

- ence and, Exposition GT2014. June 16 – 20, 2014, Düsseldorf, Germany.
7. Kashin Ya.M., Kopelevich L.E., Samorodov A.V., Shkoda V.V., Sidorenko V.S. Treatment and rehabilitation complex based on axial electromechanical power converter. // Вестник Адьгейского государственного университета. Серия 4: Естественно-математические и технические науки.– 2018.– № 3 (226).– С. 162-166.
 4. Tse P., Peng Y., Yam R. Wavelet Analysis and Envelope Detection For Rolling Element Bearing Fault Diagnosis—Their Effectiveness and Flexibilities. Journal of Vibration and Acoustics. 2001. Vol. 123. Pp 303-310. DOI: 10.1115/1.1379745.
 5. Bently D.E., Hatch C.T. “Fundamentals of rotating Machinery Diagnostics”, Bently Pressurized Press, 2002, P.726.
 6. Balducchi F., Arghir M., Gaudillere S. Experimental analysis of the unbalance response of rigid rotors supported on aerodynamic foil bearings. Proceedings of ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and, Exposition GT2014. June 16 – 20, 2014, Düsseldorf, Germany.
 7. Kashin Ya.M., Kopelevich L.E., Samorodov A.V., Shkoda V.V., Sidorenko V.S. Treatment and rehabilitation complex based on axial electromechanical power converter. // Vestnik Adygejskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 4: Estestvenno-matematicheskie i tekhnicheskie nauki. 2018. № 3 (226). S. 162-166.

References

1. Razvitie mirovogo sudohodstva [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://maritime-zone.com/articles/razvitie%20mirovogo%20sudohodstva> (data obrashcheniya 20.11.2020).
2. Registrovaya kniga sudov Rossijskogo morskogo registra sudohodstva [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://www.rs-class.org/ru/regbook/> (data obrashcheniya 20.12.2020).
3. Kornilov E.V., i dr. Sudovye glavnye dvigateli s elektronnyim upravleniem. Odessa: Ekspres-Reklama, 2010. 224s.

УДК 629.123

DOI: 10.34046/aumsuomt99/15

ГИБРИДНЫЕ СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ*С.А. Казанов, аспирант*

Объектом исследования являются гибридные судовые энергетические установки (ГСЭУ) различных надводных судов, их достоинства и недостатки. Целью статьи является анализ современного состояния ГСЭУ и их возможное использование для достижения целей по оптимизации энергоэффективности, экономичности и соблюдения экологических норм, в соответствии с стратегией, принятой Международной морской организацией (ИМО). Кратко изложены возросшие требования по эмиссии парниковых газов, рассмотрены принципы работы ГТЭУ и возможные варианты их использования. Приведены результаты исследований и практического использования ГТЭУ для достижения целей в повышении экономичности и снижения эмиссии парниковых газов. Исследованы возрастающие требования по экологичности судовых энергетических установок, рассмотрены принципы работы ГСЭУ и их практическое применения для достижения результатов по оптимизации затрат и повышения экологичности СЭУ. Заключение. Сформулированы обоснованные выводы о возможности использования ГСЭУ при проектировании новых судов и модификации имеющихся.

Ключевые слова: гибридная, судовая, энергетическая, установка, снижение выбросов, повышение энергоэффективности

HYBRID SHIP POWER PLANTS*S.A. Kazanov*

The object of research is hybrid ship power plants (GSEU) of various surface ships, their advantages and disadvantages. The purpose of the article is to analyze the current state of the SEP and their possible use to achieve the goals of optimizing energy efficiency, economy and compliance with environmental standards, in accordance with the strategy adopted by the International Maritime Organization (IMO). The increased requirements for emissions are briefly stated greenhouse gases, considered the principles of operation of the GTEU and possible options for their use. The results of research and practical use of GTEU for achieving goals in increasing the efficiency and reducing greenhouse gas emissions are presented. The increasing requirements for the environmental friendliness of ship power plants are investigated, the principles of operation of the SSEEU and their practical application to achieve results in optimizing costs and improving the environmental friendliness of the SEP are considered. Conclusion. Reasonable conclusions about the possibility of using the GSEU in the design of new ships and modification of existing ones are formulated.

Keywords: hybrid, marine, power plant, emission reduction, energy efficiency increase

Глобальные тенденции на снижение количества выбросов в атмосферу и оптимизация затрат на топливо оказывают существенное влияние на развитие судовой энергетики и конструкции судовых энергетических установок.

В апреле 2018 года Международной морской организацией (ИМО) была принята первоначальная стратегия, направленная на сокращение к 2050 году, по меньшей мере на 50%, по сравнению с 2008 годом, общего объема ежегодных выбросов парниковых газов с судов [1].

ИМО прилагает большие усилия для снижения выбросов в судоходстве. Вводятся нормы и ограничения по количеству генерируемых парниковых газов в зависимости от мощности двигателя. Например, судовые дизельные двигатели, условно относящиеся к уровню 2, установленные после января 2011, ограничены 7.7 г/кВтч для высокооборотистых двигателей и 14.4 г/кВтч для низкооборотистых двигателей. С января 2016 для двигателей, условно относящихся к уровню 3, эти лимиты снижены до уровня 2.0 г/кВтч и 3.4 г/кВтч соответственно [2]. Данные лимиты установлены именно для двигателей, а не для судна в целом, однако, учитывая опыт в автомобилестроении, в скором будущем, возможно, лимиты будут установлены из расчета в зависимости от пройденного пути [3].

Кроме того, ИМО определили лимиты индекса прогнозируемой энергоэффективности (ИПЭ) для новых судов. ИПЭ - это мера количества выброса CO₂, которое производит судно на тонну полезной нагрузки на милю пути. Новые грузовые суда должны снизить ИПЭ с 10%, по сравнению с эталоном, представленным в 2013 году, до 30% в 2030 году. Схожие требования подготавливаются и для других типов судов.

Следовательно, судовые энергетические установки для будущих судов должны значительно повысить энергоэффективность и снизить количество выбросов в ближайшие годы.

Современные достижения в области гибридных судовых энергетических установок (ГСЭУ) показывают эффективные пути достижения этих целей.

В своих исследованиях в области использования батарей и интеллектуальные системы распределения нагрузок и генерации в гибридных судовых энергетических установках, Р.Д. Гиртсма, установил, что умные системы управления энергетикой судна позволяют снизить расход топлива и, соответственно выбросы [4]. Типичная схема регулирования генерации представлена на рисунке 1.

Третичное регулирование:

Вторичное регулирование:

Первичное регулирование:

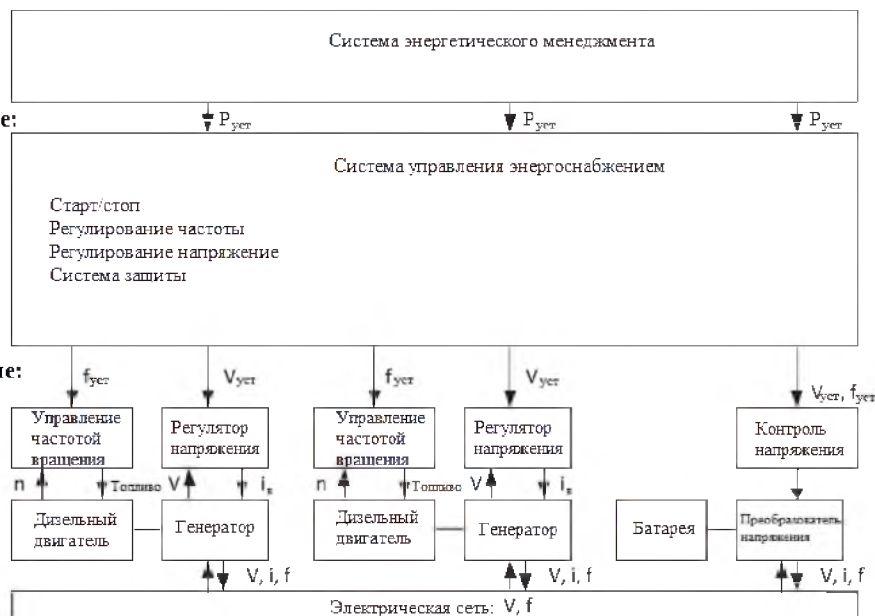


Рисунок 1 – Схема регулирования генерации

Трудности достижения оптимального баланса по выработке энергии для нужд судна и движения ведут к дополнительным энергетическим потерям. Также, потери энергии, генерируе-

мой двигателем на преобразование в электроэнергию в системе электродвижения, приводят к повышенному расходу топлива [5], и, соответственно, к экономическим потерям и увеличению

эмиссии парниковых газов. Необходимость использовать дополнительное оборудование также приводит к увеличению веса, размеров и стоимости [6]. В качестве выход из данной ситуации можно использовать возможность оборудовать суда гибридной силовой установкой.

На рисунке 2 представлена схема гибридной судовой энергетической установки. В ГСЭУ **основной двигатель (1)** обеспечивает движение с высокой эффективностью на высоких скоростях. **Электродвигатель/генератор (2)**, который соединен основным приводом через **редуктор (3)** или непосредственно с валом, приводящим в движение **гребной винт**, обеспечивает движение на

низких скоростях, что позволяет избежать неэффективной работы основного двигателя при частичной нагрузке. Этот двигатель также может быть использован в качестве генератора для систем **электропитания судна (4)**. Кроме того, в типичной схеме гибридной энергоустановки присутствуют **дополнительные генераторы (5)**, вырабатывающие энергию для работы электродвигателя и обеспечения судна электроэнергией и, если это предусмотрено, генерацией энергии для накопления в аккумуляторных блоках. Управление работой двигателей и генерацией осуществляется в главном **коммутаторе (6)**. Преобразование электроэнергии осуществляется в **конвертере (7)**.

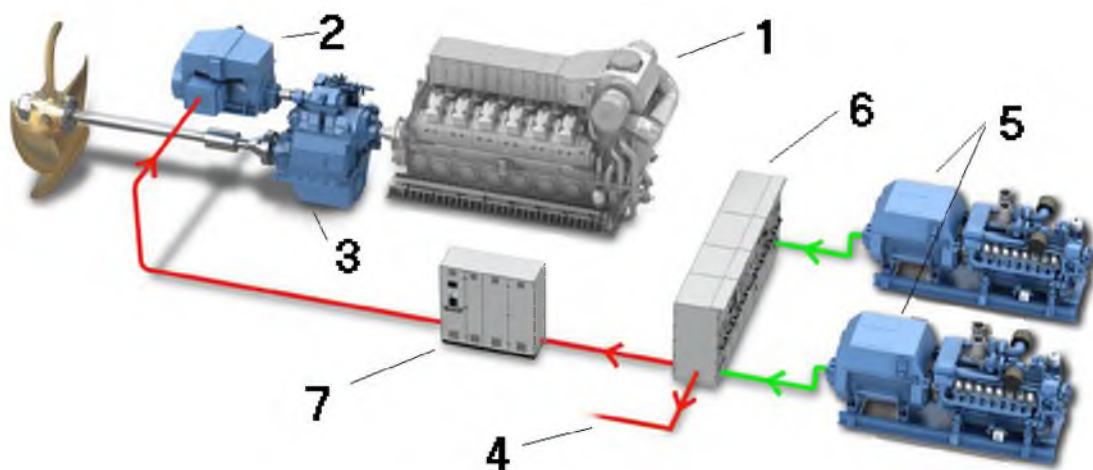


Рисунок 2 – Типичная схема гибридной судовой энергетической установки

Когда основная энергетическая установка работает, такое исполнение позволяет генерировать мощность либо от электрического генератора, либо от генераторных установок. Как правило, управление распределением нагрузок такой системы осуществляется программно (с помощью алгоритмов управления) или вручную оператором. Типичные режимы работы ГСЭУ:

а) Генераторы (5) отключены. Основной двигатель (1) вращает винт через редуктор (3). Электродвигатель (2) выступает в роли генератора энергии и вырабатывает энергию для нужд судна.

б) Режим форсажа. Основной двигатель (1) и электродвигатель (2) вращают винт через редуктор (3). Генераторы (5) вырабатывают энергию для электродвигателя. В таком режиме достигается максимальная скорость.

в) Режим маневрирования. Основной двигатель (1) выключен. Электродвигатель (2) вращает винт через редуктор (3) за счет генерации электроэнергии в электрогенераторах (5).

Поскольку гибридный привод представляет собой комбинацию электрического и механического привода, он может получить преимущества от обоих. Однако для достижения этих преимуществ требуется правильная конструкция ГСЭУ, и часто приходится искать компромисс. Многое зависит от алгоритмов управления. Именно гибкая система управления позволяет оптимизировать работу гибридной системы в зависимости от текущих требований по передаче энергии, от крутящего момента основного вала к генератору и от электродвигателя на основной вал.

Типичные области применения гибридных силовых и двигательных систем - это морские фрегаты и эсминцы [7], буксирующие суда [8] и морские суда [9]. Например, судно MS Goblin при той же производительности за счет применения гибридных систем потребляет на 12,5% меньше топлива. Сокращение использования главных двигателей существенно уменьшило затраты на техобслуживание [10]. Аналогичные показатели у судна MS Nadorias: экономия топлива более 15%,

снижение стоимости обслуживания на 60% и как следствие, существенное снижение выбросов и шума двигателей (с 60 дБ до 42 дБ) [11].

В статье, представленной Мишель Вейсмюллер и Тейс Хасселаар, проводится сравнение экономических преимуществ ряда гибридных силовых установок для буксировщика. При средней рабочей нагрузке этого судна среднее использование основного двигателя составляет около 20% или менее при 90% всего рабочего времени. Наиболее экономически эффективная конфигурация силовой установки была бы гибридная силовая установка с основным двигателем (поддерживают среднюю курсовую скорость (45% рабочего времени)) и электродвигателем (для работы на низкой скорости (45% рабочего времени)) на каждом валу [8]. В тематических исследованиях по применению гибридных силовых установок на морских судах, представленных Ренато Барцеллос, сделаны выводы, что гибридная силовая установка позволяет добиться высокой эффективности в условиях больших транзитных расстояний в сочетании с жесткими требованиями к операциям динамического позиционирования. Тепловой двигатель может быть использован для эффективного передвижения и электродвигатель для работы с динамическим позиционированием. Таким образом, топливная эффективность была повышена на 10%. Результаты этих исследований подтверждают, что гибридная силовая установка с использованием различных режимов со значительным временем работы на низкой мощности, более экономична [9].

Текущие стратегии управления, применяемые на практике и описанные в литературе по ГСДУ, основаны на двух режимах работы: основной привод и электрический привод. В режиме основного привода электродвигатель можно:

- а) Отключить;
- б) Использовать в качестве электрического вспомогательного двигателя;
- в) Использовать в качестве генератора.

Электродвигатель может работать как генератор, если основной двигатель имеет достаточный запас свободной мощности. В ВМС Италии на фрегатах FREMM, благодаря использованию газотурбинной установки в качестве основного двигателя, максимальная мощность доступна при любой частоте вращения основного вала. Таким образом, всегда доступен достаточный запас мощности, если только корабль не движется с максимальной скоростью при режимах нагрузки, превышающих проектные. Основная стратегия управления, применяемая к генератору

- это управление скоростью и напряжением для предотвращения просадки выработки электроэнергии и поддержания постоянного напряжения [7]. Благодаря использованию системы управления скоростью и напряжением, нагрузка распределяется равномерно между генератором основного двигателя и дизель - генераторами. Однако, в данной ситуации мы можем не достичь оптимальных режимов работы, которые теоретически возможны, так как газовая турбина справляется с динамическими нагрузками гораздо лучше, чем дизель-генератор. В качестве альтернативы лучше использовать дизель - генератор в статическом, оптимальном режиме работы, а электропривод основного двигателя в динамическом режиме работы, что позволит газовой турбине брать на себя динамические нагрузки и оптимизировать распределение нагрузок в системе.

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод что гибридные судовые энергетические установки имеют большой потенциал для внедрения и использования при проектировании новых российских судов и модификации уже имеющихся, как с точки зрения энергоэффективности и экономичности, так и с точки зрения соблюдения экологических норм, в соответствии с стратегией, принятой ИМО. Распределение нагрузок и возможность работы на оптимальных оборотах двигателя в различных ситуациях позволяют существенно повысить межсервисный интервал, что также ведет к экономии. Благодаря возможным различным схемам использования двигателей (отключение основного двигателя или генераторов; использования форсажа, при котором совместно работают тепловой и электродвигатели) также возможно повышение живучести судна.

Литература

1. Review of Maritime Transport 2018, UNCTAG
2. IMO. International convention for the prevention of pollution from ships (MARPOL) annex VI. Consolidated edition. IMO; 2011.
3. Ko J, Jin D, Jang W, Myung C-L, Kwon S, Park S. Comparative investigation of NOx emission characteristics from a Euro 6-compliant diesel passenger car over the NEDC and WLTC at various ambient temperatures. Appl Energy 2017
4. R.D. Geertsma et al. / Applied Energy 194 (2017)
5. McCoy TJ. Trends in ship electric propulsion. In: Proceedings of the IEEE power engineering society transmission and distribution conference, vol. 1; 2002
6. Gemmell G, McIntyre B, Reilly M. Is IFEP a realistic future propulsion system for flexible frigates and destroyers? In: Proceeding of the 12th international naval engineering conference. Amsterdam, the Netherlands; 2014.

7. Sulligoi G, Castellan S, Aizza M, Bosisch D, Piva L, Lipardi G. Active front-end for shaft power generation and voltage control in FREMM frigates integrated power system: Modelling and validation. In: Proceedings of the 21st international symposium on power electronics, electrical drives, automation and motion. Sorrento, Italy; 2012
8. Wijsmuller M, Hasselaar T. Optimisation of the propulsion arrangement in emergency towing vessels. In: Ship and boat international; September/October 2007.
9. Barcellos R. The hybrid propulsion system as an alternative for offshore vessels servicing and supporting remote oil field operations. In: Proceedings of the annual offshore technology conference, vol. 3; 2013
10. High-efficiency hybrid catapults MS Goblin to the forefront in bulk carrier shipping propulsion, 2017, <https://www.danfoss.com/en/service-and-support/case-studies/dds/high-efficiency-hybrid-catapults-ms-goblin-to-the-forefront-in-bulk-carrier-shiping-propulsion/>
11. Hybrid retrofit delivers 15% fuel saving, 2016, <https://www.danfoss.com/en/service-and-support/case-studies/dds/hybrid-retrofit-delivers-15-fuel-savings>
4. R.D. Geertsma et al. / Applied Energy 194 (2017)
5. McCoy TJ. Trends in ship electric propulsion. In: Proceedings of the IEEE power engineering society transmission and distribution conference, vol. 1; 2002
6. Gemmell G, McIntyre B, Reilly M. Is IFEP a realistic future propulsion system for flexible frigates and destroyers? In: Proceeding of the 12th international naval engineering conference. Amsterdam, the Netherlands; 2014.
7. Sulligoi G, Castellan S, Aizza M, Bosisch D, Piva L, Lipardi G. Active front-end for shaft power generation and voltage control in FREMM frigates integrated power system: Modelling and validation. In: Proceedings of the 21st international symposium on power electronics, electrical drives, automation and motion. Sorrento, Italy; 2012
8. Wijsmuller M, Hasselaar T. Optimisation of the propulsion arrangement in emergency towing vessels. In: Ship and boat international; September/October 2007.
9. Barcellos R. The hybrid propulsion system as an alternative for offshore vessels servicing and supporting remote oil field operations. In: Proceedings of the annual offshore technology conference, vol. 3; 2013
10. High-efficiency hybrid catapults MS Goblin to the forefront in bulk carrier shipping propulsion, 2017, <https://www.danfoss.com/en/service-and-support/case-studies/dds/high-efficiency-hybrid-catapults-ms-goblin-to-the-forefront-in-bulk-carrier-shiping-propulsion/>
11. Hybrid retrofit delivers 15% fuel saving, 2016, <https://www.danfoss.com/en/service-and-support/case-studies/dds/hybrid-retrofit-delivers-15-fuel-savings>

REFERENCES

1. Review of Maritime Transport 2018, UNCTAG
2. IMO. International convention for the prevention of pollution from ships(MARPOL) annex VI. Consolidated edition. IMO; 2011.
3. Ko J, Jin D, Jang W, Myung C-L, Kwon S, Park S. Comparative investigation of NOx emission characteristics from a Euro 6-compliant diesel passenger car over the NEDC and WLTC at various ambient temperatures. Appl Energy 2017

DOI: 10.34046/aumsuomt99/16

ПЕРСПЕКТИВА РАЗВИТИЯ И ПРОБЛЕМЫ АВТОНОМНЫХ ГРУЗОВЫХ СУДОВ

А.И. Епихин, кандидат технических наук, доцент

Е.В. Зарубин, курсант

В.С. Мачек, курсант

Е.Г. Лебединский

В статье рассмотрена проблема внедрения разработок конструкторских и технических решений в плане перехода к безэкипажным судам торгового флота. Рассмотрены режимы работы, которыми должны будут обладать безэкипажные суда. Затронута проблема предполагаемых аварий, которым будут подвержены эти суда и их страхования. Оценен предполагаемый объем инвестиций в технологии искусственного интеллекта в течение ближайших лет на основании опроса, проведенного Navis. Рассмотрена одна из основных проблем, связанных с эксплуатацией БЭС - это их безопасность. Ожидается, что это будет достигнуто за счет снижения частоты несчастных случаев на борту судов, связанных с «человеческим фактором», путем простого удаления экипажей. Для этого была проведена оценка рисков, основанная на использовании двухэтапного анализа, поддерживаемого методом анализа человеческого фактора и системы классификации морских аварий (HFACS-MA). Было проанализировано 100 морских аварий с участием 119 судов на основе общедоступных отчетов о расследованиях для распределения количества аварий по фазам рейса.

Ключевые слова: безэкипажное торговое судно, авария, безопасность, режим работы, статистика.