

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-203-210
УДК 629.54:621.31

**А. В. Григорьев,
Р. Р. Зайнуллин,
С. М. Малышев**

РАЗРАБОТКА НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ЛАБОРАТОРНО-ТРЕНАЖЕРНОГО КОМПЛЕКСА СУДОВЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОДВИЖЕНИЯ И ГРЕБНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТАНОВОК НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

В настоящее время в Российской Федерации вводится в эксплуатацию большое количество морских, речных и судов смешанного плавания различного назначения с единой электроэнергетической системой (ЕЭЭС) на базе системы электродвижения (СЭД). В связи с этим требуется существенное повышение уровня судовых инженеров электромехаников. Подготовка высококвалифицированных специалистов по вопросам эксплуатации ЕЭЭС с СЭД является довольно сложной научно-технической и методологической задачей. Решение данной проблемы связано с созданием универсального научно-исследовательского лабораторно-тренажерного комплекса (ЛТК). В статье приведен результат создания ЛТК, не имеющего аналогов в России, включающего в себя компьютерные модели СЭД, физические модели гребных электрических установок (ГЭУ) и тренажеры реальных судовых электротехнических систем. Отмечается, что уникальность ЛТК состоит в сочетании компьютерных и физических моделей и тренажеров. В статье рассматривается методология применения ЛТК в учебном процессе. На компьютерных моделях проводится теоретическое изучение переходных процессов в СЭД, физические модели гребных электродвигателей позволяют с использованием электротехнического оборудования и электроизмерительных приборов изучать физические процессы в ГЭУ. На тренажерных комплексах отрабатываются навыки технической эксплуатации ЕЭЭС с СЭД в реальном масштабе времени.

Ключевые слова: лабораторно-тренажерный комплекс, компьютерные модели, физические модели, гребная электрическая установка, система электродвижения, лабораторная работа, экспериментальные исследования, тренажер.

Введение

В настоящее время в Российской Федерации вводится в эксплуатацию большое количество морских, речных и судов смешанного плавания различного назначения, включая суда снабжения и ледоколы, танкеры и газовозы, буксиры и паромы, научно-исследовательские и рыбопромысловые суда с единой электроэнергетической системой (ЕЭЭС) на базе системы электродвижения (СЭД) [1] – [3].

С целью всестороннего изучения физических процессов, протекающих в судовых ЕЭЭС и гребных электрических установках (ГЭУ) современных судов, и подготовки высококвалифицированных судовых специалистов по эксплуатации электрооборудования в 2015 г. компанией ЗАО «НПЦ «Электродвижение судов» на базе кафедры электродвижения и автоматики судов факультета судовой энергетики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова» (ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова) был создан научно-учебный лабораторно-тренажерный комплекс (ЛТК) судовых систем электродвижения (СЭД) и ГЭУ.

ЛТК предназначен для проведения научных исследований, теоретических, практических и лабораторных занятий курсантов и аспирантов ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, а также осуществления послевузовской подготовки инженеров и преподавателей вузов. ЛТК используется для проведения курсов повышения квалификации судовых электромехаников, сотрудников судовладельческих компаний и классификационных обществ.

В состав ЛТК входят:

- ## Компьютерное моделирование

На компьютерных моделях реализованы следующие режимы эксплуатации СЭД и ГЭУ:

- Компьютерные модели разработаны в пакете научного моделирования Simulink программы MATLAB. В лабораторных работах созданы компьютерные модели ГЭУ на базе асинхронных и синхронных гребных электродвигателей с электромагнитным возбуждением и возбуждением на постоянных магнитах, а также машин постоянного тока.

The screenshot shows a Simulink model for a motor control system. The components are numbered 1 through 6:

- 1**: Source block (labeled 'Source' in the image) with outputs A, B, and C.
- 2**: Converter block with inputs A, B, and C, and outputs T, A, B, and C.
- 3**: motor block with inputs speed, Tm, P, Fs, and Fr, and outputs speed, Tm, P, Fs, and Fr.
- 4**: Measurements block with inputs speed, Tm, P, Fs, and Fr, and outputs speed, Tm, P, Fs, and Fr.
- 5**: AD (Analog-to-Digital) block with inputs T, A, B, and C, and outputs Tm, A, B, and C.
- 6**: Propeller block with outputs Out1 and Out2.

The model also includes a 'Scope1' block, a 'Scope2' block, and a 'Discrete, Ts = 2e-06 s.' block.

204

В лабораторной работе проводятся экспериментальные исследования, в результате которых можно получить графики переходных процессов разгона, торможения (рис. 2) и реверса ГЭД, напряжения и тока ГЭД и ПЧ при ходе на свободной воде, во льдах, на волнении и при работе в аварийных режимах.

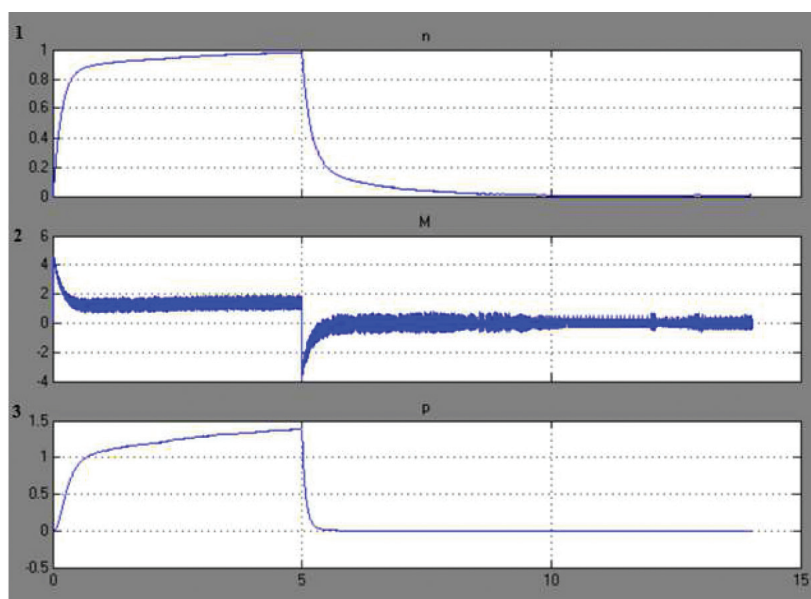


Рис. 2. Переходные процессы разгона и торможения ГЭД:
1 — переходная характеристика частоты вращения ГЭД;
2 — переходная характеристика электромагнитного момента ГЭД;
3 — переходная характеристика мощности ГЭД

Физическое моделирование (макетирование)

Лабораторные работы ГЭУ предназначены для изучения физических процессов в судовых СЭД и ГЭУ переменного и двойного (переменно-постоянного) рода тока с применением реального электротехнического оборудования и электроизмерительных приборов.

Целью проведения лабораторных занятий является изучение физических процессов в ГЭУ и СЭД и отработка навыков программирования и настройки микропроцессорных системах управления.

На компьютерных моделях реализованы следующие режимы эксплуатации СЭД и ГЭУ:

- работа ГЭУ на холостом ходу;
- работа ГЭУ по винтовой характеристике в установившихся режимах (ход в свободной воде, ход на волнении, ход в ледовых условиях);
- работа ГЭУ по винтовой характеристике в переходных режимах (разгон, торможение, реверс);
- работа ГЭУ в аварийных режимах (заклинивание гребного винта, поломка лопасти гребного винта и др.).

Состав типового лабораторного стенда СЭД:

- физическая модель гребной электроустановки (ГЭУ);
- нагрузочное устройство, моделирующее работу гребного винта;
- вспомогательное и измерительное оборудование, включающее персональный компьютер, мультиметр, USB осциллограф и электротехнический щит.

Фотография типового лабораторного стенда приведена на рис. 3.

Структурная схема лабораторного стенда, на котором можно моделировать ГЭУ переменного тока с асинхронным электродвигателем или ГЭУ двойного рода тока с управляемым выпрямителем, приведена на рис. 4. В состав лабораторного стенда входят: электродвигатель постоянного тока, асинхронный электродвигатель, полупроводниковый преобразователь частоты, полупроводниковый выпрямитель, дроссель, электрический щиток с защитно-коммутационной аппаратурой и др.

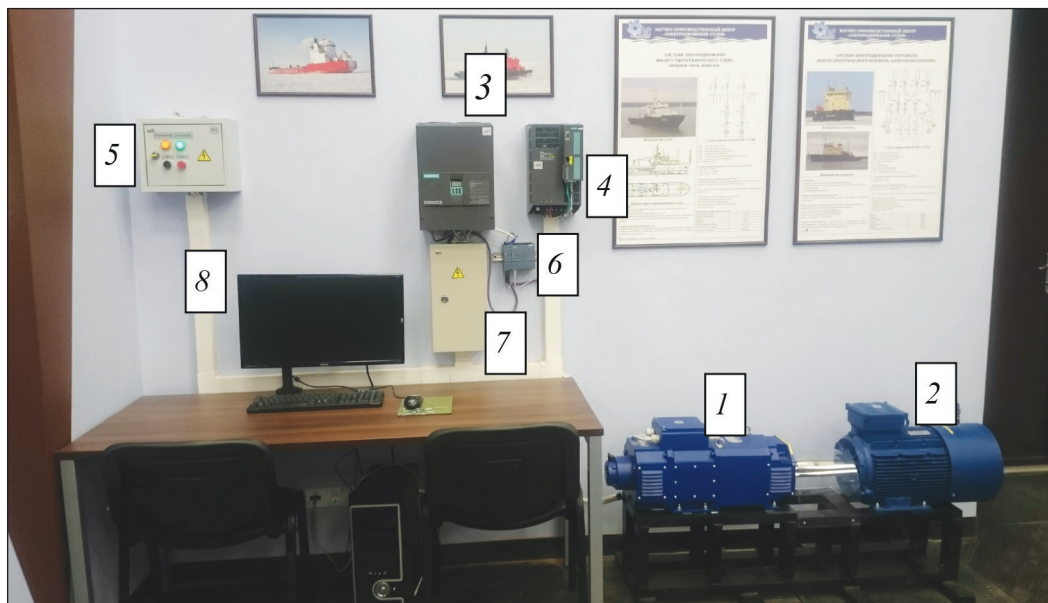


Рис. 3. Фотография лабораторного стенда:

- 1 — гребной электродвигатель; 2 — нагрузочный генератор;
3 — полупроводковый выпрямитель; 4 — полупроводниковый преобразователь частоты;
5 — электрораспределительный щит; 6 — контроллер;
7 — дроссель; 8 — персональный компьютер

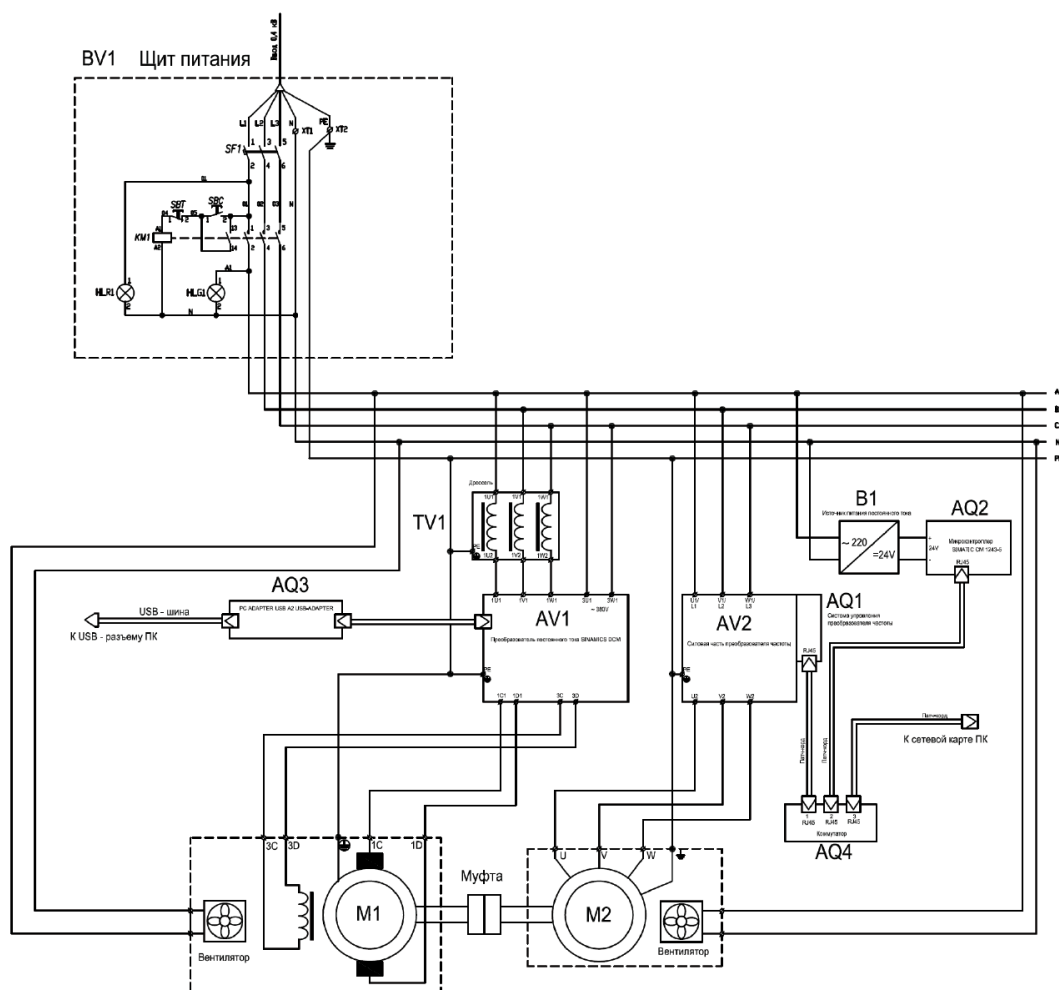


Рис. 4. Структурная схема лабораторного стенда

Переходный процесс разгона ГЭД и видеокادر панели управления представлены на рис. 5.

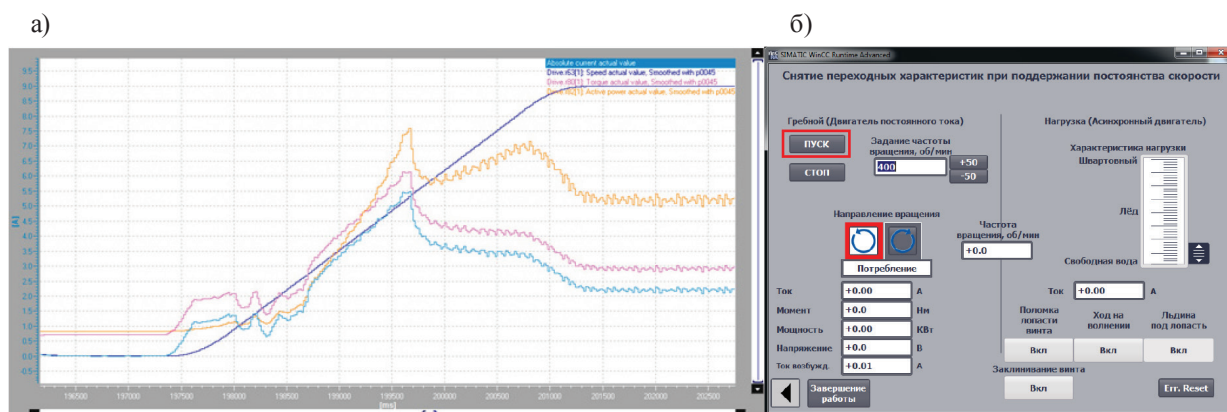


Рис. 5. Переходный процесс разгона ГЭД (а) и видеокادر панели управления (б)

Тренажерный практикум

Целью проведения тренажерного практикума является изучения принципа действия и основ эксплуатации современных СЭД и ГЭУ в реальном масштабе времени. Фотография тренажера ЕЭЭС с ГЭУ представлена на рис. 6.



Рис. 6. Фотография тренажерного комплекса ЕЭЭС с гребной электроустановкой:
1 — физическая модель двухвальной ГЭУ; 2 — пульт управления; 3 — ГРЩ

Тренажер ЕЭЭС с ГЭУ предназначен для исследования принципа действия и отработки навыков технической эксплуатации современных судовых одновальных и двухвальных СЭД переменного тока с прямой передачей вращающего момента на винт, применяемых в составе электро-энергетических установок танкеров сжиженного природного газа. Структурная схема приведена на рис. 7.

Тренажер, за счет изменения компоновки, алгоритмов и законов регулирования, нагрузочных характеристик гребного винта позволяет моделировать работу ЕЭЭС с ГЭУ переменного тока с прямой передачей вращающего момента на винт.

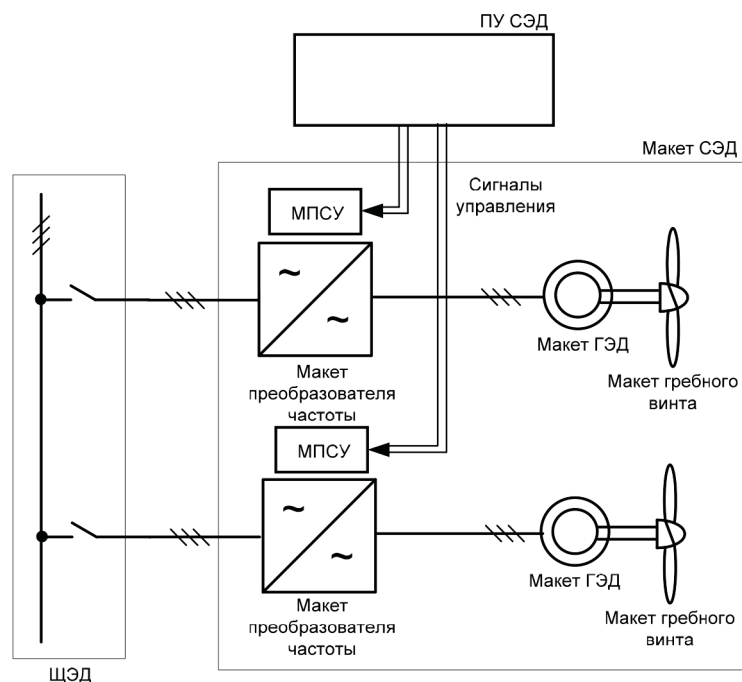


Рис. 7. Структурная схема тренажерного комплекса единой электроэнергетической систем с двухвальной ГЭУ

Видеокадр с отображением панели управления в момента запуска ГЭУ и разгона ГЭД представлен на рис. 8.

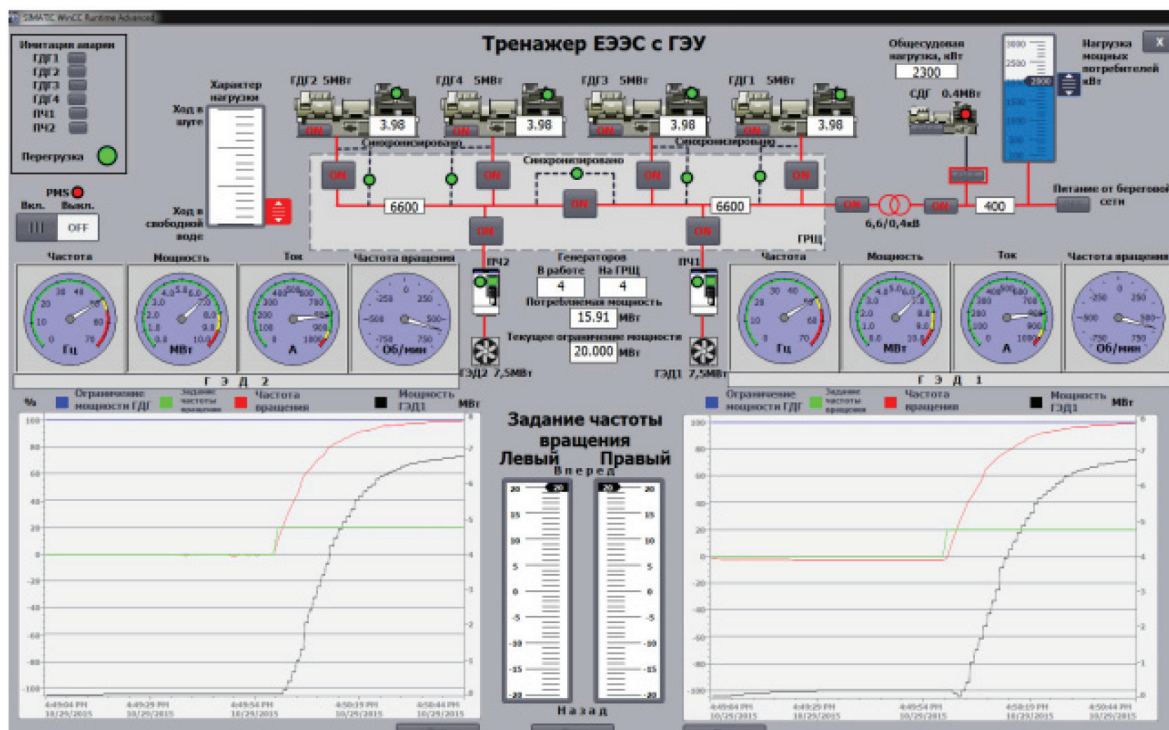


Рис. 8. Видеокадр пуска ГЭУ и разгона ГЭД

Выводы

1. На кафедре электродвижения и автоматики судов ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова создан научно-исследовательский лабораторно-тренажерный комплекс современных и пер-

спективных ЕЭЭС с СЭД, который не имеет аналогов в учебных и научных заведениях Российской Федерации. В научно-исследовательском ЛТК наиболее полно на компьютерных и физических моделях реализованы все современные и перспективные ЕЭЭС и СЭД. На моделях возможно проведение экспериментальных исследований установившихся и переходных режимов эксплуатации судовых электротехнических систем, включая аварийные режимы.

2. При создании ЛТК был решен ряд сложных научно-технических вопросов, связанных с созданием компьютерных моделей реальных ЕЭЭС с СЭД, физических моделей и макетов, на базе которых строятся физические лабораторные работы и тренажерные комплексы, позволяющие в реальном масштабе времени изучать сложные процессы управления судовыми системами.

3. Научно-исследовательский ЛТК может использоваться не только в учебном процессе, но и для проведения научно-исследовательской работы в области судовой электротехники и электроэнергетики. На лабораторном комплексе возможно проведение экспериментальных исследований с целью обоснования технических решений при проектировании ЕЭЭС и СЭД и разработки алгоритмов управления сложными электротехническими объектами. ЛТК целесообразно использовать для повышения квалификации специалистов отрасли, научных сотрудников и преподавателей вузов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
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. Схемные решения перспективных низковольтных судовых систем электродвижения / А. В. Григорьев, В. В. Романовский, Р. Р. Зайнуллин // Эксплуатация морского транспорта. — 2010. — № 4. — С. 76–78.
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. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. Герман-Галкин С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0 / С. Г. Герман-Галкин. — СПб.: КОРОНА принт, 2001. — 320 с.
10. Гузанов А. Н. Моделирование судового электрооборудования и средств автоматики / А. Н. Гузанов, К. В. Недеяков. — СПб.: СПбГУВК, 1996. — 59 с.

DESIGNING OF SCIENTIFIC-EDUCATIONAL LABORATORY-TRAINING COMPLEX OF SHIP ELECTRIC PROPULSION SYSTEMS AND ELECTRIC PROPULSION PLANTS OF NEW GENERATION

In the present time in Russian Federation a large number of sea and river ships of different appointment with integrated electric power systems (IEPS) on the basis of electric propulsion systems (EPS) are putting into operation. This why significant increase of professional level of ship electrical engineers is needed. Training of highly qualified specialists in field of maintenance of modern IEPS with EPS is rather difficult scientific and methodologic problem. The solution of the problem is connected with development of universal research labora-

theory-training complex (LTC). In the article result of creation of LTC is showed, it has no analogs in Russia and includes computer models, physical models of electric propulsion plants (EPP) and training stations of real ship electrical systems. It is noted that uniqueness of LTC consists in combination of physical and computer models. In the article methodology of using of LTC in educational process is considered. On computer models theoretical research of transitional processes in EPS is provided, physical models of electric propulsion motors with using of electrical equipment and electric measuring devices let to research physical processes in EPP. On training stations skills of technical maintenance of IEPS with EPS are working in real time.

Keywords: laboratory-training complex, computer models, physical models, electric propulsion plant, electric propulsion system, laboratory work, experimental research, training station.

REFERENCES

1. 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.
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. V. Romanov'skiy, and R. R. Zaynullin. "Circuit solutions of long range low-voltage ship electrical propulsion plants." *Jekspluatatsiya morskogo transporta* 4 (2010): 76–78.
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. 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.
6. 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.
7. Wilflinger, 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. DOI:10.3182/20100915-3-DE-3008.00001.
8. 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.
9. German-Galkin, S. G. *Kompjuternoe modelirovanie poluprovodnikovyyh sistem v MATLAB 6.0*. SPb.: KORONA print, 2001.
10. Guzanov, A. N., and K. V. Nedjalkov. *Modelirovanie sudovogo jelektooborudovaniya i sredstv avtomatiki*. SPb.: SPbGUVK, 1996.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Григорьев Андрей Владимирович —
кандидат технических наук, доцент.
АО «НПП «Электродвижение судов»
a.grigorev@eds-marine.ru
Зайнуллин Руслан Ринатович — соискатель.
Научный руководитель:
Григорьев Андрей Владимирович.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
zaynullin@eds-marine.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
Zaynullin Ruslan Rinatovich — applicant.
Supervisor:
Grigoryev Andrey Vladimirovich.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
zaynullin@eds-marine.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 24 июня 2016 г.