

Научная статья
УДК 621.311.61
<https://doi.org/10.24143/2073-1574-2023-3-88-96>
EDN MVGCWC

Оценка надежности асинхронных дизель-генераторных установок переменной частоты вращения

**Олег Станиславович Хватов[✉], Тимур Закарияевич Билялетдинов,
Павел Вадимович Кузнецов, Дмитрий Константинович Марков**

*Волжский государственный университет водного транспорта,
Нижегород, Россия, khvatov_oleg@mail.ru[✉]*

Аннотация. Расчет и последующий анализ показателей надежности является обязательным этапом разработки и внедрения в эксплуатацию технических устройств. Проведена оценка показателей надежности применительно к дизель-генераторным устройствам, работающим в режиме регулируемой частоты вращения при долевых нагрузках, что обеспечивает их высокую энергетическую эффективность. Безусловное обеспечение требований по качеству генерируемой энергии (амплитуды и частоты напряжения в судовой сети) реализуется в данных генераторных устройствах средствами полупроводниковой преобразовательной техники. Очевидно, что повышенная техническая сложность генераторных установок переменной частоты вращения, которые можно отнести к классу машинно-вентильных генераторных комплексов, связана с определенным снижением их показателей надежности. Представлены структурные схемы и указан состав силового оборудования и средств управления машинно-вентильными генераторными комплексами переменной частоты вращения на базе асинхронных генераторов с короткозамкнутым и фазным ротором. Рассмотрена методика расчета показателей надежности указанных асинхронных дизель-генераторных комплексов. Приведены результаты расчета интенсивности отказов и времени наработки на отказ с учетом нагрузочной диаграммы электростанции и тахограммы приводного двигателя внутреннего сгорания, которая соответствует работе на энергоэффективных частотах вращения при оптимальном (близком к номинальному) удельном расходе топлива. Результаты сравнительного анализа времени наработки на отказ позволяют определить наиболее надежный в эксплуатации вариант асинхронной генераторной электростанции.

Ключевые слова: показатели надежности, асинхронная дизель-генераторная электростанция переменной частоты вращения, полупроводниковый преобразователь, нагрузочная диаграмма и тахограмма, коэффициент изменения интенсивности отказов

Для цитирования: Хватов О. С., Билялетдинов Т. З., Кузнецов П. В., Марков Д. К. Оценка надежности асинхронных дизель-генераторных установок переменной частоты вращения // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2023. № 3. С. 88–96. <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2023-3-88-96>. EDN MVGCWC.

Original article

Assessment of reliability of variable speed diesel asynchronous generator sets

Oleg S. Khvatov[✉], Timur Z. Bilyaletdinov, Pavel V. Kuznetsov, Dmitriy K. Markov

*Volga State University of Water Transport,
Nizhny Novgorod, Russia, khvatov_oleg@mail.ru[✉]*

Abstract. Calculation and subsequent analysis of reliability indicators is a mandatory stage of development and commissioning of technical devices. There has been carried out an assessment of reliability in relation to diesel generator sets operating in the mode of adjustable rotational speed at shared loads, which ensures their high energy efficiency. Unconditional compliance with the requirements for the quality of the generated energy (amplitude and frequency of the voltage in the ship's network) is realized in these generating devices by means of semiconductor converter technology. It is obvious that the increased technical complexity of variable-speed generator sets, which can be attributed

to the class of machine-valve generator complexes, is associated with a certain decrease in their reliability indicators. There are presented structural schemes and indicated the composition of power equipment and controls for machine-valve generator complexes based on asynchronous generators with a short-circuited and phase rotor. The method of calculating the reliability indicators of these asynchronous diesel generator complexes is considered. The results of calculating the failure rate and operating time for failure are given, taking into account the load diagram of the power plant and the tachogram of the drive internal combustion engine, which corresponds to operation at energy-efficient rotational speeds at optimal (close to nominal) specific fuel consumption. The results of a comparative analysis of the operating time for failure allow us to determine the most reliable version of asynchronous generator electrical installation in operation.

Keywords: reliability indicators, asynchronous diesel generator power plant of variable speed, semiconductor converter, load diagram and tachogram, coefficient of change in failure rate

For citation: Khvatov O. S., Bilyaletdinov T. Z., Kuznetsov P. V., Markov D. K. Assessment of reliability of variable speed diesel asynchronous generator sets. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies. 2023;3:88-96.* (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2023-3-88-96>. EDN MVGCWC.

Введение

Оценка показателей надежности является обязательным этапом проектирования генераторных электростанций переменной частоты вращения. Расчет и дальнейший сравнительный анализ показателей надежности вариантов силовой топологии данных электростанций позволит технически грамотно осуществить выбор конкретной силовой структуры электростанции с учетом ее объектно-ориентированного применения. Исследование и разработка дизель-генераторных электростанций переменной частоты вращения (ДГПЧВ) является относительно новым направлением в малой энергетике. Анализ показателей надежности проведен только для синхронных дизель-генераторных электростанций данного типа [1]. Вместе с тем в последнее время проявляется повышенный интерес к генераторным комплексам, в которых в качестве электрического генератора используется асинхронная машина, обладающая несомненными и известными преимуществами перед синхронной [2]. Применение асинхронных машин в составе ДГПЧВ стало возможным благодаря современным достижениям в области преобразовательной техники [3]. Поэтому анализ надежности асинхронных ДГПЧВ (АДГПЧВ), несомненно, актуален. Отметим, что требования к разработке и эксплуатации генераторных установок переменной частоты вращения отражены в последней редакции «Правил классификации и постройки морских судов» Российского морского регистра судоходства (часть IX «Электрическое оборудование», раздел № 24 «Специальные требования к вентильным генераторным агрегатам», Санкт-Петербург, 2023 г.).

В соответствии с требованиями «Правил классификации и постройки морских судов» (часть XI, пункт 1.4.2.9) данные о надежности электрооборудования могут быть предоставлены в Российский морской регистр судоходства для рассмотрения и экспертной оценки.

Для оценки надежности АДГПЧВ были учтены положения следующей нормативной базы технических документов, содержащих требования к тем или иным элементам дизель-генераторных установок: ГОСТ 33115-2014 «Установки электрогенераторные с дизельными и газовыми двигателями внутреннего сгорания. Общие технические условия» (пункт 6.5); ГОСТ Р 53176-2008 «Установки электрогенераторные с бензиновыми, дизельными и газовыми двигателями внутреннего сгорания. Показатели надежности. Требования и методы испытаний».

Расчет надежности вариантов асинхронных дизель-генераторных электростанций

Учитывая вышесказанное, рассмотрим методику расчета и результаты оценки показателей надежности вариантов ДГПЧВ на базе асинхронных машин.

На рис. 1, 2 представлены соответственно структурные схемы АДГПЧВ на базе асинхронного короткозамкнутого (АГКЗ) и асинхронного генератора с фазным ротором (АГФР). Рассматриваемые генераторные комплексы относятся к машинно-вентильным электротехническим комплексам. Принцип работы предложенных авторами структур АДГПЧВ был рассмотрен ранее в работах [2, 3].

На рис. 1 приняты следующие обозначения: ДВС – двигатель внутреннего сгорания; М – асинхронный генератор с короткозамкнутым ротором; П₁, П₂ – соответственно статорный и сетевой блоки полупроводникового преобразователя; Р₁, Р₂ – соответственно регуляторы частоты вращения и напряжения; Ф – фильтр (конденсаторная батарея); Д₁, Д₂, Д₃ – соответственно датчики частоты вращения, напряжения и тока; З₁, З₂, З₃ – соответственно задатчики энергоэффективной частоты вращения, напряжения и частоты в судовой сети; Б – блок определения мощности.

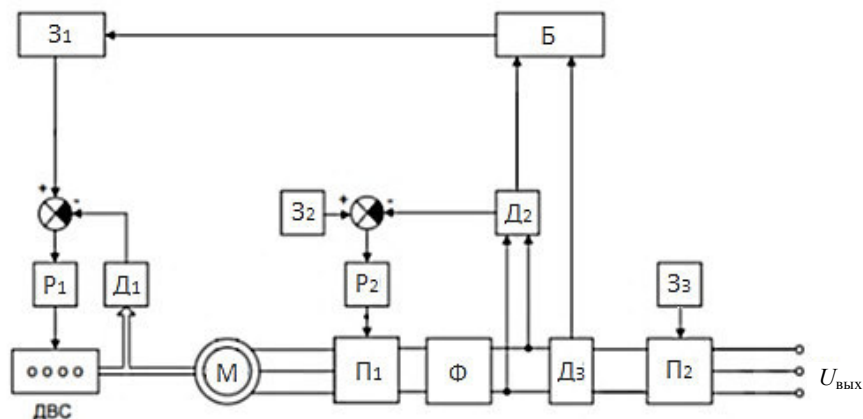


Рис. 1. Структурная схема АДГПЧВ на базе асинхронного генератора с короткозамкнутым ротором

Fig. 1. Structural scheme of a AVSDGS based on an asynchronous generator with a short-circuited rotor

На рис. 2 приняты следующие обозначения: ДВС – двигатель внутреннего сгорания; М – асинхронный генератор с фазным ротором; П1, П2 – соответственно роторный и сетевой блоки полупроводникового преобразователя; Р1, Р2, Р3 – соответственно регуляторы частоты вращения, частоты роторного и напряжения сетевого блоков полупроводникового преобразователя; Ф – фильтр (конден-

саторная батарея); Д1, Д2, Д3 – соответственно датчики частоты вращения, напряжения и тока; З1, З2, З3 – соответственно задатчики энергоэффективной частоты вращения, частоты роторного блока и напряжения сетевого блока полупроводникового преобразователя; Б – блок определения мощности.

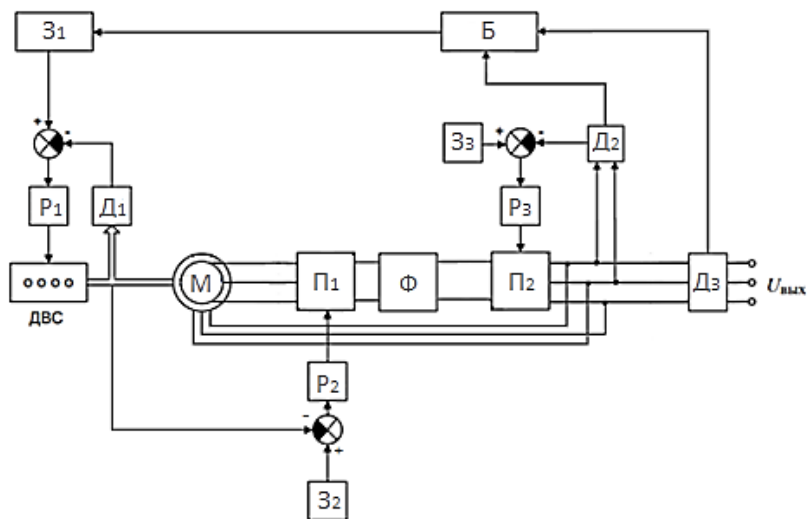


Рис. 2. Структурная схема АДГПЧВ на базе асинхронного генератора с фазным ротором (генераторная установка на основе машины двойного питания)

Fig. 2. Structural scheme of a AVSDGS based on an asynchronous generator with a phase rotor (generator unit based on a double-feed machine)

В качестве сравнительной оценки показателей надежности генераторных электростанций выбираем их среднюю наработку на отказ T – значение

времени, обратное величине интенсивности отказов λ . Интенсивность отказов, в свою очередь, определяется по выражению

$$\lambda = \alpha\lambda_0,$$

где λ_0 – номинальная интенсивность отказов, определяемая по [4–6]; α – коэффициент изменения интенсивности отказов, связанный с условиями эксплуатации технического устройства (АДГПЧВ) и определяемый по моделям прогнозирования [4–6].

Очевидно, что оптимизация расхода топлива генераторными электростанциями за счет принудительного перевода их работы на переменную частоту вращения в режимах долевой (ниже номинальной) нагрузки в судовой сети сопряжена с усложнением состава как силового оборудования, так и системы регулирования. Следует ожидать снижения показателей надежности у АДГПЧВ относительно показателей надежности электростанции классического типа (ДГУ). При этом электростанция классического типа характеризуется неизменной частотой вращения во всем диапазоне нагрузок в судовой сети, а следовательно, повышенным удельным эффективным расходом топлива.

Перейдем к оценке (определению) интенсивности отказов оборудования АДГПЧВ, структурные схемы которых представлены на рис. 1, 2.

Двигатель внутреннего сгорания

Мощность на валу ДВС и расход углеводородного топлива являются основными характеристиками (параметрами), определяющими его работу. На указанные параметры ДВС влияет функционирование систем: подачи топлива и воздуха, других систем.

Причина неисправностей, как правило, связана с износом изделий, изменением механических свойств деталей и накоплением усталостных повреждений в компонентах ДВС. Поскольку скорость изнашивания деталей ДВС связана с интенсивностью трения их поверхностей, следует ожидать увеличение срока службы ДВС при работе на энергоэффективных частотах вращения, значения которых меньше номинального.

Расчет надежности ДВС в составе АДГПЧВ в режимах долевой нагрузки и работе ДВС на энергоэффективных частотах вращения в соответствии с его многопараметровой характеристикой [7] производится с учетом коэффициента изменения интенсивности отказов α_D [1]. Значения α_D соответствуют различной нагрузке K_n и частоте вращения вала ДВС (рис. 3).

Электрический генератор

Электрические машины принадлежат к числу наименее надежных силовых агрегатов дизель-генераторной электростанции, что обусловлено как сложностью конструкции, так и тяжелыми режимами их работы. К основным видам возможных

неисправностей во время эксплуатации электрических машин относятся износ щеточно-коллекторного узла (синхронные и асинхронные машины с фазными роторами), обойм подшипников, межвитковые короткие замыкания и т. д. [4, 5, 8].

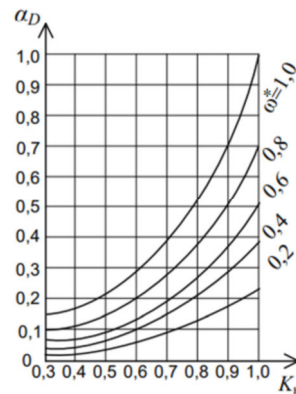


Рис. 3. Коэффициент изменения интенсивности отказов ДВС α_D в зависимости от нагрузки и частоты вращения

Fig. 3. Coefficient of changing failure rate in the internal combustion engine α_D depending on the load and speed of rotation

С помощью коэффициента изменения интенсивности отказов α_G [8, 9] рассчитывается уровень влияния подключаемой нагрузки на безотказность и надежность работы генератора. Значение α_G соответствует различным коэффициентам нагрузки K_n и частоты вращения ω^* (рис. 4).

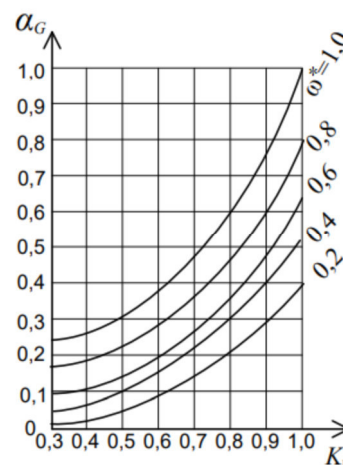


Рис. 4. Коэффициент изменения интенсивности отказов асинхронного генератора α_G в зависимости от нагрузки и частоты вращения

Fig. 4. Coefficient of changing failure rate of the asynchronous generator α_G depending on the load and speed of rotation

Конденсаторная батарея

К основным видам отказов конденсаторных батарей можно отнести пробой диэлектрика, обрыв выводов, а также неизбежное уменьшение емкости с течением времени. Факторы, влияющие на долгосрочную работу конденсаторных батарей: электрическая нагрузка, температура и влажность окружающей среды. Коэффициент электрической нагрузки конденсатора равен отношению рабочего напряжения к допустимому на его обкладках:

$$K_n = U_p / U_{\text{доп.}}$$

На рис. 5 представлены зависимости коэффициента изменения интенсивности отказов конденсаторной батареи α_C [6].

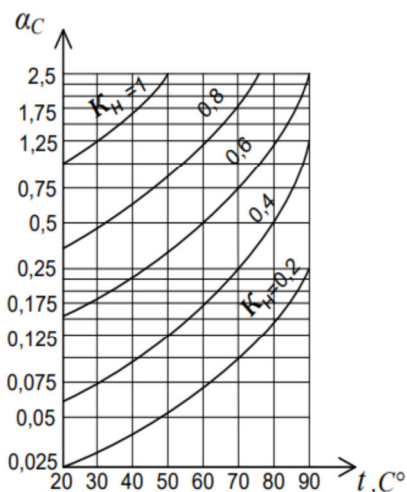


Рис. 5. Коэффициент изменения интенсивности отказов конденсаторной батареи α_C в зависимости от нагрузки и температуры окружающей среды t

Fig. 5. Coefficient of changing failure rate of the capacitor bank α_C depending on the load and ambient temperature t

Полупроводниковые преобразователи. Силовые полупроводниковые элементы

Пробой p - n перехода, возникающий вследствие воздействия повышенного напряжения, является основной причиной выхода из строя полупроводниковых элементов установки.

Величина электрической нагрузки транзистора определяется через коэффициент его нагрузки:

$$K_n = P_p / P_{\text{доп.}}$$

где P_p , $P_{\text{доп.}}$ – рабочая и допустимая величина, рассеиваемая на p - n переходе мощности, соответственно.

На рис. 6 представлены зависимости коэффициента изменения интенсивности отказов транзисторов от электрической нагрузки и температуры окружающей среды [6].

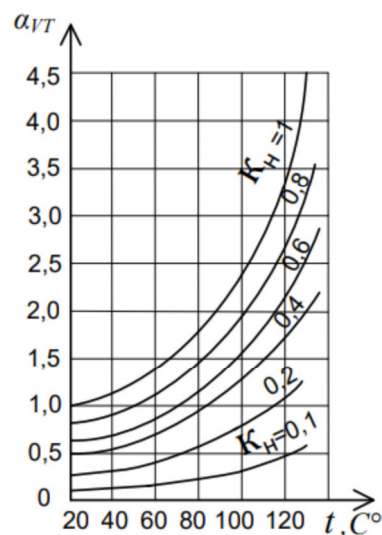


Рис. 6. Коэффициент изменения интенсивности отказов транзисторов $\alpha_{ТТ}$ в зависимости от нагрузки и температуры нагрева t

Fig. 6. Coefficient of changing failure rate of the transistors $\alpha_{ТТ}$ depending on the load and the heating temperature t

Оценка показателей надежности вариантов АДГПЧВ (см. рис. 1, 2) проведена при следующих условиях: температура окружающей среды и температура нагрева полупроводниковых элементов преобразовательных устройств составляет 20 и 60 °С соответственно.

Отметим, что вид нагрузочной диаграммы, который зависит от конкретного режима работы («ходовой», «маневровый», «стояночный» и др.), является определяющим для расчета и оценки показателей надежности судовой электростанции. В статье при расчете показателей надежности в качестве нагрузочной выбрана диаграмма электростанции, представленная на рис. 7. На том же рисунке изображена тахограмма ДВС в составе АДГПЧВ, соответствующая работе на энергоэффективных частотах вращения при долевой нагрузке на электростанцию [10–12]. Тахограмма получена исходя из многопараметровой характеристики ДВС [7, 13, 14]. Частота вращения ДВС в составе классической ДГУ при данной нагрузочной диаграмме неизменна во всем диапазоне нагрузок.

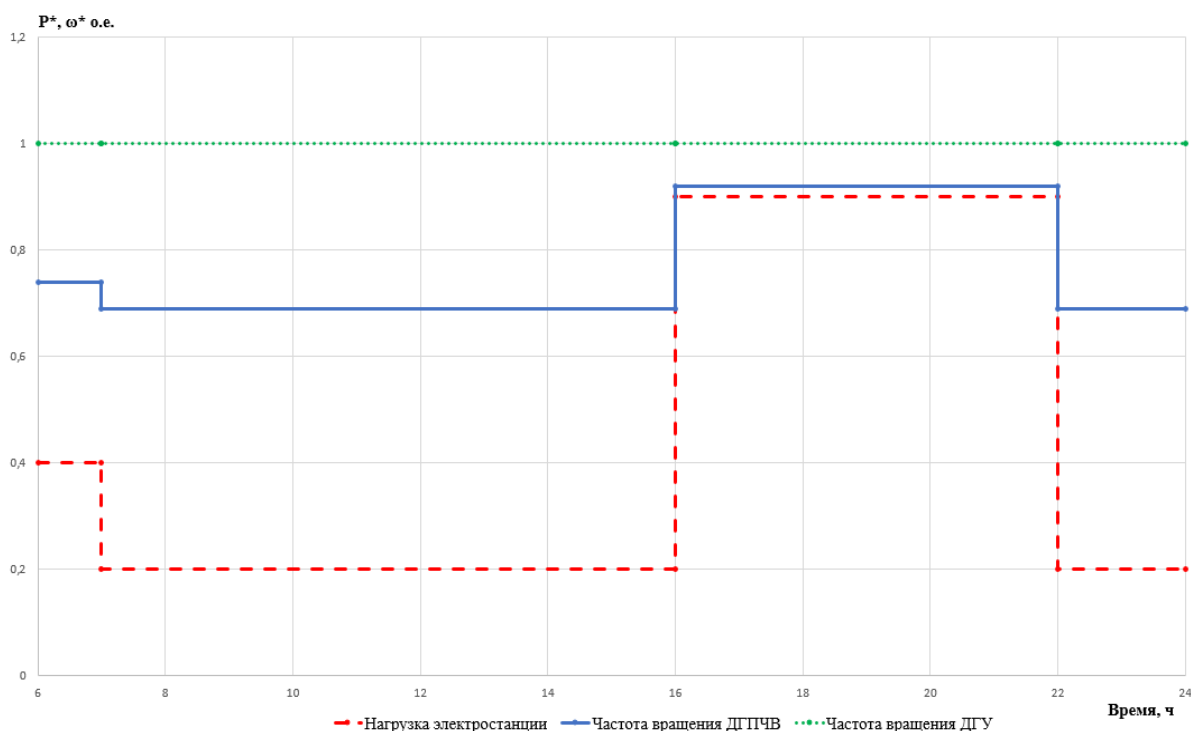


Рис. 7. Нагрузочная диаграмма и тахограммы ДВС

Fig. 7. Load diagram and tachograms of internal combustion engines

Результаты расчета показателей надежности вариантов электростанции приведены в табл. 1–3. Интенсивности отказов преобразовательного (силового) оборудования и элементов системы автоматического регулирования (регуляторов, датчиков и задатчиков параметров режима работы АДГПЧВ) определены суммированием интенсивностей отказов указанных элементов в соответ-

ствии со структурными схемами электростанций (см. рис. 1, 2), зависимостями коэффициентов изменения интенсивности отказов (см. рис. 3–6) и нагрузочной диаграммой (см. рис. 7) согласно выражению

$$\lambda_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \lambda_i.$$

Таблица 1

Table 1

Интенсивности отказов оборудования АДГПЧВ на базе АГКЗ

Failure rates of the AVSDGS equipment based on the asynchronous squirrel-cage generator

Оборудование электростанции	$\lambda_0 \cdot 10^{-6}, \text{ч}^{-1}$	α	$\lambda \cdot 10^{-6}, \text{ч}^{-1}$
ДВС	60,00	0,32	19,2
АГКЗ	30,00	0,38	11,4
Полупроводниковый преобразователь (П ₁ , П ₂)	20,00	1,00	20,00
Фильтр	5,00	0,30	1,50
Регуляторы (Р ₁ , Р ₂)	6,00	1,00	6,00
Датчики (Д ₁ , Д ₂ , Д ₃)	7,00	1,00	7,00
Задатчики (З ₁ , З ₂ , З ₃)	9,00	1,00	9,00
Блок вычисления мощности	3,00	1,00	3,00
АДГПЧВ	$\lambda_{\Sigma} = 76,1 \cdot 10^{-6} \text{ч}^{-1}$		

Таблица 2

Table 2

Интенсивности отказов оборудования АДГПЧВ на базе АГФР
Failure rate of the AVSDGS equipment based on an asynchronous generator with a phase rotor

Оборудование электростанции	$\lambda_0 \cdot 10^{-6}, \text{ч}^{-1}$	α	$\lambda \cdot 10^{-6}, \text{ч}^{-1}$
ДВС	60,00	0,32	19,2
АГФР	35,00	0,38	13,3
Полупроводниковый преобразователь (П ₁ , П ₂)	20,00	1,00	20,00
Фильтр	5,00	0,30	1,50
Регуляторы (Р ₁ , Р ₂ , Р ₃)	9,00	1,00	9,00
Датчики (Д ₁ , Д ₂ , Д ₃)	6,00	1,00	6,00
Задатчики (З ₁ , З ₂ , З ₃)	9,00	1,00	9,00
Блок вычисления мощности	3,00	1,00	3,00
АДГПЧВ	$\lambda_{\Sigma} = 81 \cdot 10^{-6} \text{ч}^{-1}$		

Таблица 3

Table 3

Средняя наработка на отказ вариантов АДГПЧВ
Mean time between failures of AVSDGS variants

Тип электростанции	Средняя наработка на отказ T, ч
АДГПЧВ на базе АГКЗ	13 140
АДГПЧВ на базе АГФР	12 345

В табл. 3 приведены результаты расчета средней наработки на отказ вариантов АДГПЧВ. Согласно приведенным данным среди вариантов АДГПЧВ наибольшей средней наработкой на отказ обладает электростанция на основе АГКЗ. Отметим, что указанные варианты обладают также лучшими надежностными показателями по сравнению с альтернативными синхронными ДГПЧВ, время наработки на отказ у которых по результатам исследования составляет 11 765 ч [1]. При этом АДГПЧВ на базе активных выпрямителей являются бестрансформаторными генераторными комплексами, что значительно снижает их массогабаритные показатели по сравнению с синхронными аналогами [15].

Заключение

В результате проведенного расчета показателей надежности (времени наработки на отказ) АДГПЧВ можно сделать вывод о перспективности разработки и внедрения в энергетические судовые системы асинхронных генераторных комплексов. Оценка надежности вариантов АДГПЧВ с учетом их других эксплуатационных показателей (удельный расход топлива, стоимость генерируемой электроэнергии, масса, габариты) является обоснованием объектно-ориентированного применения генераторных комплексов переменной частоты вращения в малой, в том числе и в судовой, электроэнергетике.

Список источников

1. Дарьенков А. Б. Повышение эффективности автономных генераторных установок на основе ДВС переменной частоты вращения: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Н. Новгород, 2020. 40 с.
2. Хватов О. С. Электротехнические генераторные комплексы переменной частоты вращения на основе машины двойного питания: моногр. Н. Новгород: Изд-во ВГУВТ, 2015. 276 с.
3. Хватов О. С., Тарпанов И. А., Кузнецов П. В. Судовая электроэнергетическая система с обратимой валогенераторной установкой по схеме машины двойного питания и дизель-генератором переменной частоты вращения // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Морская техника и технология. 2021. № 3. С. 93–100.
4. Кузнецов Н. Л. Надежность электрических машин: учеб. пособие. М.: Изд. дом МЭИ, 2006. 432 с.
5. Кузнецов Н. Л. Сборник задач по надежности электрических машин: учеб. пособие. М.: Изд. дом МЭИ, 2008. 408 с.
6. Байков А. И., Бычков Е. В. Надежность электро-механических систем: учеб. пособие. Н. Новгород: Изд-во НГТУ им. Р. Е. Алексеева, 2010. 168 с.
7. Хватов О. С., Дарьенков А. Б., Самоявчев И. С., Поляков И. С. Автономные генераторные установки на основе двигателей внутреннего сгорания переменной частоты вращения: моногр. Н. Новгород: Изд-во НГТУ им. Р. Е. Алексеева, 2016. 172 с.
8. Ермолин Н. П., Жерихин Н. П. Надежность электрических машин. Л.: Энергия, 1976. 248 с.

9. Гольдберг О. Д. Качество и надежность асинхронных двигателей. М.: Энергия. 1968. 176 с.

10. Хватов О. С., Дарьенков А. Б. Единая электростанция транспортного объекта с электродвижением на базе дизель-генераторной установки переменной частоты вращения // *Электротехника*. 2016. № 3. С. 35–40.

11. Хватов О. С., Кобыяков Д. С., Тарпанов И. А. Дизель-генераторная электростанция с вентильным генератором по схеме машины двойного питания // *Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Морская техника и технология*. 2020. № 3. С. 82–90.

12. Хватов О. С., Кобыяков Д. С. Повышение эффективности дизель-генераторной электростанции // *Электротехника*. 2020. № 12. С. 25–31.

13. Обухов С. Г. Повышение эффективности комби-

нированных автономных систем электроснабжения с возобновляемыми источниками энергии: дис. ... д-ра техн. наук. Томск, 2013. 392 с.

14. Орлов А. В., Путянинский В. А., Сапожников В. В. Перспективы создания дизель-электрических установок с переменной частотой вращения // *Судостроение*. 1976. № 10. С. 28–29.

15. Дарьенков А. Б., Поляков И. С., Гузев С. А. Технико-экономический анализ аппаратной реализации дизель-генераторной системы переменной частоты вращения // *Актуальные проблемы электроэнергетики: сб. ст. Всерос. науч.-техн. конф. (Нижний Новгород, 18 декабря 2015 г.)*. Н. Новгород: Изд-во НГТУ им. Р. Е. Алексеева, 2015. 172 с.

References

1. Dar'enkov A. B. *Povyshenie effektivnosti avtonomnykh generatornykh ustanovok na osnove DVS peremennoi chastoty vrashcheniia: avtoref. dis. ... d-ra tekhn. nauk* [Improving efficiency of autonomous generator sets based on variable speed internal combustion engines. Diss. Abstr. ... Dr. Tech. Sci.]. Nizhnii Novgorod, 2020. 40 p.

2. Khvatov O. S. *Elektrotekhnicheskie generatorynye komplekсы peremennoi chastoty vrashcheniia na osnove mashiny dvoynogo pitaniia: monografiia* [Electrotechnical generator complexes of variable speed based on dual power machine: monograph]. Nizhnii Novgorod, Izd-vo VGUVT, 2015. 276 p.

3. Khvatov O. S., Tarpanov I. A., Kuznetsov P. V. Sudovaia elektroenergeticheskaiia sistema s obratimoi valogeneratornoi ustanovkoi po skheme mashiny dvoynogo pitaniia i dizel'-generatorom peremennoi chastoty vrashcheniia [Ship electric power system with reversible shaft-generator installation according to scheme of dual-feed machine and variable speed diesel generator]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriia: Morskaiia tekhnika i tekhnologiia*, 2021, no. 3, pp. 93-100.

4. Kuznetsov N. L. *Nadezhnost' elektricheskikh mashin: uchebnoe posobie* [Reliability of electrical machines: textbook]. Moscow, Izdatel'skii dom MEI, 2006. 432 p.

5. Kuznetsov N. L. *Sbornik zadach po nadezhnosti elektricheskikh mashin: uchebnoe posobie* [Collection of tasks on reliability of electrical machines: textbook]. Moscow, Izdatel'skii dom MEI, 2008. 408 p.

6. Baikov A. I., Bychkov E. V. *Nadezhnost' elektromekhanicheskikh sistem: uchebnoe posobie* [Reliability of electromechanical systems: textbook]. Nizhnii Novgorod, Izd-vo NGTU imeni R. E. Alekseeva, 2010. 168 p.

7. Khvatov O. S., Dar'enkov A. B., Samoiaev I. S., Poliakov I. S. *Avtonomnye generatorynye ustanovki na osnove dvigatelei vnutrennego sgoraniia peremennoi chastoty vrashcheniia: monografiia* [Autonomous generators based on internal combustion engines of variable speed: monograph]. Nizhnii Novgorod, Izd-vo NGTU imeni R. E. Alekseeva, 2016. 172 p.

8. Ermolin N. P., Zherikhin N. P. *Nadezhnost' elektricheskikh mashin* [Reliability of electrical machines]. Leningrad, Energiia Publ., 1976. 248 p.

9. Gol'dberg O. D. *Kachestvo i nadezhnost' asinkhronnykh dvigatelei* [Quality and reliability of asynchronous motors]. Moscow, Energiia Publ., 1968. 176 p.

10. Khvatov O. S., Dar'enkov A. B. *Edinaia elektrostantsiia transportnogo ob'ekta s elektrodvizeniem na baze dizel'-generatornoi ustanovki peremennoi chastoty vrashcheniia* [Unified power plant of transport facility with electric propulsion based on variable speed diesel generator]. *Elektrotekhnika*, 2016, no. 3, pp. 35-40.

11. Khvatov O. S., Kobiakov D. S., Tarpanov I. A. *Dizel'-generatornaia elektrostantsiia s ventil'nym generatorom po skheme mashiny dvoynogo pitaniia* [Diesel-generator power plant with valve generator according to scheme of dual-feed machine]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriia: Morskaiia tekhnika i tekhnologiia*, 2020, no. 3, pp. 82-90.

12. Khvatov O. S., Kobiakov D. S. *Povyshenie effektivnosti dizel'-generatornoi elektrostantsii* [Improving efficiency of diesel generator power plant]. *Elektrotekhnika*, 2020, no. 12, pp. 25-31.

13. Obukhov S. G. *Povyshenie effektivnosti kombinirovannykh avtonomnykh sistem elektrosnabzheniia s vozobnovliaemyimi istochnikami energii: dis. ... d-ra tekhn. nauk* [Improving efficiency of combined autonomous power supply systems with renewable energy sources: Diss. ... Dr. Tech. Sci.]. Tomsk, 2013. 392 p.

14. Орлов А. В., Путянинский В. А., Сапожников В. В. Перспективы создания дизель-электрических установок с переменной частотой вращения [Prospects for building diesel-electric plants with variable speed]. *Судостроение*, 1976, no. 10, pp. 28-29.

15. Dar'enkov A. B., Poliakov I. S., Guzev S. A. *Tekhniko-ekonomicheskii analiz apparatnoi realizatsii dizel'-generatornoi sistemy peremennoi chastoty vrashcheniia. Aktual'nye problemy elektroenergetiki* [Technical and economic analysis of hardware implementation of variable speed diesel generator system. Actual problems of electric power industry]. *Sbornik statei Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii (Nizhnii Novgorod, 18 dekabria 2015 g.)*. Nizhnii Novgorod, Izd-vo NGTU imeni R. E. Alekseeva, 2015. 172 p.

Информация об авторах / Information about the authors

Олег Станиславович Хватов – доктор технических наук, профессор; заведующий кафедрой электротехники и электрооборудования объектов водного транспорта; Волжский государственный университет водного транспорта; khvatov_oleg@mail.ru

Тимур Закарияевич Билялетдинов – аспирант кафедры электротехники и электрооборудования объектов водного транспорта; Волжский государственный университет водного транспорта; tim.bil.99@mail.ru

Павел Вадимович Кузнецов – аспирант кафедры электротехники и электрооборудования объектов водного транспорта; Волжский государственный университет водного транспорта; khvatov_oleg@mail.ru

Дмитрий Константинович Марков – аспирант кафедры электротехники и электрооборудования объектов водного транспорта; Волжский государственный университет водного транспорта; khvatov_oleg@mail.ru

Oleg S. Khvatov – Doctor of Technical Sciences, Professor; Head of the Department of Electric Engineering and Electric Equipment of Water Transport; Volga State University of Water Transport; khvatov_oleg@mail.ru

Timur Z. Bilyaletdinov – Postgraduate Student of the Department of Electric Engineering and Electric Equipment of Water Transport; Volga State University of Water Transport; tim.bil.99@mail.ru

Pavel V. Kuznetsov – Postgraduate Student of the Department of Electric Engineering and Electric Equipment of Water Transport; Volga State University of Water Transport; khvatov_oleg@mail.ru

Dmitriy K. Markov – Postgraduate Student of the Department of Electric Engineering and Electric Equipment of Water Transport; Volga State University of Water Transport; khvatov_oleg@mail.ru

