

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-402-415

USING SUPERCONDUCTING MAGNETIC ENERGY STORAGE IN THE ELECTRIC NETWORKS OF A SHIP COMPLEX

T. S. Ivanova, V. I. Malarev, B. N. Abramovich

Saint-Petersburg State Mining University, St. Petersburg, Russian Federation

The application area of ship electric drive is expanding. The engines of boats, barges and motor ships, large and small river and sea vessels need reliable, timely and affordable power supply. The proposed method of braking and reversing the propeller drive with screws allows to store braking energy in the energy storage devices and subsequently use this energy in the electric power systems of high-power vessels of both civilian and navy, containing propeller motors, for which it is necessary to ensure the operation of the electric propulsion system with a high energy efficiency indicator without using the damping blocks of the braking energy of the propeller motors (brake resistors blocks).

The water regime of complex waterworks and lock systems can also be regulated by using superconducting magnetic energy storage (SMES) as an energy source. Based on the analysis of the various types of drives, a method for eliminating short-term interruptions in the power supply of powerful consumers is proposed. The design of the energy storage device and its communication device with the electric network are considered. In this model, a converter with bi-directional valves of the “voltage source” topology based on IGBT transistors is selected, it is economical and has the highest performance, the current can flow in two directions, and the voltage on the source side does not change polarity, which means that the blocking device does not required. To ensure navigation in the cold waters of the Arctic, icebreakers are used, which have electrical transmission to the screws. The case of using SMES while ensuring the installation speed at the time forcing icebreaker speed is discussed in the paper.

This study tests the system of a superconducting coil in the MATLAB/Simulink software environment, presenting it as a direct current source that should respond to a voltage dip in the power grid. To test the system for compensating for the voltage dip in the power supply network, a model of the power part of the network converter and the vector control system is proposed. The results of the work are graphs of computer simulation of processes in the network and inverter, showing the reaction of the coil to the voltage disappearance.

Keywords: Inverter, IGBT-transistors, inductive energy storage, renewable energy sources, automation, pulse-width modulation, phase-locked loop, energy storage, voltage dip.

For citation:

Ivanova, Tatiana S., Vadim I. Malarev, and Boris N. Abramovich. “Using superconducting magnetic energy storage in the electric networks of a ship complex.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.2 (2020): 402–415. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-402-415.

УДК 602.17

ПРИМЕНЕНИЕ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ ИНДУКТИВНЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ В ЭНЕРГОСЕТИ СУДОВОГО КОМПЛЕКСА

Т. С. Иванова, В. И. Маларев, Б. Н. Абрамович

Санкт-Петербургский горный университет (СПбГГУ),
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Отмечается, что сфера применения судового электропривода расширяется, поэтому средства водного транспорта по своим важнейшим технико-экономическим и эксплуатационным характеристикам должны обеспечивать ритмичное выполнение плана грузовых и пассажирских перевозок. Подчеркивается, что двигатели катеров и яхт, барж и теплоходов, крупных и небольших речных и морских судов нуждаются в надежном, своевременном и доступном обеспечении мощностью. Рассматриваются накопители энергии, используемые в системах судов большой мощности как гражданского, так и военно-морского флота, содержащие гребные двигатели с гребными винтами. Для таких систем необходимо обеспечить электродвижение с высоким показателем энергетической эффективности без использования блоков гашения

энергии торможения гребных двигателей (блоков тормозных резисторов). Для обеспечения судоходства в холодных водах Арктики используются ледоколы, которые имеют электрическую передачу на винты. В статье рассмотрен случай использования сверхпроводящего индуктивного накопителя (СПИН) при обеспечении установки быстродействием в момент форсирования скорости ледокола.

Предлагается способ устранения кратковременных перебоев в электроснабжении приводов судов, обеспечения торможения и реверса гребного привода с винтами при запасе энергии торможения на накопителе энергии. На основе анализа накопителей различного типа рассмотрена конструкция накопителя и его устройство связи с электрической сетью. В данном исследовании тестируется система сверхпроводящей катушки в программной среде MATLAB / Simulink, представленная в виде источника постоянного тока, установлена работоспособность данной системы при падении напряжения в энергосети. Предложена модель силовой части сетевого преобразователя и векторной системы управления. Результатами работы служат графики компьютерного моделирования процессов в сети и преобразователе, демонстрирующие реакцию катушки на исчезновение напряжения. Источник энергии такого типа целесообразен в системах, где присутствует перераспределение энергии и обмен электромагнитной энергией между узлами в сети.

Ключевые слова: преобразователь, индуктивный накопитель энергии, возобновляемые источники энергии, широтно-импульсная модуляция, фазовая автоподстройка частоты, аккумулялирование энергии, провал напряжения, гребной электропривод, реверс.

Для цитирования:

Иванова Т. С. Применение сверхпроводящих индуктивных накопителей в энергосети судового комплекса / Т. С. Иванова, В. И. Маларев, Б. Н. Абрамович // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 2. — С. 402–415. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-402-415.

Введение (Introduction)

В настоящее время в судовой электроэнергетике существует ряд важных проблем, к которым, в частности, относятся:

- несоответствие режима генерации и потребления энергии, оказывающее влияние на устойчивость энергосистем;
- низкая надежность передачи и распределения энергии, приводящая к перерывам в электроснабжении и нарушению непрерывности технологических процессов.

Для решения указанных проблем в течение последнего времени интенсивно ведутся работы в области альтернативных источников энергии, эффективных накопителей энергии, релейной защиты и противоаварийной автоматики для сетей с распределенными источниками. В работах [1], [2] рассмотрены вопросы использования фильтров качества напряжения сети, компенсаторов потерь напряжения, вызванных наличием в распределительной сети мощной нелинейной нагрузки. Разрабатываемые электротехнические устройства способны обеспечивать генерирование дополнительной энергии в часы пиковой нагрузки и накапливать энергию в часы минимального спроса, обеспечивать непрерывность подачи энергии при кратковременных провалах напряжения вследствие аварий на передающих и распределительных линиях, а также решать другие вопросы повышения качества энергии.

Теоретическая часть (Theoretical Part)

Существуют различные способы накопления энергии в кинетической, потенциальной, тепловой и электрической форме с помощью таких накопителей, как маховики, гидроаккумулирующие электростанции (ГАЭС), аккумуляторы и конденсаторы (рис. 1). Условно накопители можно разделить на два типа:

1. Быстро реагирующие накопители с малым запасом энергии.
2. Энергоемкие накопители с медленной реакцией.

ГАЭС позволяет аккумулировать большее количество энергии по сравнению с источниками другого типа, но источник энергии подобного типа характеризуется большой инерционностью и при кратковременных нарушениях сети такие источники непригодны. Среди быстродействующих накопителей можно выделить сверхпроводящий индуктивный накопитель энергии (СПИН),

областью применения которого являются устранение кратковременных перебоев и компенсации быстрых колебаний сети [3].

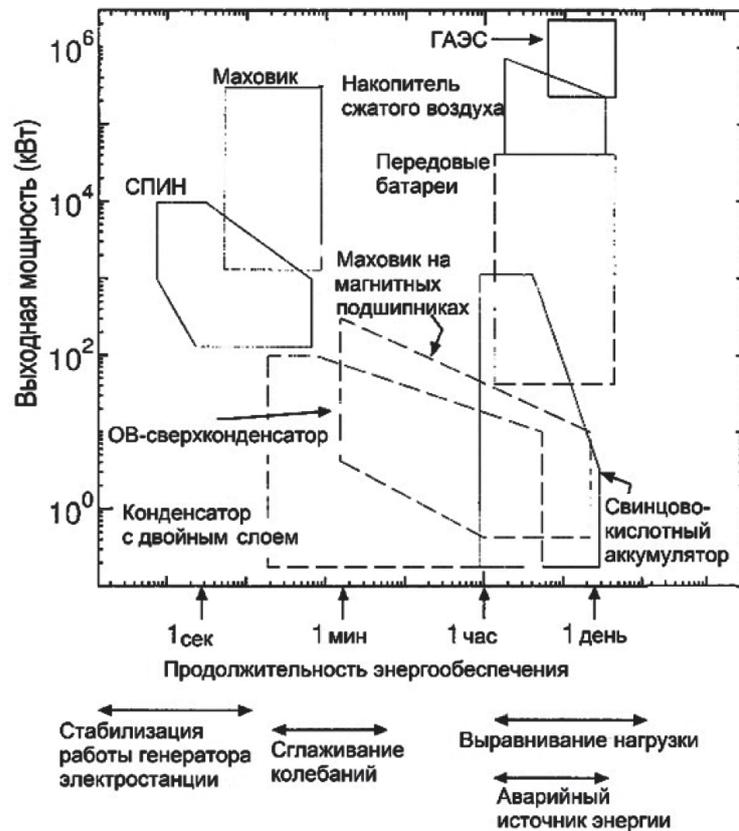


Рис. 1. Диапазон выходной мощности и продолжительности энергообеспечения для накопителей разного типа

СПИН обладает следующими достоинствами:

1. Возможность запасать и доставлять большое количество энергии, ее хранение в течение длительного периода времени с относительно малыми потерями.
2. Короткое время отклика — быстроедействие, достигающее единиц миллисекунд, что позволяет реагировать на самые внезапные аварии в энергосистеме.
3. Отсутствие потерь в процессе преобразования вида энергии. Энергия запасается в электромагнитном виде, иные типы аккумуляторов (например, химические или механические) имеют необходимость в преобразовании типа энергии.
4. Продолжительный технический ресурс.

При понижении температуры до критического состояния сопротивление обмоток СПИН становится относительно малым, при этом ток может протекать бесконечно долго:

$$t = 0; I = I_0 \Rightarrow I = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}}, \tau = L / R; \quad (1)$$

$$W = \frac{1}{2} LI^2 = W_0 e^{-\frac{2t}{\tau}}, R \rightarrow 0, \tau \rightarrow \infty. \quad (2)$$

Опыт создания таких сильноточных устройств уже имеется на предприятиях «Росатома», построивших в стране десятки крупных сверхпроводящих соленоидов и в настоящее время участвующих в международном проекте по созданию экспериментального термоядерного реактора ITER. К примеру, обмотка тороидального магнитного поля реактора типа «Токамак», созданная из российского сверхпроводника, и энергия, запасаемая в ее магнитном поле, может составлять 600 МДж, или 166 кВт·ч. Это устройство можно назвать *аналогом СПИН*. Кроме того, для реше-

ния задач энергетики зачастую можно обойтись устройствами, меньшими по запасаемой энергии. С помощью СПИН энергоемкостью 40–100 МДж можно повысить динамическую устойчивость энергосистем, работая в системе автоматического регулирования энергосистемы, СПИН будет гасить нежелательные колебания потоков мощности [4].

В современном мире становится популярным вид водного транспорта, оснащенный электродвигателями и Li-ion аккумуляторами. Активно используются электрические паромы, курсирующие на коротких дистанциях. Преимуществом такой трансформации является экономия около 100 тыс. т дизельного топлива в год в мировом использовании и сокращение выбросов на 300 тыс. т CO₂ в год относительно водного транспорта. Электрифицированная установка дает более высокую экономичность на малом и среднем ходу. Примером является паром Amperе, который поступил на службу норвежских транспортных операторов в 2015 г. На нем была установлена батарея 800 кВт·ч весом 11 т, которая питает два электромотора. Аккумулятор полностью заряжается за ночь, а также подзаряжается во время погрузки на причалах, где его ждут дополнительные мощные батареи. При сокращении выбросов CO₁ паромом на 95 % батарея также уменьшает затраты на 85 %. Правительство Норвегии обязало перевозчиков закупать только экологически чистые паромы, гибридные или полностью электрические, что позволит сократить эмиссию токсичных веществ и сэкономить денежные средства на дизельном топливе. Рациональное применение СПИН позволяет получить ряд положительных эффектов, а именно: повысить надежность энергосистем, снизить эксплуатационные затраты на базовых мощностях, уменьшить потери от межсистемных перетоков избыточных мощностей в период минимального значения нагрузки при возможности практически мгновенной смены режима накопления энергии на режим ее выдачи [5].

Особенностью движения паромов является большое количество запусков и разворотов гребного электродвигателя, особенно вблизи берега, сопровождающееся повышенным потреблением энергии в динамических режимах, таких как разгон при отходе и торможение при приближении судна к берегу. Это приводит к увеличению в значительной степени потребления ограниченной емкости батареи и уменьшению ее энергетического ресурса. В работе [6] представлен способ разгона и торможения судна-электрохода, при отходе / подходе его к пирсу с электрическим питанием от береговой сети в начале остановки судна соответственно подают электрическое питание в судовую сеть от береговой. При подходе судна к пирсу останавливают гребной двигатель или снижают частоту его вращения, осуществляя торможение судна с помощью питания, получаемого с берега [7]. Недостатком данного способа является наличие токосъемного устройства, расположенного над судном и контактирующего с береговым токопроводом, который размещают над водной поверхностью.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Объектом исследования в данной работе является преобразователь энергии в системе судового электропривода с накопителем энергии типа СПИН, его применение для обеспечения энергоснабжения в условиях падения напряжения в энергосети, аккумулярование излишней энергии в сети, генерируемой при рекуперации, и использования энергии при разгоне. Электроэнергетическая установка судна содержит тепловые двигатели, электрические генераторы, автоматические выключатели, инверторы напряжения с накопительными элементами (конденсаторами), согласующий электрический преобразователь, накопитель энергии и гребные двигатели, а также систему управления энергетической установкой [8].

В данном исследовании тестируется система СПИН в программной среде MATLAB / Simulink, представляя ее как источник постоянного тока, который должен отреагировать на падение напряжения в энергосети. Такая модель сети может представлять случай торможения судна и реверса винтов. Востребованные мощности накопителей в судостроении — до 10 МВт, а длительность работы — до 5 с. Преимуществом использования накопителя типа СПИН является ускорение процесса торможения судна без применения специального тормозного модуля.

В процессе моделирования проводилось исследование скорости реакции катушки на провал напряжения в сети, работоспособность системы управления инвертором (активным выпрямителем) и структуры преобразователя, осуществлялась проверка способности системы обеспечить нужную мощность нагрузки сети, определялась требуемая плотность заряда катушки постоянного тока, а также возможность заряда накопителя через преобразователь.

Использование СПИН на ледоколах. В настоящее время перспективным направлением является разработка месторождений с трудноизвлекаемыми запасами. Арктика — один из наиболее перспективных регионов добычи углеводородов. По прогнозам «Газпром-нефти», к 2030 г. потребность рынка перевозок по Северному морскому пути вырастет на треть, поэтому компания делает ставку на развитие собственного ледокольного и танкерного флотов. Мощность атомных ледоколов превышает мощность дизельных, они сконструированы для обеспечения судоходства в холодных водах Арктики. Одним из преимуществ атомного ледокола служит отсутствие необходимости в частой дозаправке, которая может возникнуть при плавании во льдах, когда такой возможности нет, или дозаправка сильно затруднена. Все атомные ледоколы имеют электрическую передачу на винты. В настоящее время на Балтийском заводе ведется строительство трех ледоколов нового поколения пр. 22220, которые используют инновационную установку «РИТМ-200». Обновленный ледокольный флот обеспечит бесперебойную проводку судов в акватории Северного морского пути.

Движение ледокола во льдах может осуществляться непрерывным ходом, переменными ходами, форсированием льда с разгона. Движение непрерывным ходом с установившейся скоростью возможно, если суммарная тяга гребных винтов достаточна для преодоления ледового сопротивления. Если сила ледового сопротивления превышает максимальную тягу гребных винтов, ледокол может преодолевать лед только с разгона — набегам. В этом случае к электрической передаче на винты можно добавить накопитель энергии типа СПИН. При прокладке канала ледокол форсирует льды, при ударе он резко теряет инерцию, до момента окончательной остановки машинам ледокола необходимо дать полный задний ход. Скорость, которую может развить судно во льду, зависит от мощности его энергетической установки [9].

Источник энергии типа СПИН способен обеспечить быстроедействие установки, достигающее единиц миллисекунд, снабжая сеть импульсом энергии, что повышает динамическую устойчивость энергосистемы машин ледокола и позволяет набрать нужную скорость в течение короткого промежутка времени. При плавании в составе каравана во время проводки через льды важным обстоятельством, обеспечивающим успешность продвижения вперед и безопасность плавания, является сохранение минимальной дистанции между судами. Растягивание каравана затрудняет и удлиняет его проводку, так как в этом случае задние суда будут испытывать более частые удары о льдины и вынуждены будут снижать скорость во избежание получения пробоины; в свою очередь, снижение скорости приводит к тому, что суда начинают застревать во льду. Наличие накопителя энергии в составе энергоустановок судов позволит избежать увеличения длины каравана, путем поддержания скорости форсированием в нужный момент времени.

Поскольку источником мощности обычно являются сети переменного тока, необходимо в процессе заряда СПИН произвести выпрямление тока, а в процессе разряда — его инвертирование с помощью преобразователей частоты [10]. Особенность выбранной системы управления преобразователем частоты заключается в регулировании фазы входного тока как в двигательном режиме, так и в режиме генераторного торможения. В предложенной модели выбран преобразователь с двунаправленными вентилями (рис. 2), обладающий наибольшей производительностью, так как при его работе ток может течь в двух направлениях, а напряжение на стороне источника не меняет полярности, что означает отсутствие необходимости в устройстве блокировки.

Заряд энергии СПИН происходит в два этапа: вначале заряжается конденсатор — звено постоянного тока, затем он разряжается на катушку. Использование конденсатора повышает быстро-

действие системы, его размеры обусловлены способностью выдержать напряжение в цепи на постоянном уровне в течение ожидаемых условий эксплуатации.

Уравнения Кирхгофа для модели преобразователя выглядят следующим образом:

$$\begin{bmatrix} U_{ca} \\ U_{cb} \\ U_{cc} \end{bmatrix} = R_{\phi} \cdot \begin{bmatrix} i_{ua} \\ i_{ub} \\ i_{uc} \end{bmatrix} + L_{\phi} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ua} \\ i_{ub} \\ i_{uc} \end{bmatrix} + R \cdot \begin{bmatrix} U_{ua} \\ U_{ub} \\ U_{uc} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где U_c — фазное напряжение преобразователя на выходе; i_u — фазные токи; U_u — фазные напряжения преобразователя в точке подключения к источнику тока; R_{ϕ} и L_{ϕ} — соответственно сопротивление и индуктивность фильтра на выходе преобразователя.

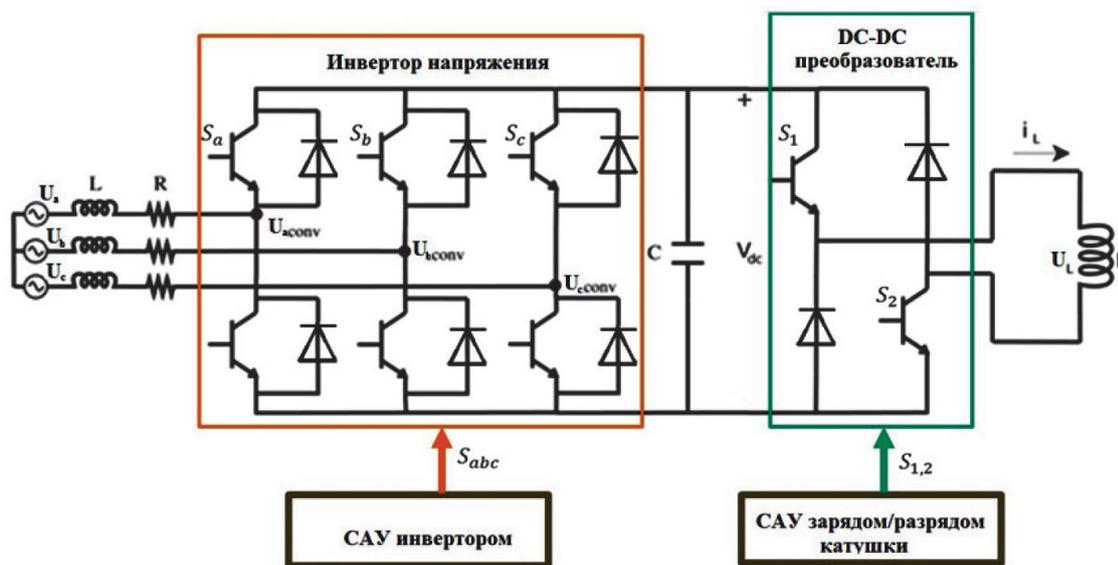


Рис. 2. Силовая схема СПИН

Катушка в цепи является источником постоянного тока, управление которым осуществляется посредством переключения ключей S_1 и S_2 , обеспечивающих различные режимы работы (рис. 3).

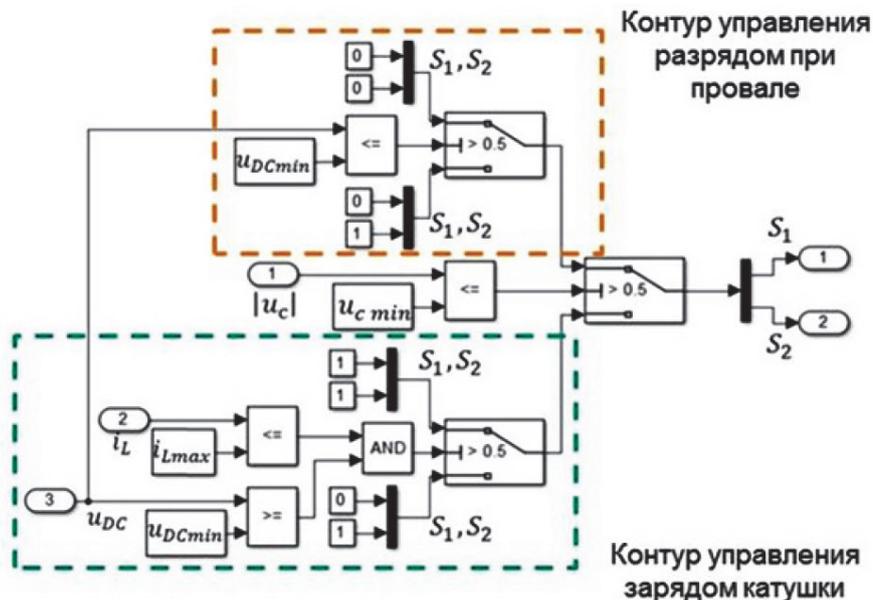


Рис. 3. САУ зарядом/разрядом катушки

1. Положение ключей $\begin{cases} S_1 = 1 \\ S_2 = 1 \end{cases}$. Если напряжение сети на номинальном уровне, то в САУ работает нижний контур управления, при этом $U_{dc} > U_{dcmin}$, а ток катушки $i_L < i_{Lmax}$. Катушка заряжается, ток направлен к ней от конденсатора.

2. Положение ключей $\begin{cases} S_1 = 1 \\ S_2 = 0 \end{cases}$. Когда напряжение сети достигает минимального значения $U_{dc} = U_{dcmin}$ и / или катушка полностью зарядилась, она изолируется от конденсатора, постоянный ток течет в образованном замкнутом контуре.

3. Положение ключей $\begin{cases} S_1 = 0 \\ S_2 = 0 \end{cases}$. При провале напряжения ниже U_{dcmin} в САУ работает верхний контур управления, катушка отдает энергию конденсатору.

САУ инвертором. Инвертор синхронизирует источник энергии и систему энергоснабжения. Система управления посредством сигналов с контроллера регулирует проводимость ключей — отношение времени открытого состояния силового ключа к периоду его работы, далее выбирается алгоритм, зависящий от требуемой формы напряжения на выходе преобразователя:

$$\begin{bmatrix} U_{ua} \\ U_{ub} \\ U_{uc} \end{bmatrix} = U_{dc} \begin{bmatrix} S_a - S'_a \\ S_b - S'_b \\ S_c - S'_c \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где U_u — фазное напряжение преобразователя на его выходе; S и S' — состояния ключей при коммутации для каждой из фаз.

В установке используются мощные полупроводниковые ключи, IGBT — запираемый тиристор с интегрированным блоком управления. Приборы рассчитаны на ток до 6000 А, позволяют наращивать уровень мощности до нескольких сотен мегавольт-ампер. ШИМ управляется векторной системой управления (ВСУ), где происходит преобразование координат к вращающимся осям d и q от неподвижных осей.

Математическая модель системы векторного управления инвертором. Переход к двухфазной системе координат осуществляется с помощью преобразования Парка – Горева:

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = x_{dc} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix}. \quad (5)$$

В этом случае уравнения баланса напряжений имеют вид:

$$U_{cd} = L_\phi \frac{di_{ud}}{dt} - \omega_c L_\phi i_{ud} + U_{ud}; \quad U_{cq} = L_\phi \frac{di_{uq}}{dt} - \omega_c L_\phi i_{uq} + U_{uq}. \quad (6)$$

Задается такой вектор напряжения инвертора U_u , при котором реактивная и активная мощности на выходе системы соответствуют показаниям сети по заданному вектору U_c (рис. 4):

$$p_c = \frac{3}{2} i_{ud} \cdot u_{cd}; \quad q_c = \frac{3}{2} i_{uq} \cdot u_{cq}. \quad (7)$$

Блок фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) генерирует сигнал, пропорциональный частоте сети. Сигнал поступает на ПИ-регулятор, на котором происходит преобразование Парка — математическое представление мощности трехфазной сети в двух составляющих вектора выходного напряжения, его действительной и мнимой части, для раздельного регулирования:

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = U_{dc} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где θ — угол поворота системы координат.

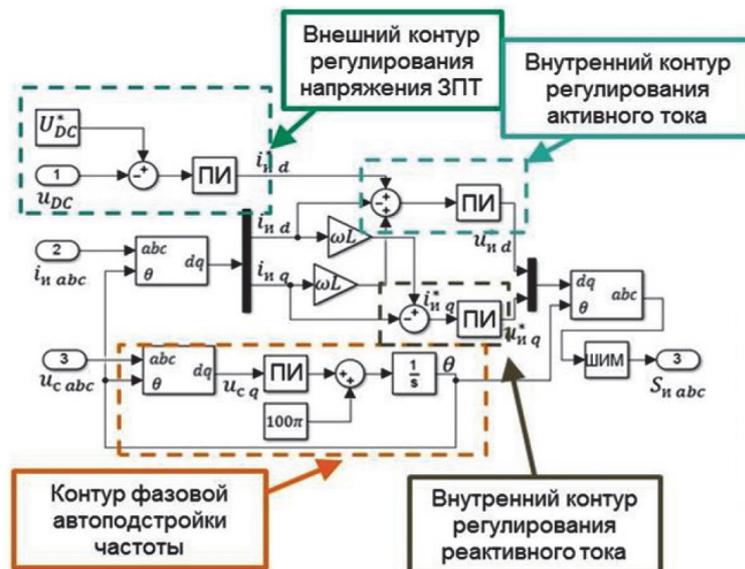


Рис. 4. Векторная САУ инвертором

После преобразования система координат синхронизируется с вектором напряжения сети: действительная часть выходного напряжения инвертора должна совпадать с направлением вектора сети, а мнимая должна быть равна нулю. При этом ток инвертора и напряжение сети должны совпадать по фазе. Два компонента контролируются независимо. Синхронизация вектора достигается ПИ-регулятором контура ФАПЧ согласно использованию следующего закона:

$$\theta = \int k_{PI}(-U_{cq}); \quad k_{PI} = k_P(x^* - x) + k_I(x^* - x). \quad (9)$$

Регулирование происходит по двум контурам: внешнему и внутреннему. Внешний контур регулирует активный и реактивный токи для поддержания номинального значения напряжения и реактивной мощности соответственно, а внутренний рассчитывает значение напряжения на блок ШИМ с минимальной ошибкой. Как отмечалось ранее, реактивная составляющая мощности должна стремиться к нулю по результатам синхронизации. Система координат для преобразований значений в блоке ШИМ показана на рис. 5.

Задание внешним контуром по току:

$$i_{\phi d}^* = k_{PI}(U_{dc}^* - U_{dc}); \quad i_{\phi q}^* = k_{PI}(Q_c^* - q_c); \quad (10)$$

$$x_{dq0} = K_s x_{abc} \theta = \int k_{PI}(-U_{cq}); \quad (11)$$

$$K_s = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \theta = \int k_{PI}(-U_{cq});$$

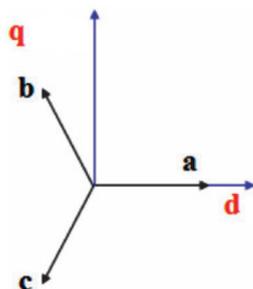


Рис. 5. Фазные преобразования dq и abc систем координат

Напряжения во внутреннем контур для блока ШИМ определяется из формулы

$$U_d^* = U_{cd} + k_{PI}(i_{\phi d}^* - i_{ud}) - \omega_c L_{\phi} i_{uq} \theta = \int k_{PI}(-U_{cq}); \quad (12)$$

Далее вычисляются действительная и мнимая части напряжения инвертора. ПИ-регулятор производит обратное преобразование Парка двух составляющих мощности для трехфазной сети, формируя трехфазный синусоидальный сигнал, который поступает на блок ШИМ. На последнем блоке формируются импульсы на IGBT-транзисторы. Сигналы для комбинаций ключей аппроксимируют вектор напряжения на выходе инвертора, он может принимать семь положений: шесть активных и одно нулевое. Таким образом, в небольшом периоде генерируется среднее значение по таблице времени включения каждого сектора (комбинации ключей) [11]. При выборе СУ проводился анализ работ, посвященных методам ШИМ. В работе [12] показано, что метод с векторной ШИМ полностью идентичен методу классической ШИМ с определенной функцией предмодуляции. Оба подхода дают один и тот же результат. Кроме того, отмечается, что использование функции предмодуляции специального вида проще векторного метода. С учетом ранее изложенного, допускается использование метода классической ШИМ с функцией предмодуляции.

Результаты эксперимента (Experiment Results)

Для проверки метода построена модель (рис. 6) в программной среде MATLAB / Simulink, с помощью которой требуется получить графики, демонстрирующие реакцию катушки на провал напряжения в сети, торможение и реверс гребного привода, а именно: изменение напряжений в энергосети и на катушке, изменение активной мощности, потребляемой нагрузкой и генерируемой СПИН, а также изменение тока в катушке. При провале напряжения в узле 1, для того, чтобы в узле 3 нагрузка оставалась в номинальном режиме, автоматические выключатели отсоединяют цепь слева от них и замыкают нагрузку на систему СПИН, которая начинает генерировать мощность. При возобновлении напряжения в узле 1, выключатели соединяют узел 3 с сетью. Нагрузка получает мощность от сети, а СПИН аккумулирует магнитную энергию.

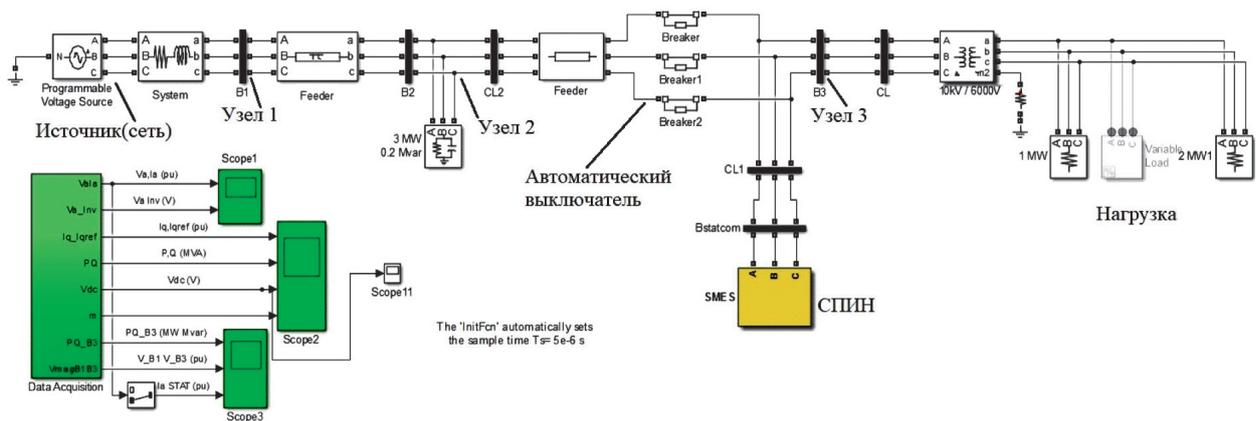


Рис. 6. Модель в системе MATLAB / Simulink

На первом графике изменения напряжения (рис. 7) видно: при заряженной до номинального значения СПИН в момент времени $t_1 = 0,2$ с происходит провал напряжения до 20 % от номинального. К сети подключается система СПИН, которая переходит в режим питания нагрузок сети. График мощности (рис. 8) показывает, как в узле 2 мощность падает из-за отключения участка от сети, а на катушке мощность становится отрицательной, так как она работает в режиме генерации. Видно, что мощности катушки, заряженной на 9 кА, не хватает для покрытия провала, в момент времени 0,22 энергия на ней заканчивается и уровень напряжения понижается.

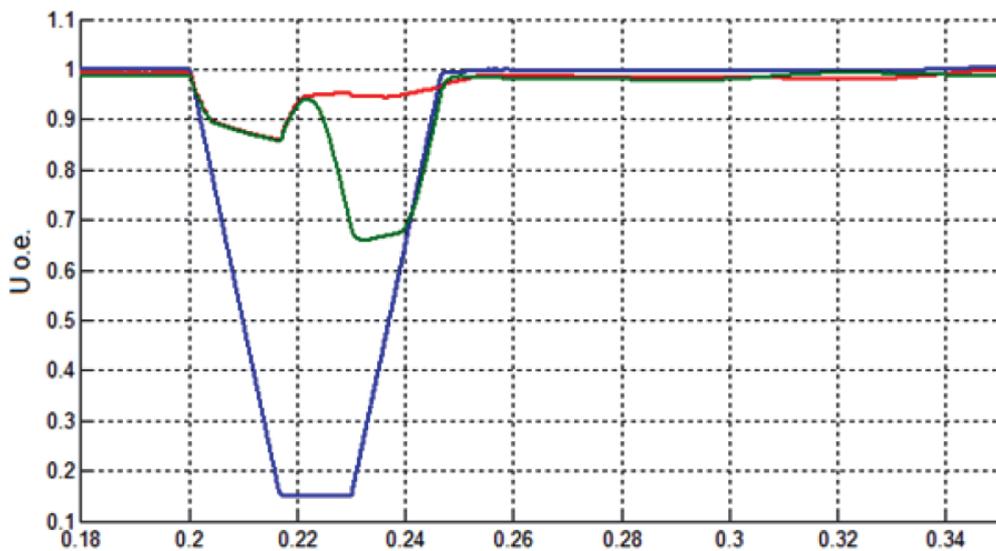


Рис. 7. Графики зависимостей напряжения от времени

Условные обозначения:

- в узле 1
- в узле 3 при СПИН, рассчитанной на 9 кА
- в узле 3 при СПИН, рассчитанной на 11 кА

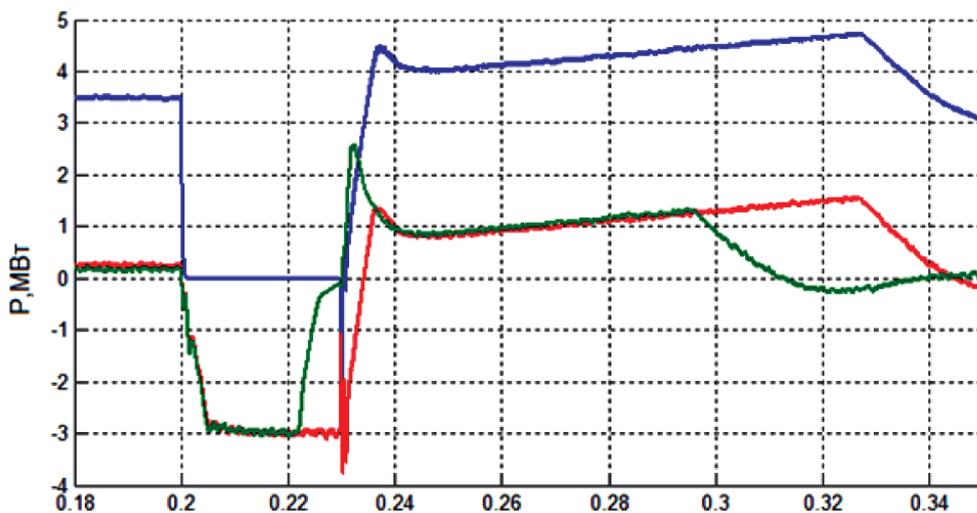


Рис. 8. Графики зависимостей активной мощности от времени

Условные обозначения:

- на входе узла 3 при СПИН, рассчитанной на 11 кА
- на выходе СПИН, рассчитанной на 9 кА
- на выходе СПИН, рассчитанной на 11 кА

На графиках рис. 9 показано как катушка на 11 кА справляется со своей задачей и генерирует мощность, требуемую нагрузке. Через 30 мс после провала напряжение на нагрузке восстанавливается до номинального уровня, а катушка заряжается от сети.

Графики на рис. 10 показывают изменение тока катушек со временем, более мощная катушка разряжается на нагрузку не до конца, напряжение на конденсаторе стабилизируется, а после катушка вновь аккумулирует энергию, подключаясь к сети с помощью автоматических выключателей.

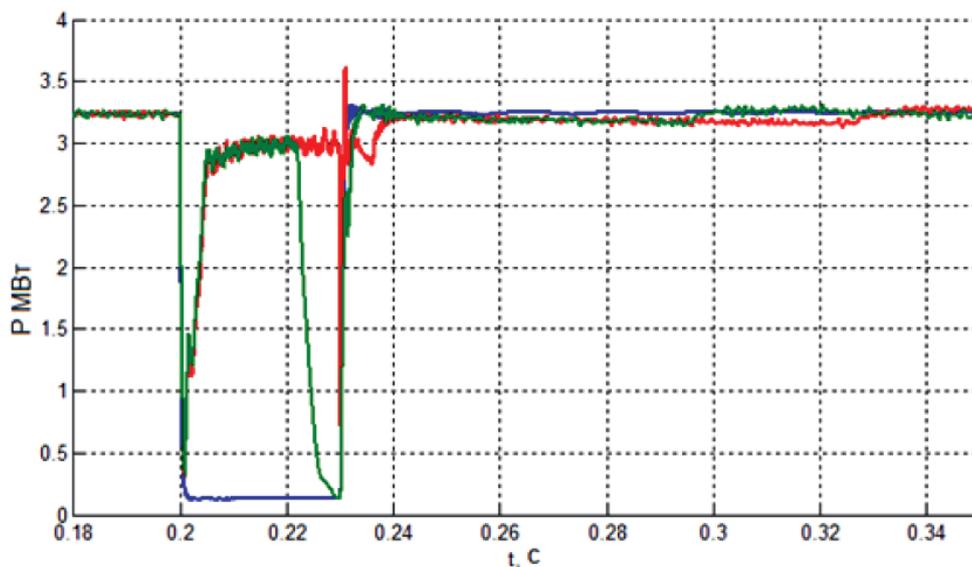


Рис. 9. Графики зависимостей активной мощности от времени

Условные обозначения:

- — потребляемой нагрузкой без СПИН;
- — потребляемой нагрузкой при СПИН, рассчитанной на 9 кА
- — потребляемой нагрузкой при СПИН, рассчитанной на 11 кА

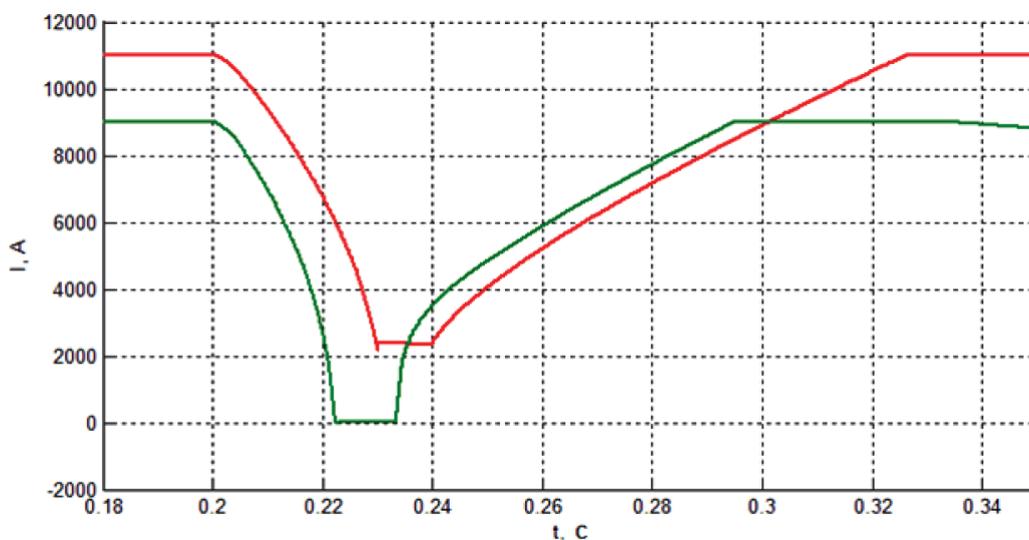


Рис. 10. График зависимости тока катушки от времени

Условные обозначения:

- — СПИН, рассчитанной на 9 кА
- — СПИН, рассчитанной на 11 кА

Таким образом, на основе анализа накопителей различного типа показано, что использование СПИН является одним из возможных способов устранения кратковременных перебоев в электроснабжении потребителей. Рассмотрена конструкция накопителя и его устройство связи с электрической сетью.

Для тестирования системы компенсации провала напряжения в энергосети предложена модель силовой части сетевого преобразователя и его векторной системы управления в среде MATLAB / Simulink. Получены графики компьютерного моделирования процессов в сети и пре-

образователе, демонстрирующие реакцию катушки на исчезновение напряжения и способность СУ обеспечить процесс аккумулирования энергии.

Выводы (Summary)

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Предложенная система СПИН (SMES) способна обеспечить нагрузку необходимой активной мощностью 3 МВт в течение 30 мс.

2. Компьютерное моделирование показало работоспособность СУ сетевым преобразователем при кратковременном провале напряжения в сети быстродействием системы 30 мс, а также эффективность заряда катушки при превышении уровня напряжения на звене постоянного тока преобразователя частоты выше определенного уровня. Такая модель сети может представлять собой торможение судна и реверса винтов. При торможении судна без накопительного элемента рассеивается до 20 % энергии. Для перераспределения тормозной энергии перспективным направлением является применение СПИН в электроэнергетической системе на базе сети постоянного тока.

3. Использование накопителя энергии также позволит уменьшить установленную мощность первичных тепловых источников энергии. Энергия в накопителе будет расходоваться на покрытие динамики при пуске привода либо при необходимости его разгона до более высокой скорости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Муньос-Гихоса Х. М.* Применение активного выпрямителя в качестве компенсатора токов искажений в распределительных сетях 6–10 кВт / Х. М. Муньос-Гихоса, С. Б. Крыльцов, С. В. Соловьев // Записки Горного института. — 2019. — Т. 236. — С. 229–238. DOI: 10.31897/PMI.2019.2.229.

2. *Shonin O. B.* A fast digital algorithm for identifying the type of asymmetrical faults occurred in a three-phase network / O. B. Shonin, S. B. Kryltcov // 2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). — IEEE, 2017. — Pp. 1016–1021. DOI: 10.1109/EIConRus.2017.7910729.

3. *Костин В. Н.* Компьютерное моделирование режимов работы систем электроснабжения с нелинейной нагрузкой / В. Н. Костин, В. А. Сериков // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. — 2019. — Т. 25. — № 1. — С. 19–29. DOI: 10.18721/JEST.25102.

4. *Жуковский Ю. Л.* Классификация инструментов инвестиционной поддержки технологий интегрированных энергетических систем / Ю. Л. Жуковский, А. Д. Булдыско, А. А. Халтурин, А. М. Блинов, М. Н. Крук, А. С. Семенов // Российский экономический интернет-журнал. — 2019. — № 3. — С. 29–30.

5. *Костин В. Н.* Моделирование несинусоидальных режимов работы систем электроснабжения / В. Н. Костин, А. В. Кривенко, В. А. Сериков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2019. — № 7. — С. 394–405.

6. *Алексеев Г. М.* Особые случаи морской практики / Г. М. Алексеев. — М.: Морской транспорт, 1959. — 339 с.

7. *Иванова Т. С.* Обеспечение устойчивой работы частотно-регулируемого привода шахтной подъемной установки при провалах напряжения / Т. С. Иванова, О. Б. Шонин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2017. — № 6. — С. 53–67.

8. Пат. 2328408 Российская Федерация, МПК В63Н 21/17, В63В 38/00. Способ разгона и торможения судна-электрохода при отходе-подходе его к пирсу с электрическим питанием от береговой сети / В. Ф. Веревкин, К. А. Реков; заяв. и патентообл. Морской государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского. — № 2006145749/11; заявл. 21.12.2006; опубл. 10.07.2008, Бюл. № 19.

9. *Kostin V. N.* Higher harmonics and limiting thereof in power supply systems of different voltages / V. N. Kostin, V. A. Serikov, I. A. Sherstennikova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — IOP Publishing, 2019. — Vol. 378. — Is. 1. — Pp. 012051. DOI: 10.1088/1755-1315/378/1/012051.

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018616323. Имитационная модель электрической сети с частотно-регулируемым электроприводом (ЧРП), звеном источника бесперебойного питания (ИБП) и активным выпрямителем (АВ) / Т. С. Иванова; заяв. и патентообл. Санкт-Петербургский горный университет. — № 2018613466; заявл. 09.04.2018; опубл. 29.05.2018.

11. Ivanova T. S. Development of a power transformer residual life diagnostic system based on fuzzy logic methods / T. S. Ivanova, V. I. Malarev, A. V. Kopteva, V. Yu. Koptev // *Journal of Physics: Conference Series*. — IOP Publishing, 2019. — Vol. 1353. — Is. 1. — Pp. 012099. DOI: 10.1088/1742-6596/1353/1/012099.

12. Белоусов И. В. Сравнительный анализ методов широтно-импульсной модуляции / И. В. Белоусов, В. Ф. Самосейко, Л. М. Бровцинова // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2018. — Т. 10. — № 2. — С. 420–429. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-420-429.

REFERENCES

1. Munoz-Guijosa, Juan Manuel, Sergei B. Kryltcov, and Sergei V. Solovev. “Application of an Active Rectifier used to mitigate currents distortion in 6-10 kV distribution grids.” *Journal of Mining Institute* 236 (2019): 229–238. DOI: 10.31897/PMI.2019.2.229.

2. Shonin, Oleg B., and Sergei B. Kryltcov. “A fast digital algorithm for identifying the type of asymmetrical faults occurred in a three-phase network.” *2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*. IEEE, 2017. 1016–1021. DOI: 10.1109/EIConRus.2017.7910729.

3. Kostin, V. N., and V. A. Serikov. “Computer simulation of operating power supply modes with non linear load.” *St. Petersburg Polytechnic University Journal of Engineering Science and Technology* 25.1 (2019): 19–29. DOI: 10.18721/JEST.25102.

4. Zhukovskii, Yu. L., A. D. Buldysko, A. A. Khaltu-rin, A. M. Blinov, M. N. Kruk, and A.S. Semenov. “Klassifikatsiya instrumentov investitsionnoi podderzhki tekhnologii integrirovannykh energeticheskikh system.” *Rossiiskii ekonomicheskii internet-zhurnal* 3 (2019): 29–30.

5. Kostin, Vladimir Nikolaevich, Aleksandr Vladimirovich Krivenko, and Vladimir Aleksandrovich Serikov. “Simulation of nonusinusoidal operating modes power supply systems.” *News of the Tula state university. Technical sciences* 7 (2019): 394–405.

6. Alekseev, G.M. *Osobyie sluchai morskoi praktiki*. M.: Morskoi transport, 1959.

7. Ivanova, Tatiana Serqeevna, and Oleg Borisovich Shonin. “Providing the sustainable working of frequency controlled drive of mine lifting installation at blackout.” *News of the Tula state university. Technical sciences* 6 (2017): 53–67.

8. Verevkin, V. F., and K. A. Rekov. RU 2 328 408 C1, IPC B63H 21/17, B63B 38/00. Sposob razgona i tormozheniya sudna-elektrokroda pri otkhode-podkhode ego k pirsu s elektricheskim pitaniem ot beregovoi seti. Russian Federation, assignee. Publ. 10 July 2008.

9. Kostin, V. N., V. A. Serikov, and I. A. Sherstennikova. “Higher harmonics and limiting thereof in power supply systems of different voltages.” *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 378. No. 1. IOP Publishing, 2019. DOI: 10.1088/1755-1315/378/1/012051.

10. Ivanova, T. S. Certificate of state registration of a computer program № 2018616323. Imitatsionnaya model' elektricheskoi seti s chastotno-reguliruemym elektroprivodom (ChRP), zvenom istochnika bospereboinogo pitaniya (IBP) i aktivnym vypryamitelem (AV). Russian Federation, assignee. Publ. 29 May 2018.

11. Ivanova, T. S., V. I. Malarev, A. V. Kopteva, and V.Yu. Koptev. “Development of a power transformer residual life diagnostic system based on fuzzy logic methods.” *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 1353. No. 1. IOP Publishing, 2019. DOI: 10.1088/1742-6596/1353/1/012099.

12. Belousov, Igor V., Veniamin F. Samosejko, and Ludmila M. Brovtsinova. “Comparative analysis of the pulse width modulation methods.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 10.2 (2018): 420–429. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-420-429.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Иванова Татьяна Сергеевна —
аспирант
Научный руководитель: Абрамович Борис Николаевич
Санкт-Петербургский горный университет (СПбГГУ)
199106, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
21-я линия В. О., 2
e-mail: Ragnhice@list.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ivanova, Tatiana S. —
Postgraduate
Supervisor:
Abramovich, Boris N.
Saint-Petersburg State Mining University
2 21-ya liniya Vasil'yevskogo Ostrova Str.,
St. Petersburg, 199106, Russian Federation
e-mail: Ragnhice@list.ru

Маларев Вадим Игоревич —
кандидат технических наук, доцент
Санкт-Петербургский горный
университет (СПбГГУ)
199106, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
21-я линия В. О., 2
e-mail: vgdoll@yandex.ru

Абрамович Борис Николаевич —
доктор технических наук, профессор
Санкт-Петербургский горный
университет (СПбГГУ)
199106, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
21-я линия В.О., 2
e-mail: babramov@mail.ru

Malarev, Vadim I. —
PhD, associate professor
Saint-Petersburg State Mining
University
2 21-ya liniya Vasil'yevskogo Ostrova Str.,
St. Petersburg, 199106, Russian Federation
e-mail: vgdoll@yandex.ru

Abramovich, Boris N. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Saint-Petersburg State Mining
University
2 21-ya liniya Vasil'yevskogo Ostrova Str.,
St. Petersburg, 199106, Russian Federation
e-mail: babramov@mail.ru

*Статья поступила в редакцию 27 ноября 2019 г.
Received: November 27, 2019.*