

ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ

эксплуатация и ремонт

№ 4/2023

WWW.PANOR.PF Издательский Дом
 ПАНОРАМА
WWW.PANOR.RU НАУКА И ПРАКТИКА

ТЕМА НОМЕРА

СУДОВОЕ
ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ

ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ: ЭКСПЛУАТАЦИЯ И РЕМОНТ

№ 4 (225)
апрель / 2023

Журнал зарегистрирован
Министерством Российской Федерации
по делам печати, телерадиовещания
и средств массовых коммуникаций.

Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС77-83154 от 26.04.2022

ISSN 2074-9635

© ИД «Панорама»
www.panor.ru

Адрес редакции:

Россия, г. Москва,
Бумажный проезд, д. 14, стр. 2
Для писем: 125040, г. Москва, а/я 1

Генеральный директор

ИД «Панорама» –

Председатель Некоммерческого фонда
содействия развитию национальной
культуры и искусства

К. А. Москаленко

Издательство «Промиздат»

Главный редактор

Хатер Ж.С.

e-mail: oborud@panor.ru

**Журнал распространяется через
подписку. Оформить подписку
с любого месяца можно:**

- На нашем сайте **panor.ru**;
- Через нашу редакцию
по тел. 8 (495) 274-2222
(многоканальный) или по заявке
в произвольной форме на адрес:
podpiska@panor.ru;
- По официальному каталогу Почты
России «Подписные издания» (индекс –
П7221);
- По «Каталогу периодических изданий.
Газеты и журналы» агентства «Урал-
пресс» (индекс на полугодие – **84817**).

Предложения и замечания:

e-mail: promizdat@panor.ru
тел.: 8 (495) 274-22-22 (многокан.)

Отдел подписки:

тел.: 8 (495) 274-22-22 (многокан.)
e-mail: podpiska@panor.ru

Отдел рекламы:

тел.: 8 (495) 274-22-22 (многокан.)
e-mail: reklama@panor.ru

Журнал издается под эгидой
Международной Академии технических
наук и промышленного производства

Учредитель:

ООО «ИНДЕПЕНДЕНТ МАСС МЕДИА»,
121351, г. Москва,
ул. Молодогвардейская, д. 58, стр. 7

Приглашаем авторов к сотрудничеству.

Статьи в журнале публикуются
бесплатно.

Подписано в печать: 12.04.2023

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕМА НОМЕРА:

СУДОВОЕ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ

СЕТИ И СИСТЕМЫ

Компьютерное моделирование поиска источников фликера в электрических сетях.....3

Бирюлин В. И., Куделина Д. В.

В статье рассматриваются вопросы, связанные с обеспечением требуемого качества электрической энергии в электрических сетях и различных системах электроснабжения. Показана актуальность применения различных технических средств для выявления мест возникновения недопустимых значений показателей качества электрической энергии, в том числе различного оборудования, работа которого сопровождается быстрыми изменениями значений фазного и междуфазного напряжения. Приведены экспериментальные данные, показывающие существование при определенных условиях значительных быстрых колебаний напряжения в электрических сетях, что приводит к возникновению превышения нормированных значений кратковременной и длительной доз фликера. Предлагается упрощенный метод определения мест расположения оборудования, создающего при своей работе недопустимый уровень кратковременной и длительной доз фликера, использующий для этой цели дифференцирование токов, протекающих в разных местах электрических сетей, питающих потребителей электрической энергии. Разработана компьютерная модель простой схемы электроснабжения с подключенными к ней электроприемниками, работающими как в спокойном, так и в резко переменном режимах потребления мощности и тока. В ходе работы с этой моделью установлено, что определение значений производных тока в различных точках электрической сети с последующим анализом полученных данных предоставляет возможность нахождения оборудования, создающего недопустимые уровни быстрых изменений или же колебаний напряжения.

ОБОРУДОВАНИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ

Привода судов с воздушной подушкой и с кавернами13

Шульга Р. Н.

Рассмотрены модели судов на воздушной подушке (СВП) и показано, что для них рассчитать сопротивление и потребную мощность сложнее, чем для моделей судов других типов. Это связано с необходимостью расчета мощности двигателя, обеспечивающего работу вентиляторной установки, создающей воздушную подушку. Приведены графики для расчета вентиляторной установки модели. Сопоставлены конструкции зарубежного безюбочного судна по технологии ALC и отечественного судна на кавернах, отмечены преимущества последнего типа в части конструктивных и эксплуатационных показателей. Выполнен анализ перспектив развития технологий СВП, которые позволяют для водоизмещающих судов использовать новые виды транспорта: либо на подводных крыльях, на воздушной подушке (включая каверны), а в ряде случаев на экранном эффекте (включая пузырьковую смазку).

Факторы, определяющие состояние заземляющих устройств карьерной распределительной сети24

**Абдуллозода И. Т., Бобоев Х. Д., Каримзода Д. Х.,
Курбонова Н. Д.**

Редакционный совет:

Богатырев А. В., генеральный директор ООО «Теплоэнергоэксперт», г. Москва

Гамазин С. И., д-р техн. наук, профессор, НИУ МЭИ, Москва

Корнилов Г. П., д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск

Крюков О. В., д-р техн. наук, действит. член Академии инженерных наук им. А.М. Прохорова, доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород

Кувалдин А. Б., д-р техн. наук, профессор, НИУ МЭИ, г. Москва

Михеев Г. М., д-р техн. наук, профессор кафедры электрических систем физики и математики, Чебоксарский политехнический институт (филиал Московского государственного университета машиностроения, МАМИ), г. Чебоксары

Шульга Р. Н., канд. техн. наук, вед. научный сотрудник ВЭИ – филиал ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ им. акад. Е. И. Забабахина», г. Москва

Editorial board:

Bogatyrev A. V., general director of Teplo-energoexpert LLC, Moscow

Gamazin S. I., Dr. habil. of technical sciences, professor, NRU MPEI, Moscow

Kornilov G. P., Dr. habil. of technical sciences, professor, the head of department of power supply at the industrial enterprises, Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov, city of Magnitogorsk

Kriukov O. V., Dr. habil. of technical sciences, full member of the Academy of Engineering Sciences named after A.M. Prokhorov, associate professor of the Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, city of Nizhny Novgorod

Kuvaldin A. B., Dr. habil. of technical sciences, professor, NRU MPEI, Moscow

Mikheev G. M., Dr. habil. of technical sciences, professor, department of electrical systems of physics and mathematics, Institute of the Cheboksary branch of the Moscow State Polytechnical University, city of Cheboksary

Shulga R. N., candidate of technical sciences, senior researcher at the VEI – branch of FSUE "RFNC – VNIITF named after Academician E. I. Zababakhin", Moscow

В данной статье приведены различные факторы, оказывающие влияние на состояние заземляющих устройств карьерной распределительной сети. В ходе работы проведен анализ состояния заземляющих устройств о необходимости контроля цепи заземления в целях обеспечения безопасности при эксплуатации электрифицированных установок.

Пропульсивный комплекс подводных судов и подводных аппаратов 29

Шульга Р. Н.

Выполнен анализ тяговых характеристик и сопротивления движению с использованием моделей подводных судов ПС и подводных лодок ПЛ. Показан способ пересчета параметров модели на натурные судна. Рассмотрены варианты управления и методы повышения энергоэффективности пропульсивных комплексов ПК. Анализируются энергетические характеристики ПК для различных движителей с учетом их КПД, удельной мощности и энерговооруженности. Для подводных дронов и торпед приведены различные типы движителей источников энергии с учетом существенных ограничений по объему, мощности и заметности движения.

МОДЕЛИ И РАСЧЕТЫ

Цифровые двойники судовых пропульсивных комплексов 40

Шульга Р. Н.

Выполнен анализ и приведены уравнения модели традиционного судового пропульсивного комплекса (ПК) на основе формирования САПР с использованием библиотек программ для различных судов. Для нетрадиционного ПК с использованием воздушной смазки типа ALS (air lubrication system), снижающей сопротивление судна, приведена структура модели и библиотека ее элементов. Эти элементы включают: двигатель, корпус судна и гребной винт, систему распределения воздуха, трубопроводы и систему управления. Приведены результаты моделирования динамики интегрированной системы, которая может быть использована для формирования цифрового двойника нетрадиционного ПК водоизмещающего судна.

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

Анализ и разработка малых гидроэлектростанций 52

Кожевников Е. Е.

Малые гидроэлектростанции (МГЭС) имеют много преимуществ перед крупными гидроэлектростанциями. МГЭС признана хорошей альтернативой традиционному производству электроэнергии для многих развивающихся стран мира. Однако создание таких проектов МГЭС может быть связано с различными техническими и экономическими сложностями. Экономическая целесообразность установок МГЭС во многом зависит от выбранного места и его гидрологических характеристик. Размер системы и конструктивные параметры должны быть тщательно выбраны для оптимизации экономической работы электростанции. Как правило, экономичная работа русловых электростанций требует работы в широком диапазоне расходов. Поэтому турбина и генераторные установки должны иметь широкий рабочий диапазон с хорошим КПД во всем диапазоне. В дополнение к этому требуется удовлетворительный механизм управления для поддержания синхронности с сетью при различных скоростях потока. В данной статье представлен экономический анализ и разработка малой гидроэлектростанции. В работе определяются оптимальные размеры мощности системы для экономической эксплуатации гидроэлектростанции руслового типа.

УДК 621.311

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОИСКА ИСТОЧНИКОВ ФЛИКЕРА В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ ¹

Бирюлин В. И., канд. техн. наук, доцент кафедры электроснабжения,
Куделина Д. В., канд. техн. наук, доцент кафедры электроснабжения,
Юго-Западный государственный университет, г. Курск

В статье рассматриваются вопросы, связанные с обеспечением требуемого качества электрической энергии в электрических сетях и различных системах электроснабжения. Показана актуальность применения различных технических средств для выявления мест возникновения недопустимых значений показателей качества электрической энергии, в т. ч. различного оборудования, работа которого сопровождается быстрыми изменениями значений фазного и междуфазного напряжения. Приведены экспериментальные данные, показывающие существование при определенных условиях значительных быстрых колебаний напряжения в электрических сетях, что приводит к возникновению превышения нормированных значений кратковременной и длительной доз фликера. Предлагается упрощенный метод определения мест расположения оборудования, создающего при своей работе недопустимый уровень кратковременной и длительной доз фликера, использующий для этой цели дифференцирование токов, протекающих в разных местах электрических сетей, питающих потребителей электрической энергии. Разработана компьютерная модель простой схемы электроснабжения с подключенными к ней электроприемниками, работающими как в спокойном, так и в резко переменном режимах потребления мощности и тока. В ходе работы с этой моделью установлено, что определение значений производных тока в различных точках электрической сети с последующим анализом полученных данных предоставляет возможность нахождения оборудования, создающего недопустимые уровни быстрых изменений или же колебаний напряжения.

Ключевые слова: качество, электроэнергия, фликер, резкопеременная нагрузка, компьютерное моделирование, доза фликера.

COMPUTER SIMULATION OF THE FLICKER SOURCES SEARCH IN THE ELECTRIC NETWORKS

Biryulin V. I., PhD of technical sciences, associate professor of the department of power supply,

¹ Исследование выполнено в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук МК-5109.2022.4 «Разработка автоматизированной системы выявления объектов, оказывающих негативное влияние на качество электроэнергии».

Kudelina D. V., PhD of technical sciences, associate professor of the department of power supply,

Southwest State University, Kursk

The article deals with the issues related to ensuring the required quality of electrical energy in electrical networks and various power supply systems. The relevance of the various technical means use to identify the places of unacceptable values occurrence of electric energy quality indicators, including various equipment, the operation of which is accompanied by rapid changes in the values of phase and phase-to-phase voltage, is shown. Experimental data are presented showing the existence under certain conditions of significant rapid voltage fluctuations in electrical networks, which leads to the occurrence of exceeding the normalized values of short-term and long-term flicker doses. A simplified method is proposed for determining the location of equipment that creates an unacceptable level of short-term and long-term flicker doses during its operation, using for this purpose the differentiation of currents flowing in different places of electrical networks which supply consumers of electrical energy. A computer model of a simple power supply circuit with power receivers connected to it, operating both in quiet and in sharply variable modes of power and current consumption, has been developed. In the course of working with this model, it was found that the determination of the values of current derivatives at various points of the electrical network, followed by analysis of the data obtained, makes it possible to find equipment that creates unacceptable levels of rapid changes or voltage fluctuations.

Keywords: quality, electric power, flicker, sharply variable load, computer simulation, flicker dose.

ВВЕДЕНИЕ

Современное товарное производство обеспечивает потребителей самыми разнообразными товарами, в т. ч. и электрической энергией. Как и вся товарная продукция, предназначенная для реализации, электроэнергия должна обладать качеством, обеспечивающим нормальную обстановку для работы как электроприемников потребителей, так и различного электротехнического оборудования систем электроснабжения.

Для электроэнергии качество следует рассматривать как оценку величин определенных, установленных нормативными документами характеристик данной энергии, контролируемых в точках ее передачи различным потребителям. Данные точки могут располагаться в электрических сетях различного класса напряжения, входящих в состав систем электроснабжения общего назначения, работающих на переменном токе частотой 50 Гц [1].

Конкретное положение этих точек устанавливается в документах, регламентирующих отношения между поставщиком электроэнергии и потребителем.

Обоснование вывода о выполнении требований к качеству электроэнергии производится с использованием значений показателей качества электроэнергии, определенных для нормируемых параметров напряжения в системах электроснабжения [1, 2]. Величины данных параметров должны измеряться в точках передачи электроэнергии, при работе систем электроснабжения они изменяются по времени. Возникновение этих изменений происходит из-за действия различных факторов, например:

- непостоянство во времени электрических нагрузок различных потребителей электроэнергии;
- широкое применение различных электронных преобразователей;
- возникновение бросков и провалов напряжения при различных комму-

тационных процессах в электрических сетях [2–4].

Также к причинам нарушения качества электроэнергии относятся быстрые изменения или же колебания напряжения, возникающие чаще всего при работе электроприемников, имеющих резкопеременный или беспокойный характер работы, например, сварочные установки. Существование заметных по величине колебаний напряжения в электрических сетях приводит к нежелательным последствиям. Наиболее сильно эти негативные последствия ощущаются в электрических сетях, к которым подключены системы электрического освещения. У световых приборов в этих сетях возникают быстрые по скорости и значительные по величине изменения светового потока, что создает неприятное для зрения человека мерцание света [5, 6].

Это воздействие на органы человеческого зрения определяется как фликер. Возникновение фликера в системах электрического освещения сопровождается быстрой утомляемостью персонала, что может повлечь возможный рост брака выпускаемой промышленной продукции и потенциальную опасность увеличения числа производственных травм [7–9]. Исследования процессов, возникающих при быстрых колебаниях напряжения, широко представлены и в зарубежных источниках, что доказывает актуальность проблемы поддержания допустимого

качества электроэнергии в этих случаях [10–15].

Чтобы оценить допустимость уровня фликера, используются два показателя:

- кратковременная доза фликера (P_{st}), для которой установлено значение в относительных единицах 1,38;
- длительная доза фликера (P_{lf}), для которой установлено значение в относительных единицах 1,0.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Превышение значений нормативных пределов тех или иных показателей, определяющих качество электрической энергии в электрических сетях, в т. ч. кратковременной и длительной доз фликера, неоднократно фиксировались авторами статьи при проведении энергетических обследований. Для подтверждения этих слов рассмотрим на приведенных ниже двух рисунках (рис. 1 и 2) суточные графики измеренных приборами «Ресурс-ПКЭ» величин двух составляющих доз фликера. Представленные для обсуждения графики были построены по результатам обследования качества электроэнергии авторами статьи. На этих графиках зафиксировано превышение нормативных значений, принятых для кратковременной и длительной доз фликера, что является нарушением качества электрической энергии.

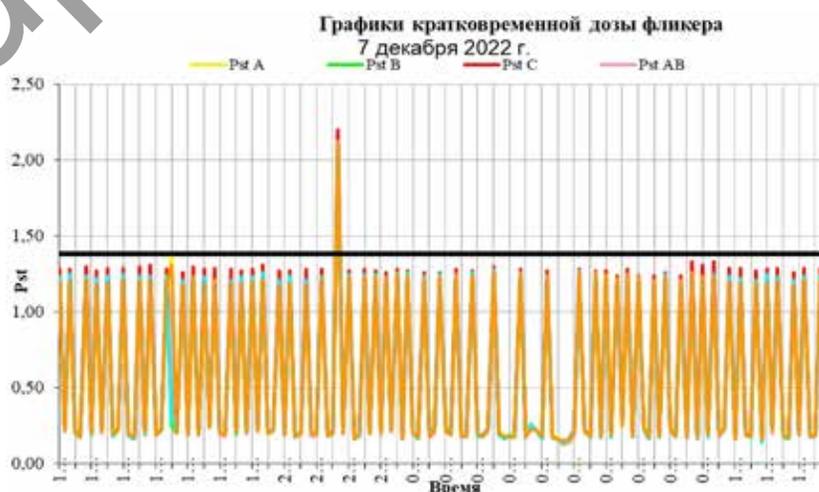


Рис. 1. Суточный график изменения значений P_{st}

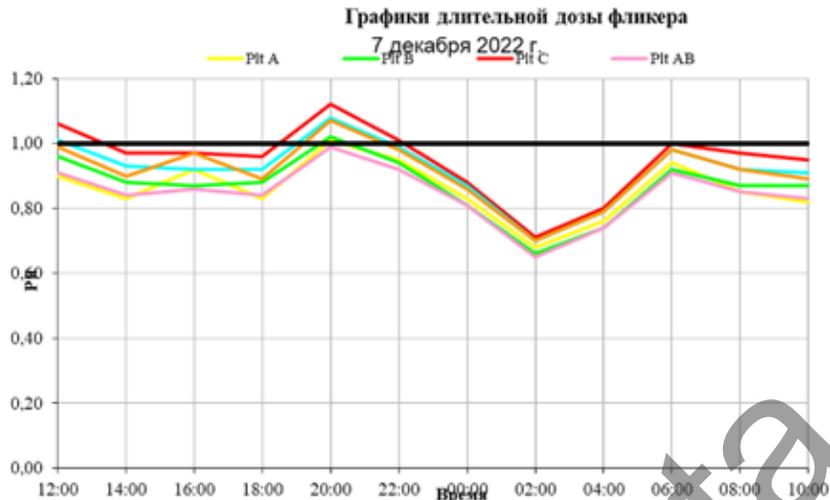


Рис. 2. Суточный график изменения значений P_{st}

Дополнительно к графикам приведем количественные данные по этим показателям качества электроэнергии в табл. 1 и 2.

Проведем краткий анализ приведенных величин этих двух доз фликера. В той электрической сети, где проводились измерения, зафиксировано нарушение качества электрической энергии.

Кратковременная доза фликера достигла значения от 2,00 до 2,20, что превышает установленное значение, равное 1,38, несмотря на кратковременность этого процесса – длительность превышения нормативного значения составила 0,69% от всего интервала времени проведения измерений показателей качества электроэнергии. Значение длительной дозы

фликера (от 1,01 до 1,12) также превышало по всем трем фазам предельную допустимую величину, равную 1,00. Длительность данного нарушения качества электрической энергии доходила до 25,00% от всего интервала времени проведения измерений.

После обнаружения нарушения качества электроэнергии необходимо разработать мероприятия по поиску оборудования или электроприемников, работа которых приводит к возникновению в электрических сетях недопустимых значений как кратковременной, так и длительной доз фликера. Другими словами, необходимо решить задачу локализации причины нарушения качества электроэнергии.

Таблица 1

Значения P_{st}

Фаза А		Фаза В		Фаза С	
результат измерений	$T_{2'}\%$	результат измерений	$T_{2'}\%$	результат измерений	$T_{2'}\%$
2,03	0,69	2,00	0,69	2,20	0,69

Таблица 2

Значения P_{lt}

Фаза А		Фаза В		Фаза С	
результат измерений	$T_{2'}\%$	результат измерений	$T_{2'}\%$	результат измерений	$T_{2'}\%$
1,01	8,33	1,02	8,33	1,12	25,00

В проведенных ранее исследованиях и других источниках указывается, что возникновение недопустимых величин как кратковременной, так и длительной доз фликера происходит из-за использования потребителями электроприемников, работающих в режимах с резким и быстрым изменением потребляющей мощности [8, 9, 16]. Также в этих работах отмечается тот факт, что работа подобных электроприемников сопровождается возникновением в электрических сетях интергармонических составляющих или интергармоник сетевого напряжения [17–19].

В общем случае определение с допустимой погрешностью мест расположения в электрических сетях потребителей электроэнергии, создающих быстрые изменения напряжения, может выполняться с применением достаточно большого количества измерительных приборов, предназначенных для получения значений обеих доз фликера. Необходимо также при этом учитывать, что такой подход нельзя считать оптимальным из-за довольно высокой стоимости указанных приборов. Это обеспечивает актуальность задачи разработки и применения более простых приборов, чем упомянутые, и имеющих достаточно низкую стоимость измерительных средств, ориентированных на поиск мест нахождения электроприемников, создающих недопустимые дозы фликера в электрических сетях.

Проведем анализ возможности использования значений интергармони-

ческих составляющих сетевого напряжения (имеющих частоту, не кратную в целых числах частоте 50 Гц) или интергармоник для построения измерительных технических средств, обеспечивающих выявление оборудования, создающего значительные по величине колебания напряжения. Изучим представленные выше экспериментальные данные.

Для выполнения анализа экспериментальных данных используем максимальные значения интергармоник напряжения одной из фаз электрической сети (рассматриваем фазу В), которые приведены ниже в табл. 3. Данные значения получены в интервал времени, за который происходило возникновение превышения допустимых норм фликера. Фаза В выбрана для рассмотрения из-за возникновения в ней наибольшего значения доз фликера.

Как видно из данных, приведенных в табл. 3 (для сокращения объема статьи приведены данные только по фазе В – по другим фазам данные примерно такие же), при возникновении недопустимого значения кратковременной дозы фликера (промежуток времени от 21:30 до 22:20) происходит возрастание величин интергармонических составляющих.

Исходя из этого, значения интергармоник можно применять для создания измерительных устройств для локализации расположения в системах электроснабжения оборудования, создающего при своей работе недопустимые значения фликера. Но для контроля значительного количе-

Таблица 3

Значения интергармонических составляющих напряжения

Дата	Время	Интергармонические составляющие				
		$K_{UB\ ig(1)}$	$K_{UB\ ig(2)}$	$K_{UB\ ig(3)}$	$K_{UB\ ig(4)}$	$K_{UB\ ig(5)}$
07.12.22	21:30	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00
07.12.22	21:40	0,04	0,01	0,01	0,01	0,00
07.12.22	21:50	0,02	0,01	0,01	0,00	0,01
07.12.22	22:00	0,04	0,04	0,02	0,02	0,01
07.12.22	22:10	0,02	0,02	0,00	0,01	0,00
07.12.22	22:20	0,02	0,01	0,02	0,00	0,00

ства интергармоник в таких устройствах должно применяться большое количество фильтров входного сигнала с высокими параметрами, обеспечивающих выявление различных частот.

При выборе способа выявления в электрических сетях источников недопустимо больших значений фликера необходимо принимать во внимание тот факт, что применение только значений напряжения для построения измерительных приборов не может гарантировать обоснованного вывода о расположении оборудования, нарушающего качество электроэнергии.

Для пояснения рассмотрим возможности определения причины недопустимых значений фликера для точки, в которой происходит передача электроэнергии от энергоснабжающей организации потребителям. Для изучения данного вопроса воспользуемся схемой, показанной на рис. 3. Данная схема представляет достаточно простую систему электроснабжения, содержащую следующие основные части:

- поставщик электроэнергии (на схеме показан в виде источника переменного напряжения U);
- точка передачи электроэнергии ТПЭ;
- электрическая сеть, находящаяся на балансе потребителя электроэнергии, питающая два электроприемника P1 и P2.

Один из этих электроприемников (P1) является нагрузкой, работающей в режиме с быстрыми колебаниями потребления мощности и тока, потенциально способными создать недопустимые дозы фликера. Второй электроприемник (P2) представляет собой спокойную по своему характеру нагрузку.

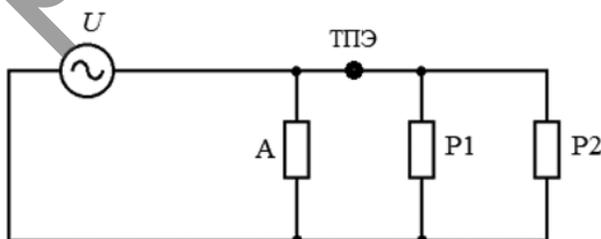


Рис. 3. Схема простой системы электроснабжения

Теперь предположим, что к ТПЭ присоединены измерительные приборы, контролирующие значения показателей качества электроэнергии, в т. ч. и двух, перечисленных выше, доз фликера. Изначально предположим, что электроприемник P1 временно не работает, и в составе энергоснабжающей организации имеется электрооборудование, создающее большие колебания напряжения, что в итоге приводит к появлению недопустимо больших доз фликера. Такое нарушение качества электроэнергии, разумеется, будет фиксироваться приборами, подключенными к ТПЭ.

Возможен и другой случай — источник фликера, находящийся в составе энергоснабжающей организации в рассматриваемый момент времени, не является источником нарушения качества электроэнергии (он либо не работает, либо работает в режиме с небольшим влиянием на качество электрической энергии, а работающий электроприемник P1 создает значительные колебания напряжения, что приводит к недопустимым дозам фликера.

В обоих случаях применение в качестве исходной информации только значений напряжений в ТПЭ не позволяет получить обоснованный вывод о расположении значительных доз фликера. И поэтому для обеспечения поиска места расположения источника недопустимого фликера необходимо пользоваться дополнительной информацией [20].

Теперь проведем краткий анализ другого способа, основанного на использовании значений производных токов в электрических сетях, поиска мест расположения оборудования, приводящего к значительным колебаниям напряжения в электрической сети и в итоге к превышению нормативных значений фликера.

Работа измерительных устройств для поиска фликера на основе рассматриваемого метода основана на выявлении высокой скорости изменения потребления тока, что позволит определять месторасположение такого оборудования, создающего значительные колебания

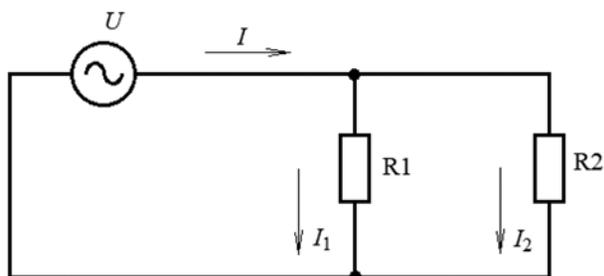


Рис. 4. Схема рассматриваемой электрической сети

напряжения в электрической сети. Чтобы проверить возможность использования предлагаемого способа, произведем компьютерное моделирование режимов работы схемы электрической сети, содержащей источник питания и две нагрузки – рис. 4.

Схема, приведенная на рис. 4, содержит источник питания – энергоснабжающую организацию и два разнородных по характеру работы электроприемника, входящие в состав потребителя электроэнергии. Элемент схемы R1 является электроприемником, имеющим резкопеременный режим работы (потенциальный источник больших доз фликера), а элемент R2 – электроприемник, работающий без значительных и резких изменений потребления тока. Исходя из этой схемы, весь ток I , потребляемый нагрузкой, дол-

жен включать в себя отдельные составляющие:

- I_1 или ток, создаваемый электроприемником R1;
- I_2 или ток, создаваемый электроприемником R2.

Получение значений производных всех рассматриваемых токов I , I_1 и I_2 можно выполнить на основе известных и достаточно простых схем дифференцирующих цепей. Использование измеренных значений скоростей изменения значений токов позволит в случае фиксации большой разницы значений производных токов в различных точках схемы сделать обоснованный вывод о расположении оборудования, создающего большие и резкие колебания напряжения, сопровождающиеся недопустимыми значениями фликера.

Чтобы провести исследование режимов работы схемы (рис. 4), разработана расчетная компьютерная модель в программной среде Simulink системы MatLab, предназначенной для выполнения расчетов в различных областях науки и техники. Структура и состав созданной модели приведены далее на рис. 5.

Данная модель представляет однофазную схему сети, приведенную на рис. 4. Нагрузка сети представлена двумя

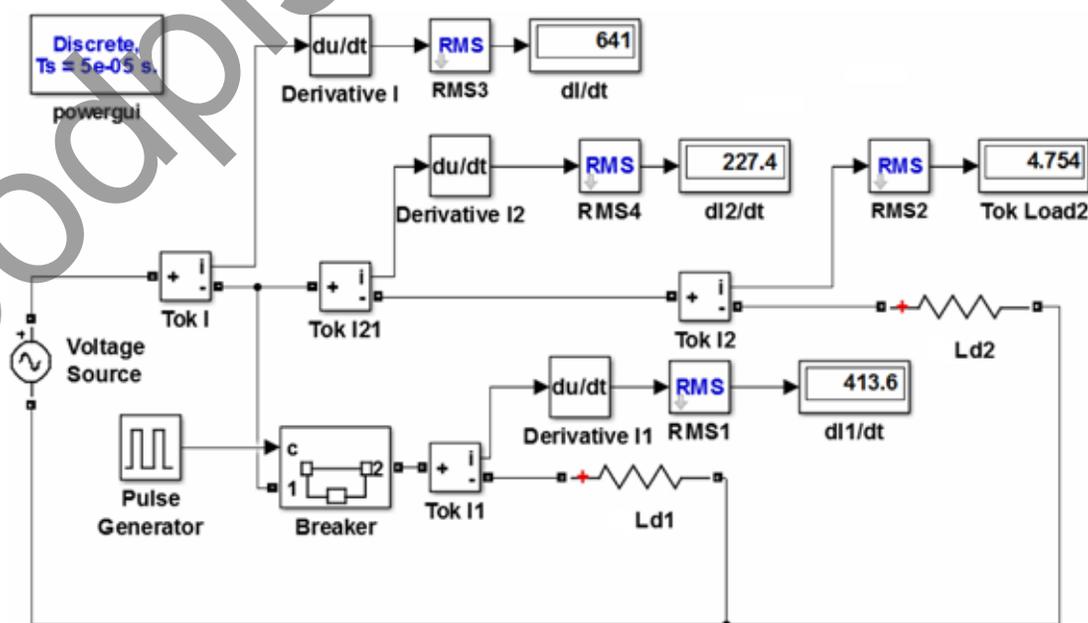


Рис. 5. Компьютерная модель исследуемой электрической сети

блоками – Ld1, моделирующим работу электрооборудования с резко изменяющимся потреблением тока, и Ld2, моделирующим работу электрооборудования, не создающего значительные колебания напряжения.

Токи, потребляемые этими нагрузками из электрической сети, контролируются измерительными блоками (амперметрами) Tok I, Tok I21. Амперметр Tok I предназначен для получения значения производной суммарного тока нагрузки. Непосредственно значение производной находится с помощью блока дифференцирования Derivative I. Измерительный комплект, состоящий из блоков Tok I21 и Derivative I2, позволяет определить производную тока нагрузки Ld2. Комплект блоков Tok I1 и Derivative I1 предназначен для получения значений производной тока нагрузки Ld1. Найденные в ходе работы модели значения всех измеренных величин регистрируются блоками вывода – дисплеями.

Значительные изменения потребления тока и мощности при работе нагрузки Ld1 создавались выключателем Breaker, обеспечивающим подключение и отключение данного электроприемника от электрической сети.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Значения всех контролируемых производных токов, полученных в ходе процесса работы компьютерной модели, можно определить по соответствующим дисплеям (рис. 5): величина производной тока, потребляемого первым электроприемником (Ld1 – потенциальный источник фликера) составляет 413,6, а для второго электроприемника – 227,4.

Полученные результаты наглядно показывают, что наличие в составе потребителей электроприемников, работающих в режиме с резко переменной нагрузкой, приводит к тому, что в системе электроснабжения возникает режим со значительной разницей между производными тока в тех или иных точках данной системы.

Поэтому можно использовать достаточно простые по схемному решению устройства для определения значений производных токов в произвольно расположенных местах различных электрических сетей. Это позволит определять расположение в данной сети электроприемников, работа которых сопровождается быстрыми изменениями тока и мощности, что является причиной возникновения недопустимых доз фликера.

Такие устройства в своей работе не нуждаются в контроле значительного количества параметров режимов электрических сетей, поэтому они могут быть построены на простых технических решениях, что в итоге обеспечивает их относительно невысокую цену. Эти свойства обеспечат выпуск таких устройств в достаточно большом количестве и позволят производить значительное количество измерений за короткое время.

Предложенный авторами подход к созданию простых и недорогих средств контроля качества электроэнергии в различных системах электроснабжения может широко использоваться для успешного поиска оборудования, создающего недопустимые дозы фликера при своей работе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренный способ поиска оборудования, создающего недопустимые дозы фликера при своей работе, на основе контроля значений производных токов в различных точках электрических сетей, обеспечивает достаточно точное нахождение местоположения различного электрооборудования, создающего колебания напряжения в электрической сети, приводящие к превышению допустимых значений кратковременной и длительной доз фликера. Это позволяет делать обоснованный вывод, где же непосредственно создаются значительные и резкие колебания напряжения – в сетях энергоснабжающей организации или же они возникают в сетях потребителя.

Наличие такой информации позволяет принимать правильные решения по разработке и внедрению мероприятий для снижения колебаний напряжения и повышению качества электроэнергии, что в конечном итоге должно обеспечить снижение негативных последствий, проявляющихся при нарушениях качества электроэнергии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Качество электрической энергии: современное состояние, проблемы и предложения по их решению / Л.И. Коверникова, В.В. Суднова, Р.Г. Шамонов и др.; отв. ред. Н.И. Воропай. – Новосибирск: Наука, 2017. – 219 с.

2. **Дед А.В., Сикорский С.П., Смирнов П.С.** Результаты измерений показателей качества электроэнергии в системах электроснабжения предприятий и организаций // Омский научный вестник. – 2018. – № 2 (158). – С. 60–64. – DOI: 10.25206/1813-8225-2018-158-60-64.

3. **Солнцев Е.Б., Мамонов А.М., Фитасов А.Н., Петрицкий А.С., Севостьянов А.А.** Анализ качества электроэнергии (колебаний напряжения) при распределенной генерации // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2019. – № 3 (87). – С. 37–40. – DOI 10.18635/2071-2219-2019-3-37-40.

4. **Харитонов Я.С., Бебихов Ю.В., Егоров А.Н.** Сопоставление и анализ результатов контроля качества электроэнергии в системах электроснабжения горных предприятий // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2019. – № 4. – С. 54–59. – URL: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=12697> (дата обращения: 19.12.2022). – DOI 10.17513/mjpf.12697.

5. **Белей В.Ф., Харитонов М.С.** Светодиодные лампы в системах судового освещения: вопросы электромагнитной совместимости // Вестник МГТУ. – 2016. – Т. 19, № 4. – С. 687–696. – DOI: 10.21443/1560-9278-2016-4-687-696.

6. **Кузнецов С.Е.** Судовые электрические источники света: состояние и перспективы развития / С.Е. Кузнецов, Ю.В. Кудрявцев // Вестник Гос. ун-та мор-

ского и речного флота им. адм. С.О. Макарова. – 2017. – Т. 9. – № 4. – С. 786–794. – DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-786-794.

7. **Лисицкий К.Е.** Совершенствование методов и средств оценки фликера при использовании источников света с разной чувствительностью к колебаниям напряжения в электрической сети // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2018. – Т. 20. – № 5-6. – С. 55–66. – DOI: 10.30724/1998-9903-2018-20-5-6-55-66.

8. **Корнилов Г.П., Баранкова И.И., Лукьянов Г.И., Карякин А.Л.** Расчет кратковременной дозы фликера в электрических сетях предприятий // Электротехнические системы и комплексы. – 2019. – № 3. – С. 10–15. – URL: [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-3\(44\)-10-15](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-3(44)-10-15).

9. **Булатов Ю.Н.** и др. Устранение фликера в сетях с установками распределенной генерации на основе согласованно настроенных регуляторов. Системы. Методы. Технологии // Братский государственный университет. – 2017. – № 4 (36). – С. 108–114. – DOI: 10.18324/2077-5415-2017-4-108-114.

10. **Batkiewicz-Pantula M.** Elimination of disruption on the example of flicker // Progress in Applied Electrical Engineering (PAEE). – 2017. – DOI: 10.1109/PAEE.2017.8009000.

11. **Batkiewicz-Pantula M.** The algorithm for determining the coefficient of flicker on the example of a wind power plant // Electronics Computers and Artificial Intelligence (ECAI). 10th International Conference on. – 2018. – Pp. 1–6. – DOI: 10.1109/ECAI.2018.8679059.

12. **Maksić M., Papić I., Blažič B.** Simple Continuous Assessment of Transmission-Network Flicker Levels Caused by Multiple Sources // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2016. – Vol. 31. Issue 6. – Pp. 1–6; 2018. – Pp. 2546–2552. – DOI: 10.1109/TPWRD.2015.2502984.

13. **Chang G.W., Lu H.J., Chuang C.S.** An accurate hybrid intelligent approach for forecasting flicker severity caused by electric arc furnaces // Elect. Power Syst. Res. – 2015. – Vol. 121. – Pp. 101–108.

УДК 629.57

ПРИВОДА СУДОВ С ВОЗДУШНОЙ ПОДУШКОЙ И С КАВЕРНАМИ

Шульга Р. Н., канд. техн. наук,

ВЭИ – филиал ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ им. акад. Е. И. Забабахина», г. Москва

Рассмотрены модели судов на воздушной подушке (СВП) и показано, что для них рассчитать сопротивление и потребную мощность сложнее, чем для моделей судов других типов. Это связано с необходимостью расчета мощности двигателя, обеспечивающего работу вентиляторной установки, создающей воздушную подушку. Приведены графики для расчета вентиляторной установки модели. Сопоставлены конструкции зарубежного безюбочного судна по технологии ALC и отечественного судна на кавернах, отмечены преимущества последнего типа в части конструктивных и эксплуатационных показателей. Выполнен анализ перспектив развития технологий СВП, которые позволяют для водоизмещающих судов использовать новые виды транспорта: либо на подводных крыльях, на воздушной подушке (включая каверны), а в ряде случаев на экранном эффекте (включая пузырьковую смазку).

Ключевые слова: привод, судно на воздушной подушке, безюбочное судно, судно с кавернами, технология.

DRIVES FOR HOVERCRAFT AND CAVERNS

Shulga R. N., PhD of technical sciences,

VEI – branch of FSUE "Academician Zababakhin RFNC – VNIITF", Moscow

Models of hovercraft (HV) are considered and it is shown that it is more difficult to calculate the resistance and required power for them than for models of ships of other types. This is due to the need to calculate the power of the engine that ensures the operation of the fan unit that creates an air cushion. Graphs for calculating the fan installation of the model are given. The designs of a foreign skirtless vessel using ALC technology and a domestic vessel on caverns are compared, the advantages of the latter type in terms of design and operational indicators are noted. The analysis of the prospects for the development of SVP technologies, which allow the use of new types of transport for displacement ships, either on hydrofoils, on an air cushion (including caverns), and in some cases on a screen effect (including bubble lubrication), is carried out.

Keywords: drive, hovercraft, skirtless vessel, cavern vessel, technology.

Проблема развития и применения новых технологий электродвижения для повышения скорости и грузоподъемности судов в различных условиях плавания является в последнее время весьма

актуальной, особенно в условиях Арктики. Эти технологии позволяют для водоизмещающих судов использовать новые виды транспорта: либо суда на подводных крыльях, либо суда на воздушной подуш-

ке (СВП) или на воздушных кавернах, а в ряде случаев суда на экранном эффекте (включая пузырьковую смазку).

Целью статьи является обобщение достигнутого зарубежного и отечественного опыта в части новых технологий судового электродвижения. Работы [1–3] отражают расчет и проектирование тяговых характеристик различных электроприводов, [4–7] посвящены вопросам энергообеспечения судов. Работа [8] обобщает опыт моделирования судов с различным приводом. Обширная литература [9–14] касается вопросов разработки судового электрооборудования и технологий его применения, а [15–19] сопоставляет данные по СВП и судам с воздушными кавернами.

МОДЕЛИ СВП

Для моделей СВП рассчитать сопротивление и потребную мощность сложнее, чем для моделей судов других типов. Это связано с необходимостью расчета мощности двигателя, обеспечивающего работу вентиляторной установки, создающей воздушную подушку (ВП) [8].

Полное сопротивление среды движению моделей СВП:

$$R = R_{\text{возд}} + R_{\text{имп}} + R\Gamma,$$

где $R_{\text{возд}}$ – воздушное сопротивление, возникающее при обтекании модели набегающим потоком воздуха;

$R_{\text{имп}}$ – импульсное сопротивление, связанное с работой вентиляторной установки;

$R\Gamma$ – гидродинамическое сопротивление, возникающее при движении модели над водой.

Значение $R\Gamma$ моделей амфибийных СВП, не имеющих контакта с водой на расчетном режиме, незначительное, и его можно не учитывать в расчетах. Для моделей скеговых СВП гидродинамическое сопротивление определяется традиционным способом с выделением сопротивления трения и остаточного сопротивления.

Мощность, необходимая для горизонтального движения модели СВП, составляет некоторую часть общей мощности модели. Основная часть мощности двигателей модели расходуется на привод вентилятора, создающего ВП.

Пример 1. Выполнен расчет полной мощности модели английского опытного судна «Ховеркрафт SR № 1, MkI» с сопловой схемой образования ВП. Основные характеристики судна «Ховеркрафт» и его модели в масштабе 1:10 приведены в табл. 1 [8].

В табл. 1 мощность модели не представлена, т. к. может быть использована

Таблица 1

Основные характеристики судна «Ховеркрафт SR № 1, MkI» и его модели в масштабе 1:10

Характеристика	Размерность	Судно	Модель
Длина, L	м	9,2	0,92
Ширина, B	м	7,6	0,76
Полная масса, D	кг	5500	4,5*/7,0**
Мощность, $N_{\text{дв}}$	кВт	320	9
Скорость, v	м/с	13	4
Давление в ВП, p	Н/м ²	1100	90/140
Площадь ВП, $S_{\text{ВП}}$	м ²	50	0,50
Площадь поперечного сечения, F	м ²	15	0,15

* модель с ДВС;

** модель с электродвигателем и аккумулятором

как для повышения грузоподъемности судна, так и для ускорения горизонтального электродвижения. Особенностью СВП «Ховеркрафт» является система воздушных каналов, обеспечивающих движение судна в горизонтальном направлении. В каналы подается примерно 30 % воздуха, нагнетаемого вентиляторной установкой. СВП имеет гибкое ограждение, улучшающее его мореходные качества.

При расчетах мощности моделей СВП с сопловой схемой коэффициенты давления воздуха a_1 и расхода воздуха a_2 следует определять графически по рис. 1, в зависимости от относительной высоты подъема аппарата h/t_1 . Диаметр вентилятора принимается в масштабе к натурному вентилятору СВП «Ховеркрафт».

При оценке мощности, необходимой для подъема модели СВП на заданную высоту t_1 , КПД η_1 вентиляторной установки принимается для модели с двигателем внутреннего сгорания (ДВС) и авиамодельным двухлопастным винтом 0,50, а КПД модели с электродвигателем и многолопастным вентилятором $\eta_1 = 0,65$.

Для оценки мощности, потребной для движения модели с масштабной скоростью $v = 4,0$ м/с, пропульсивный коэффициент воздухометного движителя $\eta_2 = 0,2$. Мощность, необходимая для движения модели над твердым экраном (землей, льдом, полом и т. д.), составляет примерно 25–33 % полной мощности двигате-

ля модели. Для обеспечения движения модели над водой следует увеличить мощность двигателя вследствие роста гидродинамического сопротивления R_L , но незначительно, в пределах 10–15 %, т. е. на 5–6 Вт.

Схема определения потребной мощности для подъема и движения моделей СВП с двумя типами двигателей представлена ниже с использованием диаграмм рис. 2.

Как показывает выполненный расчет, на рассматриваемой модели СВП целесообразно устанавливать авиамодельные ДВС мощностью не менее 120 Вт или ЭД типа МУ-100 АП мощностью 140 Вт с частотой вращения вала $n_{ДВ} = 125$ с⁻¹.

Для движения моделей СВП и с воздушной смазкой днища необходимо под корпус непрерывно нагнетать воздух под определенным давлением и с заданным расходом. В качестве нагнетателей для самоходных моделей можно использовать различные типы вентиляторов и воздушных винтов.

Нагнетатели моделей должны удовлетворять определенным требованиям и прежде всего, должны иметь небольшую массу и габариты, высокий КПД, быть просты в изготовлении и надежны в эксплуатации. Выбор типа вентилятора зависит от параметров ВП или воздушной смазки самоходной модели (давления воздуха и его расхода). Давление воздуха в основном определяется водоизмещением (массой) модели и ее размерениями, характеризующими несущую площадь, контактирующую с воздухом. Давление H , Н/м², воздуха, создаваемое вентилятором, и расход воздуха Q , м³/с, определяются в ходе предварительных расчетов в зависимости от типа модели, ее размерений, скорости движения и особенностей конструкции (рис. 2). На рис. 2 представлены расчетные диаграммы моделей СВП для определения: а) скорости u ; б) частоты вращения рабочего колеса n и его разным диаметре D_p ; в) давления воздуха.

На самоходной модели могут быть установлены центробежные, осевые и радиально-осевые вентиляторы. Для каждо-

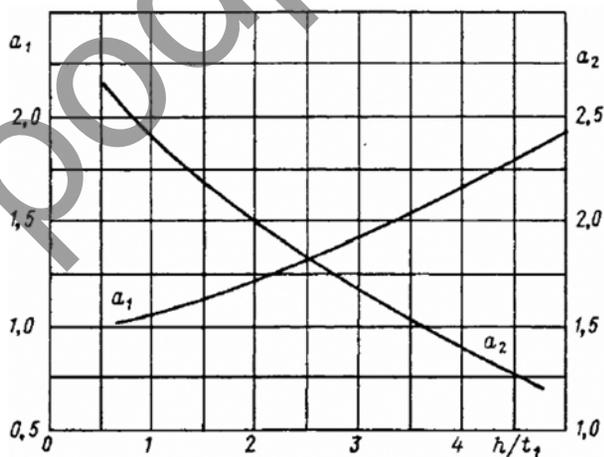


Рис. 1. Коэффициенты давления a_1 и расхода воздуха a_2 для моделей СВП [8]

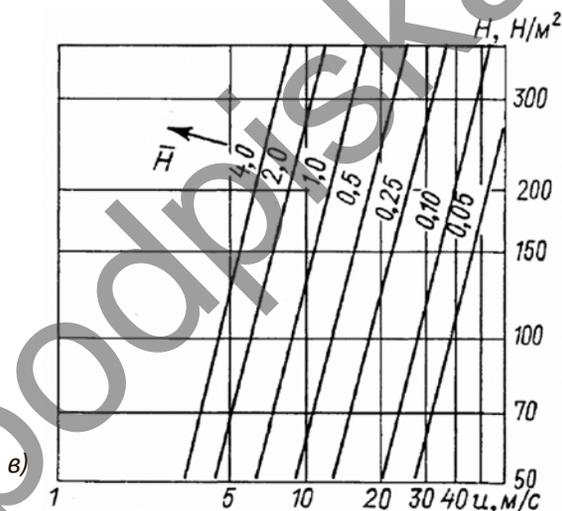
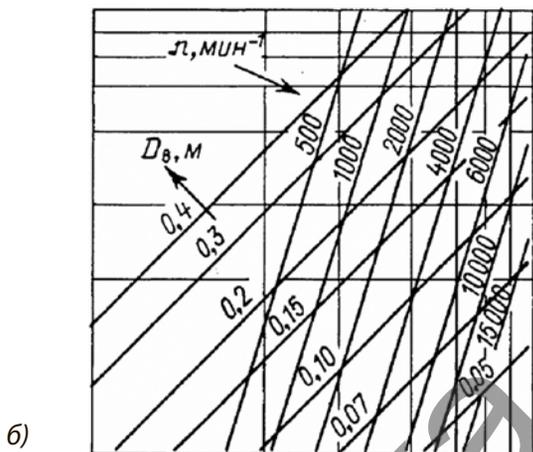
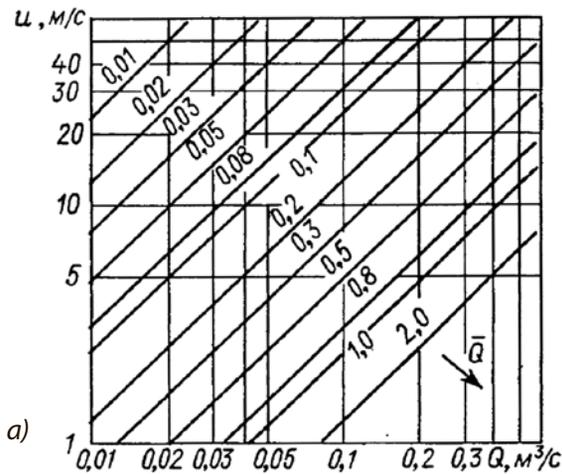


Рис. 2. Расчетные диаграммы моделей СВП для определения: а) скорости u ; б) частоты вращения рабочего колеса n и его разным диаметре $D_в$; в) давления воздуха H [8]

го из них характерны свои безразмерные значения расхода Q и давления воздуха H :

$$Q = 4Q/(\pi^2 \cdot D_1^3 \cdot n);$$

$$H = H/(\pi^2 \cdot \rho_0 \cdot D_1^3 \cdot n^2),$$

где $D_1 = 2R$ – диаметр рабочего колеса вентилятора, м;

n – частота вращения рабочего колеса, c^{-1} ;

$\rho_0 = 1,2 \text{ кг/м}^3$ – плотность воздуха.

При $Q = 0,03-0,20$ и $H = 0,30-0,55$ на моделях СВП целесообразно применять центробежные вентиляторы; при $Q = 0,10-0,30$ и $H = 0,03-0,25$ – осевые, а при $Q = 1,0$ и $H = 1,2-1,8$ – радиально-осевые вентиляторы.

Характеристики вентиляторной установки определяют в зависимости от значений Q , H и окружной скорости рабочего колеса вентилятора и $u = \pi \cdot D_1 \cdot n/60$. Значения D_1 и n выбирают с помощью диаграммы, приведенной на рис. 2, б.

Обычно после расчета характеристик вентилятора Q и H находят потребную мощность привода. Поэтому можно определить тип и марку двигателя, а, следовательно, и частоту вращения его вала $n_{дв}$.

Необходимо выбрать такой диаметр рабочего колеса вентилятора, который позволил бы получить заданные характеристики расхода Q и напора H . Если принятое в первом приближении значение диаметра вентилятора не удовлетворяет этим условиям, то мощность модели СВП рассчитывают при другом значении диаметра вентилятора.

В Примере 1 для модели «Ховеркрафт SR № 1. МкI» были приняты диаметр вентилятора $D_1 = 0,22$ м и частота вращения $n = 125 \text{ c}^{-1}$. При окружной скорости вращения вентилятора $78,6 \text{ м/с}$ были достигнуты безразмерные характеристики $Q = 0,075$ и $H = 0,19$. Следовательно, в данном случае можно установить на модели осевой вентилятор.

– При $Q = 0,03-0,20$ и $H = 0,30-0,55$ на моделях СВП целесообразно применять центробежные вентиляторы.

– При $Q = 0,10-0,30$ и $H = 0,03-0,25$ – осевые вентиляторы.

– При $Q = 1,0$ и $H = 1,2-1,8$ – радиально-осевые вентиляторы.

Характеристики вентиляторной установки определяют в зависимости от зна-

чений Q , H и окружной скорости рабочего колеса вентилятора, которая равна:

$$U = \pi \cdot D_1 \cdot n / 60.$$

Значения D_1 и n выбирают с помощью диаграммы, приведенной на рис. 2, б.

БЕЗЮБОЧНЫЕ СУДА И СУДНА НА КАВЕРНАХ

В последние годы многие зарубежные судостроители проводят активную рекламную кампанию по продвижению на мировой рынок скоростных судов, конструкция которых основана на использовании патента 1996 г. американского изобретателя Ховарда Харлея. В литературе такие суда называют Air Lifted Catamaran (ALC) или «безюбочные суда с воздушной подушкой (ССВП)».

Безюбочные суда (ССВП)

ALC представляет собой быстроходное судно катамаранного типа, в каждом корпусе которого имеется ниша для создания внутри нее воздушной подушки. Длина ниши составляет примерно две трети длины корпуса, глубина – четверть и более высоты борта. Носовая часть ниши ограничена прямым поперечным реданом. Уносу воздуха в сторону бортов препятствуют продольные кили, которые начинаются немного ближе к носу от редана и заканчиваются на транце. Носовые части корпусов, расположенные перед реданами, выполнены так же, как на традиционном катамаране, имеющем симметричные корпуса с остроскулыми V-образными обводами умеренной (до 15 град.) килеватости. Такие обводы носа позволяют обеспечить достаточно хорошие мореходные качества судна.

Принцип действия ALC аналогичен скеговым судам на воздушной подушке (СВП): при помощи воздушной прослойки от контакта с водой изолируется значительная часть смоченной поверхности корпуса, благодаря чему существенно снижается сопротивление трения. В отличие от СВП у ALC отсутствует гибкое

ограждение, вследствие чего повышается надежность судна и значительно снижаются эксплуатационные затраты. По оценкам зарубежных специалистов, буксировочное сопротивление ALC на 30–35 % меньше, чем традиционных однокорпусных судов и катамаранов близких размеров.

Воздух под днищем ALC имеет давление, превышающее атмосферное на 5–10 %, что позволяет подушке нести на себе до 80–90 % веса судна. В то же время оно достаточно низкое, что позволяет применять для подачи воздуха вентиляторы. В качестве движителей на ALC устанавливают частично погруженные гребные винты (ЧПГВ) с приводом Арнесона [18].

Вид на днище типичного катамарана ALC по патенту Х. Харлея приведен на рис. 3.

Эффективность концепции ALC подтверждена испытаниями моделей в опытных бассейнах, а также испытаниями в натуральных условиях двух прототипов. Первый прототип имел длину 7,5 м, длина второго была увеличена до 16,75 м.

Наряду с перечисленными выше достоинствами концепция ALC обладает и рядом недостатков. Главный из них – необходимость обеспечивать большие

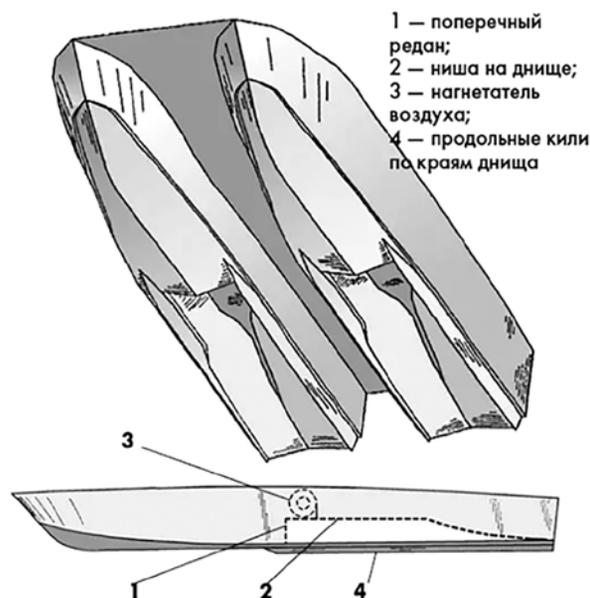


Рис. 3. Вид на днище типичного катамарана ALC по патенту Х. Харлея

расходы воздуха, который уносится не только через транец, но и в сторону носа. Поэтому для привода вентиляторов приходится использовать отдельный дизель, мощность которого составляет от 10 до 20 % мощности главной энергетической установки. К другим недостаткам следует отнести невозможность применения концепции на однокорпусных судах и ограничения, связанные с использованием двигателей, отличных от ЧПГВ с приводом Арнесона [18].

Судна на кавернах

Вид на днище катера на воздушной каверне «Мустанг» приведен на рис. 4. Воздушная прослойка под днищем судна на каверне представляет собой не воздушную подушку, а именно каверну, поверхность которой подчиняется физическим закономерностям кавитационных течений, поэтому она может быть описана теоретически с помощью уравнений движения невязкой жидкости.

Работы по созданию судов на каверне были начаты в России в 1961 г. в ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова (ныне – КГНЦ). Первые исследования проводились применительно к тихоходным судам. Затем с 1965 г.



Рис. 4. Вид на днище катера на воздушной каверне «Мустанг»

стал выполняться обширный цикл работ по использованию каверн для снижения сопротивления глиссирующих судов, таких как патрульные и разъездные катера, спасательные и скоростные пассажирские суда. Работы над проектами этих судов продолжаются и в настоящее время.

С 1985 г. объектами исследований были быстроходные водоизмещающие суда, а с 1993 г. – глиссирующие катамараны и катамараны, движущиеся в переходном режиме. Следующим этапом, начавшимся в 1995 г., стало проведение исследований по созданию каверн на однокорпусных судах переходного режима движения, прежде всего скоростных морских пассажирских и автомобильно-пассажирских паромов. Начиная с 2000 г. проводятся испытания моделей скоростных транспортных судов.

Параллельно с научно-исследовательскими работами, выполняемыми в КГНЦ, несколько конструкторских бюро проводят собственные исследования (ЦКБ по СПК им. Р. Е. Алексеева, Зеленодольское ПКБ и Нижегородское бюро скоростных судов). Внешним обликом, особенно обводами носовой оконечности, судно с каверной похоже на традиционное (рис. 4). Отличие заключается в наличии днищевой ниши, где создается одна каверна или система из нескольких каверн. Длина этой ниши может составлять от 50 до 70 % длины судна, а ширина – до 90 % ширины корпуса. Носовая часть ниши ограничена поперечным реданом стреловидной формы. С боков ее ограждают скеги, днищевая поверхность которых является плавным продолжением поверхности днища перед реданом. Принцип действия каверны аналогичен действию воздушной подушки на АЛС и СВП.

Применение каверн на глиссирующих судах позволило уменьшить их буксировочное сопротивление на 20–35 % по сравнению с сопротивлением этих же судов, имеющих гладкие обводы днища, а на судах переходного режима движения эффект должен составить 15–25 %.

Каверна способствует не только уменьшению сопротивления, но и улучшению

мореходных качеств судов (снижает амплитуды вертикальной и килевой качки, а также уменьшает вертикальные перегрузки). Мореходность судов с каверной примерно такая же, как у судов на неуправляемых подводных крыльях. Чтобы каверна обеспечивала существенное снижение буксировочного сопротивления, она должна иметь оптимальные характеристики: большую площадь в плане, повышенное избыточное давление и плавное замыкание. Большая площадь каверны необходима для изоляции от воды максимально возможной площади смоченной поверхности корпуса. Повышенное избыточное давление позволяет каверне нести на себе значительную часть веса судна, обеспечивая наибольшее всплытие корпуса. Плавное замыкание требуется для уменьшения объемов воздуха, подаваемого под днище, что приводит к снижению мощности, необходимой для работы вентилятора.

При разработке корпуса судна с каверной носовые обводы выбирают из общих проектных соображений, исходя из назначения судна и условий его эксплуатации. Чтобы каверна обладала оптимальными характеристиками, необходимо тщательно согласовать три области днища, ограничивающие нишу. Первая область, которая формирует каверну, расположена в районе редана. В этой области подбираемыми параметрами являются положение редана по длине корпуса и форма редана в плане. Вторая область представляет собой скеги, препятствующие уносу воздуха в сторону бортов. У скегов выбирают ширину и высоту. Третья, самая ответственная область днища, на которой происходит замыкание каверны, расположена между скегами вблизи транца. Для этой области подбирают ее высоту над основной плоскостью, угол наклона и форму в поперечном сечении. Геометрия этой области во многом зависит от выбранной формы редана, расчетной скорости судна и его посадки.

При правильно подобранной геометрии днища можно добиться значительного снижения сопротивления и сни-

жения энергетических затрат на подачу воздуха в каверну до величин, не превосходящих 2–3 % затрат на движение. Столь незначительный расход воздуха позволяет использовать для привода вентиляторов электродвигатели, питаемые от штатного дизель-генератора, устанавливать вентиляторы на валу главного двигателя, на небольших быстроходных судах в ряде случаев вообще обойтись без вентиляторов, а вместо них использовать выхлопные газы главных дизелей. Большинство производителей дизелей не возражает против небольшого избыточного давления на выходе газовыхлопа. Например, дизели завода «Звезда» рассчитаны на противодействие до 800 мм вод. ст.

Искусственные каверны целесообразно применять либо для снижения мощности при сохранении скорости, либо для увеличения скорости полного хода при сохранении мощности двигателей. Снижение мощности двигателей целесообразно для водоизмещающих судов и в ряде случаев для судов переходного режима движения с целью повышения их экономичности. При этом могут возникнуть дополнительные преимущества, связанные с возможностью применения менее мощных дизелей или турбин, уменьшением размеров движителей, сокращением запасов топлива. Эти положительные факторы приводят к снижению стоимости судна и уменьшению эксплуатационных расходов. Кроме того, благодаря уменьшению веса двигателей и сокращению запасов топлива следует ожидать некоторого уменьшения водоизмещения судна, что, в свою очередь, может дать дополнительный эффект по еще большему снижению сопротивления.

На рис. 5 приведены буксировочная мощность и эффективность каверны на днище в зависимости от скорости катера водоизмещением 25 т с двигателем мощностью 1000 л. с. Видно, что увеличение скорости составляет от 36 до 43 узлов, а снижение буксировочного сопротивления от 22 до 24 %.

Положительный эффект от каверны, направленный на увеличение скорости

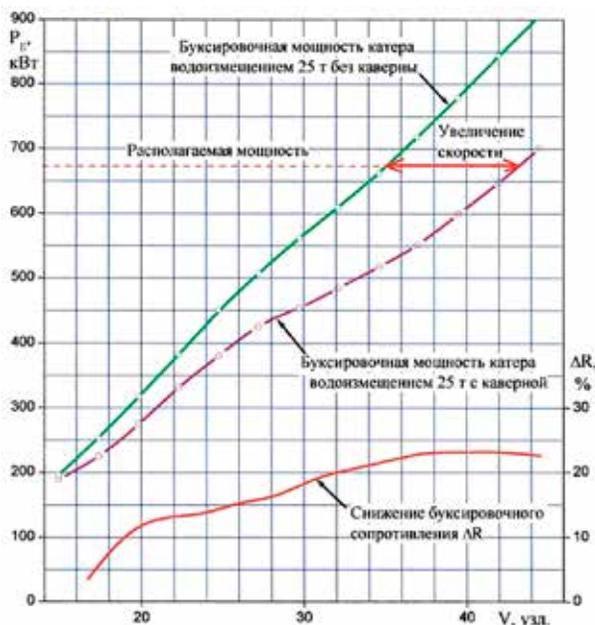


Рис. 5. Буксировочная мощность и эффективность каверны на днище катера [16]

полного хода, которое может составить от 3 до 10 узлов, рационально применять на глиссирующих судах и на судах переходного режима движения. В этом случае можно, во-первых, повысить их конкурентоспособность, и, во-вторых, увеличить дальность плавания, ограниченную временными рамками.

В результате судно на каверне не только сохраняет все положительные черты, присущие ALC, но и обладает рядом нижеприведенных преимуществ:

- для формирования каверн требуется мощность, составляющая не 10–20% мощности главных двигателей, а всего 2–3%. По этой причине у судна на каверне нет необходимости, как на ALC, иметь дополнительный двигатель, специально предназначенный для вращения вентиляторов;
- глубина днищевой ниши, внутри которой формируется каверна, составляет не четверть высоты борта и более, как у ALC, всего лишь 10–15% высоты борта. Это обеспечивает меньшую стояночную осадку и более рациональное использование внутреннего пространства;
- участок корпуса, расположенный непосредственно перед каверной, мо-

жет иметь значительно большую (до 25 град.) килеватость, что позволяет существенно повысить мореходные качества судна;

- может быть применен любой тип движителя (гребной винт, водомет, частично погруженного винта (ЧПВГ) с приводом Арнесона или со стационарным гребным валом, вентилируемый водометный движитель), в то время как на ALC выбор движителя ограничен.

К настоящему времени разработано не менее 30 проектов судов на каверне различного назначения. По шести из них построено более 60 быстроходных судов и катеров водоизмещением от 14 до 105 т со скоростью хода от 30 до 52 узлов.

Перспективы развития технологий СВП

Благодаря развитию технологий наряду с водоизмещающими судами появился транспорт: либо на подводных крыльях, либо на воздушной подушке или каверне, а в ряде случаев на экранном эффекте (включая пузырьковую смазку).

Общая идеология состоит в том, чтобы полностью или частично выдвинуть корпус судна на поверхность, избавив его от трения о воду. Наряду с этим возникает технология, которая позволяет уменьшить сопротивление движению судна за счет подвода газа к его корпусу.

Плотность воздуха примерно в 800 раз меньше плотности воды. Когда часть смоченной поверхности корпуса изолируется воздухом от контакта с водой (и возникают так называемые воздушные каверны), в этом месте сопротивление трения уменьшается в 800 раз. Соответственно, чем больше изолируемая площадь и чем больше составляющая трения в общем балансе силы буксировочного сопротивления, тем выше эффект от применения воздушной каверны. Эффект изоляции корпуса от воды с помощью пузырьков воздуха иллюстрируется на рис. 6.

В мировом судостроении в наши дни экспериментируют как собственно с воздушными кавернами (создавая в днище



Рис. 6. Эффект изоляции корпуса судна от воды с помощью пузырьков воздуха

судна полости, в которых с помощью насосов поддерживается давление газа, изолирующего судно от воды), так и с пузырьковой смазкой. В последнем случае под гладкое днище через специальные каналы выводится плотная пелена пузырьков. На схеме рис.6 показан пример такого решения.

В последующие годы идея использовать воздух для снижения сопротивления являлась предметом многочисленных исследований и изобретений как в нашей стране, так и за рубежом. Предлагались различного рода конструкции для образования газовых прослоек на днище судна, которые, однако, не только не находили практического применения, но даже не подвергались серьезной экспериментальной проверке.

Ситуация сложилась парадоксальная: теоретические работы показывали возможность серьезного снижения сопротивления воды, но на практике достичь успеха не удавалось. Это очевидное несоответствие стимулировало выполнение

более детальных исследований физических закономерностей развития газовых прослоек, образованных на днище судна.

Работы были начаты в ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова (ныне – КГНЦ) в конце 1950-х инженером А. Н. Ивановым. На основании гипотезы об аналогии тонких газовых слоев и искусственных каверн было предложено использовать для определения формы и размеров воздушных прослоек аппарат теории развитой кавитации. Это позволило изучить влияние геометрии смоченной части днища и скорости движения судна на параметры воздушных прослоек – искусственных каверн.

Применение каверны на практике для транспортных судов и глиссирующих катеров (у этих судов сила трения составляет примерно половину полного сопротивления) позволяет уменьшить буксировочное сопротивление на 17–30% при энергетических затратах на подачу воздуха, не превышающих 2–3%. На небольших (до 40 т) глиссирующих катерах для создания каверны можно использовать выхлопные газы главных дизелей. Воздушные каверны можно применять либо для снижения мощности при сохранении скорости судна, что более актуально для водоизмещающих судов, либо для увеличения скорости полного хода при сохранении мощности главных двигателей, что востребовано для глиссирующих судов.

За счет применения каверны скорость катера может возрасти примерно на 10%, например, с 50 до 55 узлов. В этом случае можно, во-первых, повысить конкурентоспособность судна и, во-вторых, увеличить дальность плавания, ограниченную временными рамками. Схема судна с воздушными кавернами разработки КГНЦ [17] приведена на рис. 7.

Одной из последних разработок КГНЦ является автоматизированная система создания каверн на днище транспортного судна. В предлагаемой версии устройства для создания воздушных каверн выступающие части (продольные и бортовые кили, поперечные козырьки) выполняются подвижными. В рабочем состоянии они

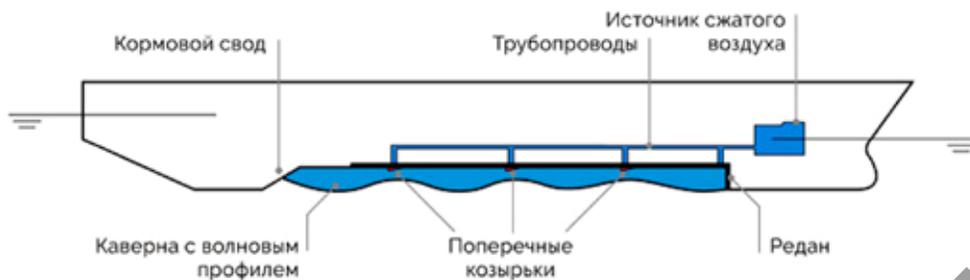


Рис. 7. Схема судна с воздушными кавернами разработки КГНЦ [17]

выступают за основную плоскость днища и служат для образования и поддержания каверн, а в необходимых случаях (прохождения судном участков предельного мелководья, шлюзования, движения в условиях сильного волнения, движения задним ходом и т. п.) эти элементы устройства автоматически поднимаются и практически не выступают за основную плоскость днища.

Для восполнения воздуха в каверне и поддержания ее устойчивости используется воздушная система, состоящая из вентилятора и трубопровода (рис. 7). Другой новой разработкой является устройство для защиты от попадания воздуха из каверны на гребной винт, предотвращающее его износ. Возможны другие варианты использования воздушной системы, включая пузырьки для смазки и их вихревое движение для перемещения судна при отказе от гребного винта.

Дополнительная полезная функция воздушной каверны позволяет транс-

портным судам ледового класса освободиться из ледового плена. Разработана технология высвобождения от заклинивания во льду морского транспортного судна с воздушной каверной на днище. На рис. 8 приведен концептуальный проект танкера дедвейтом 180–200 тыс. т с ограниченной осадкой и энергосберегающей каверной разработки КГНЦ.

Последними разработками с участием КГНЦ являются четыре проекта транспортных судов с кавернами. Это сухогруз «река-море» дедвейтом 8000 т, универсальный контейнеровоз дедвейтом 70 тыс. т, Балтик-макс-танкер ледового класса Arc4 дедвейтом 200 тыс. т и контейнеровоз Post-Panamax грузоподъемностью 9500 TEU.

На судостроительных заводах России продолжается строительство нескольких проектов катеров с каверной, спроектированных ЦКБ по СПК им. Р. Е. Алексеева. На сегодняшний день искусственные каверны позволяют получить эффект по-



Рис. 8. Концептуальный проект танкера дедвейтом 180–200 тыс. т с ограниченной осадкой и энергосберегающей каверной разработки КГНЦ [17]

снижению сопротивления, недостижимый ни одной из известных энергосберегающих технологий.

ВЫВОДЫ

1. Рассмотрены модели судов на воздушной подушке (СВП) и показано, что для них рассчитать сопротивление и потребную мощность сложнее, чем для моделей судов других типов. Это связано с необходимостью расчета мощности двигателя, обеспечивающего работу вентиляторной установки, создающей воздушную подушку. Приведены графики для расчета вентиляторной установки модели.

2. Сопоставлены конструкции зарубежного безюбчатого судна по технологии АLC и отечественного судна на кавернах, отмечены преимущества последнего типа в части конструктивных и эксплуатационных показателей.

3. Выполнен анализ перспектив развития технологий СВП, которые позволяют для водоизмещающих судов использовать новые виды транспорта: либо суда на подводных крыльях, суда на воздушной подушке или на воздушной каверне, а в ряде случаев суда на экранном эффекте (включая пузырьковую смазку).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Шульга Р.Н.** Тяговые характеристики судового электропривода // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2022. – № 1. – С. 28–39.

2. **Шульга Р.Н.** Тяговые характеристики винторулевых колонок и водометов // В портфеле редакции журнала «Электрооборудование: эксплуатация и ремонт».

3. **Шульга Р.Н.** Пропульсивный комплекс ледокола и судов ледового класса // В портфеле редакции журнала «Электрооборудование: эксплуатация и ремонт».

4. **Горячев А.М.** Устройство и основы теории морских судов / А.М. Горячев, Е.М. Подругин. – М.: Судостроение, 1983. – 224 с.

5. **Иванченко А.А., Шишкин В.А., Окунев В.Н.** Обзор опыта совершенствования конструкции и применения движительных систем в современном судостроении //

Вестник ГУМРФ им. С.О. Макарова. – 2016. – № 4 (28). – С. 156–173.

6. **Шульга Р.Н., Петров А.Ю., Хренников А.Ю.** Энергетические платформы с использованием цифровых модульных подстанций и энергоблоков // Энергия единой сети. – 2020. – № 3 (52), июль-август. – С. 18–28.

7. **Шульга Р.Н.** Применение распределенного электродвижения с использованием винторулевых колонок // Энергоэффективность и водоподготовка. – 2020. – № 4 (126). – С. 56–64.

8. **Сахновский Б.М.** Модели судов новых типов. – М.: Судостроение, 1987.

9. **Шульга Р.Н., Смирнова Т.С.** Использование судовой энергетики для жизнеобеспечения арктических объектов // Российская Арктика. – 2020. – № 1. – С. 13–26.

10. **Шульга Р.Н., Лавринович В.А., Лабутин А.А., Смирнова Т.С.** Комплекс электрооборудования для модульных электрических судов // Российская Арктика. – 2020. – № 1 (8).

11. **Шульга Р.Н., Путилова И.В., Смирнова Т.С., Иванова Н.С.** Безопасные и безотходные технологии с использованием водородной электроэнергетики // Альтернативная электроэнергетика и экология. – (ISJAE) 2019, (306–311). – С. 67–78.

12. Report of the performance committee // ИТТС. – 1978.

13. **Колесник Д.В.** Тенденции развития пропульсивных комплексов судов, эксплуатирующихся во внутренних водных путях // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 2005. – Вып. 14. – Одесса: ОНМА. – С. 5–10.

14. **Клементьев А.Н., Трифонов В.И., Хвостов Р.С.** Управление судном. – Н. Новгород: Изд. ФБОУ ВПО «ВГАВТ», 2011. – 32 с.

15. Суда на воздушной подушке, история и классификация. – URL: <http://www.sea-man.org/>

16. Судно на каверне или катамаран на воздушной подушке? // Судостроение. Катера и яхты. – 2002. – URL: <http://www.barque.ru>

17. **Макаров О.** Каверны: пустоты в дне судна // Технология/транспорт, 03.12.1020. – URL: <http://www.techinsider.ru>

18. Новый тип трансмиссии – привод Арне-сона // Катера и яхты. Судостроение. – 1991. – URL: <http://www.barque.ru>.

19. **Аносов В.Н.** и др. Развитие современных скоростных катеров. Ч. 1 // Катера и яхты. Судостроение. – 2015. – № 3 (255). – С. 52–56.