

УДК 621.313.1

DOI: 10.22213/2410-9304-2024-2-87-93

## Обзор системных исследований электрических машин в специфических условиях эксплуатации энергоустановок

*Н. М. Шайтор*, кандидат технических наук, доцент, Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

*Рассматривается проблема уязвимости жизненного цикла, предопределяемая стадиями разработки, эксплуатации и модернизации электрических машин, связанными с ограничениями габаритов и массы, с динамическими электромагнитными и тепловыми перегрузками, с возможными затоплениями и изменениями условий вентилирования и охлаждения.*

*Снижение массогабаритных показателей электрических машин лежит на путях исключения пассивных участков магнитных цепей и оптимизации соотношения меди и стали. Стремление к снижению массогабаритных показателей и увеличению энергетической плотности влечет за собой повышенные тепловыделения и температурные нагрузки структурных элементов. Возрастание температур, при которых работают современные машины, указывает на необходимость разработки математических моделей, отражающих реакцию электротехнических материалов структурных элементов на совместное воздействие тепловых и магнитных полей. Подобные модели востребованы для исследования температурной зависимости изоляционных, магнитных и рабочих свойств электрических машин в ходе установления необходимых ограничений режимов работы с целью сохранения и продления жизненного цикла.*

*Критерием принятия управленческих решений, направленных на изменение режимов работы в ходе эксплуатации, могут быть максимальные нагрузки, ограничивающие выход за предельно допустимые температуры используемого класса электрической изоляции, а также за критические значения индукции, определяемые температурной зависимостью магнитных свойств ферромагнетиков, влияющих на рабочие характеристики электрических машин.*

*Дальнейшее решение проблемы лежит на пути создания цифровых двойников, содержащих полные математические и компьютерные имитационные модели, описывающие процессы в электрических машинах с учетом температурной зависимости физических свойств материалов структурных элементов вследствие наложения тепловых, магнитных и электрических полей.*

**Ключевые слова:** жизненный цикл, температурный режим, модульный генератор, асинхронный двигатель, двухслойный ротор.

### Введение

С точки зрения системного подхода электрические машины (ЭМ) как объекты исследования относятся к микросистемам и являются структурными элементами макросистем высшего уровня – электроэнергетических систем. Последние объединяют компоненты электроэнергетики общностью процесса производства, передачи, распределения и потребления электрической энергии. ЭМ являются неотъемлемым атрибутом основного и вспомогательного оборудования энергетических систем, станций, энергокомплексов и входящих в них энергетических установок (ЭУ), они широко используются в составе исполнительных элементов систем управления энергетического оборудования.

Специфическим условиям эксплуатации подвергаются ветроэнергетические установки, автономные энергетические установки летательных аппаратов, морских судов и платформ, специальные установки. Их разработка связана с высокими требованиями к надежности и эф-

фективности. ЭМ этих ЭУ работают в условиях критических ограничений на габариты, массу, температуру электрической изоляции обмоток, в тяжелых динамических режимах, при перегрузках и высоких температурах. В условиях неблагоприятной окружающей среды ЭМ могут подвергаться затоплениям и погружениям, а также находиться в широком диапазоне давлений и окружающих температур.

Как известно, в настоящее время массовое распространение получили асинхронные двигатели (АД). Эффективным направлением улучшения динамических свойств АД является применение двухслойных роторов с железомедным сплавом активного слоя, совмещающим функции электрического и магнитного проводника, и снижающим пусковые потери и нагревание ЭМ. Однако применение сплава снижает точку Кюри железа, что может привести к обратному эффекту и отразиться на результирующем электромагнитном и температурном режиме работы машины.

Исследование влияния окружающей среды актуально для обеспечения живучести и непотопляемости ЭУ судов, плавучих платформ, а также при затоплении подземных шахт и горных выработок, осушительные установки которых работают от промышленных АД с воздушным охлаждением. После соответствующей модернизации электрическая часть машины остается в воздушной подушке, при этом изменяются исходные условия вентиляции и охлаждения, а вместе с этим и температурный режим ЭМ. Превышение предельно допустимой температуры для применяемого класса изоляции электрических обмоток способно негативно повлиять на продолжительность жизненного цикла ЭМ.

В тяжелых условиях динамических ударных нагрузок работают ветроэнергетические установки (ВЭУ). Вследствие простоты конструкции и высокой надежности модульные индукторные генераторы могут составить альтернативу синхронным и асинхронным генераторам, получившим преимущественное распространение в составе ВЭУ. В настоящее время модульные генераторы с магнитной коммутацией, разработка которых направлена на снижение габаритов и массы и достижение высокой энергетической плотности, находятся на начальных стадиях жизненного цикла.

Суть проблемы заключается в уязвимости жизненного цикла ЭМ, подвергающихся специфическим условиям эксплуатации, связанным с ограничениями габаритов и массы, с динамическими электромагнитными и тепловыми перегрузками, с возможными затоплениями и изменениями условий вентилирования и охлаждения.

Цель работы – рассмотрение и анализ научных публикаций, посвященных системным исследованиям проектируемых и модернизируемых ЭМ для специфических условий эксплуатации объектов энергетики, выявление основных тенденций и возможностей дальнейших изысканий для сохранения и продления их жизненного цикла.

### **Материалы и методы**

*Обзор публикаций системных исследований в электроэнергетике.* Современные методы системного анализа являются развитием системного подхода и теории систем, основоположником которой считают Л. Фон Берталанфи, который в 30-е годы XX века ввел понятие системы и сформулировал основные положения теории. В то же время важный вклад в становление системных представлений внес А. А. Богданов.

Среди отечественных специалистов, принявших участие в развитии системного анализа, можно отметить Н. Н. Моисеева, Ю. И. Черняка, Е. П. Голубкова, В. Н. Сгатовского, Ф. И. Перегудова, Г. П. Щедровицкого и ряд других специалистов. Современные работы В. Н. Волковой посвящены раскрытию закономерностей теории систем и описанию методов и моделей системного анализа [1].

К системным исследованиям и направлениям развития теории систем в энергетической области относятся работы Л. А. Мелентьева и его учеников [2]. Основные современные понятия, положения и подходы теории систем применительно к береговым электроэнергетическим системам изложены в работах Н. И. Воропая и Б. В. Попкова [3, 4]. Автономные и судовые электроэнергетические и электротехнические системы рассмотрены в работах И. А. Рябинина [5]. Определенные процессы и совокупности процессов в электромеханических преобразователях, исследованных Г. Готтером, Б. С. Сотсковым и другими авторами, используются для реализации и управления отдельными стадиями жизненного цикла ЭМ [6]. В работах А. В. Саушева приводится морфологический анализ, структура, задачи и критерии управления состоянием электротехнических систем. Рассматриваются модели управления в различных режимах их работы [7]. Работы Ф. Р. Исмагилова посвящены результатам изучения и обобщения разработок нетрадиционных конструкций ЭМ [8]. В работах В. Г. Макарова проводятся системные исследования на основе идентификации математических моделей объектов электромеханики, ориентированных на оптимальные режимы их работы [9].

Упомянутые авторы используют системный подход преимущественно в применении к техническим энергетическим, электротехническим и электроэнергетическим системам, в составе которых ЭМ рассматриваются как отдельные элементы системы. Дальнейшее проведение анализа требует рассмотрения ЭМ как самостоятельных систем, обладающих собственной структурой и эмерджентностью.

*Концепция развития индукторных машин при ограничениях на габариты и массу.* Разработка ветроэнергетических установок мотивирует создание ЭМ, удовлетворяющих требованиям высокой надежности, сопровождающимся повышенной энергетической плотностью [10]. Особенность ВЭУ заключается в ограниченной частоте вращения, поэтому для достижения промышленной частоты при прямой передаче на вал требует-

ся большое число полюсов, которые увеличивают габариты и массу электрической машины [11]. Наиболее простую и надежную конструкцию имеют индукторные генераторы, основным недостатком которых являются повышенные массогабаритные показатели [12]. Снижение массогабаритных показателей индукторных машин лежит на путях исключения пассивных участков магнитных цепей и оптимизации соотношения меди и стали путем перехода к новой концепции модульной электрической машины с магнитной коммутацией.

*Влияние критических температур на эффективность ЭМ.* Влияние критических температур отмечается при использовании электротехнических материалов для ЭМ, работающих в условиях относительно высоких тепловых нагрузок [13]. Продолжительность результирующего жизненного цикла ЭМ в основном зависит от ресурса электрической изоляции, определяемого температурой и классом изоляции обмоток. Существенное влияние на характеристики ЭМ оказывает и магнитное поле, для усиления которого используется электротехническое железо. Первые исследования магнитных свойств железа в области ферромагнитного превращения провел в 1895 г. П. Кюри. Общепринято рассматривать превращение «ферромагнетизм – парамагнетизм» как фазовые переходы 2-го рода, понятие о которых впервые ввел Эренфест в 1933 году. Теория фазовых переходов была впоследствии развита Ландау и Лифшицем и применена Вонсовским и Гинзбургом для описания явлений вблизи точки Кюри в ферромагнетиках [14, 15].

Как известно, в настоящее время массовое распространение получили АД с короткозамкнутым ротором (АДКР). Для динамических режимов работы используются модернизированные АД с двухслойными роторами (АДДР), обладающие улучшенными пусковыми свойствами [16]. Железомедные сплавы для двухслойных роторов АДДР были созданы и исследованы В. С. Могильниковым, А. М. Олейниковым, А. Н. Стрельниковым, В. В. Ивановым [17]. Водоотливные насосные установки судов и подземных шахт в основном работают от промышленных АДКР с воздушным охлаждением, они обеспечивают безопасность мореплавания и препятствуют затоплению горных выработок [18–21]. После соответствующей модернизации электрическая часть машины при затоплениях и погружениях остается в воздушной подушке, однако изменяется тепловой режим работы электротехнических материалов.

Применение сплавов снижает точку Кюри и индукцию насыщения при высоких температурах железа, что негативно сказывается на рабочих характеристиках ЭМ. Назрела необходимость в разработке математических моделей ЭМ, отражающих реакцию магнитных материалов на наложение тепловых и магнитных полей. Предельные тепловые нагрузки в сочетании с температурной зависимостью магнитных, электрических и изоляционных характеристик электротехнических материалов побуждают к исследованию температурного влияния элементов на продолжительность жизненного цикла ЭМ.

*Цифровые двойники и информационные модели ЭМ.* Новые возможности в области исследований жизненного цикла и его отдельных этапов открывают математические и компьютерные модели на основе описания физических процессов ЭУ. Перспективным направлением в развитии этих исследований является создание и применение цифровых двойников, которые рассматриваются как инструмент комплексного моделирования технологических процессов элементов ЭУ [22]. Виртуальные цифровые модели широко используются для оптимизации параметров и режимов гибридных энергетических комплексов [23, 24]. Большой интерес представляют разработки и исследования погружных электрических машин, в том числе на основе унифицированной платформы Ansys Electronics Desktop, а также с применением методов планирования эксперимента в сочетании с цифровыми двойниками [25–27]. Информационные модели и алгоритмы прогнозирования тепловых режимов и параметрической идентификации будут полезными для дальнейших исследований при решении проблем сохранения и продления жизненного цикла ЭМ в специфических условиях эксплуатации [28–30].

#### **Анализ результатов**

Снижение массогабаритных показателей индукторных машин для ЭУ лежит на путях исключения пассивных участков магнитных цепей, оптимизации соотношения меди и стали и переходе к новой концепции модульных электрических машин с магнитной коммутацией. Заключительным этапом разработки машин этого типа может быть комплексный структурно-параметрический синтез, содержащий создание алгоритмического и программного обеспечения для автоматизации проектирования с получением максимальной удельной мощности по массе в качестве параметра оптимизации.

Эффективным средством адаптации к затоплению является технология создания и поддер-

жания динамической воздушной подушки в электрической полости модернизированной ЭМ, позволяющая сохранить ресурс электрической изоляции и продолжительность жизненного цикла. Изменение вентиляционных и внешних факторов мотивируют создание имитационных структурно-функциональных компьютерных моделей, объединяющих математическое описание физических явлений и процессов для исследования тепловых режимов ЭМ.

Расширение интервала температур, в которых работают магнитные, электрические и изоляционные материалы современных ЭМ в сочетании с использованием новых электротехнических материалов, указывает на необходимость разработки математических моделей, отражающих реакцию электротехнических материалов структурных элементов на совместное наложение тепловых, магнитных и электрических полей.

#### Выводы

Стремление к снижению массогабаритных показателей к увеличению энергетической плотности влечет повышение температурных нагрузок структурных элементов ЭМ. Основным фактором, определяющим жизненный цикл на этапе эксплуатации, является ресурс изоляции электрических обмоток ЭМ.

Критерием принятия управленческих решений, направленных на сохранение жизненного цикла ЭМ, могут быть максимально допустимые электрические нагрузки в конкретных условиях эксплуатации. Их величина ограничивается предельно допустимыми температурами используемого класса электрической изоляции, а также критическим снижением индукции вследствие температурной зависимости магнитных свойств материалов магнитных цепей.

Дальнейшее решение проблемы лежит на пути создания цифровых двойников, содержащих полные математические и компьютерные имитационные модели, описывающие процессы в ЭМ с учетом температурной зависимости физических свойств материалов структурных элементов, вследствие наложения тепловых, магнитных и электрических полей.

#### Библиографические ссылки

1. Волкова В.Н. Истоки и перспективы наук о системах : монография. М. : Курс, 2023. 368 с. ISBN 978-5-907535-53-4.
2. Системные исследования в энергетике: энергетический переход / под ред. Н. И. Воропая и А. А. Макарова. Иркутск : ИСЭМ СО РАН, 2021. 594 с. ISBN 978-5-93908-153-5.

3. Развитие системных энергетических исследований: вклад Н. И. Воропая / Д. Н. Ефимов, Д. С. Крупенев, А. В. Михеев, С. В. Подковальников // *Электричество*. 2023. № 3. С. 4–21. URL: <https://doi.org/10.24160/0013-5380-2023-3-4-21>.

4. Папков Б. В., Илюшин П. В., Куликов А. Л. Надежность и эффективность современного электрооборудования: монография. Н. Новгород : XXI век, 2021. 160 с. ISBN 978-5-6045837-5-3.

5. Рябинин И. А., Струков А. В. Решение одной задачи оценки надежности структурно-сложной системы разными логико-вероятностными методами // *Моделирование и анализ безопасности и риска в сложных системах МАБР-2019 : сборник трудов конференции*. СПб. : ГУАП, 2019. С. 159–172.

6. Самарская Н. С., Парамонова О. Н., Борисова Ю. С. Жизненный цикл ветроэнергетической установки // *Инженерно-строительный вестник Прикаспия*. 2021. № 3 (37). С. 41–44. DOI: 10.52684/2312-3702-2021-37-3-41-44.

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

8. Исмагилов Ф. Р., Вавилов В. Е., Саяхов И. Ф. Обзор конструкций дисковых электромеханических преобразователей энергии для различных областей применения // *Электротехнические системы и комплексы*. 2018. № 1 (38). С. 68–79.

9. Макаров В. Г., Шаряпов А. М. Модель электропривода малой мощности в пакете Matlab // *Вестник Технологического университета*. 2022. Т. 25, № 12. С. 133–138. DOI: 10.55421/1998-7072\_2022\_25\_12\_133.

10. Горожанкин А. Н., Коржов А. В. Особенности синтеза синхронных реактивных и индукторных электрических машин // *Вестник Южно-Уральского государственного университета*. Серия: Энергетика. 2022. Т. 22, № 2. С. 81–91. DOI: 10.14529/power220208.

11. Татевосян А. А. Оптимизация тихоходного синхронного генератора модульного типа и принцип реализации системы управления напряжением генератора на основе нейронной сети // *Электричество*. 2021. № 7. С. 61–70. DOI: 10.24160/0013-5380-2021-7-61-70.

12. Красовский А. Б., Восторгина Е. С. Особенности режима ослабления поля в вентильно-индукторной электрической машине // *Электричество*. 2022. № 12. С. 36–47. DOI: 10.24160/0013-5380-2022-12-36-47.

13. Гельвер Ф. А., Белоусов И. Б., Самосенко В. Ф. Результаты экспериментальных исследований опытного образца реактивной электрической машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора // *Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления*. 2019. № 29. С. 148–173.

14. Доценко В. А., Белоус И. А. Особенности поведения прочностных свойств сплавов железа в области температур магнитных переходов на основе феноменологической теории фазовых переходов // Территория новых возможностей. Вестник ВГУЭС. 2021. Т. 13, № 1. С. 137–143. DOI: 10.24866/VVSU/2073-3984/2021-1/137-143.
15. Магнитные свойства композиционных магнитомягких материалов на основе железного порошка с многослойным изоляционным покрытием / Г. А. Говор, А. О. Ларин, О. Ф. Демиденко, А. Л. Желудкевич // Перспективные материалы. 2023. № 5. С. 66–71. DOI: 10.30791/1028-978X-2023-5-66-71.
16. Машлян А. Л., Сагателян М. А., Хангельдян А. Г. Расчет параметров асинхронной машины с массивным ротором из сплава железа и меди // Вестник Национального политехнического университета Армении. Электротехника, энергетика. 2022. № 1. С. 28–41. DOI: 10.53297/18293328-2022.1-28.
17. Олейников А. М., Высоцкий В. Е., Нагурняк А. Ж. Расчетные модели и алгоритмы проектирования асинхронных двигателей с двухслойным ротором // Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты: труды XVII Международной конференции. Алушта : Знак, 2018. С. 104–107.
18. Мотрич В. Морские вести России. 2022 год: аварийность морского флота. URL: <https://morvesti.ru> (дата обращения: 27.10.2023).
19. Долганов А. В. Повышение энергоэффективности при эксплуатации комплексов шахтного водоотлива // ГИАБ. 2019. № S9. С. 16–23. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-5-9-16-23.
20. Овчинников Н. П., Смыслов А. Г. Повышение ресурса секционных насосов главного водоотлива подземного кимберлитового рудника «Удачный» // Вестник машиностроения. 2018. № 9. С. 48–52.
21. Отечественная гидронавтика. О главном конструкторе Чернове А.А. URL: [http://oosif.ru/biblioteka-gidronavtiki-1?mode=album&album\\_id=157822301](http://oosif.ru/biblioteka-gidronavtiki-1?mode=album&album_id=157822301) (дата обращения: 20.11.23).
22. Volintiru O.N., Epikhin A.I., Toriia T.G., Modina M.A., Skoda V.V., Ermolenko M.A., Ivanov O.V. Digital twins of ship power plant elements as a tool for complex modeling of technological processes // Эксплуатация морского транспорта. 2023. № 1 (106). С. 198–203.
23. Тягунов М. Г., Шевердиев Р. П. Использование цифрового двойника гибридных энергетических комплексов для оптимизации их параметров и режимов // Вестник Московского энергетического института. Вестник МЭИ. 2023. № 3. С. 109–118. DOI: 10.24160/1993-6982-2023-3-109-118.
24. Тягунов М. Г., Шевердиев Р. П. Применение цифрового двойника для исследования и оптимизации локальных гибридных энергокомплексов с генерацией на основе ВИЭ // Энергетические системы. 2022. № 1. С. 60–71. DOI: 10.34031/ES.2022.1.007.
25. Цифровой двойник погружного электродвигателя на основе методов планирования эксперимента / В. З. Ковалев, Э. И. Хусаинов, Е. С. Балыклов, О. В. Архипова, Р. Н. Хамитов, А. С. Глазырин // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2022. Т. 18, № 2. С. 32–44. DOI: 10.17122/1999-5458-2022-18-2-32-44.
26. Ганджа С. А., Аминов Д. С., Косимов Б. И. Разработка водопогружного гидрогенератора комбинированного возбуждения для освоения энергии малых и средних рек // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2020. № 34. С. 27–44. DOI: 10.15593/2224-9397/2020.2.02.
27. Аминов Д. С. Применение программного комплекса Ansys Electronics Desktop для анализа водопогружного гидрогенератора комбинированного возбуждения // Электротехнические системы и комплексы. 2020. № 1 (46). С. 13–18. DOI: 10.18503/2311-8318-2020-1(46)-13-18.
28. Нефедьев А. И., Исаев А. В., Исаева Л. А. Информационная модель асинхронных электромеханических преобразователей // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2021. № 1. С. 40–47. DOI: 10.25791/pribor.1.2021.1236.
29. Еришов М. С., Феоктистов Е. А. Модели и алгоритмы прогнозирования нагрева асинхронного двигателя при изменении режимов его работы // Электротехника. 2021. № 11. С. 82–90.
30. Фролов М. Ю., Дулов И. В. Параметрическая идентификация асинхронной машины в процессе эксплуатации // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2021. Т. 13, № 1 (49). С. 85–96.

## References

1. Volkova V.N. *Istoki i perspektivy nauk o sistemakh: monografiya*. [Origins and prospects of systems sciences: monograph.]. Moscow: Publishing house. LLC "Kurs", 2023, 368 p. (in Russ.). ISBN:978-5-907535-53-4.
2. Voropay N.I. and Makarov A.A. – Ed. *Sistemnyye issledovaniya v energetike: energeticheskiy perekhod* [System research in energy: energy transition]. ISEM SB RAS, 2021, 594 p. (in Russ.).
3. Efimov D.N., Krupenev D.S., Mikheev A.V., Podkovalnikov S.V. [Development of systemic energy research: contribution of N.I. Voropaya ]. *Electricity*, 2023, no. 3, pp. 4-21 (in Russ.). Available at: <https://doi.org/10.24160/0013-5380-2023-3-4-21>.
4. Papkov B.V., Ilyushin P.V., Kulikov A.L. *Nadozhnost' i effektivnost' sovremennogo elektrosnabzheniya: monografiya* [Reliability and efficiency of modern power supply: monograph]. Nizhny Novgorod: Scientific Publishing Center "XXI Century", 2021, 160 p. (in Russ.). ISBN 978-5-6045837-5-3
5. Ryabinin I.A., Strukov A.V. *Resheniye odnoy zadachi otsenki nadezhnosti strukturno-slozhnoy sistemy raznymi logiko-veroyatnostnymi metodami* [Solution of one problem of assessing the reliability of a structurally complex system using different logical and probabilistic methods]. *Modelirovaniye i analiz bezopasnosti i riska v slozhnykh sistemakh MABR-2019* [Modeling and analy-

sis of safety and risk in complex systems MABR-2019]. St. Petersburg, 2019. Ed. SUAI, 2019, pp. 159-172 (in Russ.).

6. Samarskaya N.S., Paramonova O.N., Borisova Yu.S. [Life cycle of a wind power plant]. *Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Sea*, 2021, no. 3, pp. 41-44 (in Russ.). DOI: 10.52684/2312-3702-2021-37-3-41-44.

7. Saushev A.V., Smirnov V.I., Bova E.V. [Terminology, structure and model of the process of operating electrical systems]. *Bulletin of the State University of Marine and River Fleet named after. Admiral S.O. Makarova*. 2023, vol. 15, no. 4, pp. 666-679 (in Russ.). DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-666-679.

8. Ismagilov F.R., Vavilov V.E., Sayakhov I.F. [Review of designs of disk electromechanical energy converters for various applications]. *Electrotechnical systems and complexes*, 2018, no. 1. Pp. 68-79 (in Russ.).

9. Makarov V.G., Sharyapov A.M. [Model of a low-power electric drive in the Matlab package]. *Bulletin of the Technological University*, 2022, vol. 25, no. 12, pp. 133-138 (in Russ.). DOI: 10.55421/1998-7072\_2022\_25\_12\_133.

10. Gorozhankin A.N., Korzhov A.V. [Features of the synthesis of synchronous reactive and inductor electrical machines]. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Energy*, 2022, vol. 22, no. 2, pp. 81-91 (in Russ.). DOI: 10.14529/power220208.

11. Tatevosyan A.A. [Optimization of a low-speed synchronous generator of a modular type and the principle of implementing a generator voltage control system based on a neural network]. *Electricity*, 2021, no. 7, pp. 61-70 (in Russ.). DOI: 10.24160/0013-5380-2021-7-61-70.

12. Krasovsky A.B., Vostorgina E.S. [Features of the field weakening mode in a switched reluctance electric machine]. *Electricity*, 2022, no. 12, pp. 36-47 (in Russ.). DOI: 10.24160/0013-5380-2022-12-36-47.

13. Gelver F.A., Belousov I.B., Samosenko V.F. [Results of an experimental study of a prototype of a reactive electric machine with anisotropic magnetic conductivity of the rotor]. *Vestnik PNIPU. Electrical engineering, information technology, control systems*, 2019, no. 29, pp. 148-173 (in Russ.).

14. Dotsenko V.A., Belous I.A. [Features of the behavior of the strength properties of iron alloys in the temperature range of magnetic transitions based on the phenomenological theory of phase transitions]. *Territory of New Opportunities. VSUES Bulletin*, 2021, vol. 13, no. 1, pp. 137-143 (in Russ.). DOI: 10.24866/VVSU/2073-3984/2021-1/137-143.

15. Govor G.A., Larin A.O., Demidenko O.F., Zheludkevich A.L. [Magnetic properties of composite soft magnetic materials based on iron powder with a multi-layer insulating coating]. *Perspective materials*, 2023, no. 5, pp. 66-71 (in Russ.). DOI: 10.30791/1028-978X-2023-5-66-71.

16. Mailyan A.L., Saghatlyan M.A., Khangeldyan A.G. [Calculation of the parameters of an asynchronous machine with a massive rotor made of an iron and copper alloy]. *Bulletin of the National Polytechnic University of Armenia. Electrical engineering, energy*, 2022, no.

1, pp. 28-41 (in Russ.). DOI: 10.53297/18293328-2022.1-28.

17. Oleynikov A.M., Vysotsky V.E., Nagirnyak A.Zh. *Raschetnyye modeli i algoritmy proyektirovaniya asinkhronnykh dvigateley s dvukhsloynym rotorom* [Calculation models and algorithms for designing asynchronous motors with a two-layer rotor]. *Elektromekhanika, elektrotekhnologii, elektrotekhnicheskiye materialy i komponenty* [Electromechanics, Electrical Technologies, Electrical Materials and Components]. Alushta, Ed. "Sign", 2018, pp. 104-107 (in Russ.).

18. Motrich V. *Morskiye vesti Rossii. 2022 god: aviariynost' morskogoflota* [Marine news from Russia. 2022: maritime accident rate.] (in Russ.). Available at: URL: <https://morvesti.ru/> (accessed 10.27.2023).

19. Dolganov A.V. [Increasing energy efficiency during the operation of mine drainage complexes]. *GIAB*, 2019, no. S9, pp. 16-23 (in Russ.). DOI: 10.25018/0236-1493-2019-5-9-16-23.

20. Ovchinnikov N.P., Smyslov A.G. [Increasing the service life of sectional pumps for the main drainage of the Udachny underground kimberlite mine]. *Bulletin of Mechanical Engineering*, 2018, no. 9, pp. 48-52 (in Russ.).

21. *Otechestvennaya gidronavtika. O glavnom konstruktore Chernove A.A.* [Domestic hydronautics. About the chief designer Chernov A.A.] (in Russ.). Available at: URL: [http://oosif.ru/biblioteka-gidronavtiki-1?mode=album&album\\_id=157822301](http://oosif.ru/biblioteka-gidronavtiki-1?mode=album&album_id=157822301) (accessed 20.11.23).

22. Volintiru O.N., Epikhin A.I., Torria T.G., Modina M.A., Skoda V.V., Ermolenko M.A., Ivanov O.V. [Digital twins of ship power plant elements as a tool for complex modeling of technological processes]. *Operation of maritime transport*, 2023, no. 1, pp. 198-203. DOI: 10.34046/aumsuomt106/33.

23. Tyagunov M.G., Sheverdiev R.P. [Using a digital twin of hybrid energy complexes to optimize their parameters and modes]. *Bulletin of the Moscow Energy Institute. MPEI Bulletin*, 2023, no. 3, pp. 109-118 (in Russ.). DOI: 10.24160/1993-6982-2023-3-109-118.

24. Tyagunov M.G., Sheverdiev R.P. [Application of a digital twin for research and optimization of local hybrid energy complexes with generation based on renewable energy sources]. *Energy Systems*, 2022, no. 1, pp. 60-71 (in Russ.). DOI: 10.34031/ES.2022.1.007.

25. Kovalev V.Z., Khusainov E.I., Balyklov E.S., Arkhipova O.V., Khamitov R.N., Glazyrin A.S. [Digital twin of a submersible electric motor based on experimental planning methods]. *Electrical engineering and information complexes and systems*. 2022. Vol. 18, no. 2, pp. 32-44 (in Russ.). DOI: 10.17122/1999-5458-2022-18-2-32-44.

26. Ganja S.A., Aminov D.S., Kosimov B.I. [Development of a water-submersible hydrogenerator of combined excitation for harnessing the energy of small and medium-sized rivers]. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Electrical engineering, information technology, control systems*. 2020. No. 34, pp. 27-44 (in Russ.). DOI: 10.15593/2224-9397/2020.2.02.

27. Aminov D.S. [Application of the Ansys Electronics Desktop software package for the analysis of a combined excitation water-submersible hydrogenerator]. *Electrical systems and complexes*, 2020, no. 1, pp. 13-18 (in Russ.). DOI: 10.18503/2311-8318-2020-1(46)-13-18.

28. Nefed'ev A.I., Isaev A.V., Isaeva L.A. [Information model of asynchronous electromechanical converters]. *Devices and systems. Management, control, diagnostics*, 2021, no. 1, pp. 40-47 (in Russ.). DOI: 10.25791/pribor.1.2021.1236.

29. Ershov M.S., Feoktistov E.A. [Models and algorithms for predicting the heating of an asynchronous motor when its operating modes change]. *Electrical engineering*, 2021, no. 11, pp. 82-90 (in Russ.).

30. Frolov M.Yu., Dulov I.V. [Parametric identification of an asynchronous machine during operation]. *Bulletin of the Kazan State Energy University*, 2021, vol. 13, no. 1, pp. 85-96 (in Russ.).

\* \* \*

### **System Study Review of Electrical Machines under Specific Operating Conditions of Power Installations**

*N. M. Shaitor*, PhD in Engineering, Associate Professor, Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

*The problem of life cycle vulnerability, predetermined by the development stages, operation and modernization of electrical machines due to size and weight restrictions, dynamic electromagnetic and thermal overloads, possible flooding and changes in ventilation and cooling conditions is considered.*

*Reducing the weight and size of electric machines implies eliminating passive sections of magnetic circuits and optimizing the ratio of copper and steel. The desire to reduce weight and size indicators and increase energy density entails increased heat generation and temperature loads of structural elements. The increase in operating temperatures of modern machines indicates the need to develop mathematical models that account the response of electrical materials and structural elements to the combined thermal and magnetic field effects. Such models are in demand to study the temperature dependence of insulating, magnetic and operating properties of electrical machines when establishing the required operating mode restrictions in order to preserve and extend the life cycle.*

*The criterion for making management decisions aimed at changing operating modes during operation can be maximum loads that limit exceeding the maximum permissible temperatures of the electrical insulation class used, as well as critical values of induction determined by the temperature dependence of ferromagnetic properties that affect the performance characteristics of electrical machines.*

*Further solution to the problem lies in the creation of digital twins containing complete mathematical and computer simulation models that describe processes in electrical machines, taking into account the temperature dependence of material physical properties of structural elements being subjected to thermal, magnetic and electric fields.*

**Keywords:** life cycle, temperature regime, modular generator, asynchronous motor, double-layer rotor.

Получено: 15.01.24

#### **Образец цитирования**

*Шайтор Н. М.* Обзор системных исследований электрических машин в специфических условиях эксплуатации энергоустановок // Интеллектуальные системы в производстве. 2024. Т. 22, № 1. С. 87–93. DOI: 10.22213/2410-9304-2024-2-87-93.

#### **For Citation**

*Shaitor N.M.* [System Study Review of Electrical Machines under Specific Operating Conditions of Power Installations]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2024, vol. 22, no. 1, pp. 87-93. DOI: 10.22213/2410-9304-2024-2-87-93.