппарата. Основой метода является получение информации о режимах работы и техническом состоянии электрооборудования на основании анализа характера изменения формы тока, потребляемого приемниками электрической энергии, которую называют *кинети́кой токопотребления* или *кинети́кой тока*.

Регистрация осуществляется датчиками внешнего магнитного поля, которое определяется токами в токоподводящих проводах и отражает кинетику токопотребления. При этом важным обстоятельством является тот факт, что датчики магнитного поля, подключаемые к токопроводам по схеме трансформатора тока, могут быть установлены как непосредственно у диагностируемого аппарата, так и в любом другом, удобном для размещения месте. Получаемая диагностическая информация запоминается в оперативной памяти диагностической аппаратуры, включающей программируемый контроллер или управляющую ЭВМ, в форме матрицы технического состояния. Полученную матрицу сравнивают с предварительно сформированным в модулях памяти набором эталонных матриц технических состояний конкретного электротехнического устройства. По завершению процесса сравнения проводится идентификация технического состояния устройства, результаты которой оператор наблюдает на табло вывода диагностической информации. На основании полученных данных мониторинга оператор формирует стратегию диспетчерского управления техническим состоянием электрооборудования [11].

При оценке технического состояния высоковольтного оборудования достаточно часто используют гибридные сети. Для определения функции принадлежности диагностируемого оборудования к определенному классу состояний используют нечеткие множества, а в качестве дефазификатора, как правило, выступает искусственная нейронная сеть (ИНС). Нейронные сети — это адаптивные системы для обработки и анализа данных, которые представляют собой математическую структуру, имитирующую некоторые аспекты работы человеческого мозга. Нейронные сети не нуждаются в заранее известной модели для анализа данных, а строят ее сами только на основе полученной информации. В основе любого метода неразрушающего контроля лежит диагностическая модель, которая представляет собой формальное описание работоспособного состояния диагностируемого объекта, позволяющая по известным значениям входных параметров вычислять с заданной точностью значения его выходных параметров. Выходной функцией диагностической модели является функция состояния ИНС (или отдельного нейрона). Самыми распространенными программными инструментами для применения ИНС являются Neural Network Toolbox, NeuralTools и т. д.

Перечислим основные причины, определяющие целесообразность применения ИНС для оценки данных по результатам технического диагностирования высоковольтного электрооборудования. Во-первых, при любом методе диагностирования в той или иной степени возможно искажение, противоречивость или недостаточная полнота исходных данных, вследствие чего применение стандартных методов анализа может привести к неудовлетворительному или нежелательному результату. Во-вторых, в процессе диагностирования накапливается достаточный объем данных (особенно в длительном временном промежутке) о поведении системы. В-третьих, при использовании отдельных методов неразрушающего контроля имеются входные данные, между которыми существуют неявно-выраженные взаимосвязи и закономерности [12]. Одним из возможных методов определения характеристических функций принадлежности АВН является метод с использованием лингвистических переменных, т. е. с использованием качественных оценок состояния оборудования. Классификация оборудования по техническому состоянию выполняется с помощью функций принадлежности *RL*-типа [13].

В качестве примера приведем четыре важнейших состояния любого электротехнического устройства: исправное состояние; неисправное, но работоспособное состояние; неисправное и неработоспособное состояние; предельное состояние. При диагностировании технического состояния электротехнических устройств и систем, как отмечается в работах [2], [14], следует расширить число качественно различающихся состояний, отличающихся друг от друга накопленными параметрическими и структурными возмущениями. Это особенно важно при диагностировании высоковольтных электрических аппаратов. Такими состояниями являются:

{a1} — множество работоспособных состояний, различающихся объемом накопленных параметрических отклонений, которым соответствуют различные уровни запаса работоспособности системы:  $\rho_0, \rho_1, \dots, \rho_{d-1}$ ;

{b1} — множество работоспособных состояний, которые различаются объемом накопленных параметрических и структурных отклонений, которые могут иметь место, например, в системе с резервированием;

{c1} — множество состояний правильного функционирования, различающихся объемом накопленных параметрических и структурных возмущений;

{a2} — множество состояний, при которых в системе отсутствуют структурные отклонения и, как следствие, внезапный отказ, и она выполняет возложенные на нее функции, но один или несколько показателей качества вышли за допустимые пределы;

{b2} — множество состояний, отличающихся от множества {a2} тем, что в системе имеются структурные отклонения, которые не привели к внезапному отказу;

{c2} — множество состояний, отличающихся от множества {b2} тем, что в системе произошел внезапный отказ и она функционирует с недопустимо низким уровнем качества лишь в одном или нескольких (но не всех) режимах работы;

{a3} — множество состояний, различающихся уровнем параметрических отклонений, при которых система не способна выполнять возложенные на нее функции из-за исключительно низкого уровня ее качества. Вместе с тем в системе отсутствуют структурные отклонения;

{b3} — множество состояний, отличающихся от множества {a3} тем, что в системе имеются структурные отклонения, которые не привели к внезапному отказу;

{c3} — множество состояний, отличающихся от множества {c2} тем, что система не способна выполнять возложенные на нее функции из-за исключительно низкого уровня ее качества.

{d4} — множество состояний, различающихся уровнем параметрических и структурных отклонений, при которых система находится в предельном состоянии и физически не может выполнять возложенные на нее функции.

Критериями, определяющими то или иное состояние, являются показатели технической диагностики, испытаний и экспертные оценки квалифицированного персонала. Каждый показатель (диагностический параметр) должен характеризоваться рабочим диапазоном, ограниченным минимальным и / или максимальным граничными значениями. При выходе за пределы этого диапазона система переходит из работоспособного состояния в неработоспособное состояние. В том случае, если диагностическими параметрами являются внутренние параметры системы, т. е. параметры ее комплектующих элементов, оценку технического состояния следует осуществлять на основании информации о границе области работоспособности, что ведет к снижению методической погрешности такой оценки [15], [16]. При ограниченной априорной информации, в случае использования характеристических функций принадлежности системы к тому или иному состоянию, основанных на нескольких показателях, обычно используют обобщенную количественно-качественную оценку технического состояния, определяемую на основе средневзвешенной балльной оценки с применением прогрессивной шкалы, снижающей дисперсию конечного результата [17], [18].

### Методы диагностирования аппаратов высокого напряжения

В группу АВН входят измерительные трансформаторы тока (ТТ), напряжения (ТН), коммутационные аппараты (масляные, воздушные, элегазовые, вакуумные), комплектные распределительные устройства (РУ), трансформаторы тока (ТТ), напряжения (ТН), коммутационные аппараты (масляные, воздушные, элегазовые, вакуумные), комплектные распределительные устройства (РУ).

тельные устройства с элегазовой изоляцией (КРУЭ), вводы (бумажно-масляные, масло-барьерные, твердые, бакелитовые), разрядники, ограничители перенапряжения, реакторы и заземляющие устройства. Каждый из этих аппаратов подвержен отказам. При этом под отказом понимают событие, заключающееся в переходе объекта из класса работоспособных состояний, определяющих область работоспособности, в класс неработоспособных состояний. Проведенный анализ позволил выделить характерные причины отказов и методы диагностики АВН. Полученные результаты представлены в таблице.

#### Причины отказов и методы диагностики аппаратов высокого напряжения

Тип АВН	Причины отказа	Методы диагностики
Измерительные трансформаторы тока и напряжения	– нарушения лакового покрова внешней изоляции; – замыкание листов магнитопровода; – повреждения армировочного слоя изолятора; – трещины по фарфору изоляторов	– метод контроля сопротивления изоляции; – метод ультрафиолетового контроля
Маслонаполненные выключатели	– отказы механической системы; – нарушение теплового отвода, нагревания токоведущих частей; – ухудшения изоляции	– метод контроля сопротивления изоляции; – тепловизионный метод; – газохроматографический метод; – метод акустической эмиссии
Газонаполненные выключатели	– потеря герметичности	– метод контроля сопротивления изоляции; – тепловизионный метод
Вводы высокого напряжения	– нарушение теплового отвода; – ухудшение изоляции; – ухудшение (старение) качества масла	– метод контроля сопротивления изоляции; – тепловизионный метод; – газохроматографический метод; – метод акустической эмиссии
Комплектных распределительных устройств с элегазовой изоляцией (КРУЭ)	– нарушение теплового отвода, нагревания токоведущих частей; – ухудшения изоляции	– метод испытания повышенным напряжением переменного тока с регистрацией параметров частичных разрядов; – оптический метод индикации дефектов

Метод контроля сопротивления изоляции ( $R_{из}$ ) сводится к следующему. В процессе работы  $R_{из}$  существенно меняется и зависит в основном от двух факторов — влажности и температуры, которые снижают ее значение, и если температуру можно измерить, то влажность не поддается количественной оценке, а качественная оценка влажности есть измеренный результат.  $R_{из}$  можно измерять мегаомметром. Сравнивая  $R_{из}$  обмоток в процессе работы, можно судить о допустимой ее величине. Снижение сопротивления изоляции более чем на 30 % по сравнению с предыдущим значением считается недопустимым.

Степень увлажнения и состояние изоляции определяются следующими методами:

- по отношению «емкость – частота» ( $C2/C50$ );
- по приросту емкости за 1 с ( $\Delta C/C$ );
- по значению коэффициента абсорбции ( $K_{аб}$ );
- по значению тангенса угла диэлектрических потерь  $\text{tg } \delta$ .

Метод «емкость – частота» основан на том, что емкость сухой изоляции при изменении частоты фактически не меняется в отличие от влажной изоляции. Измерение емкости проводят при частоте 50 Гц и 2 Гц. Измеряя емкость изоляции на частоте 50 Гц, можно исследовать только геометрическую емкость, которая имеет одинаковое значение у сухой и влажной изоляции.

При измерении емкости на частоте 2 Гц начинает проявляться емкость абсорбции влажной изоляции. В сухой изоляции она имеет меньшее значение, из-за этого изоляция заряжается медленнее.

Определять влажность изоляции также можно по приросту емкости за 1 с ( $\Delta C/C$ ). Для этого нужно зарядить изоляцию, а затем при ее разряде измерить емкость объекта «С» и прирост емкости « $\Delta C$ » в течение 1 с за счет емкости абсорбции, которая проявляет себя в пределах 1 с у влажной изоляции и не проявляется у сухой изоляции. Отношение  $\Delta C/C$  является функцией температуры и позволяет характеризовать увлажненность изоляции. Данная методика применяется для контроля влажности изоляции у электрических машин, которые не заполняют маслом.

Увлажненность изоляции связана с продолжительностью стабилизации показаний мегаомметра при измерении ее сопротивления. Это время тем больше, чем меньше увлажнена изоляция. При оценке увлажненности изоляции метод коэффициента абсорбции является основополагающим. Коэффициент  $K_{аб}$  определяется как отношение двух сопротивлений:  $R_{60}$  и  $R_{15}$ . Изоляция считается влажной, если  $K_{аб} < 1,3$ . При  $K_{аб} > 1,3$  изоляция сухая. Физика процесса объясняется различным временем разряда емкости абсорбции у сухой и влажной изоляций.

Другой характеристикой состояния изоляции является мощность, которая рассеивается в проводах, или пропорциональный этой мощности тангенс угла диэлектрических потерь —  $\text{tg } \delta$ . По активному току  $I_a$  нельзя судить о потерях, так как он является функцией геометрии самой изоляции. Отношение активного тока утечки к емкостному току ( $I_a / I_C$ ) имеет функциональную зависимость от величины сопротивления изоляции  $R_{ин}$ . Для измерения  $\text{tg } \delta$  используются резонансный и мостовой методы. Наиболее широкое применение на практике находят МД-18, Р-526 и другие мостовые приборы. Этот метод позволяет определять прочность изоляции, отсутствие местных дефектов, что невозможно сделать, используя другие методы [19].

Дефектами в изоляции чаще всего являются газовые включения. Под воздействием напряженности электрического поля в полости начинают возникать частичные разряды, которые разрушают изоляционный материал. Впоследствии в изоляции развиваются дендриты — древовидные каналы неполного пробоя, которые могут быть заполнены газом. Развитие дендритов ведет к увеличению общей электрической прочности изоляции и, в конечном счете, к пробое. Частичные разряды являются индикаторами разрушения изоляционного материала и могут служить средством диагностики изоляции аппаратов высокого напряжения.

Основными разрушительными факторами для изоляции являются: частичные разряды, радиационное излучение, влажность окружающей среды (воздуха или земли), термическое воздействие, механическое воздействие, ультрафиолетовое излучение (в случае нахождения в воздухе).

Непосредственно измерить величину импульса *частичного разряда* не представляется возможным, поэтому фиксируются его внешние проявления, называемые кажущимся разрядом [20]. Появление частичных разрядов в изоляции электрооборудования сопровождается следующими процессами: протеканием импульсного тока в цепях с источниками частичных разрядов, ударными волнами, электромагнитным излучением в окружающее пространство, световым излучением в окружающее пространство, разложением диэлектрика на модулярные группы в зоне действия частичных разрядов, нагревом локальных объемов изоляции с частичными разрядами [21]. На основе физических явлений, происходящих при частичных разрядах, разработаны и совершенствуются следующие методы их обнаружения: электрический, акустический, электромагнитный (дистанционный), оптический (оптоэлектронный), химический, термический [22]. Для контроля источников частичных разрядов в изоляции используют регистратор характеристик частичных разрядов. Он формирует данные о характеристиках частичных разрядов, производит их обработку и отправляет на устройство прогнозирующей релейной защиты в цифровом коде. Прогнозирующая защита производит расчет остаточного ресурса изоляции на основе данных о частичных разрядах и других разрушающих изоляцию факторах [23]. Кроме того, устройство прогнозирующей защиты определяет предпробивное состояние изоляции и выдает сигнал о необходимости ремонта поврежденного элемента, после чего производится поиск дефекта и его устранение [24].

Метод *ультрафиолетового контроля* заключается в сканировании электрооборудования с помощью ультрафиолетовой камеры (дефектоскопа). При сканировании на мониторе дефектоскопа красным свечением выделяются поврежденные участки изолятора, что указывает на их повреждение [22].

Принцип *тепловизионного* метода основан на анализе температур определенных систем аппаратов, используемых на объектах энергетики. Каждый электроэнергетический аппарат имеет несколько «контрольных» точек, путем измерения температуры которых можно косвенно производить анализ режима работы рассматриваемого прибора. Условно такие системы можно разделить на системы анализа спектрального и точечного типов. Системы спектрального анализа в большинстве своем представлены тепловизорами, позволяющими всесторонне анализировать рассматриваемый аппарат в полном объеме. Системы точечного типа представляют собой конструкции, объединяющие множество датчиков, регистрирующих температуру в конкретных, заранее определенных точках устройства. Преимуществом системы спектрального анализа над системой точечного анализа является возможность получения полной термограммы прибора. Однако автоматизация такой системы является более трудной задачей в сравнении с точечным методом. При построении автоматизированной системы анализа также необходимо учитывать взаимовлияние на спектр температур близко расположенных объектов [23]. При этом важно, чтобы измерялось собственное излучение обследуемого объекта, которое связано с наличием и степенью развития дефекта. При тепловизионном обследовании хорошо выявляются дефекты работы охладителей, термосифонных фильтров, местные перегревы баков, перегревы болтов, соединяющих колокол и поддон, работы маслоуказателей по уровню масла и другие элементы [24]. В качестве основных средств анализа и контроля данные системы не могут использоваться, однако они могут входить в состав АСДМ.

Специфика *газохроматографического* метода заключается в том, что при анализе газов нормативно устанавливаются только те граничные концентрации, при достижении которых возможно развитие дефектов в маслonaполненных выключателях, а риск опасности развития неисправностей определяется по относительной скорости нарастания концентрации газов. Такая диагностика позволяет провести распознавание дефектов, связанных с частичными разрядами малой интенсивности, термическим воздействием, а также дуговыми процессами. Перспективным при диагностике состояния маслonaполненного электрооборудования является использование варианта экспрессной и двумерной газовой хроматографии с применением поликапиллярных и монолитных хроматографических колонок, заполненных новыми неподвижными жидкими фазами, которые в последнее время стали широко использоваться и являются коммерчески доступными. Одним из наиболее важных свойств поликапиллярных колонок является высокая скорость разделения, которая в 60 – 100 раз выше, чем на насадочных колонках, что позволяет проводить анализ газообразных продуктов, выделяющихся из трансформаторного масла в течение нескольких секунд. Перспективным является также нанесение на внутреннюю поверхность поликапиллярных колонок новых сорбентов, что позволяет повысить селективность разделения анализируемых компонентов и тем самым повысить эффективность газохроматографического метода [25].

Метод *акустической эмиссии* является одним из перспективных методов исследования технического состояния трансформаторного масла в маслonaполненном электрооборудовании. В первую очередь, данный метод применяется для диагностики частичных электрических разрядов. Испытательное оборудование содержит трансформаторное масло в резервуаре, два электромеханических (пьезоэлектрических) преобразователя, микроконтроллер, предусилитель, цифровой осциллограф с двумя измерительными вводами и одним генерирующим выходом, персональный компьютер. Общая схема работы метода следующая: один из электромеханических (пьезоэлектрических) преобразователей формирует синусоидальный акустический сигнал определенной частоты. Форма сигнала определяется на установленном персональном компьютере, через USB-кабель передается на цифровой осциллограф и далее через испытываемую среду ко второму преобразователю. Полученный сигнал направляется через предусилитель к цифровому осциллографу и да-

лее на персональный компьютер, где формируется амплитудно-частотная характеристика (АХЧ). По анализу АХЧ можно судить о состоянии трансформаторного масла [26].

Наиболее эффективным методом для выявления возможных дефектов в изоляции комплектных распределительных устройств с элегазовой изоляцией (КРУЭ) являются *испытания повышенным напряжением переменного тока с регистрацией параметров частичных разрядов*. Данный метод является в настоящее время основным методом определения мест дефектов и установления степени их опасности. Методика диагностики изоляции основана на сочетании акустического и электрического метода регистрации частичных разрядов. Диагностика изоляции КРУЭ на наличие частичных разрядов акустическим методом производится во время эксплуатации КРУЭ под рабочим напряжением, а также при первичном вводе в эксплуатацию или после ремонта, во время испытания КРУЭ от постороннего источника. При этих испытаниях акустическая диагностика проводится параллельно с испытанием на наличие частичных разрядов электрическим методом либо после их выявления для уточнения места дефекта изоляции. В настоящее время разработаны и внедрены как стационарные системы контроля изоляции, так и переносные. При возникновении дефекта изоляции в КРУЭ возникают частичные разряды, сигналы которых воспринимаются датчиком и передаются в блоки обработки информации. При этом на индикаторной панели контрольного оборудования загорается соответствующий светодиод. Факт регистрации частичных разрядов передается на щит управления дежурному персоналу, который по номеру загоревшегося светодиода на индикаторной панели блока обработки может определить место возникновения дефекта изоляции [27], [28].

В настоящее время развивается *оптический* метод диагностики КРУЭ. Принцип работы оптического индикатора поясняется следующим. Распределение электрического поля и потенциала вдоль изолирующей конструкции изменяется при нарушении целостности отдельных ее частей. Разность потенциалов на поврежденном участке уменьшается, что вызывает увеличение напряжения вблизи неповрежденной части конструкции. Дефектное состояние изолирующей конструкции может быть обнаружено по интенсивности свечения индикатора, установленного на участке изолирующей части конструкции или на опоре, яркость свечения которого зависит от падения напряжения на его контактах и протекающего тока [29].

### Заключение

Повышение надежности высоковольтного электрооборудования является важным технико-экономическим фактором, влияющим на эффективность работы энергетической системы. Существенно повысить надежность АВН и технико-экономические показатели работы энергетической системы можно путем комплексной диагностики электрооборудования и внедрения энергоэффективных способов мониторинга его технического состояния. Комплексная автоматизация производственных процессов в промышленности и на транспорте приводит к появлению достаточно сложных автоматических систем, которые могут быть задействованы для решения задач технического диагностирования электрооборудования. Для обеспечения возможности их использования необходимо повышать уровень эксплуатации.

Необходима разработка автоматизированных систем контроля и мониторинга состояния электрооборудования, включающая в себя все современные методы диагностики аппаратов высокого напряжения. Техничко-экономический эффект от применения такой системы возможен, прежде всего, благодаря переходу от периодического контроля электрооборудования при помощи переносных приборов к непрерывному автоматизированному контролю и диагностированию, что приведет к повышению информативности данных, применяемых для диагностирования состояния, и, как следствие, к повышению достоверности полученных диагностических результатов. Конечным результатом будет являться повышение надежности диагностируемого оборудования и снижение расходов на его эксплуатацию.

Вместе с тем необходимо совершенствование существующих и разработка новых технологий и практических методов, которые обеспечивали бы более эффективное техническое об-

служивание и ремонт электрооборудования по техническому состоянию, а также обеспечение возможности диагностики из удаленных центров управления. Для этой цели следует внедрять автоматизированные системы мониторинга и оперативной диагностики высоковольтного оборудования.

Основным направлением, определяющим повышение качества информационных технологий контроля и оценки технического состояния, следует считать интеллектуализацию процессов обработки диагностической информации с использованием технологии экспертных систем, которые способны обеспечить повышение качества распознавания и прогнозирования технического состояния и ресурса объекта [30], [31].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сви П. М. Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения / П. М. Сви. — М.: Энергоатомиздат, 1992. — 240 с.
2. Саушев А. В. Основы управления состоянием электротехнических систем объектов водного транспорта / А. В. Саушев. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2015. — 215 с.
3. Кудаярова А. А. Повышение надежности работы электрооборудования путем применения методов диагностики / А. А. Кудаярова, Л. Н. Хузина, А. О. Дорофеев // Электротехнические комплексы и системы: матер. междунар. науч.-практ. конф. — Уфа: ГОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет», 2016. — С. 244–247.
4. Чичев С. И. Система контроля и управления электротехническим оборудованием подстанций / С. И. Чичев, В. Ф. Калинин, Е. И. Глинкин. — М.: Спектр, 2011. — 140 с.
5. Генин В. С. Диагностика электрооборудования подстанций распределительных сетей / В. С. Генин, С. И. Копылов // Международный научный журнал. — 2012. — № 2. — С. 106–110.
6. Баширов М. Г. Интегральный критерий оценки технического состояния силовых масляных трансформаторов / М. Г. Баширов, А. С. Хисматуллин, Р. У. Галлямов // Энергетик. — 2016. — № 7. — С. 24–26.
7. Дарьян Л. Автоматизированная система мониторинга и диагностики оборудования подстанций / Л. Дарьян, Р. Образцов, Е. Ильина, К. Сипачёв // Электроэнергия. Передача и распределение. — 2015. — № 1 (28). — С. 82–88.
8. Женихов М. А. Повышение эффективности диагностики электрооборудования путем применения данных автоматизированной системы диспетчерского управления / М. А. Женихов // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. — 2010. — № 1. — С. 36–39.
9. Будейкин В. П. Перспективы внедрения автоматизированной системы диагностики и мониторинга электрооборудования подстанций / В. П. Будейкин, А. Г. Хисматуллин, Е. И. Буланкин, А. Р. Мусин // Наука. Технология. Производство – 2016: современные методы и средства диагностики электроэнергетического и электротехнического оборудования, средств и систем автоматики: матер. Всероссийской науч.-техн. конф., посвященной 60-летию филиала УГНТУ в г. Салавате. — Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2016. — С. 51–55.
10. Алешиков П. А. Обзор методов и приборов для диагностики высоковольтного электрооборудования / П. А. Алешиков // Сб. матер. I Всероссийской молодежной науч.-практ. конф. — 2014. — С. 32–34.
11. Будко П. А. Метод бесконтактного мониторинга технического состояния электрооборудования систем энергоснабжения промышленных комплексов / П. А. Будко // XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ. — 2014. — С. 7001–7011.
12. Хальясмаа А. И. Предпосылки и причины применения методов искусственных нейронных сетей для анализа данных технической диагностики электрооборудования на ПС 35 – 110 кВ / А. И. Хальясмаа, С. А. Дмитриев, С. Е. Кокин // Научное обозрение. — 2013. — № 2. — С. 126–131.
13. Калявин В. П. Надежность и диагностика элементов электроустановок / В. П. Калявин, Л. М. Рыбаков. — СПб.: Элмор, 2009. — 336 с.
14. Саушев А. В. Структура процесса управления состоянием сложных электротехнических систем / А. В. Саушев // Надежность и качество сложных систем. — 2013. — № 3. — С. 23–30.
15. Саушев А. В. Области работоспособности электротехнических систем / А. В. Саушев. — СПб.: Политехника, 2013. — 412 с.

16. Саушев А. В. Математическое описание областей работоспособности электромеханических систем / А. В. Саушев // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2013. — № 6. — С. 7–13.
17. Хальясмаа А. И. Принцип формирования оценки технического состояния электрооборудования на подстанциях / А. И. Хальясмаа, С. А. Дмитриев, С. Е. Кокин [и др.] // Электричество. — 2014. — № 10. — С. 22–27.
18. Flores W. C. Expert system for the assessment of power transformer insulation condition based on type-2 fuzzy logic systems / W. C. Flores, E. E. Mombell, J. A. Jardini, G. Rattá, A. M. Corvo // Expert Systems with Applications. — 2011. — Vol. 38. — Is. 7. — Pp. 8119–8127. DOI: 10.1016/j.eswa.2010.12.153.
19. Помогаев Ю. М. Диагностика изоляции электрооборудования / Ю. М. Помогаев, В. В. Картавец, Ю. В. Лакомов // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. — 2016. — № 1 (48). — С. 98–104. DOI: 10.17238/issn2071-2243.2016.1.98.
20. Chen H. C. A novel extension neural network based partial discharge pattern recognition method for high-voltage power apparatus / H. C. Chen, F. C. Gu, M. H. Wang // Expert Systems with Applications. — 2012. — Vol. 39. — Is. 3. — Pp. 3423–3431. DOI: 10.1016/j.eswa.2011.09.030.
21. Поляков Д. А. Регистратор характеристик частичных разрядов / Д. А. Поляков, Н. О. Голубяникова, К. И. Никитин [и др.] // Россия молодая: передовые технологии — в промышленность! — 2015. — № 1. — С. 254–258.
22. Беспрозванных А. В. Анализ структуры поля и обоснование напряжений диагностики по частичным разрядам изоляции экранированных витых пар / А. В. Беспрозванных, А. Г. Кессаев // Электротехника і електромеханіка. — 2014. — № 6. — С. 61–65.
23. Исмагилов Ф. Р. Математическое моделирование развития частичных разрядов в процессе старения диэлектрика / Ф. Р. Исмагилов, Д. В. Максудов // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. — 2011. — Т. 15. — № 3 (43). — С. 98–100.
24. Моногаров О. И. Способ повышения достоверности селекции сигналов частичных разрядов / О. И. Моногаров // Достижения вузовской науки. — 2013. — № 2. — С. 97–103.
25. Ильина Е. В. Опыт диагностики электрооборудования методом ультрафиолетового контроля / Е. В. Ильина // Русский инженер. — 2015. — № 4 (47). — С. 16–18.
26. Уразов Д. Ю. О преимуществах тепловизионного метода анализа работы электрооборудования / Д. Ю. Уразов // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. — 2012. — № 3 (53). — С. 51–53.
27. Лисина Л. Ф. Методы испытания и диагностики изоляции высоковольтного оборудования / Л. Ф. Лисина // Вестник Ангарского государственного технического университета. — 2014. — № 8. — С. 61–65.
28. Карташова А. А. Перспективные направления в совершенствовании диагностики маслонаполненного электрооборудования хроматографическими методами / А. А. Карташова, В. Ф. Новиков // Вестник Казанского государственного энергетического университета. — 2014. — № 3 (23). — С. 7–18.
29. Тюрюмина А. В. Современное состояние вопроса диагностики силовых трансформаторов / А. В. Тюрюмина, В. С. Секацкий, А. П. Батрак // Современные материалы, техника и технологии. — 2015. — № 3 (3). — С. 245–250.
30. Балобанов Р. Н. Особенности диагностирования высоковольтного оборудования с элегазовой изоляцией / Р. Н. Балобанов, Ю. Н. Зацаринная // Вестник Казанского технологического университета. — 2015. — Т. 18. — № 2. — С. 257–258.
31. Базыль И. М. Прогнозирование технического состояния электрооборудования систем электропитания / И. М. Базыль // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2011. — № 6–1. — С. 89–93.

## REFERENCES

1. Svi, P. M. *Metody i sredstva diagnostiki oborudovaniya vysokogo napryazheniya*. М.: Energoatomizdat, 1992.
2. Saushev, A. V. *Osnovy upravleniya sostoyaniem elektrotekhnicheskikh sistem ob'ektov vodnogo transporta*. SPb.: GUMRF imeni admirala S. O. Makarova, 2015.
3. Kudayarova, A. A., L. N. Huzina, and A. O. Dorofeev. "Improvement of the reliability of electrical equipment by applying diagnostic methods." *Elektrotekhnicheskie komplekсы i sistemy: materialy mezhdunarodnoi*

*nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Ufa: GOU VPO “Ufimskii gosudarstvennyi aviatsionnyi tekhnicheskii universitet”, 2016: 244–247.

4. Chichev, S. I., V. F. Kalinin, and E. I. Glinkin. *Sistema kontrolya i upravleniya elektrotekhnicheskim oborudovaniem podstantsii*. M.: Spektr, 2011.

5. Genin, V. S., and S. I. Kopylov. “Diagnostics of distribution networks substations electric.” *The International Scientific Journal* 2 (2012): 106–110.

6. Bashirov, M. G., A. S. Khismatullin, and R. U. Gallyamov. “Integral’nyi kriterii otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya silovykh maslyanykh transformatorov.” *Energetik* 7 (2016): 24–26.

7. Dar’yan, L., R. Obraztsov, E. Il’ina, and K. Sipachev. “Avtomatizirovannaya sistema monitoringa i diagnostiki oborudovaniya podstantsii.” *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie* 1(28) (2015): 82–88.

8. Zhenikhov, M. A. “Enhancement of effectiveness of electrical equipment diagnostics by means of data received from automated dispatcher control system.” *Elektro. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost’* 1 (2010): 36–39.

9. Budeikin, V. P., A. G. Khismatullin, E. I. Bulankin, and A. R. Musin. “Perspektivy vnedreniya avtomatizirovannoi sistemy diagnostiki i monitoringa elektrooborudovaniya podstantsii.” *Nauka. Tekhnologiya. Proizvodstvo - 2016: sovremennye metody i sredstva diagnostiki elektroenergeticheskogo i elektrotekhnicheskogo oborudovaniya, sredstv i sistem avtomatiki: materialy Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, posvyashchennoi 60-letiyu filiala UGNTU v g. Salavate*. Ufa: Ufimskii gosudarstvennyi neftyanoi tekhnicheskii universitet, 2016: 51–55.

10. Aleshikov, P. A. “Obzor metodov i priborov dlya diagnostiki vysokovol’tnogo elektro-oborudovaniya.” *Sbornik materialov I Vserossiiskoi molodezhnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. 2014: 32–34.

11. Budko, P. A., and A. I. Litvinov. “Metod beskontaktnogo monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya elektrooborudovaniya sistem energosnabzheniya promyshlennykh kompleksov.” *XII Vserossiyskoye soveshchaniye po problemam upravleniya VSPU*. 2014: 7001–7011.

12. Khalyasmaa, Aleksandra Ilmarovna, Stepan Aleksandrovich Dmitriev, Sergey Evgenievich Kokin. “Prerequisites and causes of applying the methods of artificial neural nets for analyzing the data of technical diagnostics of power equipment at 35-110 kV substations.” *Science review* 2 (2013): 126–131.

13. Kaljavin, V. P., and L. M. Rybakov. *Nadezhnost i diagnostika jelementov jelektroustanovok*. SPb.: Jelmor, 2009.

14. Saushev, A. V. “Struktura protsessa upravleniya sostoyaniem slozhnykh elektrotekhnicheskikh sistem.” *Nadezhnost’ i kachestvo slozhnykh sistem* 3 (2013): 23–30.

15. Saushev, A. V. *Oblasti rabotosposobnosti jelektrotekhnicheskikh sistem*. SPb.: Politehnika, 2013.

16. Saushev, A. V. “The Mathematical Description of Areas of Working Capacity of Electromechanical Systems.” *Mechatronics, Automation, Control* 6 (2013): 7–13.

17. Hal’yasmaa, A. I., S. A. Dmitriev, S. E. Kokin, D. A. Glushkov, and M. V. Osotova. “The Principle for Forming an Assessment of Electrical Equipment Technical State at Substations.” *Electrical Technology Russia* 10 (2014): 22–27.

18. Flores, Wilfredo C., E. E. Mombell, J. A. Jardini, G. Rattá, and A. M. Corvo. “Expert system for the assessment of power transformer insulation condition based on type-2 fuzzy logic systems.” *Expert Systems with Applications* 38.7 (2011): 8119–8127. DOI: 10.1016/j.eswa.2010.12.153.

19. Pomogaev, Yu. M., V. V. Kartavtsev, and I. V. Lakomov. “Diagnostics of insulation of electrical equipment.” *Vestnik of Voronezh state agrarian university* 1(48) (2016): 98–104. DOI: 10.17238/issn2071-2243.2016.1.98.

20. Chen, Hung-Cheng, Feng-Chang Gu, and Meng-Hui Wang. “A novel extension neural network based partial discharge pattern recognition method for high-voltage power apparatus.” *Expert Systems with Applications* 39.3 (2012): 3423–3431. DOI: 10.1016/j.eswa.2011.09.030.

21. Polyakov, D. A., N. O. Golubyatnikova, K. I. Nikitin, R. A. Golovkov, and D. A. Polonyankin. “Registrator kharakteristik chastichnykh razryadov.” *Rossiya molodaya: peredovye tekhnologii – v promyshlennost’!* 1 (2015): 254–258.

22. Besprozvannykh, A. V., and A. G. Kyessaevy. “Analysis of field structure and justification of voltages of diagnostics by partial discharges of shielded twisted pairs insulation.” *Elektroteh. elektromeh* 6 (2014): 61–65.

23. Ismagilov, F. R., and D. V. Maksudov. “Mathematical modeling of partial discharges evolution in time of isolation degradation process.” *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta* 15.3(43) (2011): 98–100.

24. Monogarov, O. I. “Sposob povysheniya dostovernosti selektsii signalov chastichnykh razryadov.” *Dostizheniya vuzovskoi nauki* 2 (2013): 97–103.

25. Il'ina, E. V. "Opyt diagnostiki elektrooborudovaniya metodom ul'trafioletovogo kontrolya." *Russkii inzhener* 4(47) (2015): 16–18.

26. Urazov, D. Yu. "O preimushchestvakh teplovizionnogo metoda analiza raboty elektrooborudovaniya." *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologii* 3(53) (2012): 51–53.

27. Lisina, L. F. "Test methods and insulation diagnosis of high voltage equipment." *Vestnik Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* 8 (2014): 61–65.

28. Kartashova, A. A., and V. F. Novikov. "Modern directions diagnostics of electrical transformers by chromatographic methods." *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta* 3(23) (2014): 7–18.

29. Tyuryumina, A. V., V. S. Sekatskii, and A. P. Batrak. "Sovremennoe sostoyanie voprosa diagnostiki silovykh transformatorov." *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii* 3(3) (2015): 245–250.

30. Balobanov, R. N., and Yu. N. Zatsarinnaya. "Osobennosti diagnostirovaniya vysokovol'nogo oborudovaniya s elegazovoy izolyatsiyey." *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* 18.2 (2015): 257–258.

31. Bazyl', I. M. "Prediction of the technical state of electrical power systems." *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki* 6-1 (2011): 89–93.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Саушев Александр Васильевич** —  
доктор технических наук, профессор  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
адмирала С. О. Макарова»  
198035, Российская Федерация,  
Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7  
e-mail: [SaushevAV@gumrf.ru](mailto:SaushevAV@gumrf.ru)

**Шерстнев Денис Александрович** — аспирант  
*Научный руководитель:*

Саушев Александр Васильевич  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
адмирала С. О. Макарова»  
198035, Российская Федерация,  
Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7  
e-mail: [kaf\\_electroprivod@gumrf.ru](mailto:kaf_electroprivod@gumrf.ru)

**Широков Николай Викторович** —  
кандидат технических наук, доцент  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
адмирала С. О. Макарова»  
198035, Российская Федерация,  
Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7  
e-mail: [kaf\\_electroprivod@gumrf.ru](mailto:kaf_electroprivod@gumrf.ru)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Saushev, Alexander V.** —  
Dr. of Technical Sciences, professor  
Admiral Makarov State University  
of Maritime and Inland Shipping  
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,  
Russian Federation  
e-mail: [SaushevAV@gumrf.ru](mailto:SaushevAV@gumrf.ru)

**Sherstnev, Denis A.** – Postgraduate  
*Supervisor:*

Saushev, Alexander V.  
Admiral Makarov State University  
of Maritime and Inland Shipping  
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,  
Russian Federation  
e-mail: [kaf\\_electroprivod@gumrf.ru](mailto:kaf_electroprivod@gumrf.ru)

**Shirokov, Nikolaj V.** —  
PhD, associate professor  
Admiral Makarov State University  
of Maritime and Inland Shipping  
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,  
Russian Federation  
e-mail: [kaf\\_electroprivod@gumrf.ru](mailto:kaf_electroprivod@gumrf.ru)

*Статья поступила в редакцию 15 сентября 2017 г.  
Received: September 15, 2017.*