

СУДОВЫЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

SHIP POWER GENERATING COMPLEXES AND SYSTEMS

Научная статья
УДК 62-515;62-523.3
<https://doi.org/10.24143/2073-1574-2024-1-104-111>
EDN SIEAKC

Сравнительный анализ принципов проектирования электрогидравлических рулевых машин скоростных судов

*Сергей Васильевич Попов[✉], Олег Анатольевич Бурмакин,
Юрий Сергеевич Малышев*

*Волжский государственный университет водного транспорта,
Нижний Новгород, Россия, Popovsev3@ya.ru[✉]*

Аннотация. Рассмотрены состав и принципы управления рулевых электрогидравлических машин простого и следящего типа, предназначенных для перекачки руля маломерных и скоростных судов. Выполнен анализ функционирования существующих рулевых машин для указанной группы судов. Сформированы недостатки в работе, связанные с элементной базой и составом систем управления и электропривода проанализированных рулевых машин. Показаны особенности работы гидравлических станций с приводными электродвигателями насосов, выполненных на постоянном токе, выявленные в результате экспериментов. Предложены варианты технических решений для улучшения энергетических показателей электропривода. Проведен сравнительный анализ работы рулевых машин с приводами на переменном и постоянном токе. Дана оценка работы рулевых машин в штатном и аварийном режимах. Предложены структурные схемы систем управления простого и следящего действия с учетом выявленных при анализе особенностей работы и требований Российского классификационного общества. Показана возможность реализации электропривода рулевой машины, построенного по системе «преобразователь частоты – асинхронный двигатель» с питанием от сети переменного тока и аварийного источника. Предложены варианты реализации электроприводов насосов гидростанций с аккумуляторной батареей повышенного напряжения. Представлена возможность создания отечественных установок для рулевых и других судовых механизмов по предложенным структурным схемам систем управления гидростанциями для скоростных судов. Даны рекомендации построения рулевых машин для скоростных судов с полным водоизмещением до 100 т при использовании электрооборудования отечественного производства.

Ключевые слова: судовое рулевое устройство, система управления рулевой машиной, рулевой электропривод насоса гидравлической системы, следящая рулевая система, электропитание рулевой машины

Для цитирования: Попов С. В., Бурмакин О. А., Малышев Ю. С. Сравнительный анализ принципов проектирования электрогидравлических рулевых машин скоростных судов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2024. № 1. С. 104–111. <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2024-1-104-111>. EDN SIEAKC.

Original article

Comparative analysis of the principles of high-speed vessels electrohydraulic steering machines construction

Sergey V. Popov[✉], Oleg A. Burmakin, Yuriy S. Malyshev

Volga State University of Water Transport,
Nizhny Novgorod, Russia, Popovsev3@ya.ru[✉]

Abstract. The composition and control principles of steering electro-hydraulic machines of a simple and follower type, intended for rudder shifting of small and high-speed vessels are considered. An analysis of the functioning of existing steering gears for the specified group of vessels was carried out. Deficiencies in the work associated with the element base and composition of the control and electric drive systems of the analyzed steering machines have been formed. The features of the operation of hydraulic systems with drive electric motors of pumps made on direct current, revealed as a result of experiments, are shown. Variants of technical solutions for improving the energy performance of the electric drive are proposed. A comparative analysis of the operation of steering machines with AC and DC drives has been carried out. An assessment of steering machines operation in normal and emergency modes is given. Structural diagrams of control systems of simple and follow-up action are proposed, taking into account the operating features identified during the analysis and the requirements of the Russian classification society. The possibility of implementing an SM electric drive built using a frequency converter – asynchronous motor system powered by an alternating current network and an emergency source has been shown. Options for the implementation of electric drives for pumps of hydraulic stations with a high-voltage battery are proposed. The possibility of creating domestic installations for steering and other ship mechanisms, according to the proposed structural diagrams of control systems for hydraulic stations for high-speed ships, is shown. Recommendations are given for the construction of steering gears for high-speed vessels with a total displacement of up to 100 tons using domestic electrical equipment.

Keywords: ship's steering gear, steering machine control system, steering electric drive of the hydraulic system pump, follower steering system, steering power supply

For citation: Popov S. V., Burmakin O. A., Malyshev Yu. S. Comparative analysis of the principles of high-speed vessels electrohydraulic steering machines construction. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies.* 2024;1:104-111. (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2024-1-104-111>. EDN SIEAKC.

Введение

Рулевые машины (РМ) относятся к средствам управления судном, к которым предъявляются особые требования Российского классификационного общества (РКО) [1]. Наряду с различными типами конструкций РМ наибольшее распространение получили электрогидравлические РМ, построенные на базе гидроцилиндров.

Российское производство предлагает гидравлические РМ в большом ассортименте с различной производительностью и большими значениями крутящего момента (ОА «Завод им. Гаджиева», ПАО «Пролетарский завод»). Для судов малого водоизмещения до 100 т применяют компактные РМ с двумя основными типами систем управления: простым и следящим. Следящие системы управления в основном имеют зарубежное происхождение, (например, фирмы Kobelt, Fluidmeccanica, Navis и др.) [2–5].

Методы и объект исследования

На рис. 1 представлена структурная схема электрогидравлической РМ с простой системой управ-

ления. Запуск РМ выполняется системой автоматики, расположенной в шкафу управления (ШУ), от которого получает питание электродвигатель (ЭД) насоса. Гидравлический насос, установленный в гидравлическом баке (ГБ), создает давление рабочей жидкости, которая поступает по трубкам высокого давления от ГБ в рубку судна. В рубке установлен штурвал (Ш) и гидроклапаны (ГК) управления потоком рабочей жидкости. При повороте Ш на правый или левый борт попарно открываются соответствующие клапаны ГК и жидкость поступает в полости гидроцилиндров (ГЦ). Происходит перекладка руля. При возврате штурвала Ш в нейтральное состояние положение руля сохраняется и контролируется по аксиометру. Такая система управления РМ довольно проста, однако возникают сложности при монтаже трубопроводов гидросистемы, которые необходимо смонтировать по всему корпусу судна от гидростанции до штурвала. Эксплуатация и ремонт таких систем управления крайне затруднены из-за скрытого расположения трубопроводов.

Попов С. В., Бурмакин О. А., Малышев Ю. С. Сравнительный анализ принципов проектирования электрогидравлических рулевых машин скоростных судов

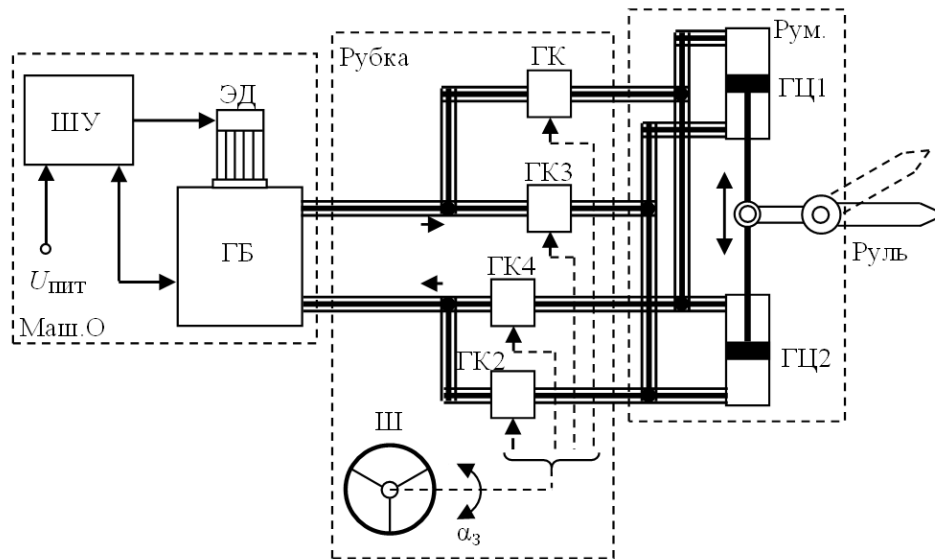


Рис. 1. Структурная схема электрогидравлической РМ с простым управлением

Fig. 1. Structural diagram of electro-hydraulic steering machine with simple control

Более удобной для монтажа является электрогидравлическая РМ с электрической системой управления.

При реализации простого электрического управления (рис. 2) используется переключатель –

джойстик (Д) для включения электрогидроклапанов (ЭГК), которые, в свою очередь, подают рабочую жидкость в соответствующую полость ГЦ для перекладки руля на тот или другой борт.

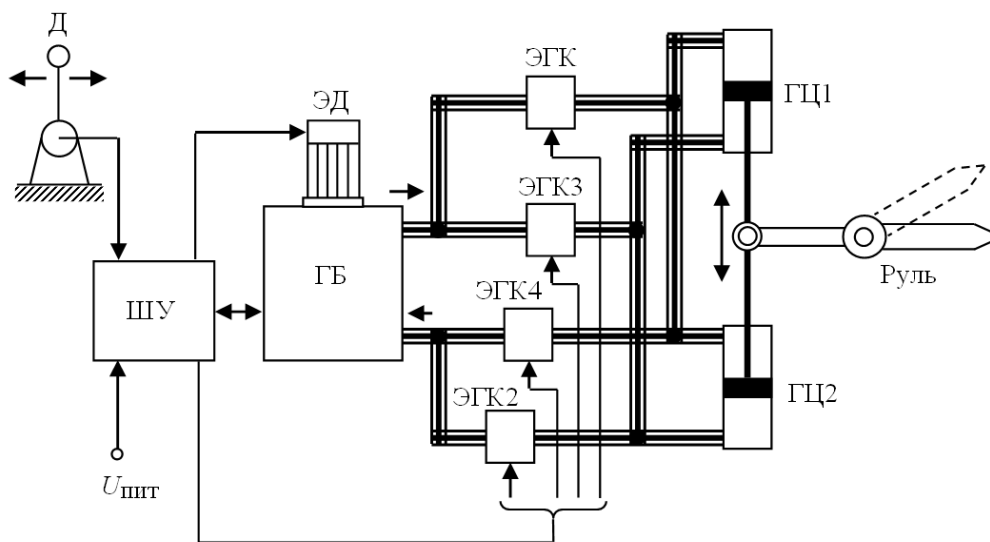


Рис. 2. Структурная схема электрогидравлической РМ с простой электрической системой управления

Fig. 2. Structural diagram of electro-hydraulic steering machine with simple electric control system

Следящая система (рис. 3) построена на базе датчика угла поворота Д1, встроенного в штурвал, и датчика угла поворота Д2, установленного на бал-

лере руля. За счет управления ЭГК система позволяет выполнить поворот руля на угол α_{OC} , заданный штурвалом Ш (α_3) с определенной точностью.

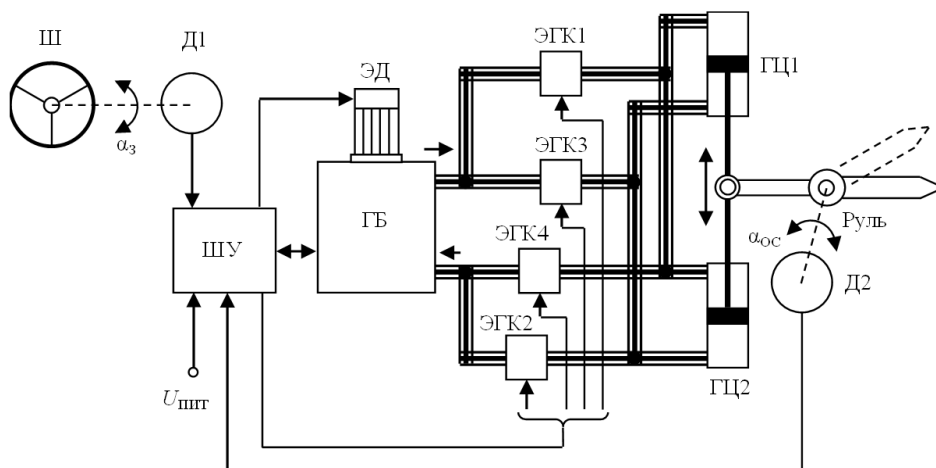


Рис. 3. Структурная схема электрогидравлической РМ со следящей системой управления

Fig. 3. Structural diagram of an electro-hydraulic steering machine with a servo control system

В советское время следящие электроприводы были выполнены на базе датчика и приемника, работающие в системе синхронной передачи угла поворота сельсинов, в том числе в разработках типа «Аист» и «Печера» [6–9]. Эти системы управления построены на сельсинах, магнитных усилителях и многомашинных преобразователях, достаточно сложны в изготовлении, громоздки, трудны в наладке и обслуживании, они содержат многочисленные контакты, которые снижают надежность системы, а в следящем режиме при подходе руля в крайнее положение возникает разность в углах перекладки двух рулей (до 10 град) [6–15]. Кроме того, такие системы давно не выпускаются, а комплекты запасных инструментов и принадлежностей исчерпаны. В настоящее время зарубежными фирмами, например Kobelt, Fluidmecsanica, выпускаются более простые системы с резистивными задатчиком и датчиком обратной связи. Однако, исходя из опыта эксплуатации, такие системы имеют существенный недостаток – использование потенциометров, снижающих точность и надежность РМ.

Следящими системами управления, как правило, оснащают скоростные суда для обеспечения лучшей управляемости. В последнее время следящие системы выполнены с применением микроконтроллеров, которые позволяют выполнить более сложные алгоритмы управления РМ, например ограничение угла поворота руля в зависимости от скорости движения судна.

Результаты исследований

Исходя из требований правил РКО, судно должно иметь основную и резервную РМ, при этом

механизм поворота руля может иметь общие конструктивные элементы. В качестве приводного двигателя насоса основной РМ возможно использование главного (маршевого) двигателя либо ЭД, установленного на ГБ. На рис. 4 приведена структурная схема с приводом насоса (Н) гидростанции основной РМ от главного двигателя (ГД), а гидростанции резервной РМ – от ЭД. Каждая система имеет ГБ, ЭГК и ШУ. В соответствии с правилами РКО основная и резервная РМ имеет собственный фидер питания и отдельные органы управления – штурвал (Ш) и джойстик (Д). В панели управления РМ, установленной в пульте судоводителя, расположена светосигнальная аппаратура и переключатель (П) выбора РМ, которую необходимо ввести в действие.

Существуют электрогидравлические РМ с электроприводами насосов как основной, так и резервной гидростанции. Также возможно исполнение основной и резервной РМ с одинаковым способом управления – простыми или следящим.

В ряде случаев в качестве приводного двигателя насоса используют ЭД постоянного тока с номинальным напряжением 24 В. Это объясняется наличием сети постоянного тока напряжением 24 В и удобным переключением питания ЭД на аварийный источник – аккумулятор. Однако исследования доказали, что при запуске ЭД постоянного тока возникает пусковой ток значительной величины, который оказывает влияние на напряжение питающей сети. При этом отключается электрооборудование, получающее питание от этой сети. Существует несколько вариантов решения этой проблемы: ограничение пускового тока или обеспечение плавного пуска ЭД, подключение

Попов С. В., Бурмакин О. А., Малышев Ю. С. Сравнительный анализ принципов проектирования электрогидравлических рулевых машин скоростных судов

питания приводного ЭД к отдельному источнику, установка буферной аккумуляторной батареи в цепь питания ЭД. Вследствие установки дополнительного оборудования неизбежно будут увели-

чиваться массогабаритные показатели системы в целом, что при проектировании скоростных судов является неприемлемым.

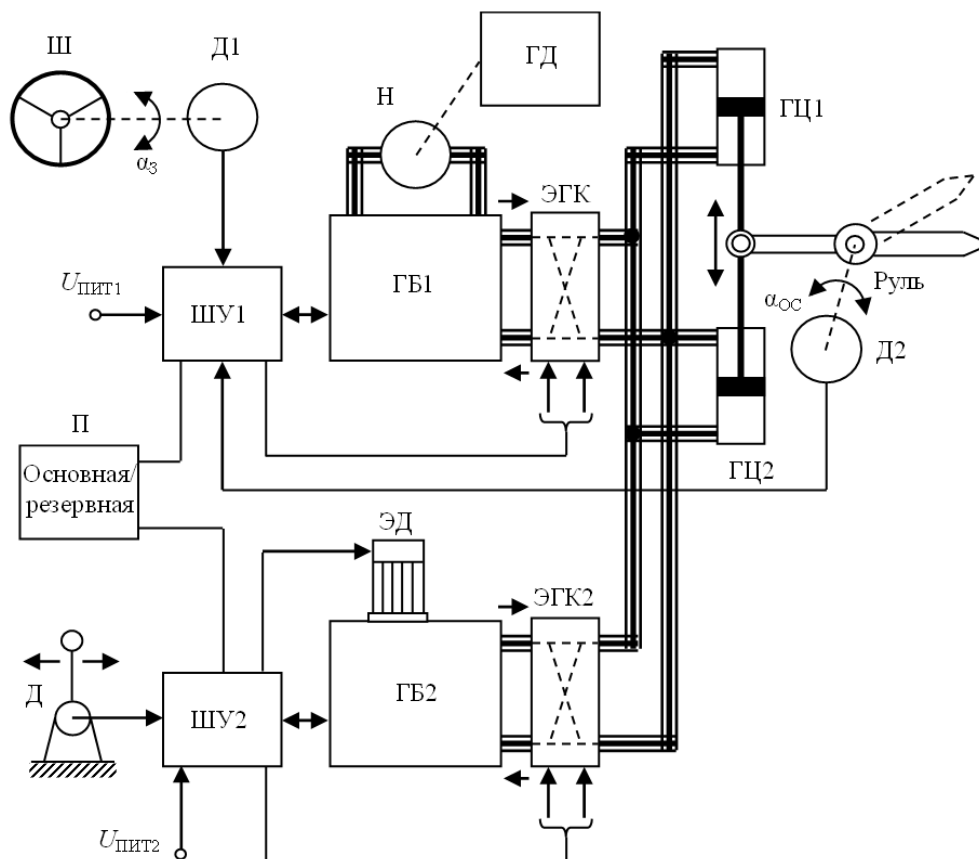


Рис. 4. Структурная схема электрогидравлической РМ с основной и резервной гидростанциями

Fig. 4. Structural diagram of an electro-hydraulic steering machine with a main and a backup hydraulic station

Следует отметить, что для большинства судовых ЭД постоянного тока напряжением 24 В, выпускаемых отечественной промышленностью, номинальным режимом работы двигателей является повторно-кратковременный режим S2 и выше (от продолжительности включения – 25 %). Судовые ЭД с длительным режимом работы S1 (продолжительность включения – выше 60 %) выпускаются зарубежной промышленностью. Поэтому при использовании отечественных ЭД необходимо завышать их мощность, а в ряде случаев обеспечивать внешнее охлаждение. Такие решения неизбежно приводят к увеличению массогабаритных показателей гидравлической станции по сравнению с установками зарубежного производства со схожими показателями гидравлической системы.

Использование асинхронных двигателей, работающих в режиме S1, позволяет снизить массогабаритные и стоимостные показатели. Однако применение ЭД переменного тока требует наличия сети переменного тока и решения вопроса обеспечения питанием ЭД в аварийных режимах работы судна, когда источник переменного тока не работает.

Схема варианта реализации гидравлической станции с двумя ЭД насосов разного рода тока приведен на рис. 5. В штатных режимах работы судна будет работать ЭД переменного тока M1, а в аварийных – постоянного тока M2 от аккумуляторной батареи в течение ограниченного времени. Исходя из требования правил РКО, энергии аварийного источника должно быть достаточно для работы РМ не менее 30 мин.

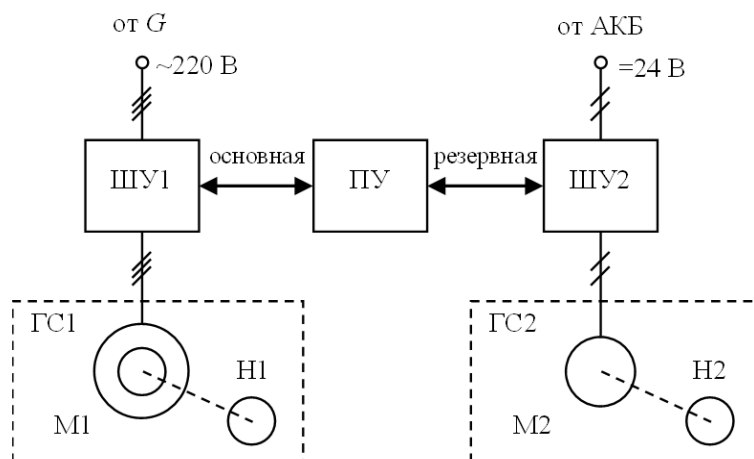


Рис. 5. Структурная схема электрогидравлической РМ с приводами насосов основной и резервной гидростанций от электродвигателей разного рода тока

Fig. 5. Structural diagram of an electro-hydraulic steering machine with pump drives of the main and backup hydraulic stations from electric motors of various types of current

Также заслуживает внимания вариант реализации электропривода РМ с питанием от сети переменного тока и аварийного источника. Такой электропривод построен по системе «преобразователь частоты – асинхронный двигатель» (ПЧ – АД) (рис. 6). Преобразователь частоты позволяет выполнить плавный разгон ЭД насоса и исключить бросок тока при пуске [12, 16]. В штатном режиме работы ПЧ электроэнергия поступает к ЭД через выпрямитель (В) и инвертор (И). При этом аккумуляторная батарея (АКБ) повышенного напряжения, выполняющая роль аварийного источника, будет заряжаться от выпрямителя (В).

При отключении основного питания от генератора G происходит автоматическое переключение питания на АКБ. В зависимости от номинального значения напряжения питания ЭД АКБ может состоять из 25 аккумуляторов напряжением 12 В при $U_{ном} = 220$ В или из 43-х при $U_{ном} = 380$ В. Емкость таких аккумуляторов будет зависеть от номинальной мощности ЭД и времени его работы. Например, для ЭД 5,5 кВт с напряжением 380 В при работе в течение 30 мин емкость АКБ будет составлять 5 А·ч. Несмотря на увеличение массогабаритных показателей РМ, надежность РМ будет существенно повышена.

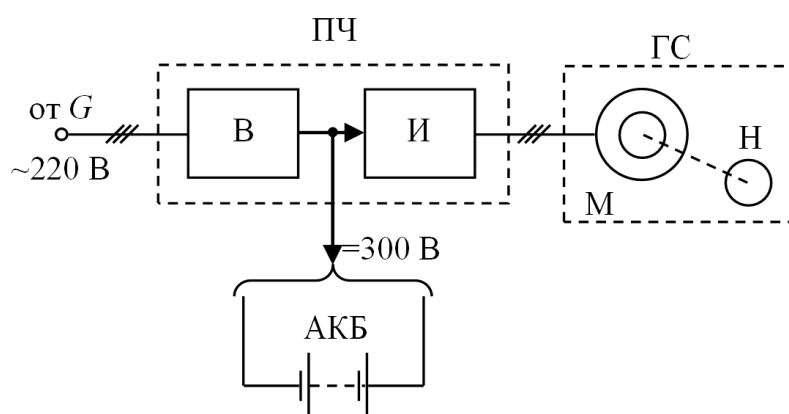


Рис. 6. Структурная схема электрогидравлической РМ с приводом насоса от электродвигателя переменного тока и аварийным источником питания повышенного напряжения

Fig. 6. Structural diagram of an electro-hydraulic steering machine with a pump drive from an AC motor and an emergency high voltage power supply

Кроме того, установленные ПЧ и АКБ для основной РМ могут быть использованы для питания электропривода резервной РМ, что приведет к снижению массогабаритных показателей для РМ в целом по сравнению с вариантами, рассмотренными ранее.

Заключение

Анализ существующего судового электрообор-

удования, предлагаемого на российском рынке, и судовых систем управления РМ позволяет сделать вывод о том, что существует возможность создания отечественных электрогидравлических установок для рулевых и других судовых механизмов по предложенным структурным схемам систем управления гидростанциями для скоростных судов.

Список источников

1. Правила классификации, постройки и освидетельствования судов ВВП, судов смешанного (река – море) плавания, плавучих объектов. URL: <https://rfclass.ru/izdaniya-rko/pravila-klassifikatsii-postroyki-i-osvidetelstvovaniya-sudov-vvp-sudov-smeshannogo-reka-more-plavaniya-plavuchikh-obektov/> (дата обращения: 20.05.2023).
2. Related Manuals for Kobelt 7173-K. URL: <https://www.manualslib.com/manual/1551631/Kobelt-7173-K.html#manual> (дата обращения: 20.05.2023).
3. Техническое описание системы управления РМ. URL: <https://fluidmecnica.com/en/menu/steering-gears/> (дата обращения: 22.06.2023).
4. Система управления рулевым гидроприводом Navis ST5000. URL: <https://navis.spb.ru/katalog/sistema-upravleniya-rulevym-gidroprivodom-st5000/> (дата обращения: 22.06.2023).
5. Скиданчук А. И. Гидравлические рулевые машины и гидропривод. Киев: Изд-во КГАВТ, 2007. 35 с.
6. Харин В. М., Декин Б. Г., Занько О. Н., Писклов В. Т. Судовые вспомогательные механизмы и системы. М.: Транспорт, 1992. 319 с.
7. Завиша В. В., Декин Б. Г. Судовые вспомогательные механизмы. М.: Транспорт, 1984. 392 с.
8. Рулевой автоматизированный электропривод:

- учеб.-метод. пособие / сост. А. М. Ханнанов, К. В. Чупина. Владивосток: Изд-во ДВФУ, 2018. 47 с.
9. Шмаков М. Г. Рулевые устройства судов. Л.: Судостроение, 1968. 364 с.
10. Мельников М. А., Плющаев В. И. Исследование влияния погрешностей измерения навигационных параметров на качество процесса управления безэкипажным судном // Науч. проблемы вод. трансп. 2022. № 73. С. 196–205. <https://doi.org/10.37890/jwt.vi73.326>.
11. Вагущенко Л. Л., Цымбал Н. Н. Системы автоматического управления движением судна. Одесса: Фенікс, 2007. 328 с.
12. Фрейдзон И. Р. Судовые автоматизированные электроприводы и системы. Л.: Судостроение, 1988. 472 с.
13. Богословский А. П., Певзнер Е. М., Туганов М. С. и др. Системы тиристорного управления судовыми электромеханизмами. Л.: Судостроение, 1978. 232 с.
14. Бурмака И. А., Кирис А. В., Козьминых Н. А. Судовые энергетические установки и электрооборудование судов: учеб. Одесса: Изд-во ОНМА, 2013. 136 с.
15. Дейнего Ю. Г. Эксплуатация судовых механизмов и систем. М.: Моркнига, 2012. 344 с.
16. Дементьев Ю. Н., Чернышев А. Ю., Чернышев И. А. Электрический привод. Томск: Изд-во ТПУ, 2013. 224 с.

References

1. *Pravila klassifikatsii, postroyki i osvidetel'stvovaniia sudov VVP, sudov smeshannogo (reka – more) plavaniia, plavuchikh ob'ektov* [Rules for classification, construction and inspection of GDP vessels, vessels of mixed (river – sea) navigation, floating objects]. Available at: <https://rfclass.ru/izdaniya-rko/pravila-klassifikatsii-postroyki-i-osvidetelstvovaniya-sudov-vvp-sudov-smeshannogo-reka-more-plavaniya-plavuchikh-obektov/> (accessed: 20.05.2023).
2. *Related Manuals for Kobelt 7173-K*. Available at: <https://www.manualslib.com/manual/1551631/Kobelt-7173-K.html#manual> (accessed: 20.05.2023).
3. *Tekhnicheskoe opisaniie sistemy upravleniia RM* [Technical description of the RM control system]. Available at: <https://fluidmecnica.com/en/menu/steering-gears/> (accessed: 22.06.2023).
4. *Sistema upravleniia rulevym gidroprivodom Navis ST5000* [Navis ST5000 hydraulic steering control system]. Available at: <https://navis.spb.ru/katalog/sistema-upravleniya-rulevym-gidroprivodom-st5000/> (accessed: 22.06.2023).
5. Skidanchuk A. I. *Gidravlicheskie rulevye mashiny i gidroprivod* [Hydraulic steering machines and hydraulic drive]. Kiev, Izd-vo KGAVT, 2007. 35 p.
6. Kharin V. M., Dekin B. G., Zan'ko O. N., Pisklov V. T. *Sudovye vspomogatel'nye mekhanizmy i sistemy* [Ship's aux-

- iliary mechanisms and systems]. Moscow, Transport Publ., 1992. 319 p.
7. Zavisha V. V., Dekin B. G. *Sudovye vspomogatel'nye mekhanizmy* [Ship's auxiliary mechanisms]. Moscow, Transport Publ., 1984. 392 p.
8. *Rulevoi avtomatizirovanniy elektroprivod: uchebno-metodicheskoe posobie* [Steering automated electric drive: educational and methodical manual]. Sostaviteli A. M. Khannanov, K. V. Chupina. Vladivostok, Izd-vo DVFU, 2018. 47 p.
9. Shmakov M. G. *Rulevye ustroistva sudov* [Steering devices of ships]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1968. 364 p.
10. Mel'nikov M. A., Pliushchaev V. I. *Issledovanie vliianiia pogreshnostei izmereniia navigatsionnykh parametrov na kachestvo protsessu upravleniia bezkipazhnym sudnom* [Investigation of the influence of measurement errors of navigation parameters on the quality of the pilotless vessel control process]. *Nauchnye problemy vodnogo transporta*, 2022, no. 73, pp. 196–205. <https://doi.org/10.37890/jwt.vi73.326>.
11. Vagushchenko L. L., Tsymbal N. N. *Sistemy avtomaticheskogo upravleniia dvizheniem sudna* [Automatic vessel movement control systems]. Odessa, Feniks, 2007. 328 p.
12. Freidzon I. R. *Sudovye avtomatizirovannye elektroprivody i sistemy* [Marine automated electric drives and sys-

tems]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1988. 472 p.

13. Bogoslovskii A. P., Pevzner E. M., Tuganov M. S. i dr. *Sistemy tiristorного управления судовыми электромеханизмами* [Thyristor control systems for marine electromechanics]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1978. 232 p.

14. Burmaka I. A., Kiris A. V., Koz'minykh N. A. *Sudovye energeticheskie ustanovki i elektrooborudovanie sudov: uchebник* [Marine power plants and electrical equipment

of ships: textbook]. Odessa, Izd-vo ONMA, 2013. 136 p.

15. Deinego Iu. G. *Ekspluatatsiia sudovykh mekhanizmov i sistem* [Operation of ship mechanisms and systems]. Moscow, Morkniga Publ., 2012. 344 p.

16. Dement'ev Iu. N., Chernyshev A. Iu., Chernyshev I. A. *Elektricheskii privod* [Electric drive]. Tomsk, Izd-vo TPU, 2013. 224 p.

Статья поступила в редакцию 12.07.2023; одобрена после рецензирования 18.09.2023; принята к публикации 17.01.2024
The article was submitted 12.07.2023; approved after reviewing 18.09.2023; accepted for publication 17.01.2024

Информация об авторах / Information about the authors

Сергей Васильевич Попов — кандидат технических наук, доцент; доцент кафедры электротехники и электрооборудования объектов водного транспорта; Волжский государственный университет водного транспорта; Popovsev3@ya.ru

Олег Анатольевич Бурмакин — кандидат технических наук, доцент; доцент кафедры электротехники и электрооборудования объектов водного транспорта; Волжский государственный университет водного транспорта; boa_71@mail.ru

Юрий Сергеевич Малышев — кандидат технических наук, доцент; доцент кафедры электротехники и электрооборудования объектов водного транспорта; Волжский государственный университет водного транспорта; elektrikasp@mail.ru

Sergey V. Popov — Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor; Assistant Professor of the Department of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Water Transport Objects; Volga State University of Water Transport; Popovsev3@ya.ru

Oleg A. Burmakin — Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor; Assistant Professor of the Department of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Water Transport Objects; Volga State University of Water Transport; boa_71@mail.ru

Yuriy S. Malyshev — Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor; Assistant Professor of the Department of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Water Transport Objects; Volga State University of Water Transport; elektrikasp@mail.ru

