

# ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-591-605

## HYBRID ELECTRICITY SYSTEMS OF VESSELS WITH DC-GRID SYSTEM

**V. V. Romanovskiy, V. A. Malishev, A. S. Bezhik**

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,  
St. Peterburg, Russian Federation

*Reduction of the resources consumption for generating the electric power, improving the parameters of a vessel electric network is one of the purposes of sea transport development. A direction of researches is hybridization of generation sources and the electric energy accumulation devices. The given concept is based on division or simultaneous use of several various energy sources, the choice and combination of which are intended for improving the power systems parameters. The overwhelming majority of modern sea-crafts use the systems of distribution of an alternating current. However, with introduction of power electronic converters into the power supply systems, the direct current networks with integration of sources and devices for accumulating electric energy, connected to a distributed DC bus, are increasingly being used in the fleet. This direction is one of the decisions for fuel consumption minimization, especially, for the vessels demanding high degree of maneuverability and various running cycles. The possibilities of a ship hybrid electric power system are defined in the paper. Comparison of various architectures of the given system is performed. The block diagram of the hybrid electric power system is considered. Formulas for calculating static load are given. The equations describing electromagnetic processes of the asynchronous electric motor as the propulsion electric motor are written down. The device for accumulating electric energy is considered. The calculation of the energy released by the propulsion electric motor during braking or reverse, which can be directed both to the braking resistor and stored in special systems of electric energy storage. The computer model of considered hybrid electric power installation on the basis of computer program SimInTech is made.*

*Keywords: propulsion electric installation, system with distributed DC bus, auxiliary fleet vessels, electric power storage devices, SimInTech.*

**For citation:**

Romanovskiy, Victor V., Vladimir A. Malishev, and Artem S. Bezhik. "Hybrid electricity systems of vessels with dc-grid system." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.3 (2020): 591–605. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-591-605.

**УДК 621.315:621.3.025**

## СУДОВЫЕ ГИБРИДНЫЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ШИННОЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

**В. В. Романовский, В. А. Малышев, А. С. Бежик**

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,  
Санкт-Петербург, Российская Федерация

*Отмечается, что целью развития морского транспорта является сокращение потребления ресурсов, затрачиваемых на генерирование электроэнергии и улучшение параметров электрической сети. Направлением данного исследования является гибридизация источников генерирования и устройств накопления электрической энергии. Данная концепция основана на разделении или одновременном использовании нескольких различных источников энергии, выбор и комбинация которых предназначены для улучшения параметров энергетических систем. Подчеркивается, что подавляющее большинство современных морских судов используют системы распределения переменного тока. Однако с внедрением силовых*

электронных преобразователей в энергосистемы сети постоянного тока с интеграцией источников и устройств накопления электрической энергии, подключенных к распределенной шине постоянного тока, все чаще находят применение на флоте. Отмечается, что данное направление является одним из решений для минимизации расхода топлива в особенности для судов, требующих высокой степени маневренности и разнообразных рабочих циклов. В статье определены возможности судовой гибридной электроэнергетической системы. Выполнено сравнение различных архитектур данной системы. Рассмотрена блок-схема гибридной электроэнергетической системы. Приведены формулы для расчета статической нагрузки. Записаны уравнения, описывающие электромагнитные процессы асинхронного электродвигателя в качестве гребного электродвигателя. Рассмотрено устройство накопления электрической энергии. Выполнен расчет энергии, выделяемой гребным электрическим двигателем при торможении или реверсе, которая может направляться как на тормозной резистор, так и запасаться в специальных системах накопления электрической энергии. Составлена компьютерная модель рассматриваемой гибридной электроэнергетической установки на базе компьютерной программы SimInTech. Сняты графики изменения напряжения на распределенной шине постоянного тока и токов гребного электрического двигателя в процессе изменения частоты вращения гребного винта.

**Ключевые слова:** гребная электрическая установка, система с распределенной шиной постоянного тока, суда вспомогательного флота, устройства накопления электроэнергии, SimInTech.

**Для цитирования:**

Романовский В. В. Судовые гибридные электроэнергетические системы с распределенной шиной постоянного тока / В. В. Романовский, В. А. Малышев, А. С. Бежик // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 3. — С. 591–605. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-591-605.

**Введение (Introduction)**

Сокращение потребления ресурсов, затрачиваемых на генерирование электроэнергии и улучшение параметров электрической сети является одним из направлений развития морского транспорта [1]. Одно из решений при проектировании современных судов заключается в повышении эффективности и оптимальном управлении энергетической / движительной системами с целью уменьшения потребления топлива [2], [3]. Текущим направлением исследований является гибридизация источников генерирования и устройств накопления энергии (УНЭ) с целью обеспечения конкурентоспособной эксплуатации транспортных средств [4], [5].

Гибридные энергосистемы (ГЭС) становятся все более популярными и используются в качестве решений при производстве современных электроэнергетических систем [6]. Основные компоненты типичной ГЭС с распределенной шиной постоянного тока (РШПТ), как показано на рис. 1, включают в себя источники питания, преобразователи энергии, УНЭ и нагрузки. Ключевой особенностью ГЭС является то, что она включает несколько источников питания, которые могут дополнять друг друга с возможностью генерации электроэнергии для повышения общей эффективности системы.

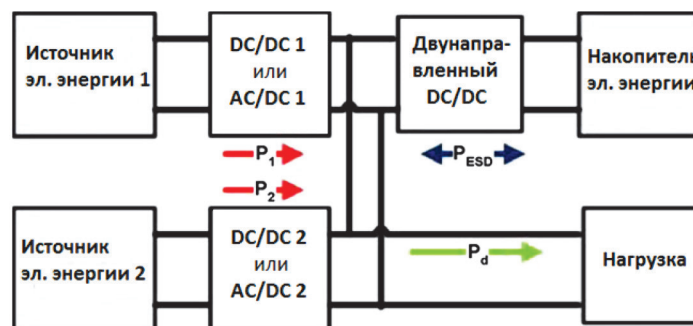


Рис. 1. Структура гибридной электроэнергетической системы

подавляющее большинство современных морских судов используют системы распределения переменного тока, включая единые электроэнергетические системы (ЕЭЭС). Однако с внедре-

нием силовых электронных преобразователей в энергосистемы все чаще стали применяться на судах сети постоянного тока с интеграцией источников и устройств накопления электрической энергии, подключенных к РШПТ [7], [8]. Система распределения постоянного тока помогает сократить количество ступеней преобразования при применении источников и устройств постоянного тока. Однако при построении РШПТ сохраняются проблемы, связанные с необходимостью синхронизации блоков генерации, управлением потока реактивной мощности, пусковых токов трансформаторов, гармонических составляющих электрических параметров и трехфазных дисбалансов. Судовая система питания постоянного тока позволяет первичным двигателям работать на своих оптимальных скоростях, обеспечивая значительную экономию топлива по сравнению с обычными системами переменного тока. Она также предлагает дополнительные преимущества, такие как экономия места и веса, а также гибкое расположение оборудования [9].

*Целями данной статьи* являются определение возможностей судовой гибридной электроэнергетической системы, рассмотрение способов расчета статической и динамической нагрузок, выполнение вычисления энергии, выделяемой гребным электрическим двигателем при торможении или реверсе, а также выполнение компьютерной модели на базе компьютерной программы SimInTech.

### **Методы и материалы (Methods and Materials)**

ГЭС имеют перспективное значение, когда в процессе эксплуатации существуют большие колебания в потребляемой мощности. Требования проектирования систем данного типа могут существенно различаться для разных типов судов. При всех имеющихся в настоящее время вариантах гибридные силовые установки являются весьма перспективными технологиями для проектирования относительно малых судов и имеют следующие преимущества [10]:

- ГЭС обеспечивают лучшую энергоэффективность, значительное сокращение выбросов парниковых газов и загрязняющих веществ, чем классические системы;
- гибридные системы являются модульными и обеспечивают резервирование мощности;
- применение электрических силовых установок (системы типа «Azipod», подруливающие устройства) позволяет улучшить маневренность при значительном снижении шума и вибраций;
- электрические силовые установки обеспечивают большую степень свободы с точки зрения планирования размещения оборудования и позволяют высвободить на борту судна доступное пространство;
- ГЭС позволяет снизить уровень вибрации, передаваемой на конструкцию судна;
- ГЭС дает возможность снизить требования к обслуживанию двигателей внутреннего сгорания вследствие оптимального режима эксплуатации.

Гибридизация силовых цепей основана на разделении или одновременном использовании нескольких различных источников энергии [11], выбор и комбинация которых предназначены для улучшения параметров энергетических систем. Данное направление является одним из решений для минимизации расхода топлива особенно для судов, требующих высокой степени маневренности и разнообразных рабочих циклов [12].

Существует три основных вида архитектуры гибридных силовых цепей.

1. *Последовательная гибридная архитектура.* В этом типе архитектуры ГЭС (рис. 2) последовательно используются два вида энергетических систем: двигатели внутреннего сгорания и электрические системы [13]. Движение осуществляется электрическим приводом с регулируемой частотой вращения (электродвигателем и силовым преобразователем). Электроэнергию вырабатывают генераторы, приводимые в движение двигателями внутреннего сгорания. Другой вариант заключается в использовании топливных элементов для выработки электроэнергии или их комбинации с генераторами. Системы накопления электроэнергии (СНЭ): батареи, специальные конденсаторы и другие устройства могут быть подключены к общей распределительной шине для обеспечения дополнительной электрической энергии, при этом их можно применять автономно или вместе с генераторами.

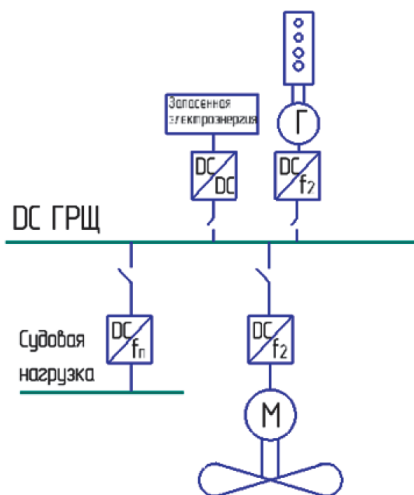


Рис. 2. Схема последовательного дизель-электрического гибрида с системой накопления электроэнергии

В такой конфигурации электричество используется как вектор энергии между двигателем внутреннего сгорания и гребным винтом, что позволяет разделить рабочие точки [14], что позволяет повысить общую эффективность системы за счет оптимизации рабочей точки двигателя внутреннего сгорания и гребного винта с точки зрения эффективности. Конечно, это преимущество могло быть более значительным при использовании нескольких генераторов и СНЭ, поскольку оно дает возможность обеспечить необходимую движительную мощность, выбирая оптимальную комбинацию источников электроэнергии и поддержание режимов первичных двигателей в оптимальной рабочей зоне. Однако для малых судов возможность увеличения количества источников электроэнергии связана с ограничениями по массогабаритным показателям.

2. *Параллельная гибридная архитектура.* Типичная параллельная гибридная силовая установка (рис. 3) сочетает в себе два вида силовых двигателей: электродвигатели и двигатели внутреннего сгорания, которые механически соединены одинаковыми валами через редукторы. Электродвигатели питаются от электрических СНЭ и / или независимых источников энергии (например, генераторов, приводимых в движение двигателями внутреннего сгорания и / или топливными элементами). Две двигательные установки могут использоваться вместе или по отдельности [15].

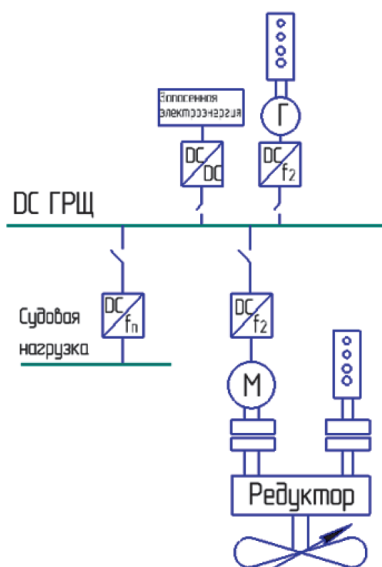


Рис. 3. Схема параллельного электромеханического гибрида с системой накопления электроэнергии

В большинстве случаев одна из движительных систем предназначена для использования на низких скоростях (классически электрическая система), а другая (классический двигатель внутреннего сгорания) применяется для высоких скоростей. Первая система может также использоваться в качестве системы повышения мощности во время переходного процесса (запуск, ускорение и другие). Эта архитектура уменьшает количество элементов по сравнению с последовательной гибридизацией и позволяет оптимизировать размеры каждого из источников энергии [16].

3. *Последовательно-параллельная гибридная архитектура.* Последовательно-параллельная архитектура объединяет обе концепции, определенные ранее. Она позволяет перейти от операции параллельного типа к операции последовательного типа. В таблице выполнено сравнение последовательной и параллельной архитектуры гибридизации с точки зрения стоимости, взаимозаменяемости и эффективности.

**Характеристики гибридных электроэнергетических систем**

Характеристики	Последовательная	Параллельная
Размеры элементов	Для полной эффективности система должна объединять несколько источников питания с номинальной мощностью, равной долей общей мощности. Это приводит к дополнительным затратам на объемы и вес. Размеры электродвигателей соответствуют пиковой мощности.	Система позволяет оптимизировать размеры каждой движительной установки. Размеры электродвигателя уменьшены. Дополнительные расходы и объем связаны со сложной механической системой (сцепления, коробки передач).
Мощность и эффективность	Эффективность ограничена количеством последовательно соединенных систем (двигатель, генератор, трансформатор, преобразователи, двигатели и т. д.). Система позволяет точно контролировать и постепенно изменять частоту вращения гребного винта. Если используется несколько источников электроэнергии, двигатели внутреннего сгорания могут работать с максимальной эффективностью.	Хорошая эффективность, связанная с уменьшенным количеством последовательно соединенных компонентов (особенно с двигателями внутреннего сгорания). Точный контроль и постепенное изменение частоты вращения винта. Двигатель внутреннего сгорания работает с максимальной эффективностью.
Резервирование / надежность	Система является модульной и предлагает резервирование источников питания.	Очень высокий уровень резервирования, поскольку мощность двигателя может обеспечиваться двумя независимыми системами. Сложная механическая система, которая может явиться причиной отказа.

Главная нагрузка на ГЭУ с РШПТ, блок-схема которой приведена на рис. 4, связана с системой электродвижения, включающей DC/AC-преобразователь и гребной электродвигатель. Такие системы демонстрируют постоянный характер нагрузки, поскольку способны потреблять такую же суммарную мощность при различных величинах напряжения [17]. Данное явление вызвано электромеханическим модулятором, который корректирует время переключения в зависимости от нагрузки.

Для того, чтобы математически описать постоянную нагрузку (ПН), может быть использован контролируемый источник напряжения, где требуемый электрический ток находится в результате деления заданной мощности на реальное DC-напряжение, как показано в следующем уравнении:

$$I_{\text{нагр}} = \frac{P_{\text{зад}}}{U} \quad (1)$$

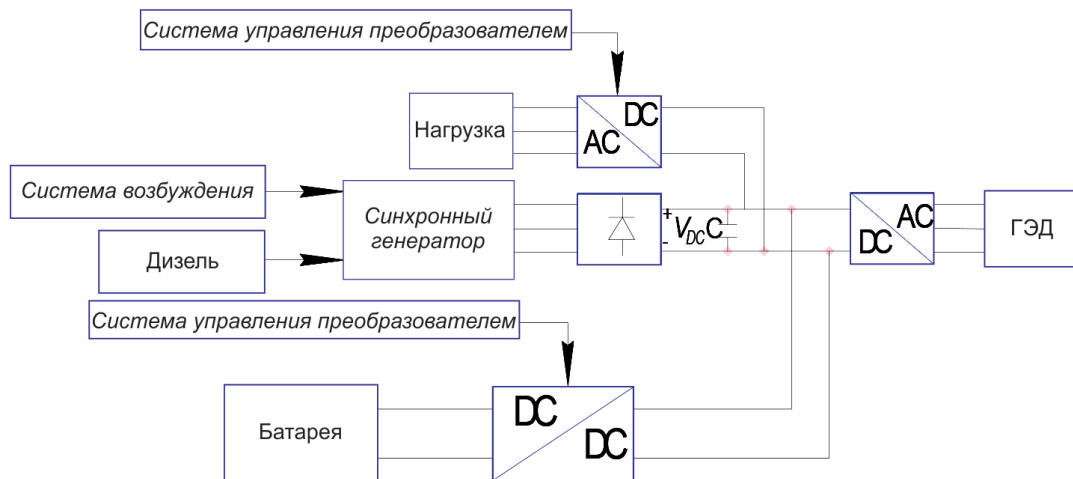


Рис. 4. Блок-схема рассматриваемой ГЭУ с РШПТ

Линеаризованное выражение постоянной нагрузки находится из уравнения [18]:

$$i = -\frac{P_{\text{зад}}}{U^2} + 2\frac{P}{U}. \quad (2)$$

В данной рабочей точке постоянная нагрузка может быть представлена отрицательной параллелью сопротивления с постоянной мощностью, приведенными в уравнениях (3) и (4). Отрицательное приращение сопротивления имеет эффект дестабилизации на автоматическую систему и известно как отрицательный неустойчивый импеданс [19]:

$$R_{\text{ПН}} = -\frac{U^2}{P}; \quad (3)$$

$$I_{\text{ПН}} = 2\frac{P}{U}. \quad (4)$$

В качестве динамической нагрузки необходимо применение асинхронного двигателя (АД), имеющего  $T$ -образную схему замещения, представленную на рис. 5, который определяется следующими векторами состояний [20]:

- $\vec{\psi}_S$  — вектор потокосцепления статора;
- $\vec{\psi}_R$  — вектор потокосцепления ротора;
- $\vec{\psi}_m$  — вектор потокосцепления в воздушном зазоре;
- $\vec{U}_S$  — вектор напряжения статора;
- $\vec{I}_S$  — вектор тока статора;
- $\vec{I}_R$  — вектор тока ротора;
- $\vec{I}_m$  — вектор тока намагничивания.

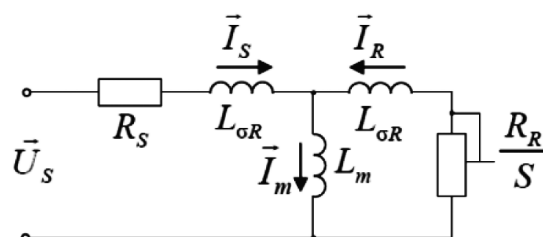


Рис. 5.  $T$ -образная схема замещения АД



На рис. 6 приведена векторная диаграмма, демонстрирующая взаимосвязь векторов состояний асинхронного двигателя, которые совершают вращения в поперечном сечении вокруг оси ротора. В установившемся режиме максимальные значения, фазовые сдвиги и частоты вращения всех векторов состояний остаются постоянными. В динамике во время переходных процессов данные значения изменяются [21].

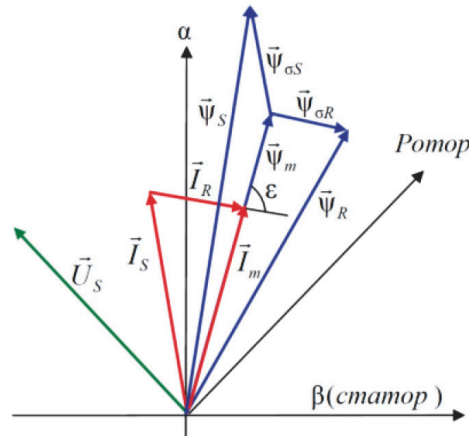


Рис. 6. Векторная диаграмма

Зачастую системы векторного регулирования АД строятся во вращающейся системе координат  $dq$ , ось  $d$  которой ориентирована по потоку ротора [22]. Для данной системы характерно следующее:

- проекция потока ротора на ось  $q$  имеет значение, равное нулю ( $\psi_{Rq} = 0$ );
- имеет вращение со скоростью поля  $\omega_e$ ;
- скорость поля ( $\omega_e$ ) и скорость ротора ( $\omega_R$ ) связаны следующим соотношением:

$$\Delta\omega = \omega_e - Z_p\omega_R.$$

где  $\Delta\omega$  — скорость скольжения;  $Z_p$  — число пар полюсов двигателя.

Учитывая ранее изложенное, можно записать уравнения, описывающие электромагнитные процессы рассматриваемого АД в системе  $dq$  [23]:

$$\begin{cases} pI_{sd} = \frac{1}{L_S - L_m K_R} (U_{sd} - I_{sd} R_s - K_R p \Psi_R) + \omega_e I_{sq}; \\ pI_{sq} = \frac{1}{L_S - L_m K_R} (U_{sq} - I_{sq} R_s - K_R \omega_e \Psi_R) - \omega_e I_{sd}; \\ p\Psi_R = \frac{1}{T_R} (L_m I_{sd} - \Psi_R); \\ \omega_e = Z_p \omega_R + \frac{L_m}{\Psi_R T_R} I_{sq}; \\ M_{em} = \frac{3Z_p K_R}{2} \Psi_R I_{sq}. \end{cases} \quad (5)$$

В качестве дополнительного источника электрической энергии и системы, улучшающей качество электрической сети, на таких судах применяется УНЭ, которое состоит из  $DC-DC$  преобразователя, а также аккумуляторов. В данном устройстве используется метод изменения направления протекания электрической энергии, направленный на улучшение выходного напряжения, которое фильтруется и имеет постоянное выходное значение благодаря параллельно подключенным конденсаторам [24]. Из-за их высокой эффективности и способности обеспечивать повышающий, понижающий или инверторный выход переключающие регуляторы являются более предпочтительными, чем линейные регуляторы, при разработке преобразователей.

В переключающих цепях полупроводниковые переключатели вносят значительный вклад в быстродействие управления динамической передачей мощности от входа к выходу. При разработке импульсных регуляторов требованием является постоянное выходное напряжение с минимальным потреблением переменного электрического тока. Наиболее широко используемым методом управления выходным напряжением является широтно-импульсная модуляция (ШИМ), которая помогает поддерживать постоянную частоту переключения и изменяет рабочий цикл [25].

Схема для понижающего / повышающего преобразователя, способного генерировать выходное напряжение постоянного тока большего или меньшего значения в сравнении с входным, показана на рис. 7. Когда транзистор  $Q_1$  включен, входное напряжение подается на катушку индуктивности, и ток в катушке  $L$  линейно возрастает. Во время второго интервала, когда транзистор отключен, напряжение на катушке индуктивности меняется на полярность, тем самым электрическая энергия начинает течь через диод. В течение этого интервала энергия, запасенная в катушке индуктивности, питает нагрузку и перезаряжает конденсатор. График изменения напряжения и тока показан на рис. 8.

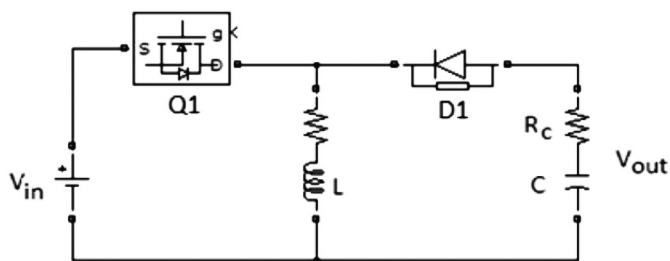


Рис. 7. Повышающий/понижающий DC-DC преобразователь

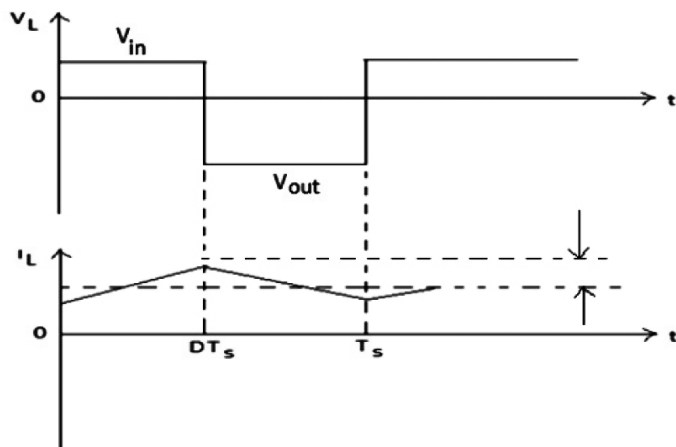


Рис. 8. График изменения напряжения и тока в повышающем / понижающем преобразователе

Применение принципа баланса напряжения в индуктивности для определения уравнения выходного напряжения в установившемся режиме дает [26]:

$$U_{in}T_{on} + U_{out}T_{off} = 0; \quad (6)$$

$$\frac{U_{out}}{U_{in}} = -\frac{D}{1-D}. \quad (7)$$



где  $U_{in}$  — входное напряжение;  $U_{out}$  — выходное напряжение;  $T_{on}$  — время включения;  $T_{off}$  — время выключения;  $D$  — рабочий цикл.

Поскольку рабочий цикл  $D$  может варьировать от 0 до 1, выходное напряжение может быть ниже или выше входного напряжения по величине, но противоположно по полярности. Для преобразователей частоты с неуправляемым выпрямителем на входе при рассмотрении вопроса торможения и реверса судна с гибридной электроэнергетической системой нужно учитывать, что энергия, возвращаемая в сеть двигателем, может гаситься как на тормозном резисторе [27], так и передаваться на УНЭ. Выполним расчет электрической энергии, выделяемой при известных параметрах ГЭД танкера СПГ «SCF Великий Новгород», имеющего следующие параметры:

- приведенный момент инерции  $J = 19000 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ;
- масса ротора — 47500 кг;
- частота вращения номинальная  $n = 104 \text{ об/мин}$ ;
- момент вращения  $M_{ном} = 577 \text{ кН} \cdot \text{м}$ .

Определим значение энергии торможения при условии изменения частоты вращения от 120 об/мин ( $n_{max}$ ) до 58 об/мин и того, что часть энергии поглощается конденсатором при его заряде. Значение кинетической энергии на валу гребного двигателя [28], [29]:

$$W = \frac{J\omega^2}{2}. \quad (8)$$

Значение энергии заряженного конденсатора

$$W = \frac{CU^2}{2}. \quad (9)$$

Изменение энергии системы, при ее переходе со 120 об/мин на 58 об/мин, будет составлять

$$\Delta W_M = J \left( \frac{\omega_1^2}{2} - \frac{\omega_2^2}{2} \right). \quad (10)$$

Изменение энергии на конденсаторе

$$\Delta W_C = C \left( \frac{U_1^2}{2} - \frac{U_2^2}{2} \right). \quad (11)$$

Изменение энергии системы при переводе в рад/с:

$$\Delta W_M = 19000 \left( \frac{145^2}{2} - \frac{36,85^2}{2} \right) = 1,027 \text{ МДж}.$$

Определим значение энергии, которая пойдет на заряд конденсаторной батареи. В схеме ПЧ используется два конденсатора, каждый емкостью по 1,6 мФ. Напряжение на конденсаторе при  $n = 120 \text{ об/мин}$  равно 3000В, предельное напряжение на конденсаторе должно быть не более 10 % от номинального 3300В и, следовательно,

$$\Delta W_C = 0,0032 \left( \frac{10890000}{2} - \frac{9000000}{2} \right) = 3024 \text{ Дж}.$$

Значение энергии, идущей на нагрев резистора или направляемой в УНЭ:

$$\Delta W_M - \Delta W_C = W; \quad (12)$$

$$W = 1027000 - 3024 = 1023976 \text{ Вт} \cdot \text{с};$$

$$W = 51,2 \text{ кВт за } 20 \text{ с}.$$

Учитывая ранее изложенное, ГЭУ с РШПТ была смоделирована на рис. 9 с использованием основных положений компьютерной программы SimInTech [30].

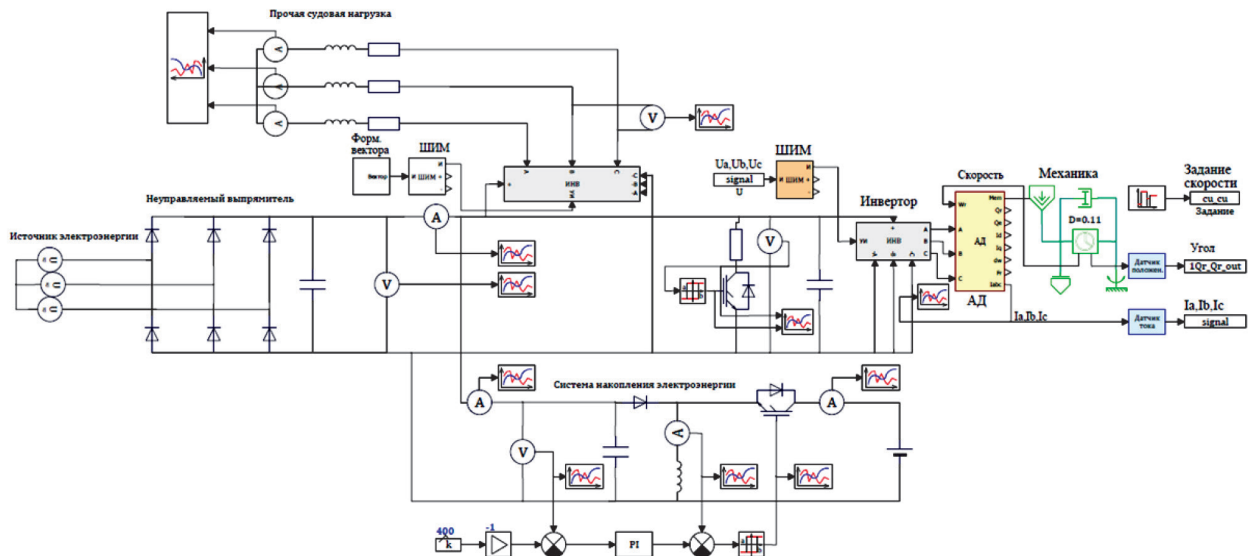


Рис. 9. SimInTech — модель гибридной ГЭУ с РШПТ

Данная компьютерная модель состоит из следующих блоков:

- источник электроэнергии;
- неуправляемый выпрямитель;
- инвертор;
- ГЭД;
- система накопления электроэнергии;
- прочая судовая нагрузка.

В процессе выполнения моделирования гибридной ГЭУ с РШПТ в программе SimInTech (серийный номер D63B30FDA70) задавались различные значения частоты вращения ГЭД.

На рис. 10 дан график изменения значения напряжения на РШПТ в зависимости от величины потребляемого ГЭУ электрического тока, приведенного на рис. 11, с поэтапным увеличением оборотов и последующим реверсом.

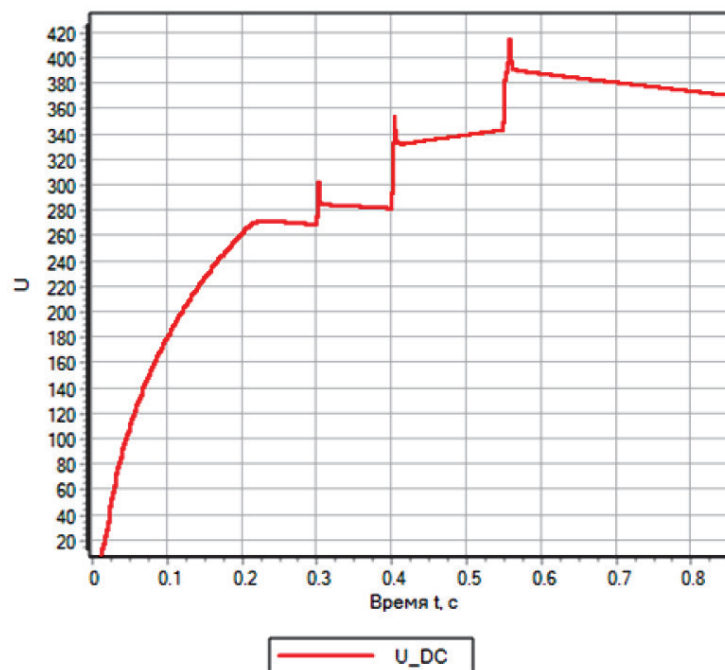


Рис. 10. График изменения напряжения на РШПТ

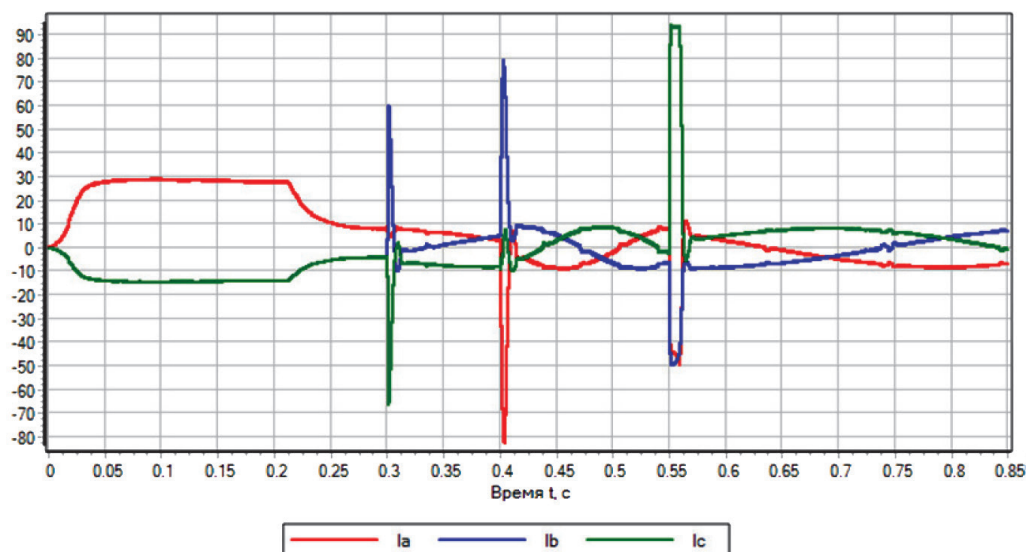


Рис. 11. График изменения токов ГЭД

Как видно из графиков, приведенных на рис. 10 и 11, в процессе изменения нагрузки качество электрической энергии сети удовлетворяет установленным требованиям.

### Заключение (Conclusion)

В статье рассмотрены преимущества системы постоянного тока по сравнению с системой переменного тока, к которым относятся: простота интеграции источников питания постоянного тока, экономия пространства, снижение расхода топлива и др. Несмотря на наличие указанных преимуществ, новая технология имеет проблемы, требующие разрешения. Очевидно, что для некоторых типов судов с характерными эксплуатационными профилями системы постоянного тока не будут в ближайшее время оптимальным решением. Переход от системы распределения переменного тока к постоянному току будет происходить постепенно через гибридные решения, которые будут одновременно содержать основную шину переменного тока и основную шину постоянного тока, каждая из которых имеет соответствующий тип нагрузки. Применение устройств накопления электроэнергии позволит улучшить качество электрической сети и при достаточном уровне автоматизации производить отбор мощности от ГЭД в процессе торможения и реверса, тем самым снижая расход топлива в динамических режимах. Кроме того, гибридизация судов дает возможность отказаться от трансформаторов, входящих в систему электродвижения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hmam S. Techno-economic optimization of a supercapacitor-based energy storage unit chain: Application on the first quick charge plug-in ferry / S. Hmam, J. C. Olivier, S. Bourguet, L. Loron // Applied Energy. — 2015. — Vol. 153. — Pp. 3–14. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.04.054.
2. Dedes E. K. Assessing the potential of hybrid energy technology to reduce exhaust emissions from global shipping / E. K. Dedes, D. A. Hudson, S. R. Turnock // Energy policy. — 2012. — Vol. 40. — Pp. 204–218. DOI: 10.1016/j.enpol.2011.09.046.
3. Stevens L. Is new emission legislation stimulating the implementation of sustainable and energy-efficient maritime technologies? / L. Stevens, C. Sys, T. Vanelslender, E. Van Hassel // Research in transportation business & management. — 2015. — Vol. 17. — Pp. 14–25. DOI: 10.1016/j.rtbm.2015.10.003.
4. Романовский В. В. Использование постоянного тока в перспективных гребных электрических установках / В. В. Романовский, О. А. Зубин, А. Г. Гостев // Морское образование: традиции, реалии перспективы: мат. науч.-практ. конф. 31 марта 2015 г. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2015 — С. 211–215.

5. *Thounthong P.* Energy management of fuel cell/battery/supercapacitor hybrid power source for vehicle applications / P. Thounthong, S. Rael, B. Davat // *Journal of Power Sources*. — 2009. — Vol. 193. — Is. 1. — Pp. 376–385. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2008.12.120.

6. *Zahedi B.* Optimized efficiency of all-electric ships by dc hybrid power systems / B. Zahedi, L. E. Norum, K. B. Ludvigsen // *Journal of Power Sources*. — 2014. — Vol. 255. — Pp. 341–354. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2014.01.031.

7. *Doerry N.* History and the status of electric ship propulsion, integrated power systems, and future trends in the US Navy / N. Doerry, J. Amy, C. Krolick // *Proceedings of the IEEE*. — 2015. — Vol. 103. — Is. 12. — Pp. 2243–2251. DOI: 10.1109/JPROC.2015.2494159.

8. *Doerry N.* Naval power systems: Integrated power systems for the continuity of the electrical power supply / N. Doerry // *IEEE Electrification Magazine*. — 2015. — Vol. 3. — Is. 2. — Pp. 12–21. DOI: 10.1109/MELE.2015.2413434.

9. *Григорьев А. В.* Теоретические вопросы расчета токов короткого замыкания в судовых электро-энергетических системах с распределением электроэнергии на постоянном токе / А. В. Григорьев, А. Ю. Васильев, Ю. А. Кулагин // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2017. — Т. 9. — № 5. — С. 1095–1103. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1095-1103.

10. *Lan H.* Optimal sizing of hybrid PV/diesel/battery in ship power system / H. Lan, S. Wen, Y. Y. Hong, C. Y. David, L. Zhang // *Applied Energy*. — 2015. — Vol. 158. — Pp. 26–34. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.08.031/

11. *Liu H.* Estimation of PV output power in moving and rocking hybrid energy marine ships / H. Liu, Q. Zhang, X. Qi, Y. Han, F. Lu // *Applied Energy*. — 2017. — Vol. 204. — Pp. 362–372. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.07.014.

12. *Григорьев А. В.* Исследование дизель-генератора, работающего с переменной частотой вращения, на компьютерной модели / А. В. Григорьев // *Электросистемы*. — 2006. — № 2 (14). — С. 17–19.

13. *Chan C. C.* Electric, hybrid, and fuel-cell vehicles: Architectures and modeling / C. C. Chan, A. Bouscayrol, K. Chen // *IEEE transactions on vehicular technology*. — 2009. — Vol. 59. — Is. 2. — Pp. 589–598. DOI: 10.1109/TVT.2009.2033605.

14. *Chen J. S.* Energy efficiency comparison between hydraulic hybrid and hybrid electric vehicles / J. S. Chen // *Energies*. — 2015. — Vol. 8. — Is. 6. — Pp. 4697–4723. DOI: 10.3390/en8064697.

15. *Wang E.* System design and energetic characterization of a four-wheel-driven series-parallel hybrid electric powertrain for heavy-duty applications / E. Wang, D. Guo, F. Yang // *Energy Conversion and Management*. — 2015. — Vol. 106. — Pp. 1264–1275. DOI: 10.1016/j.enconman.2015.10.056.

16. *Hebner R. E.* Electric ship power system-research at the University of Texas at Austin / R. E. Hebner // *IEEE Electric Ship Technologies Symposium, 2005*. — IEEE, 2005. — Pp. 34–38. DOI: 10.1109/ESTS.2005.1524649.

17. *Романовский В. В.* Анализ схемных решений гребных электрических установок с распределенной шиной постоянного тока / В. В. Романовский, В. А. Малышев, А. С. Бежик // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2019. — Т. 11. — № 1. — С. 169–181. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-169-181.

18. *Rahimi A. M.* Active damping in DC/DC power electronic converters: A novel method to overcome the problems of constant power loads / A. M. Rahimi, A. Emadi // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. — 2009. — Vol. 56. — Is. 5. — Pp. 1428–1439. DOI: 10.1109/TIE.2009.2013748.

19. *Emadi A.* Constant power loads and negative impedance instability in automotive systems: definition, modeling, stability, and control of power electronic converters and motor drives / A. Emadi, A. Khaligh, C. H. Rivetta, G. A. Williamson // *IEEE Transactions on vehicular technology*. — 2006. — Vol. 55. — Is. 4. — Pp. 1112–1125. DOI: 10.1109/TVT.2006.877483.

20. *Денисов В. А.* Сравнительный анализ переходных процессов в асинхронном двигателе / В. А. Денисов, М. Н. Третьякова, О. А. Бородин // *Электротехника*. — 2018. — № 3. — С. 2–7.

21. *Kopyrin V. A.* Simulation Modeling of the Submersible Asynchronous Motor's Operation Modes / V. A. Kopyrin, O. V. Smirnov, M. V. Deneko // *2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*. — IEEE, 2018. — Pp. 1–5. DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602539.

22. *Guo Z.* The Study on Mathematical Model and Simulation of Asynchronous Motor Considering Iron Loss / Z. Guo, Q. Zhang // *Journal of Physics: Conference Series*. — IOP Publishing, 2018. — Vol. 1060. — Is. 1. — Pp. 012085. DOI: 10.1088/1742-6596/1060/1/012085.

23. *Shestakov A. V.* Modeling and Experimental Analysis of Dynamic Characteristics of Asynchronous Motor / A. V. Shestakov // *2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. — IEEE, 2019. — Pp. 1–4. DOI: 10.1109/ICIEAM.2019.8743061.

24. *Dung N. A.* A novel low-loss control strategy for bidirectional DC–DC converter / N. A. Dung, P. P. Hieu, Y. C. Hsieh, J. Y. Lin, Y. C. Liu, H. J. Chiu // *International Journal of Circuit Theory and Applications*. — 2017. — Vol. 45. — Is. 11. — Pp. 1801–1813. DOI: 10.1002/cta.2373.
25. *Wu H.* High step-up/step-down soft-switching bidirectional DC–DC converter with coupled-inductor and voltage matching control for energy storage systems / H. Wu, K. Sun, L. Chen, L. Zhu, Y. Xing // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. — 2016. — Vol. 63. — Is. 5. — Pp. 2892–2903. DOI: 10.1109/TIE.2016.2517063.
26. *Geng Z.* Modularized High Power Density Bidirectional Buck-Boost DC-DC Converter for EV Battery Management / Z. Geng, D. Gu, T. Hong, K. Qi, K. Zhang, J. Ambrosio // 2018 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC). — IEEE, 2018. — Pp. 164–167. DOI: 10.1109/ITEC.2018.8450230.
27. *Мальшев В. А.* Расчет и выбор тормозных резисторов гребной электрической установки танкера ледового класса / В. А. Мальшев, В. С. Иванов, В. С. Соловей // *Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2016. — № 5 (39). — С. 172–184. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-172-184.
28. *Хорошенький А. В.* Торможение судна с винторулевыми колонками / А. В. Хорошенький // *Материалы VII Межвузовской научно-практической конференции аспирантов, студентов и курсантов «Современные тенденции развития водного транспорта России»*. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2016. — С. 202–205.
29. *Андронников Д.* Особенности выбора и применения резисторов в силовой технике / Д. Андронников // *Силовая электроника*. — 2007. — № 12. — С. 4–8.
30. *Калачев Ю. Н.* SimInTech: моделирование в электроприводе / Ю. Н. Калачев. — ДМК Пресс, 2019. — 98 с.

## REFERENCES

1. Hmam, Sadok, J. C. Olivier, S. Bourguet, and L. Loron. “Techno-economic optimization of a supercapacitor-based energy storage unit chain: Application on the first quick charge plug-in ferry.” *Applied Energy* 153 (2015): 3–14. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.04.054.
2. Dedes, Eleftherios K., Dominic A. Hudson, and Stephen R. Turnock. “Assessing the potential of hybrid energy technology to reduce exhaust emissions from global shipping.” *Energy policy* 40 (2012): 204–218. DOI: 10.1016/j.enpol.2011.09.046.
3. Stevens, Laurence, C. Sys, T. Vanelslander, and E. Van Hassel. “Is new emission legislation stimulating the implementation of sustainable and energy-efficient maritime technologies?” *Research in transportation business & management* 17 (2015): 14–25. DOI: 10.1016/j.rtbm.2015.10.003.
4. Romanovskii, V. V., O. A. Zubin, and A.G. Gostev. “Ispol’zovanie postoyannogo toka v perspektivnykh grebnykh elektricheskikh ustanovkakh.” *Morskoe obrazovanie: traditsii, realii perspektivy: materialy nauchno-prakticheskoi konferentsii*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2015. 211–215.
5. Thounthong, Phatiphat, Stephane Rael, and Bernard Davat. “Energy management of fuel cell/battery/supercapacitor hybrid power source for vehicle applications.” *Journal of Power Sources* 193.1 (2009): 376–385. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2008.12.120.
6. Zahedi, Bijan, Lars E. Norum, and Kristine B. Ludvigsen. “Optimized efficiency of all-electric ships by dc hybrid power systems.” *Journal of Power Sources* 255 (2014): 341–354. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2014.01.031.
7. Doerry, Norbert, John Amy, and Cy Krolick. “History and the status of electric ship propulsion, integrated power systems, and future trends in the US Navy.” *Proceedings of the IEEE* 103.12 (2015): 2243–2251. DOI: 10.1109/JPROC.2015.2494159.
8. Doerry, Norbert. “Naval power systems: Integrated power systems for the continuity of the electrical power supply.” *IEEE Electrification Magazine* 3.2 (2015): 12–21. DOI: 10.1109/MELE.2015.2413434.
9. Grigoryev, Andrey V., Aleksey Yu. Vasilyev, and Yurii A. Kulagin. “Theoretical issues of calculation of short-circuit currents in shipboard electric power systems with electric power distribution on a direct current.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.5 (2017): 1095–1103. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1095-1103.
10. Lan, Hai, S. Wen, Y. Y. Hong, C. Y. David, and L. Zhang. “Optimal sizing of hybrid PV/diesel/battery in ship power system.” *Applied energy* 158 (2015): 26–34. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.08.031.
11. Liu, Hongda, Q. Zhang, X. Qi, Y. Han, and F. Lu. “Estimation of PV output power in moving and rocking hybrid energy marine ships.” *Applied Energy* 204 (2017): 362–372. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.07.014.



12. Grigor'ev, A.V. "Issledovanie dizel'-generatora, rabotayushchego s peremennoi chastotoi vrashcheniya, na komp'yuternoi modeli." *Elektrosistemy* 2(14) (2006): 17–19.
13. Chan, Ching Chuen, Alain Bouscayrol, and Keyu Chen. "Electric, hybrid, and fuel-cell vehicles: Architectures and modeling." *IEEE transactions on vehicular technology* 59.2 (2009): 589–598. DOI: 10.1109/TVT.2009.2033605.
14. Chen, Jia-Shiun. "Energy efficiency comparison between hydraulic hybrid and hybrid electric vehicles." *Energies* 8.6 (2015): 4697–4723. DOI: 10.3390/en8064697.
15. Wang, Enhua, Di Guo, and Fuyuan Yang. "System design and energetic characterization of a four-wheel-driven series-parallel hybrid electric powertrain for heavy-duty applications." *Energy Conversion and Management* 106 (2015): 1264–1275. DOI: 10.1016/j.enconman.2015.10.056.
16. Hebner, Robert E. "Electric ship power system-research at the University of Texas at Austin." *IEEE Electric Ship Technologies Symposium, 2005*. IEEE, 2005. 34–38. DOI: 10.1109/ESTS.2005.1524649.
17. Romanovskiy, Victor V., Vladimir A. Malishev, and Artem S. Bezhik. "Special structure of the electrical propulsion plant with DC-grid system." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.1 (2019): 169–181. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-169-181.
18. Rahimi, Amir M., and Ali Emadi. "Active damping in DC/DC power electronic converters: A novel method to overcome the problems of constant power loads." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 56.5 (2009): 1428–1439. DOI: 10.1109/TIE.2009.2013748.
19. Emadi, Ali, A. Khaligh, C. H. Rivetta, and G. A. Williamson. "Constant power loads and negative impedance instability in automotive systems: definition, modeling, stability, and control of power electronic converters and motor drives." *IEEE Transactions on vehicular technology* 55.4 (2006): 1112–1125. DOI: 10.1109/TVT.2006.877483.
20. Denisov, V. A., M. N. Tret'yakova, and O. A. Borodin. "A Comparative Analysis of Transient Processes in an Asynchronous Motor." *Russian Electrical Engineering* 89.3 (2018): 137–142. DOI: 10.3103/S1068371218030070.
21. Kopyrin, Vladimir A., Oleg V. Smirnov, and Marina V. Deneko. "Simulation Modeling of the Submersible Asynchronous Motor's Operation Modes." *2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*. IEEE, 2018. 1–5. DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602539.
22. Guo, Zhen, and Qing-wei Zhang. "The Study on Mathematical Model and Simulation of Asynchronous Motor Considering Iron Loss." *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 1060. No. 1. IOP Publishing, 2018. DOI: 10.1088/1742-6596/1060/1/012085.
23. Shestakov, Alexander V. "Modeling and Experimental Analysis of Dynamic Characteristics of Asynchronous Motor." *2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. IEEE, 2019. DOI: 10.1109/ICIEAM.2019.8743061.
24. Dung, Nguyen Anh, P. P. Hieu, Y. C. Hsieh, J. Y. Lin, Y. C. Liu, and H. J. Chiu. "A novel low-loss control strategy for bidirectional DC–DC converter." *International Journal of Circuit Theory and Applications* 45.11 (2017): 1801–1813. DOI: 10.1002/cta.2373.
25. Wu, Hongfei, K. Sun, L. Chen, L. Zhu, and Y. Xing. "High step-up/step-down soft-switching bidirectional DC–DC converter with coupled-inductor and voltage matching control for energy storage systems." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 63.5 (2016): 2892–2903. DOI: 10.1109/TIE.2016.2517063.
26. Geng, Zhi, D. Gu, T. Hong, K. Qi, K. Zhang, and J. Ambrosio. "Modularized High Power Density Bidirectional Buck-Boost DC–DC Converter for EV Battery Management." *2018 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*. IEEE, 2018. 164–167. DOI: 10.1109/ITEC.2018.8450230.
27. Malyshev, Vladimir Alekseevich, Vladimir Sergeevich Ivanov, and Valery Sergeevich Solovey. "Calculation and selection of brake resistors, electric propeller the installation of the tanker." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 5(39) (2016): 172–184. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-172-184.
28. Horoshenkij, A. V. "Tormozhenie sudna s vinto-rulevymi kolonkami." *Materialy VII mezhvuzovskoj nauchno-prakticheskoy konferencii aspirantov, studentov i kursantov «Sovremennye tendencii razvitiya vodnogo transporta Rossii»*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S.O. Makarova, 2016. 202–205.
29. Andronnikov, D. "Osobennosti vybora i primeneniya rezistorov v silovoj tekhnike." *Silovaya elektronika* 2 (2007): 4–8.
30. Kalachev, Yu.N. *SimInTech: modelirovanie v elektroprivode*. DMK Press, 2019.



**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**

**Романовский Виктор Викторович —**

доктор технических наук, профессор  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала  
С. О. Макарова»  
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
ул. Двинская, 5/7  
e-mail: [romanovskiyvv@gumrf.ru](mailto:romanovskiyvv@gumrf.ru)

**Малышев Владимир Алексеевич —**

кандидат технических наук, доцент  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала  
С. О. Макарова»  
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
ул. Двинская, 5/7  
e-mail: [kaf\\_edas@gumrf.ru](mailto:kaf_edas@gumrf.ru)

**Бежик Артем Сергеевич —**

аспирант  
*Научный руководитель:*  
Романовский Виктор Викторович  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала  
С. О. Макарова»  
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
ул. Двинская, 5/7,  
e-mail: [kaf\\_edas@gumrf.ru](mailto:kaf_edas@gumrf.ru)

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Romanovskiy, Victor V. —**

Dr. of Technical Sciences, professor  
Admiral Makarov State University of Maritime  
and Inland Shipping  
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,  
Russian Federation  
e-mail: [romanovskiyvv@gumrf.ru](mailto:romanovskiyvv@gumrf.ru)

**Malishev, Vladimir A. —**

PhD, associate professor  
Admiral Makarov State University of Maritime  
and Inland Shipping  
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,  
Russian Federation  
e-mail: [kaf\\_edas@gumrf.ru](mailto:kaf_edas@gumrf.ru)

**Bezhik, Artem S. —**

Postgraduate  
*Supervisor:*  
Romanovskiy, Victor V.  
Admiral Makarov State University of Maritime  
and Inland Shipping  
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,  
Russian Federation  
e-mail: [kaf\\_edas@gumrf.ru](mailto:kaf_edas@gumrf.ru)

*Статья поступила в редакцию 18 марта 2020 г.*

*Received: March 18, 2020.*