

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ДЛЯ СУДОВ С СИСТЕМАМИ ЭЛЕКТРОДВИЖЕНИЯ

Вопрос о целесообразности применения высоковольтных электростанций для судов с системами электродвижения (СЭД) мощностью более 15 МВт весьма актуален и решается на стадии проектирования судна. В статье проведен анализ применения низковольтных электростанций в составе единых электроэнергетических систем (ЕЭЭС) с СЭД мощностью свыше 16 МВт. На примере судна-снабженца рассмотрены два варианта схемотехнических решений построения ЕЭЭС с СЭД с использованием низковольтного и высоковольтного оборудования. Для вышеуказанных вариантов приведены массы и габариты главных распределительных устройств (ГРУ) и кабельных трасс для участков между наиболее мощными потребителями ЕЭЭС. Представлен краткий сравнительный анализ низковольтных и высоковольтных судовых электростанций (СЭС), рассмотрены основные преимущества высоковольтных СЭС, среди которых следует отметить снижение токов главных дизель-генераторов (ГДГ) и сборных шин, значительное уменьшение токов короткого замыкания, снижение сечения и массы кабельных трасс, улучшение массогабаритных показателей ГРУ, уменьшение количества секций распределительных щитов и автоматических выключателей. Дана оценка влияния уровня напряжения на технико-эксплуатационные показатели оборудования. Указаны причины, благодаря которым в настоящее время низковольтные СЭС на судах с СЭД мощностью от 10 до 16 МВт имеют более широкое распространение, чем высоковольтные. Указаны основные недостатки применения высоковольтных электростанций. Проведен первичный критериальный анализ мощности электростанции, позволяющий определить целесообразность применения высоковольтной ЕЭЭС. На основе результатов сравнения двух вариантов исполнения ЕЭЭС с СЭД показано, что применение высоковольтной СЭС на 6,3 кВ является технически обоснованным и перспективным и имеет ряд существенных преимуществ.

Ключевые слова: судовая электростанция, единая электроэнергетическая установка, единая электроэнергетическая система, система электродвижения, гребная электрическая установка.

Введение

На современном этапе развития мирового судостроения единые электроэнергетические системы (ЕЭЭС) с системами электродвижения (СЭД) находят все более широкое применение на морском и речном транспорте. Мощность судовой электростанции (СЭС) на некоторых судах с СЭД может превышать 20 МВт. В связи с этим возникает вопрос об использовании в составе ЕЭЭС с СЭД высоковольтного оборудования (более 1000 В) [1].

Классическое построение единых электроэнергетических установок (ЕЭЭУ) с уровнем напряжения ЕЭЭС и СЭД до 1000 В (например, равным 690 В) находит широкое применение в отечественном и зарубежном судостроении. Данное схемотехническое решение позволяет использовать пропульсивную установку суммарной мощностью до 16 МВт [2] – [4]. По мере достижения верхней границы мощности, существенно возрастают токи сборных шин главных распределительных щитов (ГРЩ), что обуславливает необходимость применения системы двойных шин и коммутационных аппаратов с высокой коммутационной способностью. В конструктивном плане система двойных шин характеризуется двукратным увеличением количества секций ГРЩ и ухудшением массогабаритных показателей.

По мере увеличения номинального тока сборных шин, ток в режиме короткого замыкания (КЗ) может превысить предельный ток отключения коммутационных аппаратов, тогда достижение необходимой мощности СЭД станет невозможным. В этом случае рациональным решением становится применение высоковольтных СЭС с использованием коммутационной аппаратуры на-

пряжением, равным 6 кВ или 10 кВ. За счет увеличения напряжения главных генераторов происходит пропорциональное снижение тока на сборных шинах. Это позволяет отказаться от системы двойных шин и выполнить компоновку главного распределительного устройства (ГРУ) по упрощенной схеме. Снижение величины тока влечет за собой уменьшение сечения сборных шин, а также питающих и отходящих кабелей. Необходимость введения понижающих трансформаторов приводит к незначительному снижению массогабаритных показателей СЭС, что компенсируется уменьшением веса ГРУ и кабельных трасс.

Сравнительный анализ низковольтного и высоковольтного варианта построения ЕЭЭС с СЭД

Рассмотрим два варианта построения ЕЭЭУ на примере судна-снабженца с мощностью ГЭУ, равной 16 МВт:

первый вариант — ЕЭЭС на 690 В и СЭД на 690 В;

второй вариант — ЕЭЭС на 6,3 кВ и СЭД на 690 В.

В первом случае (рис. 1) СЭС образует две системы трехфазных шин с ГРЩ напряжением 690 В. Между шинами ГРЩ реализован сдвиг по фазе напряжения на 30° эл., что обеспечивает питание статических 12-пульсных преобразователей без применения согласующих трансформаторов с расщепленной вторичной обмоткой. Полупроводниковый преобразователь частоты для питания гребного электродвигателя (ГЭД) и подруливающих устройств одновременно получает питание от двух систем шин ГРУ. ГЭД выполнен на напряжение 690 В. Потребители собственных нужд получают питание от двух трехобмоточных трансформаторов. Напряжение на выходе трансформаторов собственных нужд составляет 400 В.

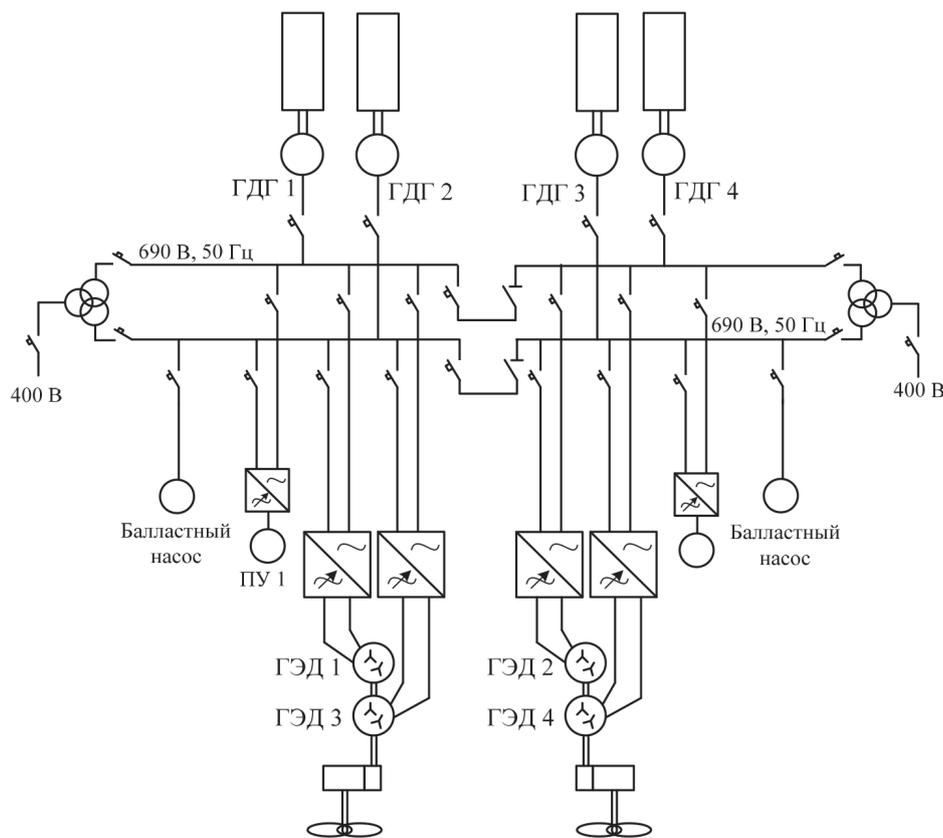


Рис. 1. ЕЭЭС с СЭД на 690 В

Во втором случае (рис. 2) генераторы включены на общую систему шин ГРУ с напряжением 6,3 кВ. Преобразователи частоты для питания ГЭД получают питание через понижающие трехоб-

моточные трансформаторы. ГЭД выполнен на напряжение 690 В. Потребители собственных нужд получают питание от двух двухобмоточных трансформаторов. Напряжение на выходе трансформаторов собственных нужд составляет 400 В.

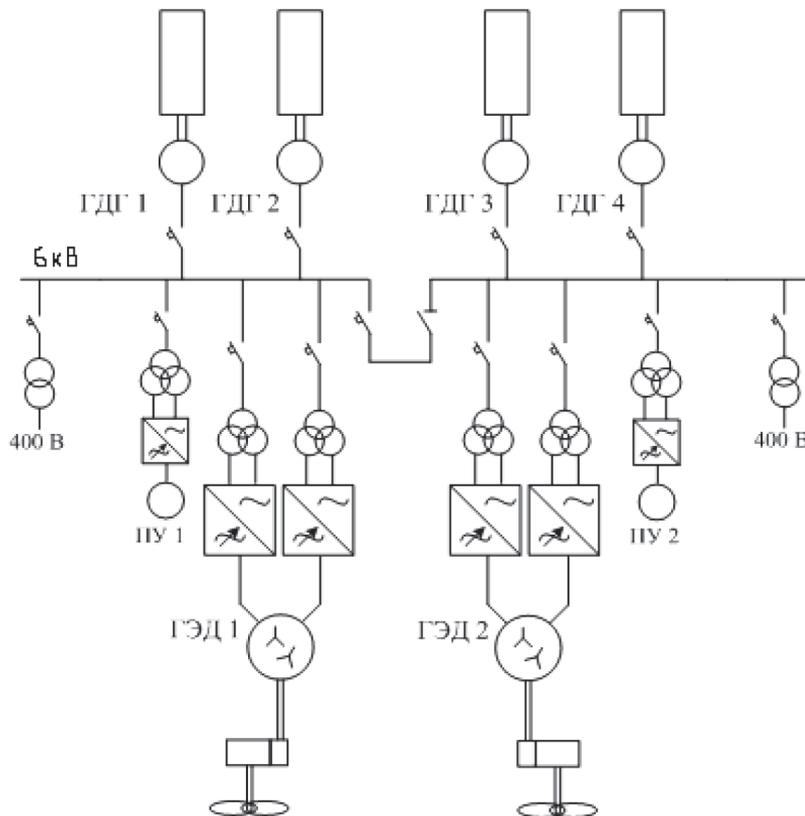


Рис. 2. ЕЭЭС на 6 кВ с СЭД 690 В

Состав основного оборудования ЕЭЭС с СЭД:

- главные дизель-генераторы (ГДГ) мощностью 5 МВт — 4 шт.;
- винто-рулевые колонки (ВРК) мощностью 8 МВт — 2 шт.;
- носовые подруливающие устройства (ПУ) мощностью 1 МВт — 2 шт.

При одинаковой мощности ЕЭЭС в высоковольтном варианте значительно уменьшается токовая нагрузка электрооборудования, в том числе:

- существенно снижаются токи генераторов (так, для генератора мощностью 5 МВт в первом варианте значение тока будет составлять 5 000 А, а для СЭС на 6,3 кВ — 550А);
- в высоковольтной схеме суммарный номинальный ток сборных шин равен 1 100 А, в низковольтной схеме — 20 000 А;
- значительно меньше токи КЗ, а следовательно, ниже требования к термической и динамической стойкости шинопроводов.

Снижение токов в высоковольтной ЕЭЭС позволяет:

- уменьшить сечение сборных шин щитового оборудования;
- уменьшить сечения кабельных линий как по условиям нормального режима эксплуатации, так и в режиме КЗ;
- уменьшить вес и габариты щитового оборудования, генераторов и кабельных трасс.

В таблице приведены расчеты технических характеристик оборудования ЕЭЭС для двух вариантов исполнения. Уровни питающего напряжения при одинаковой передаваемой мощности в обоих вариантах определяют разницу в сечении кабельных трасс.

Сравнение вариантов построения СЭС на 6,3 кВ и 690 В

Параметр	ГРУ 6,3 кВ	ГРУ 690 В
Габариты Д × Г × В, мм	8800 × 1000 × 1900	11250 × 820 × 2220
Масса, т	5,8	10
Количество секций, шт.	12	16
Количество силовых выключателей, шт.	11	24
Ток генератора, А	550	5000
Ток одной ВРК, А	1500	8000
Ток одного ПУ, А	125	1000
Номинальный ток сборных шин, А	1100	5000
Суммарный ток сборных шин, А	2200	20000
Количество кабелей в прокладке, общая длина и вес кабелей мощных потребителей ЕЭЭУ		
Кабельная трасса на 1-м участке: ДГА – ГРУ 50 м (для четырех генераторов)	12 шт. Всего 0,6 км; 3,72 т	100 шт. Всего 5 км; 17 т
Кабельная трасса на 2-м участке: ГРУ – ВРК 120 м (для двух ВРК)	16 шт. Всего 1,92 км; 11,904 т	80 шт. Всего 9,6 км; 32,64 т
Кабельная трасса на 3-м участке: ГРУ – ПУ 30 м (для двух ПУ)	2 шт. Всего 0,06 км; 0,372 т	10 шт. Всего 0,3 км; 1,02 т
Суммарная длина и вес кабельных трасс мощных потребителей ЕЭЭУ	2,58 км; 15,996 т	14,9 км, 50,66 т

Таким образом, в таблице рассмотрены три основных участка кабельных трасс:

- 1-й участок — дизель-генераторный агрегат (ДГА) – ГРУ;
- 2-й участок — ГРУ – помещение ВРК;
- 3-й участок — ГРУ – помещение носового ПУ.

Для сравнения двух схем СЭС были выбраны высоковольтный и низковольтный кабель фирмы Nexans со следующими техническими характеристиками:

- MPRXCX — FLEX 0.6/1 кВ 3 × 95 (205 А), диаметр — 40 мм, масса 3400 кг/км;
- MPRXCX 6/10 кВ × 35 (205 А), диаметр — 60 мм, масса – 6200 кг/км.

Примечание. Выбор кабеля с указанным одинаковым сечением обусловлен задачей произвести теоретическое сравнение кабельных трасс с различным номинальным напряжением.

Сравнение двух вариантов исполнения ЕЭЭС с СЭД мощностью 20 МВт показывает, что применение высоковольтной СЭС на 6,3 кВ является технически обоснованным и перспективным и имеет ряд существенных преимуществ [5] – [10]. Среди основных достоинств высоковольтной СЭС необходимо отметить следующие:

- снижение массы и габаритов ГРУ;
- значительное упрощение системы сборных шин;
- снижение количества секций на 25 %;
- уменьшение количества силовых выключателей на 55 %, что повышает надежность ГРУ;
- значительное снижение тока сборных шин и тока питающих генераторов, что приводит к существенному снижению уровня тока КЗ;
- значительное снижение номинального тока кабельных трасс, что приводит к существенному снижению количества кабелей в прокладке и снижению их общей протяженности в 5,8 раз и веса в 3,2 раза;
- повышение КПД щитового оборудования за счет снижения тепловых потерь;
- уменьшение на 15 % стоимости оборудования ЕЭЭС.

Выводы

1. Проведенный сравнительный анализ схмотехнических решений низковольтного и высоковольтного вариантов построения СЭС применительно к судну-снабженцу с ЕЭЭС с СЭД мощностью до 16 МВт показал предпочтение использования для данного типа судна высоковольтной СЭС с величиной напряжения 6 кВ или 10 кВ.

2. Использование высоковольтных электростанций на судах с СЭД позволяет значительно улучшить технико-экономические показатели судна, в том числе массогабаритные.

3. Основная причина преимущественного применения низковольтных ЕЭЭС на судах с СЭД мощностью до 16 МВт заключается в том, что на сегодняшний день число компаний, занимающихся производством низковольтной коммутационной аппаратуры, имеющих сертификат Российского морского регистра судоходства (РС), значительно превышает количество компаний, выпускающих высоковольтную коммутационную аппаратуру с сертификатом РС.

4. Одним из незначительных недостатков применения высоковольтных электростанций являются дополнительные повышенные требования к эксплуатирующему персоналу — наличие у него соответствующей группы допуска по электробезопасности и наличие особых требований Правил РС по размещению высоковольтного оборудования.

5. В последнее время наблюдается тенденция перехода на уровень напряжения свыше 1000 В в ЕЭЭС с СЭД мощностью от 10 до 16 МВт.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьев А. В. Схемные решения перспективных низковольтных судовых систем электродвижения / А. В. Григорьев, В. В. Романовский, Р. Р. Зайнуллин // Эксплуатация морского транспорта. — 2010. — № 4. — С. 76–78.

2. 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.

3. 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.

4. Григорьев А. В. Анализ режимов эксплуатации судовых валогенераторных установок с преобразователями частоты и синхронными компенсаторами / А. В. Григорьев, Р. Р. Зайнуллин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 3(31). — С. 164–171.

5. Wilflinger J. Simulation and control design of hybrid propulsions in boats / J. Wilflinger, P. Ortner, L. Del Re, M. Aschaber // IFAC Proceedings Volumes. — 2010. — Vol. 43. — Is. 20. — Pp. 40–45. DOI: 10.3182/20100915-3-DE-3008.00001.

6. Mahmud K. A review of computer tools for modeling electric vehicle energy requirements and their impact on power distribution networks / K. Mahmud, G. E. Town // Applied Energy. — 2016. — Vol. 172. — Pp. 337–359. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.03.100.

7. Gierusz W. Simulation model of the LNG carrier with podded propulsion, Part II: Full model and experimental results / W. Gierusz // Ocean Engineering. — 2016. — Vol. 123. — Pp. 28–44. DOI:10.1016/j.oceaneng.2016.06.024.

8. Yutao C. Integrated Design Platform for Marine Electric Propulsion System / C. Yutao, Z. Fanming, W. Jiaming // Energy Procedia. — 2012. — Vol. 17. — Part A. — Pp. 540–546. DOI:10.1016/j.egypro.2012.02.133.

9. Гузанов А. Н. Моделирование судового электрооборудования и средств автоматики / А. Н. Гузанов, К. В. Недялков. — СПб.: СПбГУВК, 1996. — 59 с.

10. Герман-Галкин С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0 / С. Г. Герман-Галкин. — СПб.: Корона Принт, 2001. — 320 с.

ANALYSIS OF CAPABILITY OF USING OF HIGH-VOLTAGE ELECTRIC POWER PLANTS FOR SHIPS WITH ELECTRIC PROPULSION SYSTEMS

The question regarding expediency of using of high-voltage power plants for ships with electric propulsion systems more than 15 MW power is rather actual and is solving on the stage designing of a ship. In the article analysis of using of low-voltage electric power plants in unified electric power systems with electric propulsion systems above 16 MW power is adduced. On example of supply vessel two alternatives of schematic decisions of unified electric power systems with electric propulsion systems with using of high-voltage and low-voltage equipment are considered. For the above mentioned alternatives mass and overall dimensions of propulsion switchboards and cable routes on sections to the most powerful consumers of unified electric power system are given. The short comparative analysis of low-voltage and high-voltage ship electric power plants is given, the main advantages of high-voltage voltage ship electric power plants are considered, among them it should be noted decreasing of currents of main diesel-generators, and bus bar, significant decreasing of short-circuit currents, decreasing of cross sectional area and mass of cable routes, improvement of mass and overall dimensions of propulsion switchboards, decreasing of amount of sections of distributing switchboards and circuit breakers. Evaluation of influence of voltage level to technical and economical parameters of equipment is given. Reasons of more widespread using of low-voltage ship electric power plants on ships with electric propulsion systems of 10 up to 16 MW power in comparison with high-voltage are given. Main disadvantages of using of high-voltage power plants are listed. Primary criterion analysis of power of plant, with which expediency of using of unified electric power systems appears, is realized. As a result of comparison of two alternatives of unified electric power system with electric propulsion system it is shown, that using of high-voltage ship electric power plant 6,3 kV is technically reasonable and prospective and it has some essential advantages.

Keywords: ship electric power plant, unified electric power installation, unified electric power system, electric propulsion system, electric propulsion plant.

REFERENCES

1. Grigorev, A. V., V. V. Romanov'skiy, and R. R. Zaynullin. "Circuit solutions of long range low-voltage ship electrical propulsion plants." *Jekspluatacija morskogo transporta* 4 (2010): 76–78.
2. Grigorev, A. V., and R. R. Zajnullin. "Analysis of possibility and expediency of using of electrical propulsion plants on ships for auxiliary fleet." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 5(27) (2014): 40–46.
3. Grigorev, A. V., V. I. Shtrambrand, and R. R. Zajnullin. "Celesoobraznost primeneniya SJeD na sudah vspomogatelnogo flota." *The Morskoy Flot (Marine Fleet)* 4 (2014): 38–40.
4. Grigoryev, A. V., and R. R. Zaynullin. "Analysis of operation modes of ship shaft generator plants with frequency converters and synchronous compensators." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 3(31) (2015): 164–171.
5. Wilfinger, Johann, P. Ortner, L. Del Re, and M. Aschaber. "Simulation and control design of hybrid propulsions in boats." *IFAC Proceedings Volumes* 43.20 (2010): 40–45.
6. Mahmud, Khizir, and Graham E. Town. "A review of computer tools for modeling electric vehicle energy requirements and their impact on power distribution networks." *Applied Energy* 172 (2016): 337–359. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.03.100.
7. Gierusz, Witold. "Simulation model of the LNG carrier with podded propulsion, Part II: Full model and experimental results." *Ocean Engineering* 123 (2016): 28–44. DOI:10.1016/j.oceaneng.2016.06.024.
8. Yutao, Chen, Zeng Fanming, and Wu Jiaming. "Integrated Design Platform for Marine Electric Propulsion System." *Energy Procedia* 17 (2012): 540–546. DOI:10.1016/j.egypro.2012.02.133.
9. Guzanov, A. N., and K. V. Nedjalkov. *Modelirovanie sudovogo jelektrorudovanija i sredstv avtomatiki*. SPb.: SPbGUVK, 1996.
10. German-Galkin, S. G. *Kompjuterное modelirovanie poluprovodnikovyh sistem v MATLAB 6.0*. SPb.: KORONA print, 2001.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Григорьев Андрей Владимирович —
кандидат технических наук, доцент.
АО «НПЦ «Электродвижение судов»
a.grigorev@eds-marine.ru
Васильев Алексей Юрьевич — соискатель.
Научный руководитель:
Григорьев Андрей Владимирович.
АО «НПЦ «Электродвижение судов»
alex_was@mail.ru
Малышев Сергей Михайлович — аспирант.
Научный руководитель:
Григорьев Андрей Владимирович.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
malyshev@eds-marine.ru, kaf_saees@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Grigoryev Andrey Vladimirovich —
PhD, associate professor.
Jelektrodvizhenie sudov
a.grigorev@eds-marine.ru
Vasil'ev Aleksej Jur'evich — applicant.
Supervisor:
Grigoryev Andrey Vladimirovich.
Jelektrodvizhenie sudov
alex_was@mail.ru
Malyshev Sergey Mihaylovich — postgraduate.
Supervisor:
Grigoryev Andrey Vladimirovich.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
malyshev@eds-marine.ru, kaf_saees@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 12 сентября 2016 г.