

4. *Kaganovich B. M.* On the area of equilibrium thermodynamics application / B. M. Kaganovich, A. V. Kelko, V. A. Shamansky, I. A. Shirkalin // Proc. of ASME 2044 International Mech. Eng. Congress. November, 13 – 19. — Anaheim, California, USA — 2004. — С. 197–203.
5. *Сахаров В. В.* Балансовые модели и их применение в автоматизированных системах управления производством / В. В. Сахаров, А. А. Кузьмин // Журнал университета водных коммуникаций. — 2013. — № 1. — С. 46–53.
6. *Иванов Е. Н.* Способ расчета электрических цепей на основе квадратичного программирования / Е. Н. Иванов, А. В. Черничкова, М. Б. Шамсиева // Журнал университета водных коммуникаций. — 2012. — № 4. — С. 67–71.
7. *Каганович Б. М.* Технология термодинамического моделирования. Редукция моделей движения к моделям покоя / Б. М. Каганович, А. В. Кейко, В. А. Шаманский [и др.]. — Новосибирск: Наука, 2010. — 236 с.
8. *Пригожин И. Р.* Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур / И. Р. Пригожин, Д. Кондепуди. — М.: Мир, 2002. — 461 с.
9. *Ottinger H. S.* Beyond Equilibrium Thermodynamics / H. S. Ottinger. — Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2005. — 635 p.
10. *Дьяконов В. П.* Математические пакеты расширения MatLAB. Специальный справочник / В. П. Дьяконов, В. В. Круглов. — СПб.: Питер, 2001. — 480 с.
11. *Ахметзянов А. В.* Структурные модели стационарных процессов в нелинейных сетях / А. В. Ахметзянов, Л. И. Григорьев, С. В. Спиридонов // Информационные технологии и вычислительные системы. — 2007. — № 3. — С. 37–48.
12. *Левин А. А.* Расчет потокораспределения в системе пылеприготовления ТЭС / А. А. Левин, Э. А. Тариров, В. Ф. Чистяков // Математические модели и методы анализа и оптимального синтеза развивающихся трубопроводных и гидравлических систем: сб. науч. тр. / Институт систем энергетики им. Л. А. Меленцева СО РАН. — М., 2010. — С. 114–122.

УДК 629.123:621.31

А. В. Григорьев,
канд. техн. наук, доц.;

Р. Р. Зайнуллин,
соиск.

АНАЛИЗ РЕЖИМОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ СУДОВЫХ ВАЛОГЕНЕРАТОРНЫХ УСТАНОВОК С ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ ЧАСТОТЫ И СИНХРОННЫМИ КОМПЕНСАТОРАМИ

ANALYSIS OF OPERATION MODES OF SHIP SHAFT GENERATOR PLANTS WITH FREQUENCY CONVERTERS AND SYNCHRONOUS COMPENSATORS

На современных транспортных судах широкое распространение получили валогенераторные установки. Применение полупроводниковых преобразователей частоты позволяет расширить их функциональные возможности и реализовать следующие режимы эксплуатации: автономный генераторный, генераторный параллельно с вспомогательными дизель-генераторами, автономный двигательный, двигательный совместно с главным двигателем. В состав традиционной схемы установки входят синхронный валогенератор, полупроводниковый преобразователь частоты и синхронный компенсатор. Анализ режимов ее эксплуатации проведен с использованием методов теории электрического поля и теории электрических цепей, в том числе метода баланса мощностей. В целях повышения технико-экономических показателей и надежности установок с полупроводниковыми преобразователями частоты в различных режимах эксплуатации разработаны требования к виду функции мощности от частоты вращения валогенератора, к рас-

пределению мощности при параллельной работе валогенератора и вспомогательного дизель-генератора, к порядку ввода и вывода оборудования из работы при снижении частоты вращения главного двигателя, к совместной работе полупроводникового преобразователя частоты и синхронного компенсатора и другие. Полученные математические зависимости могут быть использованы при проектировании с целью выбора структуры и параметров оборудования валогенераторных установок и разработке алгоритмов систем автоматического управления и регулирования.

Shaft generator plants got wide spread on modern transport ships. Using of semiconductor frequency converters lets to expand their functional capabilities and to realize following operation modes: single generating, generating in parallel with auxiliary diesel-generators, single driving, driving in combination with main diesel. Traditional scheme of plant consists of synchronous shaft generator, semiconductor frequency converter and synchronous compensator. Analysis of operation modes of plant is made with using of the theory's of electrical field methods and the theory's of electrical circuits methods, including method of power balance. In order to increasing of technical-economical parameters and reliability of plants with semiconductor frequency converters requirements to form of function of power in relationship to rotating speed of shaft generator, to distribution of power in case of parallel operation of shaft generator and auxiliary diesel-generator, to procedure of turning equipment on and off in case of reduction of main diesel's rotation speed, to joint operation of frequency converter and synchronous compensator and others are developed. Received mathematic expressions can be used for justification and choice of structure and parameters of equipment and developing of algorithms of automatic control and regulating systems.

Ключевые слова: валогенератор, валогенераторная установка, преобразователь частоты, потребитель электроэнергии, режим эксплуатации, активная мощность, реактивная мощность, электромагнитный момент, баланс мощностей.

Key words: shaft generator, shaft generator plant, frequency converter, electric consumer, operation mode, active power, reactive power, electromagnetic torque, power balance.

Н А современном морском транспортном флоте широкое распространение получили валогенераторные установки (ВГУ) с синхронным валогенератором (ВГ), полупроводниковыми преобразователями частоты (ППЧ) и синхронными компенсаторами (СК). Установки данного типа производят ведущие мировые электротехнические фирмы, в том числе *Siemens, Convertteam, Rolls-Royce* и др. [1].

Применение ППЧ расширяет функциональные возможности ВГУ, позволяет ВГ работать как в генераторном, так и в двигательном режимах [2], [3].

Основными режимами эксплуатации ВГУ с ППЧ являются:

- автономный генераторный;
- генераторный параллельно с вспомогательными дизель-генераторами (ВДГ);
- автономный двигательный;
- двигательный совместно с главным двигателем (ГД).

Традиционная ВГУ данного типа состоит из синхронного ВГ, СК, ППЧ со звеном постоянного тока на базе ведомого инвертора (ВИ) и управляемого выпрямителя (УВ).

В ходовых режимах ВГУ работают автономно, полностью обеспечивая общесудовые потребители электроэнергией. При автономной работе ВГУ с ППЧ на базе ВИ синхронный ВГ вырабатывает активную мощность $P_{ВГ}$, которая через ППЧ поступает в судовую сеть, питая общесудовые потребители $P_{ЭП}$ и СК $P_{СК}$.

Реактивную мощность, необходимую для коммутации однооперационных тиристоров ведомого инвертора $Q_{ВИ}$ и питания общесудовых потребителей $Q_{ЭП}$, вырабатывает СК $Q_{СК}$. Баланс активных и реактивных мощностей определяется следующей системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} P_{ВГУ} &= P_{ВГ} - P_{СК} \\ Q_{ВГУ} &= Q_{СК} - Q_{ВИ} \\ P_{ППЧ} &= \eta_{ППЧ} \cdot P_{ВГ} \end{aligned} \right\},$$

где $P_{ВГУ}$, $Q_{ВГУ}$ — активная и реактивная мощность ВГУ; $\eta_{ППЧ}$ — КПД полупроводникового преобразователя.

Энергетическая диаграмма активных и реактивных мощностей при автономной работе ВГУ представлена на рис. 1. Активная мощность, вырабатываемая ВГ, зависит от частоты вращения n и электромагнитного момента M . Пренебрегая потерями, можно определить мощность, отдаваемую ВГУ в судовую сеть как

$$P_{ВГ} = M_{ВГ} \cdot n_{ВГ}, \quad (1)$$

где $M_{ВГ}$, $n_{ВГ}$ – электромагнитный момент и частота вращения ВГ.

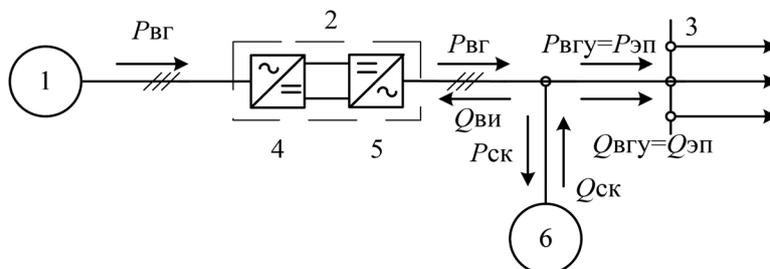


Рис. 1. Диаграмма баланса мощностей при автономной работе традиционной ВГУ с ПП
1 — синхронный ВГ; 2 — ПП; 3 — главный распределительный щит (ГРЩ);
4 — выпрямитель; 5 — ВИ; 6 — СК

Без учета явнополюсной составляющей электромагнитный момент равен

$$M_{ВГ} = \frac{mE_0 I_{ВГ} \cos \psi}{\omega};$$

$$\psi = \angle \vec{E}_0 \vec{U}_{ВГ},$$

где E_0 , $I_{ВГ}$, ω — ЭДС холостого хода, ток и угловая скорость ВГ соответственно; $U_{ВГ}$ — напряжение ВГ.

С учетом того, что $E_0 = k\omega\Phi$, где k — коэффициент, Φ — магнитный поток, получим

$$M_{ВГ} = mk\Phi I_{ВГ} \cos \psi. \quad (2)$$

Выражение (1) показывает, что снижение частоты вращения ВГ приведет к пропорциональному снижению генерируемой мощности. Для поддержания постоянства мощности необходимо увеличить электромагнитный момент ВГ, форсируя магнитный поток генератора обратно пропорционально снижению частоты (формула 2).

При снижении частоты вращения ВГ ниже значения, при котором обеспечивается поддержание постоянства мощности, происходит ограничение тока возбуждения и ВГ регулируется с постоянством $M = \text{const}$. Вырабатываемая мощность в данном случае будет изменяться пропорционально частоте вращения ГД.

На рис. 2 представлена зависимость мощности вырабатываемой ВГ в функции частоты вращения. В диапазоне от 70 до 100 % от номинальной частоты ВГ может работать с номинальной нагрузкой. С уменьшением частоты вращения мощность ВГ ограничивается, и при достижении 30 – 40 % от номинальной величины ВГУ выводится из работы. Ограниченное время возможна работа ВГ с мощностью, несколько превышающей допустимую для данной частоты.

При частоте вращения ВГ ниже 30 – 40 % происходит отключение ВГ. Для того чтобы при дистанционном управлении избежать обесточивания судна, остановка ГД после снижения частоты до минимальной величины осуществляется только после запуска и перевода нагрузки на ВДГ.

В ВГУ с синхронным валогенератором и преобразователем частоты на базе ВИ возможен режим параллельной работы ВГ и ВДГ. Особенность режима параллельной работы ВГУ данного типа состоит в том, что электроэнергию вырабатывают три электрических машины (ЭМ), между которыми распределяется активная и реактивная нагрузка.

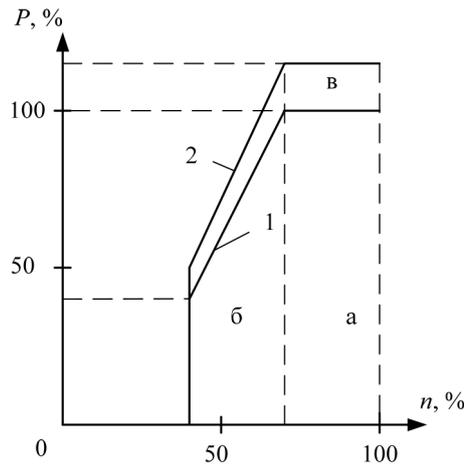


Рис. 2. Зависимость мощности ВГ от частоты вращения вала
1, 2 — продолжительный и кратковременный режимы работы соответственно;
а — без ограничения по мощности; б — с ограничением по мощности;
в — с допустимой кратковременной перегрузкой

При параллельной работе ВГУ и ВДГ активная мощность распределяется между ВГ и СГ, а реактивная – между СК и СГ. При этом справедливы следующие выражения:

$$P_{ЭП} = P_{ВГУ} + P_{ДГ};$$

$$P_{ВГУ} = P_{ВГ} - P_{СК};$$

$$Q_{ЭП} = Q_{ВГУ} + Q_{ДГ};$$

$$Q_{ВГУ} = Q_{СК} - Q_{ВИ};$$

где $P_{ЭП}$, $P_{ВГ}$, $P_{ВГУ}$, $P_{СК}$, $P_{ДГ}$, $Q_{ЭП}$, $Q_{ВГ}$, $Q_{ВГУ}$, $Q_{ДГ}$, $Q_{СК}$ — активные и реактивные мощности соответственно потребителей электроэнергии, ВГ, ВГУ, СК, ВДГ.

Диаграмма распределения мощностей при параллельной работе ВГУ и ВДГ представлена на рис. 3. С целью снижения расхода топлива и себестоимости вырабатываемой электроэнергии распределение активной нагрузки между ВГ и ВДГ производится непропорционально их мощностям. При экономичном режиме ВГ нагружается на номинальную мощность, остальную нагрузку принимает ВДГ. При этом нагрузка на ВДГ не должна быть ниже предельно допустимой для дизеля, что составляет около 30 % от номинальной мощности.

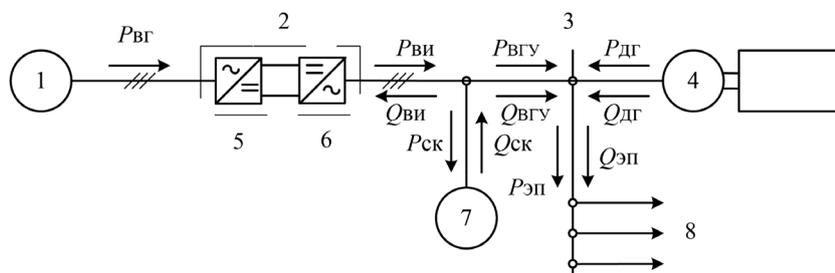


Рис. 3. Диаграмма распределения мощностей при параллельной работе ВГУ и ВДГ
1 — ВГ; 2 — ПП; 3 — ГРЩ; 4 — СГ; 5 — выпрямитель;
6 — ВИ; 7 — СК; 8 — потребители электроэнергии

Распределение активных мощностей между ВГУ и ВДГ происходит в соответствии со следующим законом:

$$\begin{cases} P_{\text{ДГ}} = P_{\text{ЭП}} - P_{\text{ВГ}} \\ P_{\text{ДГmin}} \leq P_{\text{ДГ}} \leq P_{\text{ДГном}} \\ P_{\text{ВГ}} \leq P_{\text{ВГmax}} \\ P_{\text{ВГmax}} = f(n_{\text{ВГ}}) \end{cases} \quad (3)$$

где $P_{\text{ДГmin}}, P_{\text{ДГном}}$ — минимально допустимая и номинальная мощность ВДГ; $P_{\text{ВГmax}}$ — максимальная допустимая мощность ВГ для данной частоты вращения.

На рис. 5 приведены варианты экономичного распределения активной мощности при параллельной работе ВГ и ВДГ в соответствии с законом распределения (3). При уменьшении нагрузки ВДГ разгружается до минимально допустимого уровня, после чего снижается нагрузка ВГ (рис. 4, а). Вариант, когда у ВДГ минимально допустимая нагрузка, а ВГ работает с долевой нагрузкой, представлен на рис. 4, б. При уменьшении частоты вращения ГД происходит ограничение мощности, вырабатываемой ВГ (рис. 4, в), в результате чего происходит перевод нагрузки на ВДГ.

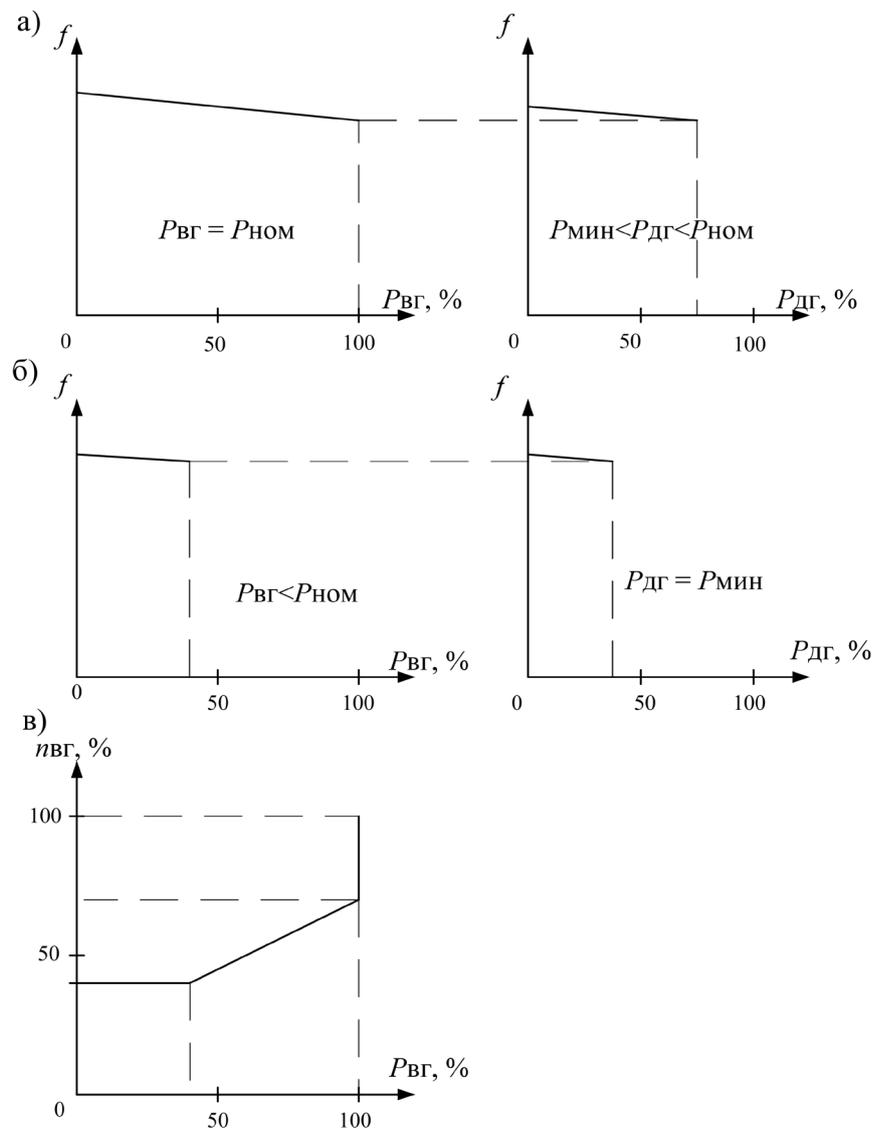


Рис. 4. Экономичное распределение активной мощности при параллельной работе ВГУ и ВДГ
а — номинальная нагрузка ВГ и долевая нагрузка ВДГ;
б — долевая нагрузка ВГ и минимальная нагрузка ВДГ;
в — ограничение мощности ВГ в функции частоты вращения

Одним из достоинств ВГУ на базе ППЧ является возможность реализации двигательного режима работы [4] – [10]. При этом ВГ может работать в качестве гребного электродвигателя (ГЭД) автономно или совместно с ГД. В первом случае ВГ может обеспечивать аварийный ход судна (так называемый режим «Power Take Home», или «РТН»). Совместная работа с ГД на винт используется для увеличения скорости судна и компенсации колебания момента нагрузки.

Двигательный режим работы ВГ может быть реализован при использовании обратимого ППЧ, к которому, в частности, относится двухзвенный ППЧ на базе УВ и ВИ, а также непосредственные ППЧ (циклоконверторы). Векторная диаграмма синхронного ВГ, работающего в двигательном режиме с перевозбуждением, представлена на рис. 5.

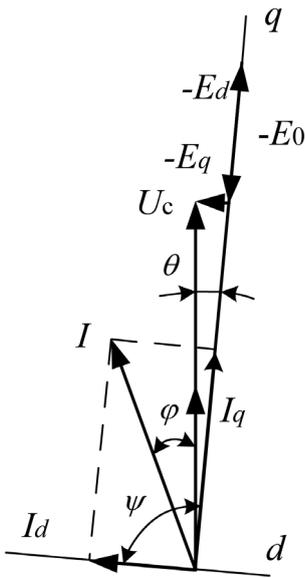


Рис. 5. Векторная диаграмма синхронного ВГ, работающего в двигательном режиме

При работе в двигательном режиме ВГ потребляет из сети активную мощность, вырабатываемую ВДГ. Реактивная мощность для коммутации тиристоров ППЧ поступает от ВГ и ВДГ.

Энергетическая диаграмма для двигательного режима работы синхронного ВГ с ВИ представлена на рис. 6. Активную мощность для питания ВГ $P_{ВГ}$ и потребителей электроэнергии $P_{ЭП}$ вырабатывает ВДГ $P_{ДГ}$. Для повышения $\cos\phi$ в судовой сети в данном режиме может работать СК, вырабатывающий реактивную мощность $Q_{СК}$, что снижает токовую нагрузку на синхронный генератор ВДГ. При этом выполняются следующие равенства:

$$P_{ДГ} = P_{ВГУ} + P_{ЭП};$$

$$P_{ВГУ} = P_{ВГ} + P_{СК};$$

$$Q_{ЭП} = Q_{ВГУ} + Q_{СК};$$

$$Q_{ВГУ} = Q_{СК} - Q_{ППЧ};$$

где $P_{ЭП}$, $P_{ВГУ}$, $P_{ВГ}$, $P_{ДГ}$, $P_{СК}$, $Q_{ЭП}$, $Q_{ВГУ}$, $Q_{ВГ}$, $Q_{СК}$, $Q_{ППЧ}$ — соответственно активная и реактивная мощность потребителей электроэнергии, ВГУ, ВГ, ВДГ, СК, ППЧ.

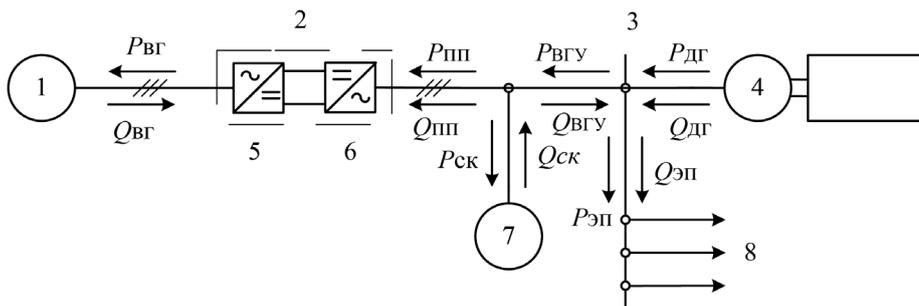


Рис. 6. Диаграмма распределения мощностей при работе синхронного ВГ с ПП на базе ВИ в двигательном режиме
 1 – ВГ; 2 – ППЧ; 3 – ГРЩ; 4 – СГ; 5 – УВ; 6 – ВИ; 7 – СК; 8 – потребители электроэнергии

В современных ВГУ наибольшее применение нашли ППЧ со звеном постоянного тока [11], [12] на базе ВИ и значительно реже — с непосредственной связью. Данные ППЧ охватывают практически весь диапазон мощностей судовой силовой преобразовательной техники. Их силовые схемы, как правило, строятся на основе однооперационных тиристоров.

Среди недостатков ППЧ на базе однооперационных вентилях, используемых в составе современных ВГУ, следует отметить:

- применение сетевой коммутации;

- сложность технической реализации защиты от аварийных режимов;
- низкое качество электроэнергии в судовой сети;
- сложность осуществления коммутации тиристорov ВИ при пуске ВГ, работающего в двигательном режиме.

К недостаткам традиционных полупроводниковых вентиляей относятся: неполная управляемость и низкая рабочая частота у однооперационных тиристорov, значительная мощность управления и сравнительно низкая надежность у биполярных транзисторov.

Выводы

1. Применение ППЧ позволяет расширить функциональные возможности ВГУ и реализовать следующие режимы эксплуатации:

- автономный генераторный;
- генераторный параллельно с вспомогательными дизель-генераторами (ВДГ);
- автономный двигательный;
- двигательный совместно с главным двигателем (ГД).

2. В целях повышения технико-экономических показателей и надежности ВГУ с ППЧ в различных режимах эксплуатации разработаны требования к зависимости мощности от частоты вращения ВГ, к распределению мощности при параллельной работе ВГ и ВДГ, к порядку ввода и вывода оборудования из работы при снижении частоты вращения ГД, к совместной работе ППЧ и СК и др.

3. Полученные математические зависимости могут быть использованы при проектировании с целью выбора структуры и параметров оборудования ВГУ и разработке алгоритмов систем автоматического управления и регулирования.

Список литературы

1. Григорьев А. В. Современные и перспективные судовые валогенераторные установки: монография / А. В. Григорьев, В. А. Петухов. — СПб.: Изд-во ГМА им. адм. С. О. Макарова, 2009. — 176 с.
2. Григорьев А. В. Судовые комбинированные пропульсивные установки / А. В. Григорьев // Морской флот. — № 2. — 2013. — С. 50–52.
3. Григорьев А. В. Судовые валогенераторные установки нового поколения на базе обратимых полупроводниковых преобразователей / А. В. Григорьев, Р. Р. Зайнуллин // Морской вестник. — 2013. — № 2 (11). — С. 36–38.
4. Григорьев А. В. Электроэнергетические установки танкеров-газовозов / А. В. Григорьев, Р. Р. Зайнуллин // Судостроение. — 2010. — № 3. — С. 39–42.
5. Зайнуллин Р. Р. Стендовые испытания судовых систем электродвижения / Р. Р. Зайнуллин, А. В. Григорьев, Е. А. Глеклер // Измерения и испытания в судостроении и смежных отраслях. СУДОМЕТРИКА-2010: тезисы докладов Третьей Всероссийской научно-технической конференции. — СПб.: Судометрика. — 2010. — С. 42–44.
6. Григорьев А. В. Схемные решения перспективных низковольтных судовых систем электродвижения / А. В. Григорьев, В. В. Романовский, Р. Р. Зайнуллин // Эксплуатация морского транспорта. — 2010. — № 4 (62). — С. 76–78.
7. Григорьев А. В. Схемотехнические решения перспективных электроэнергетических установок танкеров-газовозов / А. В. Григорьев, Р. Р. Зайнуллин // Науч.-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и курсантов. Тезисы докладов. ГМА им. адм. С. О. Макарова. — СПб.: Северная звезда. — 2010. — С. 122–125.
8. Григорьев А. В. Низковольтные судовые системы электродвижения // Науч.-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и курсантов. Тезисы докладов. ГМА им. адм. С. О. Макарова / А. В. Григорьев, Р. Р. Зайнуллин. — СПб.: Северная Звезда. — 2011. — С. 179–180.

9. Григорьев А. В. Целесообразность применения СЭД на судах вспомогательного флота / А. В. Григорьев, В. И. Штрамбранд, Р. Р. Зайнуллин // Морской флот. — 2014. — № 4. — С. 38–40.

10. Григорьев А. В. Анализ возможности и целесообразности применения систем электродвижения на судах вспомогательного флота / А. В. Григорьев, Р. Р. Зайнуллин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 5 (27). — С. 40–46.

11. Григорьев А. В. Опыт проектирования и результаты испытаний судового полупроводникового преобразователя частоты на новой элементной базе / А. В. Григорьев, Ю. А. Кулагин, Р. В. Митрофанов // Эксплуатация морского транспорта. — 2011. — № 1 (63). — С. 53–58.

12. Григорьев А. В. Анализ отказов и аварийных режимов преобразователя частоты гидрографического судна «Вайгач» / А. В. Григорьев, Д. И. Улитовский // Эксплуатация морского транспорта. — 2011. — № 2 (64). — С. 41–46.

УДК 621.37К

Е. Г. Барщевский,
канд. техн. наук, проф.

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ГЕНЕРАТОРНЫХ АГРЕГАТОВ НА ПАРАМЕТРЫ МОДУЛИРОВАННОГО НАПРЯЖЕНИЯ ГЕНЕРАТОРА

INFLUENCE OF DESIGN FEATURES GENSER ON PARAMETERS MODULATED VOLTAGE GENERATOR

В статье рассматривается влияние конструктивных особенностей генераторных агрегатов, в частности, несоосности и гибкости валов, эллипсности валов, дефектов подшипников, производственных и монтажно-производственных допусков в редукторах на низкочастотную модуляцию напряжения генераторных агрегатов. Показано, как определить наличие несоосности валов генераторных агрегатов, степень влияния несоосности валов на низкочастотную модуляцию и пути минимизации этого влияния. В статье показано, что для уменьшения влияния производственных и монтажно-производственных допусков, целесообразно выбирать двигатели с более высокой скоростью вращения и отдавать предпочтение одновальным агрегатам. В статье рассматриваются вопросы повышения качества напряжения судовых электроэнергетических систем. С целью уменьшения влияния неуравновешенных масс, несоосности валов, эллипсности шеек предлагается выбирать первичные двигатели с более высокой скоростью вращения.

The influence of design features of generating units, in particular, shaft misalignment and shaft flexibility, shaft ellipticity, defects of bearings, production tolerances and assembly and manufacturing tolerances in reducers on the low-frequency modulation of voltage of the generating units is considered in the article. It is shown how to identify the presence of shaft misalignment of generating units, the degree of influence of shaft misalignment on the low-frequency modulation and ways to minimize this impact. The paper shows that in order to reduce the impact of production tolerances and assembly and manufacturing tolerances it is advisable to choose engines with higher speed, preferring single-shaft units. In general the questions of quality improvement of tension of ship electrical power systems are considered in article. For the purpose of reduction of unbalanced masses influence, shaft misalignment, necks ellipticity it is offered to choose primary engines with higher speed of rotation.

Ключевые слова: амплитудно-частотная модуляция, несоосность валов, дефекты подшипников, низкочастотная модуляция, демпферная обмотка.

Key words: chastotnaya sampling analogue modulation, shaft misalignment, bearing defekty, low-frequency modulation damper.