

TERMINOLOGY, STRUCTURE AND MODEL OF THE ELECTRICAL SYSTEMS OPERATION PROCESS

A. V. Saushev, V. I. Smirnov, E. V. Bova

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

The content of operation as one of the most important stages of the life cycle of a technical system is revealed. The structure of the process of technical operation of electrical engineering systems is considered. The essence of the individual stages of operation is revealed, their functional purpose is given. It is shown that some fundamental concepts related to operation do not have an unambiguous interpretation. The well-known definitions of these concepts are considered and a one-digit formulation of each of them, which corresponds to the current standards, is given. Special attention is paid to the disclosure of the content of the concept of state and consideration of various types of technical states of the system. The definition of the “condition” category, the formulation of which differs from the known definitions and allows more fully and accurately solving the problems of diagnosing the studied electrical systems, is given. An important feature of this definition is that it fixes the continuous variability of the state of any system in a function of time. At the same time, stable technical conditions that differ significantly from each other and correspond to the current version of the standard are distinguished. Such states are serviceable, faulty, operable, inoperable, partially inoperable, marginal. Functional conditions that are determined by the operating modes of the system are considered. The current definitions of the most important properties and events, among which a special place is occupied by reliability, survivability, safety, failure, damage, defect, are given. For the selected technical states, a model in the form of an oriented graph is synthesized. It is shown that the actual process of an electrical system operation has two features. The first one is that the probability of transition from one state to another does not depend on the type of state the system is in at the moment. The second feature is that the time spent in each technical condition can be either deterministic or random. The conclusion about the possibility of modeling the process of changing the technical states of the system by semi-Markov models with a discrete set of states is made. A mathematical model in the form of Kolmogorov differential equations, which makes it possible to estimate the probabilities of the system being in a particular state, has been compiled.

Keywords: electrical system, operation, definitions of basic concepts, block diagram, condition, types of technical conditions, graph model, Kolmogorov equations.

For citation:

Saushev, Alexander V., Viktor I. Smirnov, and Elena V. Bova. “Terminology, structure and model of the electrical systems operation process.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.4 (2023): 666–679. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-666-679.

УДК 621.396

ТЕРМИНОЛОГИЯ, СТРУКТУРА И МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

А. В. Саушев, В. И. Смирнов, Е. В. Бова

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

Темой исследования является содержание эксплуатации как одного из важнейших этапов жизненного цикла технической системы. Рассмотрена структура процесса технической эксплуатации электротехнических систем. Раскрыта сущность отдельных этапов эксплуатации, приводится их функциональное назначение. Показано, что некоторые фундаментальные понятия, связанные с эксплуатацией, не имеют однозначного толкования. Рассмотрены известные определения этих понятий, приведены актуальные формулировки каждого из них, соответствующие действующим стандартам. Особое внимание уделяется раскрытию содержания понятия «состояние» и рассмотрению различных видов технических состояний системы. Дано определение категории «состояние», формулировка которого отличается от известных, позволяя более

полно и точно решать задачи диагностирования исследуемых электротехнических систем. Важной особенностью данного определения является то, что оно закрепляет непрерывную изменчивость состояния любой системы в функции времени. При этом выделяются качественно различающиеся друг от друга устойчивые технические состояния, соответствующие действующей редакции стандарта, такие как исправное, неисправное, работоспособное, неработоспособное, частично неработоспособное, предельное. Рассмотрены функциональные состояния, определяемые режимами работы системы. Приведены актуальные определения важнейших свойств и событий, среди которых особое место занимают надежность, живучесть, безопасность, отказ, повреждение, дефект. Для указанных технических состояний синтезирована модель в виде ориентированного графа. Показано, что реальный процесс эксплуатации электротехнической системы имеет две особенности. Первая из них состоит в том, что вероятность перехода из одного состояния в другое не зависит от вида состояния, в котором система находится в данный момент, вторая заключается в том, что время пребывания в каждом техническом состоянии может быть как детерминированным, так и случайным. Сделан вывод о возможности моделирования процесса смены технических состояний системы полумарковскими моделями с дискретным множеством состояний. Составлена математическая модель в виде дифференциальных уравнений Колмогорова, позволяющая оценивать вероятности пребывания системы в том или ином состоянии.

Ключевые слова: электротехническая система, эксплуатация, определения основных понятий, структурная схема, состояние, виды технических состояний, граф-модель, уравнения Колмогорова.

Для цитирования:

Саушев А. В. Терминология, структура и модель процесса эксплуатации электротехнических систем / А. В. Саушев, В. И. Смирнов, Е. В. Бова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 4. — С. 666–679. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-666-679.

Введение (Introduction)

Техническая эксплуатация является важнейшим этапом жизненного цикла любой технической системы, под которым понимается структура процесса его разработки, производства и эксплуатации, охватывающая временной интервал от возникновения идеи создания объекта до его снятия с эксплуатации. Жизненный цикл, как правило, включает следующие стадии и этапы: формирование замысла, проектирование, изготовление, эксплуатация, утилизация. От грамотно выбранной стратегии и методов проведения технической эксплуатации зависит общая эффективность работы электротехнических систем (ЭТС). Для правильной организации и эксплуатации, помимо знания норм и правил, необходимо понимание основных закономерностей изменения эксплуатационных свойств элементов ЭТС, а также методов их определения, поскольку условия использования даже однотипных ЭТС на различных объектах имеют, как правило, особенность. Например, это в полной мере относится к автономным системам и объектам водного транспорта. Поэтому для рационального построения процесса эксплуатации необходимо проведение исследований и анализ свойств ЭТС в конкретных производственных условиях.

Решить основные задачи эксплуатации ЭТС, направленные на обеспечение их безотказной (безаварийной) работы, увеличение межремонтного периода их использования, снижение трудоемкости обслуживания и эксплуатационных расходов, можно лишь при научно обоснованном управлении этим процессом, которое предполагает планирование, организацию, контроль, учет и анализ результатов наблюдений за техническим состоянием ЭТС, а также оперативное воздействие на процесс эксплуатации. Все ранее изложенное составляет предмет теории эксплуатации, которая непрерывно развивается [1]–[3]. Эксплуатация сопровождается изменением параметров элементов ЭТС. Под действием эксплуатационных нагрузок при использовании ЭТС по назначению происходит изнашивание ее элементов. Воздействие окружающей среды вызывает физическое старение элементов ЭТС как в процессе работы, так и при хранении или нахождения в резерве. Научно-технический прогресс определяет моральное старение техники, в результате которого снижается его потребительная стоимость и дальнейшая эксплуатация может оказаться экономически неэффективной. Ввиду того, что указанный комплекс факторов при совместном воздействии приводит к снижению показателей свойств ЭТС, необходимо проведение специальных мероприятий по поддержанию параметров системы в заданных пределах в соответствии с требуемыми нормами.

Для решения различных задач в области технической эксплуатации ЭТС необходимо однозначное толкование фундаментальных понятий, связанных с эксплуатацией. Вместе с тем ввод в действие новых редакций стандартов в области технической эксплуатации требует нового их осмысления и устранения различных, иногда противоречащих друг другу формулировок. Многочисленные исследования, посвященные решению задач технической эксплуатации ЭТС [4]–[6], часто основаны на базисных понятиях, не имеющих однозначного толкования, что не позволяет корректно сравнивать полученные результаты и в ряде случаев использовать разработанные методы и алгоритмы для решения конкретной практической задачи.

Целью работы является исследование основных понятий теории эксплуатации на основании действующих стандартов, раскрытие важнейших этапов технической эксплуатации ЭТС, а также построение модели, описывающей смену технических состояний ЭТС в процессе эксплуатации.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Общие требования, задачи, содержание системы технической эксплуатации и требования к техническому состоянию разнообразных по своему составу и функциям ЭТС определяют действующие стандарты [7]–[10] и положения по технической эксплуатации ЭТС конкретного назначения. Под объектом понимается предмет рассмотрения, на который распространяется терминология в области технической эксплуатации. Объектом может быть сборочная единица, деталь, компонент, элемент, устройство, функциональная единица, оборудование, изделие, система, сооружение. Он может включать аппаратные средства, программное обеспечение, персонал или их комбинации. Объектом исследования в данной работе является ЭТС или ее элемент [7]. К таким системам можно, например, отнести судовую электроэнергетическую систему, систему поддержания напряжения на шинах судового синхронного генератора, систему распределения нагрузки между параллельно работающими генераторами, и электроприводы. Элементом ЭТС может быть, например, электродвигатель или преобразователь электрической энергии.

Под *эксплуатацией ЭТС*, по аналогии с эксплуатацией изделия, будем понимать стадию жизненного цикла ЭТС с момента принятия его потребителем от предприятия-изготовителя или ремонтного предприятия до отправки в ремонт или списания. При этом, согласно ГОСТ 25866–83¹, *эксплуатация* — это стадия жизненного цикла объекта, на которой реализуется, поддерживается и восстанавливается его качество. При этом эксплуатация ЭТС включает в общем случае использование по назначению, транспортировку, хранение, техническое обслуживание и ремонт. *Техническая эксплуатация* — часть эксплуатации, включающая транспортирование, хранение, техническое обслуживание и ремонт ЭТС (рис. 1).

Условия эксплуатации — это совокупность внешних воздействующих факторов, оказывающих влияние на ЭТС при его эксплуатации. Началом эксплуатации является момент ввода ЭТС в эксплуатацию, снятие с эксплуатации — событие, фиксирующее невозможность или нецелесообразность дальнейшего использования по назначению и ремонта ЭТС, документально оформленное в установленном порядке.

Управление технической эксплуатацией, включающее планирование, создание организационных структур, регулирование, контроль, учет и анализ результатов эксплуатации, должно обеспечивать выполнение основных задач технической эксплуатации; оно является составной частью процесса управления жизненным циклом технического объекта, важнейшей компонентой которого служит управление его состоянием на всех этапах и стадиях [8].

Техническое использование — это применение ЭТС по назначению с технико-экономическими показателями, предусмотренными приемо-сдаточными документами; осуществляется обслуживающим электротехническим персоналом и заключается в контроле и учете технического состояния, проверке готовности к действию, вводе и выводе из действия, обеспечении, изменении и поддержании режимов работы, сопоставлении заданных и фактических характеристик, оценке и регистрации отклонений параметров от их номинальных значений.

¹ ГОСТ 25866–83. Эксплуатация техники. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1983. 8 с.

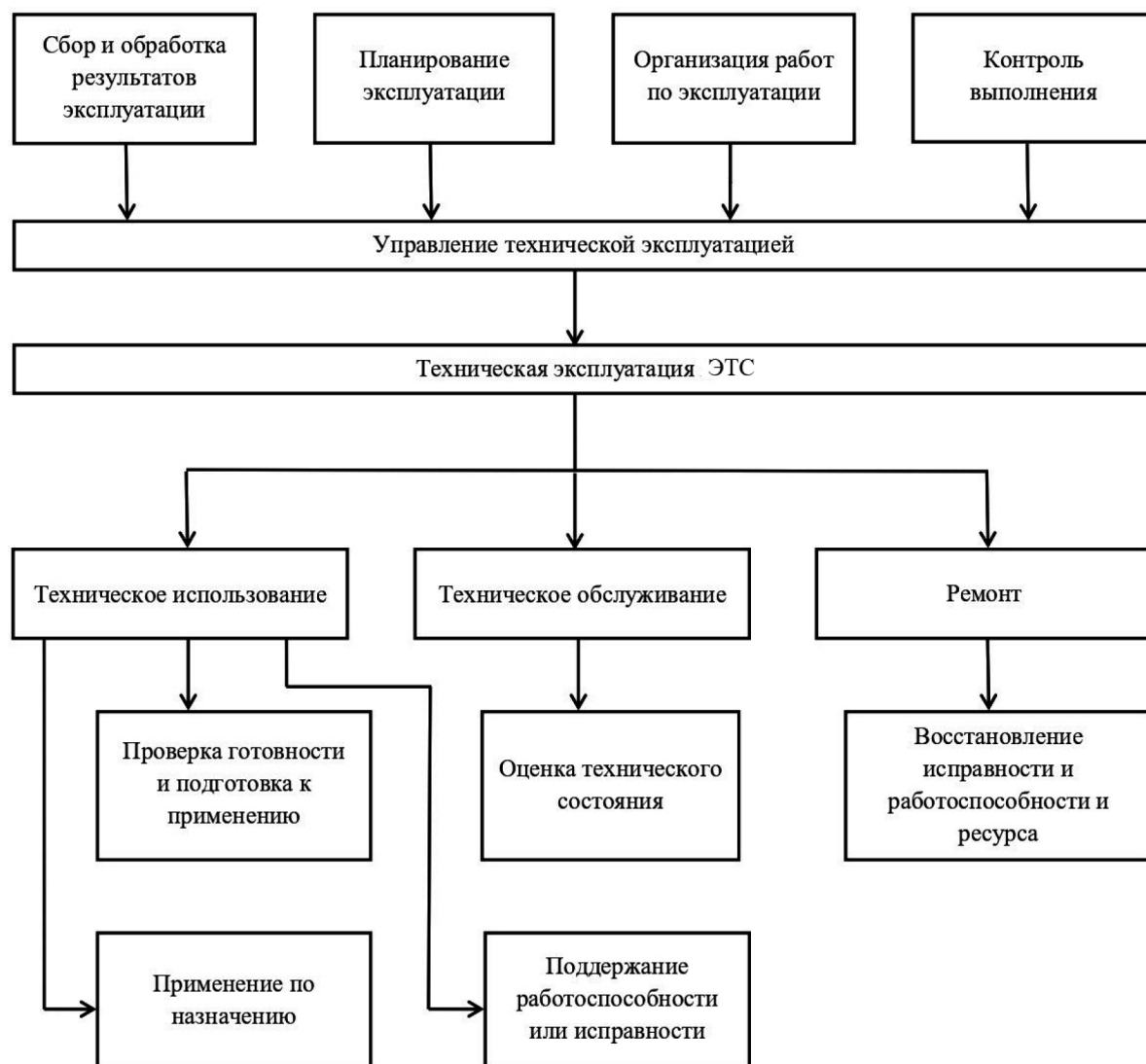


Рис. 1. Структура процесса технической эксплуатации ЭТС

Техническое обслуживание (ТО) — это комплекс технологических операций и организационных действий по поддержанию работоспособности или исправности ЭТС при использовании по назначению, ожидании, хранении и транспортировании.

Плановое ТО (другие отраслевые названия: профилактическое, регламентированное) — техническое обслуживание, выполнение которого осуществляется в соответствии с требованиями документации.

Внеплановое ТО (другие отраслевые названия: корректирующее, нерегламентированное) — техническое обслуживание, выполнение которого осуществляется по техническому состоянию объекта без предварительного назначения.

Ремонт — это комплекс технических операций и организационных действий по восстановлению исправного или работоспособного состояния объекта и восстановлению ресурса объекта или его составных частей. Ремонт включает операции локализации, диагностирования, устранения неисправности и контроль функционирования. Ремонты подразделяют на плановые и внеплановые:

- плановый ремонт выполняется по плану в соответствии с требованиями документации. Плановые ремонты по объему выполняемых работ, трудоемкости и периодичности проведения подразделяют на текущие, средние и капитальные;
- внеплановый ремонт не предусматривается планом, он может быть обусловлен отказом объекта, появлением повреждений (неисправностей), нарушением правил технической эксплуатации;

внеплановые ремонты подразделяют на аварийно-восстановительные и ремонты по состоянию объекта.

Система технического обслуживания и ремонта — это совокупность документации, персонала, организационных и технических действий, необходимых для поддержания и восстановления работоспособного состояния объекта. Операция технического обслуживания — ТО (ремонта) — отдельный вид работы, выполняемой при ТО (ремонте) с целью поддержания или восстановления работоспособности ЭТС.

Согласно ГОСТ 18322–2016¹, под техническим состоянием понимается «...совокупность свойств объекта, подверженных изменению в процессе его производства, эксплуатации, транспортировки и хранения, характеризующихся значениями параметров и / или качественными признаками, установленными в документации».

Согласно ГОСТ Р 27.102–2021², «Техническое состояние — это состояние объекта в определенный момент времени, при определенных условиях внешней среды, характеризующееся фактическими значениями параметров, установленных в документации».

Согласно ГОСТ 20911–89³, под «...техническим состоянием объекта понимается состояние, которое характеризуется в определенный момент времени, при определенных условиях внешней среды, значениями параметров, установленных технической документацией на объект».

Последние два определения, по сути, совпадают. Таким образом, объективно существуют две точки зрения относительно понятия «техническое состояние». Из первого определения следует, что возможны такие интервалы времени, при которых состояние объекта не изменяется. Кроме того, свойства объекта, по сути, являются следствием его состояния. Таким образом, под техническим состоянием ЭТС будем понимать определение, сформулированное в ГОСТ Р 27.102–2021.

К факторам, под воздействием которых изменяется техническое состояние объекта, можно отнести действия климатических условий, старение с течением времени, операции регулировки и настройки в ходе изготовления или ремонта, замену отказавших элементов и т. д. Об изменении технического состояния объекта судят по значениям диагностических (контролируемых) параметров, позволяющих определить техническое состояние объекта без его разборки.

Основными видами технического состояния согласно действующему стандарту, являются: исправное состояние, работоспособное состояние, неисправное состояние, неработоспособное состояние, частично неработоспособное состояние и предельное состояние.

Приведем определения этих понятий ввиду наличия изменений и дополнений по сравнению с предыдущей редакцией стандарта.

Исправное состояние (исправность) — состояние объекта, в котором все параметры объекта соответствуют всем требованиям, установленным в документации на этот объект.

Неисправное состояние (неисправность) — состояние объекта, в котором хотя бы один параметр объекта не соответствует хотя бы одному из требований, установленных в документации на этот объект.

Работоспособное состояние — состояние объекта, в котором значения всех параметров, характеризующих его способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативной и технической документации.

Неработоспособное состояние — состояние объекта, в котором значение хотя бы одного из параметров, характеризующих способность объекта выполнять заданные функции, не соответствует требованиям документации на этот объект.

Исправный объект всегда работоспособен, неисправный объект может быть как работоспособным, так и неработоспособным. Работоспособный объект может быть исправен и неисправен, неработоспособный объект всегда неисправен.

¹ ГОСТ 18322–2016. Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2017. 14 с.

² ГОСТ Р 27.102–2021. Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения. М.: ФГБУ «РСТ», 2021. 36 с.

³ ГОСТ 20911–89. Техническая диагностика. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1989. 10 с.

Работоспособный объект в отличие от исправного должен удовлетворять лишь тем требованиям документации, выполнение которых обеспечивает нормальное применение объекта по назначению. При этом следует различать два принципиально разных случая:

- переход в неисправное, но работоспособное состояние произошел вследствие нарушения требований, не связанных с потенциальным снижением уровня этого состояния (например, вследствие нарушения эстетических или экологических требований);
- переход в неисправное, но работоспособное состояние произошел вследствие отказа какого-либо резервного элемента, что привело к снижению потенциальной устойчивости (уровня) этого состояния.

Для сложных объектов возможны *частично неработоспособные состояния*, при которых объект способен выполнять требуемые функции с пониженными показателями или способен выполнять лишь часть требуемых функций. Например, время переходного процесса электропривода превысило допустимое значение и в отдельных случаях он не успеет с заданным быстродействием отработать слежение за целью. Другим примером является потеря возможности электрического торможения электродвигателя. При этом в режимах пуска и рабочего функционирования электродвигатель выполняет все возложенные на него функции. Различают «внутреннее» неработоспособное состояние и «внешнее» неработоспособное состояние, обусловленное отсутствием внешних ресурсов. В работоспособном состоянии различают «рабочее состояние» и «нерабочее состояние», при котором объект не функционирует.

Рабочее состояние — это состояние объекта, в котором он выполняет хотя бы одну требуемую функцию.

Нерабочее состояние — состояние объекта, в котором он не выполняет ни одной из требуемых функций.

«Нерабочее состояние» допускается подразделять, в свою очередь, на состояние резервирования и состояние планового простоя.

Работающий объект может находиться в работоспособном или в частично неработоспособном состоянии.

Неработающий объект может находиться в любом из состояний, рассмотренных ранее, исключая рабочее и нерабочее состояния.

Следует иметь в виду, что согласно ГОСТ 20911–75 «Техническая диагностика. Основные термины и определения», который прекратил действие в 1989 г. ввиду появления новой редакции стандарта, в рассмотрение было введено еще два состояния: состояние правильного функционирования и состояние неправильного функционирования. Эти понятия часто применяются и в настоящее время.

Под *состоянием правильного функционирования* понимается вид технического состояния, в котором применяемый по назначению объект в целом или его составная часть выполняют в текущий момент времени предписанные им алгоритмы функционирования со значениями параметров, соответствующими установленным требованиям. Соответственно в *состоянии неправильного функционирования* объект не выполняет предписанные им алгоритмы функционирования со значениями параметров, соответствующими установленным требованиям.

Состояние готовности — это состояние неработающего работоспособного объекта, в котором объект может выполнять требуемые функции в заданных условиях применения при условии, что все необходимые внешние ресурсы обеспечены.

Работоспособный объект не всегда находится в состоянии готовности (при отсутствии необходимых ресурсов). Например, при отсутствии электрического питания ЭТС не может работать и, следовательно, не находится в состоянии готовности.

Предельное состояние — это состояние объекта, в котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно. Недопустимость дальнейшей эксплуатации устанавливают на основе критериев предельного состояния объекта.

Критерий предельного состояния — признак или совокупность признаков, установленных в документации, появление которых свидетельствует о возникновении предельного состояния объекта.

В зависимости от условий эксплуатации для одного и того же объекта могут быть установлены два и более критерия предельного состояния. Предельное состояние может являться результатом как внутренних процессов или причин, так и внешних воздействий на объект в процессе его функционирования. Переход объекта в предельное состояние влечет за собой временное или окончательное прекращение его эксплуатации. При достижении предельного состояния объект должен быть снят с эксплуатации, направлен в средний или капитальный ремонт, списан, утилизирован или передан для применения не по назначению. Если критерий предельного состояния установлен из соображений безопасности, хранения и / или транспортирования объекта, то при наступлении предельного состояния хранение и / или транспортирование объекта должно быть прекращено. В других случаях при наступлении предельного состояния должно быть прекращено применение объекта по назначению.

Для неремонтируемых объектов имеет место предельное состояние двух видов: первый совпадает с неработоспособным состоянием, второй обусловлен тем, что начиная с некоторого момента дальнейшая эксплуатация еще работоспособного объекта оказывается недопустимой в связи с опасностью или высокими затратами эксплуатации. Переход неремонтируемого объекта в предельное состояние второго вида происходит до потери объектом работоспособности.

Для ремонтируемых объектов выделяют два или более вида предельных состояний. Например, для двух видов предельных состояний требуется отправка объекта в средний или капитальный ремонт, т. е. временное прекращение применения объекта по назначению. Третий вид предельного состояния предполагает окончательное прекращение применения объекта по назначению. Критерии предельного состояния каждого вида устанавливаются в документации.

Опасное состояние — это состояние объекта, которому соответствует высокая вероятность или высокая значимость неблагоприятных последствий для людей, окружающей среды и материальных ценностей; может возникнуть как в результате отказа, так и в процессе работы объекта.

Состояние резервирования — нерабочее состояние работоспособного объекта, находящегося в резерве, в течение заданного периода времени.

Все рассмотренные виды технического состояния существуют на базе основного понятия «состояние», определение которого в имеющихся ГОСТах отсутствует. Анализ категории *состояние ЭТС* исследуется в работах [8], [9]. Рассмотрим лишь методологические основы данного понятия. При этом вначале необходимо определить категорию *свойство*. В дополнение к определению свойства продукции, закрепленного ГОСТ 15467–79¹, где акцентировано внимание на ее объективной особенности, которая может проявляться при ее создании, эксплуатации или потреблении, под свойством ЭТС будем прежде всего понимать ее определенность, которая обуславливает ее различие и сходство с другими системами и проявляется во взаимоотношении с ними. Согласно функционально-структурному подходу будем различать внутренние (материально-структурные) и внешние (функциональные) свойства ЭТС, которые количественно характеризуются ее внутренними и выходными параметрами.

Категория *состояние ЭТС* должна отражать внутренние свойства системы, интенсивность их проявления в различные моменты времени и фиксировать процесс развития. Дадим следующие определения: состояние — это внутренняя определенность (субстрат) ЭТС, характеризующаяся в рассматриваемый момент времени признаками, установленными технической документацией на ЭТС, которые являются начальными условиями процессов их дальнейшего изменения [12], признак — это количественная (параметры) и качественная характеристики определяющих ЭТС свойств.

Совокупность внутренних свойств ЭТС и их характеристик (рис. 2) в некоторый момент времени определяет внутреннее (материально-структурное) состояние (*МСС*), которое, в свою очередь, характеризуется сочетанием состояния комплектующих элементов (*СКЭ*) ЭТС и ее комму-

¹ ГОСТ 15467–79. Управление качеством продукции. Основные понятия, термины и определения. М.: Стандартиформ, 2009.

тационного состояния ($КС$). Коммутационное состояние определяется видом структуры системы и, в частности, положением различных переключающих устройств, связанных с пуском, реверсом, включением нагрузки, блокировки и др. Совокупность функциональных свойств и выходных параметров ЭТС в некоторый момент времени определяет его функциональное состояние ($\Phi С$). Состояние среды ($С С$) оказывает влияние на режим работы ЭТС и может быть представлено двумя группами: режимом работы ($Р Р$) (в узком смысле) и состоянием условий использования ($С У И$), которые определяются атмосферными факторами, степенью «нагруженности» элементов, а также качеством ТО и ремонта и др.

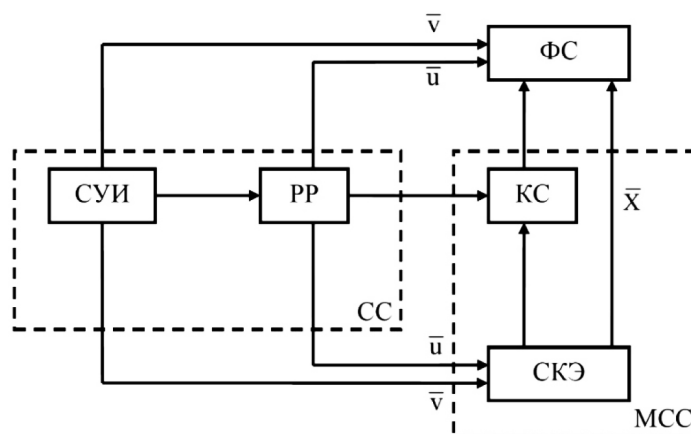


Рис. 2. Взаимосвязь классов состояний ЭТС:

MCC — материально-структурное состояние;

$СКЭ$ — состояния комплектующих элементов; $С С$ — состояние среды;

$С У И$ — состояние условий использования; $Р Р$ — режим работы;

$КС$ — коммутационное состояние; $\Phi С$ — функциональное состояние

Рассмотренные множества состояний ЭТС взаимосвязаны (рис. 2) и позволяют объяснить и обосновать многообразие их видов в эксплуатации. Материально-структурному уровню соответствуют *исправное состояние* и *неисправное состояние*. На функциональном уровне выделяют *работоспособное состояние* и *неработоспособное состояние* при всех возможных коммутационных состояниях ЭТС, а также *состояние правильного функционирования* и *состояние неправильного функционирования* — при определенном коммутационном состоянии (режиме) системы. Из приведенного определения состояния следует, что все его виды являются дискретными, а для класса работоспособных состояний можно выделить сколь угодно большое число состояний, различающихся значением запаса работоспособности ЭТС [10].

Качество и эффективность работы ЭТС определяются способами управления процессами формирования и сохранения ее важнейших свойств и значений параметров на всех этапах и стадиях жизненного цикла.

Мониторинг технического состояния — составная часть ТО, представляющая собой наблюдение за объектом с целью получения информации о его техническом состоянии и рабочих параметрах. Мониторинг может проводиться в процессе работы объекта непрерывно или через запланированные интервалы времени; на основе полученных данных осуществляются контроль технического состояния и оценка остаточного ресурса объекта.

Основные понятия и определения в области надежности аналогично эксплуатации установлены применительно к объекту, под которым в данной работе понимается ЭТС или ее элемент. Приведем определения важнейших понятий, характеризующих свойства и состояния технической системы, соответствующих действующему стандарту.

Надежность — свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность объекта выполнять требуемые функции в заданных режимах, условиях применения, стратегиях ТО, хранения и транспортирования.

Надежность является комплексным свойством, которое в зависимости от назначения объекта и условий его применения может включать безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость или определенные сочетания этих свойств.

Безотказность — свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или наработки в заданных режимах и условиях применения.

Долговечность — свойство объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта (ТО и Р).

Объект может перейти в предельное состояние, оставаясь работоспособным, если, например, его дальнейшее применение по назначению станет недопустимым по требованиям безопасности, экономичности и эффективности.

Ремонтпригодность — свойство объекта, заключающееся в его приспособленности к поддержанию и восстановлению работоспособности объекта путем ТО и Р.

Сохраняемость — свойство объекта сохранять в заданных пределах значения параметров, характеризующих способность объекта выполнять требуемые функции в течение и после хранения и / или транспортирования.

Для объектов, являющихся потенциальным источником опасности, важными понятиями являются «безопасность» и «живучесть». Это в полной мере относится, например, к судовым ЭТС.

Безопасность — свойство объекта при изготовлении и эксплуатации в случае нарушения работоспособного состояния не создавать угрозу для жизни и здоровья людей, а также для окружающей среды.

Несмотря на то, что безопасность не входит в общее понятие надежности объекта, при определенных условиях она тесно связана с этим понятием (например, в случае, если отказы могут привести к условиям, вредным для людей и окружающей среды сверх предельно допустимых норм).

Понятие «живучесть» занимает пограничное место между понятиями «надежность» и «безопасность» объекта. Под *живучестью* понимают свойство объекта, состоящее в его способности противостоять развитию критических отказов из дефектов и повреждений при установленной системе ТО и Р, либо свойство объекта сохранять работоспособность при воздействиях, не предусмотренных условиями эксплуатации, или свойство объекта сохранять работоспособность при наличии дефектов или повреждений определенного вида, а также при отказе некоторых компонентов. При этом работоспособность может быть неполной.

Безотказность в той или иной степени свойственна объекту в любом из возможных режимов его существования. В основном безотказность рассматривают применительно к использованию объекта по назначению, тем не менее во многих случаях необходима оценка безотказности при хранении и транспортировании объекта.

Необходимо отметить, что показатели безотказности вводят либо по отношению ко всем возможным отказам объекта, либо по отношению к какому-либо одному виду отказов с указанием критерия отказа. Переход из одного вида технического состояния в другой вид является событием.

Отказ — это событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта. Отказ может быть полным или частичным. Полный отказ характеризуется переходом объекта в неработоспособное состояние, частичный отказ — переходом объекта в частично неработоспособное состояние.

Повреждение — это нарушение исправного состояния объекта при сохранении его работоспособного состояния.

Дефект — это каждое отдельное несоответствие объекта требованиям, установленным в документации.

При наличии дефекта по меньшей мере один из показателей качества или параметров объекта вышел за предельное значение или не выполняется одно из требований нормативной документации. Термин «дефект» в основном применяется при контроле качества объекта на стадии изготовления, а также при ремонте (например, при дефектации преобразователя электрической энергии, составлении ведомостей дефектов, СУИ контроле качества отремонтированного преобразователя).

Термин «неисправность», означающий нахождение объекта в неисправном состоянии, применяется при использовании, хранении и транспортировании конкретных элементов ЭТС. Находясь в неисправном состоянии объект имеет один или несколько дефектов. Термин «неисправность», в отличие от термина «дефект», распространяется не на любые объекты (например, неисправностями не называют недопустимые отклонения параметров материалов электродвигателя или параметров масла в трансформаторе).

Следует отметить, что отказ объекта может возникнуть в результате наличия одного или нескольких дефектов, но появление дефектов не всегда означает, что имеет место отказ. Таким образом, дефект, как и неисправность, в зависимости от их влияния на техническое состояние объекта может означать как повреждение, так и отказ. Дефект и /или повреждение могут служить причиной возникновения частичного или полного отказа объекта. Наличие дефекта и /или повреждения приводит объект в неисправное состояние.

Результаты (Results)

В процессе эксплуатации ЭТС ее технические состояния меняются. При этом, на основании рассмотренных ранее определений, можно выделить: исправное состояние C_1 ; работоспособное состояние C_2 ; частично неработоспособное состояние C_3 ; неработоспособное состояние C_4 . Таким образом, в процессе эксплуатации ЭТС может находиться в одном из четырех качественно различающихся друг от друга технических состояний, причем переход из одного состояния в другое может происходить вследствие структурных и параметрических возмущений [12]. Переход в предельное состояние может произойти из любого из состояний: C_1 – C_4 . При этом эксплуатация ЭТС прекращается и она направляется в ремонт или утилизируется.

Представим рассматриваемый процесс смены технических состояний, имеющих место в процессе эксплуатации ЭТС, формализованной моделью в виде ориентированного графа (рис. 3) $J = (C, L)$, где множеству вершин $C = \{C_1, C_2, C_3, C_4\}$ соответствует множество технических состояний, а множеству дуг $L \in C \times C$ — множество направленных переходов при смене этих состояний.

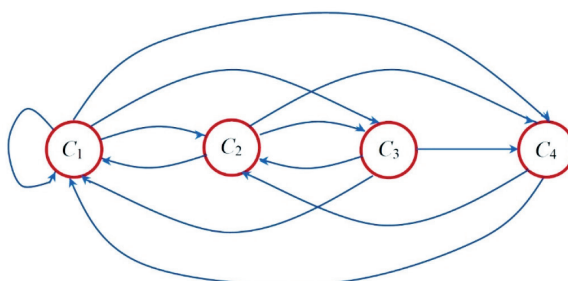


Рис. 3. Граф возможных состояний ЭТС в процессе технической эксплуатации

Для анализа возможных вариантов организации эксплуатации ЭТС выделим на графе J все возможные элементарные контуры. С каждым контуром свяжем базисный вариант эксплуатации. Число базисных вариантов будет равно цикломатическому числу графа [12].

Цикломатическое число $\mu(J)$ графа $J = (C, L)$ определяется по формуле

$$\mu(J) = \text{card}(L) - \text{card}(C) + r(J),$$

где $\text{card}(L)$ — число дуг;

$\text{card}(C)$ — число вершин;

$r(J)$ — число компонент связности графа.

Для приведенного на рис. 3 графа получим: $\text{card}(L) = 12$; $\text{card}(C) = 4$; $r(J) = 1$, $\mu(J) = 9$.

Рассмотрим полученные девять базисных вариантов смены технических состояний ЭТС. При этом каждый базисный вариант будем обозначать символом исходного графа с указанием последовательности вершин, образующих контур, а его порядковый номер — нижним индексом.

Вариант 1. $J_1 = (C_1, C_1)$.

В этом варианте ЭТС находится в течение всего срока службы в исправном состоянии.

Вариант 2. $J_2 = (C_1, C_2, C_1)$.

ЭТС находится в исправном состоянии, но периодически переходит в работоспособное состояние. После восстановления возвращается в исправное состояние.

Вариант 3. $J_3 = (C_1, C_2, C_3, C_1)$.

В отличие от предыдущего варианта ЭТС после работоспособного состояния переходит в частично неработоспособное состояние вследствие внезапного или постепенного отказа, после чего в результате мероприятий по восстановлению переходит в исходное (исправное) состояние.

Вариант 4. $J_4 = (C_1, C_2, C_4, C_1)$.

В отличие от варианта 3 после работоспособного состояния ЭТС переходит в неработоспособное состояние, а затем (после восстановления) в исходное (исправное) состояние.

Вариант 5. $J_5 = (C_1, C_3, C_4, C_1)$.

ЭТС из исправного состояния переходит в частично неработоспособное состояние, затем в неработоспособное состояние и после восстановления возвращается в исправное состояние.

Вариант 6. $J_6 = (C_1, C_3, C_1)$.

В отличие от варианта 2 ЭТС из исправного состояния периодически переходит в частично работоспособное состояние, а затем (после восстановления,) возвращается в исходное состояние.

Вариант 7. $J_7 = (C_1, C_4, C_1)$.

Аналогично варианту 6, только вместо частично работоспособного состояния ЭТС периодически пребывает в неработоспособном состоянии.

Вариант 8. $J_8 = (C_1, C_3, C_2, C_1)$ или $J_8 = (C_1, C_3, C_2)$.

ЭТС из исправного состояния переходит в частично неработоспособное состояние и после восстановления переходит в работоспособное состояние, а затем, возможно, в исправное состояние.

Вариант 9. $J_9 = (C_1, C_4, C_2, C_1)$ или $J_9 = (C_1, C_4, C_2)$.

Аналогично варианту 8, но вместо частично неработоспособного состояния ЭТС периодически находится в неработоспособном состоянии.

С помощью комбинаций рассмотренных базисных вариантов можно синтезировать различные варианты смены технических состояний ЭТС, общее число которых $N = \sum_{k=1}^{10} C_{10}^k = 2^9 - 1 = 511$.

Реальный процесс эксплуатации ЭТС имеет две особенности. Первая состоит в том, что в рассмотренном графе смены технических состояний направления перехода зависят в основном от состояния ЭТС и практически не зависят от состояний, в которых система уже побывала. Вторая особенность заключается в том, что время пребывания в каждом техническом состоянии может быть как детерминированным, так и случайным, а переходы между состояниями обусловлены как постепенными, так и внезапными отказами. Отсюда следует возможность моделирования процесса смены технических состояний ЭТС полумарковскими моделями с дискретным множеством состояний [11], [12].

Граф многорежимной эксплуатации ЭТС, приведенный на рис. 3, является *сильно связанным*, так как содержит только сообщающиеся состояния. Отсюда следует, что полумарковский процесс, заданный на данном графе, является эргодическим. Вершинами графа являются различные технические состояния, дугами — интенсивности перехода из одного состояния в другое.

По аналогии с работой [12] может быть рассмотрена задача управления процессом изменения состояний, осуществляемая изменением вероятностей переходов полумарковского процесса. Математическая модель функционирования ЭТС, на основании которой можно, например, рассчитать вероятности пребывания системы в том или ином состоянии составляется на основе уравнений Колмогорова и имеет вид:

$$\begin{aligned}\frac{dP[C_1(t)]}{dt} &= \lambda_{2-1}P[C_2(t)] + \lambda_{3-1}P[C_3(t)] + \lambda_{4-1}P[C_4(t)] - (\lambda_{1-2} + \lambda_{1-3} + \lambda_{1-4})P[C_1(t)]; \\ \frac{dP[C_2(t)]}{dt} &= \lambda_{1-2}P[C_1(t)] + \lambda_{3-2}P[C_3(t)] + \lambda_{4-2}P[C_4(t)] - (\lambda_{2-1} + \lambda_{2-3} + \lambda_{2-4})P[C_2(t)]; \\ \frac{dP[C_3(t)]}{dt} &= \lambda_{1-3}P[C_1(t)] + \lambda_{2-3}P[C_2(t)] - (\lambda_{3-1} + \lambda_{3-2} + \lambda_{3-4})P[C_3(t)]; \\ \frac{dP[C_4(t)]}{dt} &= \lambda_{1-4}P[C_1(t)] + \lambda_{2-4}P[C_2(t)] + \lambda_{3-4}P[C_3(t)] - (\lambda_{4-1} + \lambda_{4-2})P[C_4(t)]; \\ P[C_1(t)] &= 1 - P[C_2(t)] - P[C_3(t)] - P[C_4(t)].\end{aligned}$$

Для определения стационарных вероятностей пребывания ЭТС в рассмотренных состояниях производные в левой части системы уравнений приравниваются нулю.

Заключение (Conclusion)

Приведенные определения базовых понятий теории эксплуатации позволили исключить неоднозначность их понимания и толкования. Дано определение категории «состояние», формулировка которого отличается от известных определений и позволяет более полно и точно решать задачи диагностирования ЭТС. Принципиальным моментом в определении категории состояния является то, что оно непрерывно меняется в функции времени. При этом можно выделить устойчивые состояния, качественно отличающиеся друг от друга. Такими техническими состояниями являются исправное, неисправное, работоспособное, неработоспособное, частично неработоспособное и предельное состояния. Рассмотрены также функциональные состояния, определяемые режимами работы ЭТС и актуальные определения важнейших свойств и событий, среди которых особое место занимают надежность, живучесть, безопасность, отказ, повреждение и дефект.

Для выделенных технических состояний модель синтезирована в виде ориентированного графа и составлена математическая модель в виде дифференциальных уравнений Колмогорова, позволяющая оценивать вероятности пребывания ЭТС в том или ином состоянии.

На основе определения категории состояния, рассмотренных технических состояний и составленной математической модели могут быть синтезированы математические модели для конкретных ЭТС и определены вероятностей пребывания системы в том или ином техническом состоянии. Для решения этой задачи необходимы статистические данные об изменении параметров конкретных ЭТС. Такая информация может быть получена в результате постоянного мониторинга ЭТС и формирования базы данных, на основе которой могут быть с заданной достоверностью определены интенсивности переходов от одного технического состояния к другому.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маркин И. Н. Стратегии эксплуатации и организации системы технического обслуживания и ремонта сложных технических систем / И. Н. Маркин // Наука и техника транспорта. — 2016. — № 3. — С. 53–55.
2. Орешин Н. А. Методика оптимизации процесса оценки вида технического состояния объектов технической эксплуатации / Н. А. Орешин, А. Н. Орешин // Известия Орловского государственного технического университета. Серия: Информационные системы и технологии. — 2006. — № 1–1. — С. 155–157.
3. Северцев Н. А. Мониторинг качества функционирования сложных технических систем в процессе их эксплуатации / Н. А. Северцев, В. В. Шипилов // Вопросы теории безопасности и устойчивости систем. — 2016. — № 18. — С. 66–74.
4. Дрогайцев В. С. Средства обеспечения эксплуатации электротехнических комплексов по техническому состоянию / В. С. Дрогайцев, В. А. Ушаков, Р. Е. Куликов // Вестник Саратовского государственного технического университета. — 2014. — Т. 2. — № 1 (75). — С. 210–213.

5. Жуковский Ю. Л. Оценка технического состояния и остаточного ресурса электромеханического агрегата с асинхронным двигателем / Ю. Л. Жуковский, Н. А. Королёв, И. С. Бабанова // Горное оборудование и электромеханика. — 2017. — № 6 (133). — С. 20–25.
6. Саушев А. В. Структура процесса управления состоянием сложных электротехнических систем / А. В. Саушев // Надежность и качество сложных систем. — 2013. — № 3 (3). — С. 23–30.
7. Саушев А. В. Морфологический анализ категории «электротехническая система» / А. В. Саушев // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 1 (29). — С. 193–201. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-1-193-201.
8. Саушев А. В. Основы управления состоянием электротехнических систем объектов водного транспорта: монография / А. В. Саушев. — СПб.: ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2015. — 215 с.
9. Фрумкин А. М. К определению понятия состояния для процессов и событий / А. М. Фрумкин // Ученые записки: электронный научный журнал Курского государственного университета. — 2013. — № 2 (26). — С. 1–13.
10. Саушев А. В. Показатели надежности при параметрическом синтезе автоматизированных электроприводов / А. В. Саушев, Е. В. Бова, Г. Л. Демидова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 3. — С. 597–607. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-597-607.
11. Пюкке Г. А. К вопросу об использовании марковской модели деградации при диагностировании технических систем / Г. А. Пюкке // Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. — 2017. — № 3 (19). — С. 50–60. DOI: 10.18454/2079-6641-2017-19-3-50-60.
12. Емелин Н. М. Марковская модель оценки безопасности эксплуатации сложных технических систем / Н. М. Емелин // Двойные технологии. — 2021. — № 1 (94). — С. 23–25.

REFERENCES

1. Markin, I. N. “Strategii ekspluatatsii i organizatsii sistemy tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta slozhnykh tekhnicheskikh system.” *Nauka i tekhnika transporta* 3 (2016): 53–55.
2. Oreshin, N. A., and A. N. Oreshin. “Metodika optimizatsii protsessa otsenki vida tekhnicheskogo sostoyaniya ob’ektov tekhnicheskoi ekspluatatsii.” *Izvestiya Orlovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Informatsionnye sistemy i tekhnologii* 1–1 (2006): 155–157.
3. Severtsev, N. A., and V. V. Shipilov. “Monitoring the quality of functioning complex technical systems during their operation.” *Voprosy teorii bezopasnosti i ustoychivosti sistem* 18 (2016): 66–74.
4. Drogaytsev, V. S., V. A. Ushakov, and R. E. Kulikov. “Ensuring operation of electrotechnical complexes according to technical conditions.” *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* 2.1(75) (2014): 210–213.
5. Zhukovsky, Yu. L., N. A. Korolev, and I. S. Babanova. “Estimation of the technical state and residual resource of electromechanical unit with asynchronous motor.” *Mining Equipment and Electromechanics* 6(133) (2017): 20–25.
6. Saushev, A. V. “Struktura protsessu upravleniya sostoyaniem slozhnykh elektrotekhnicheskikh system.” *Nadezhnost’ i kachestvo slozhnykh sistem* 3(3) (2013): 23–30.
7. Saushev, Aleksandr Vasilevich. “Morphological analysis of category electrotechnical system.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 1(29) (2015): 193–201. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-1-193-201.
8. Saushev, A. V. *Osnovy upravleniya sostoyaniem elektrotekhnicheskikh sistem ob’ektov vodnogo transporta: monografiya*. SPb.: GUMRF imeni admirala S. O. Makarova, 2015.
9. Frumkin, A. M. “K opredeleniyu ponyatiya sostoyaniya dlya protsessov i sobytii.” *Uchenye zapiski. Elektronnyi nauchnyi zhurnal Kurskogo gosudarstvennogo universiteta* 2(26) (2013): 1–13.
10. Saushev, Alexander V., Elena V. Bova, and Galina L. Demidova. “Reliability indicators at parametrical synthesis of the automated electric drives.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.3 (2018): 597–607. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-597-607.
11. Pyukke, G. A. “To the question of the use of Markov model degradation in the diagnosis technical systems.” *Bulletin KRASEC. Physical and Mathematical Sciences* 3(19) (2017): 50–60. DOI: 10.18454/2079-6641-2017-19-3-50-60.
12. Emelin, Nikolay. “Markov model for assessing the safety of operation of complex technical systems.” *Dvoynye tekhnologii* 1(94) (2021): 23–25.

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: saushev@bk.ru, SaushevAV@gumrf.ru

Смирнов Виктор Иванович — 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: V.S.@d-i.su, kaf_electroprivod@gumrf.ru

Бова Елена Владимировна —

доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: elena.bova2015@bk.ru,
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: saushev@bk.ru, SaushevAV@gumrf.ru

Smirnov, Viktor I. — 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: V.S.@d-i.su, kaf_electroprivod@gumrf.ru

Bova, Elena V. —

Associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: elena.bova2015@bk.ru,
kaf_electroprivod@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 12 мая 2023 г.

Received: May 12, 2023.