

Л. В. ВИШНЕВСКИЙ, И. Е. ВОЙТЕЦКИЙ, Т. А. ВОЙТЕЦКАЯ

МОДЕЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННАЯ СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ БЕЗАВАРИЙНОСТИ СУДОВОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

Предлагается модельно-ориентированная система поддержки принятия решений для повышения безаварийности судовой электроэнергетической установки. Данная система состоит из моделирующего блока и блока оценки результатов моделирования. Разработанная система может быть реализована в составе систем управления, как на базе программируемых логических контроллеров, так и на базе отдельного программируемого логического контроллера. Приведена математическая модель судовой электроэнергетической установки. Рассмотрены используемые критерии оценки результатов моделирования и возможные последствия. Разработана компьютерная программа для реализации данной системы. Приведены результаты моделирования различных аварийных ситуаций. Рассмотрены возможности использования данной системы для обучения.

Ключевые слова: модельно-ориентированная система, поддержка принятия решений, безаварийность, электроэнергетическая установка, оценка переходных процессов, моделирование процессов в судовой электроэнергетической установке, обучение на модели.

Пропонується модельно-орієнтована система підтримки прийняття рішень для підвищення безаварійності судової електроенергетичної установки. Дана система складається з моделюючого блоку і блоку оцінки результатів моделювання. Розроблена система може бути реалізована в складі систем управління, як на базі програмованих логічних контролерів, так і на базі окремого програмованого логічного контролера. Наведено математичну модель судової електроенергетичної установки. Розглянуті використовувані критерії оцінки результатів моделювання і можливі наслідки. Розроблено комп'ютерну програму для реалізації даної системи. Наведені результати моделювання різних аварійних ситуацій. Розглянуті можливості використання даної системи для навчання.

Ключові слова: модельно-орієнтована система, підтримка прийняття рішень, безаварійність, електроенергетична установка, оцінка перехідних процесів, моделювання процесів в судовій електроенергетичній установці, навчання на моделі.

A model-based decision support system is proposed to increase the reliability of the ship electric power plant. This system consists of a modeling unit and a unit for evaluating simulation results. The developed system can be implemented as part of control systems, both on the basis of programmable logic controllers, and on the basis of a separate programmable logic controller. The mathematical model of the ship electric power installation is given. The criteria used to evaluate the results of modeling and possible consequences are given. Considered the possibility of using this system for training.

Keywords: model-oriented system, decision-making support, trouble-free, electric power installation, assessment of transient processes, modeling of processes in the ship electric power installation, training on the model.

Введение. Современные энергетические установки являются сложными многомерными объектами. Требования к экономической эффективности и охране окружающей среды растут. Количество обслуживающего персонала сокращается. Активно разрабатывается и частично внедряется концепция виртуального вахтенного механика. Предполагается, что судно будет работать как удаленно управляемое с постепенным переходом в режим полной автономности. Планируется предусмотреть два набора алгоритмов – для полностью самостоятельного функционирования и для работы под управлением диспетчера [1].

Постановка задачи. Сложность обеспечения судна электроэнергией высокого качества объясняется также наличием большого количества источников энергии и необходимостью согласованной параллельной работы между ними. Как известно, многогенераторная система дизельных электроагрегатов является слабоустойчивых системой, в ней возникают большие по амплитуде и слабо угасающие колебания напряжения и частоты. Из-за ограниченности мощности генерирующих агрегатов при коммутации в сети мощных судовых потребителей случается выпадение генераторов из синхронизма и обесточивания судна.

Явление неустойчивой работы и обменные колебания мощности параллельно работающих синхронных генераторов исследованы во многих научных публикациях и отмечается службами эксплуатации флота.

Частично решенной остается проблема длительной параллельной работы вало-генератора с дизель-

генераторами судовой электростанции.

Поэтому разработка новой системы управления поддержкой принятия решений для повышения безаварийности работы судовой электроэнергетической установки является актуальным направлением исследования.

Компания «Siemens» выстроила последовательную цифровую идеологию, включающую в себя описание основополагающих этапов внедрения цифровых технологий и содержащую соответствующие инструменты цифровизации энергетических предприятий. К таковым, например, относятся:

- цифровая модель энергосистемы, создаваемая на базе программного комплекса “PSS@SINCAL”;

- облачная платформа “MindSphere”, предназначенная для обработки больших объемов данных о состоянии энергообъекта, что позволяет решать сложные аналитические задачи и прогнозировать поведение системы с учетом различных факторов;

- создание и ведение единой информационной структуры описания всего парка энергетического оборудования на базе классификатора в соответствии со стандартом CIM для упрощения обмена данными между различными процессами, приложениями и задачами цифрового комплекса.

Также вводятся компьютерные программы, позволяющие прогнозировать возможные аварийные ситуации.

В настоящее время разработано и реализовано множество компьютерных программ для моделирова-

ния различных режимов работы электроэнергетической установки.

Разработанные программы для моделирования можно условно разделить на две группы: тренажеры для обслуживающего персонала и программы для расчета и анализа элементов электроэнергетической установки или всей электростанции в целом.

В первую группу программ входят: функциональный тренажер "Генератор" для Курской АЭС разработанный фирмой "Тренажерные системы обучения", "maxim 100" разработанный фирмой "Haven Automation Limited", всережимный тренажер "ТГВ-200-МУЗ" разработанный фирмой ЗАО "Тэст", математическая модель судовой электростанции ЗАО "Навис".

Во вторую группу программ входят: комплексный анализатор процессов функционирования электрооборудования электростанций для ТЭЦ-26 Мосэнерго фирмы "Тренажеры для электростанций", подсистема ИГС "CityCom-ЭлГраф" информационно графической системы "CityCom" ИВЦ "Поток" [2].

Компьютерная программа "SGE", разработанная авторами, позволяет моделировать следующие режимы работы судовой электроэнергетической установки (СЭЭУ):

1. Работа синхронного дизель-генератора без нагрузки
2. Работа синхронного дизель-генератора с активной, активно-индуктивной нагрузкой
3. Работа синхронного дизель-генератора с береговой сетью
4. Параллельная работа двух синхронных дизель-

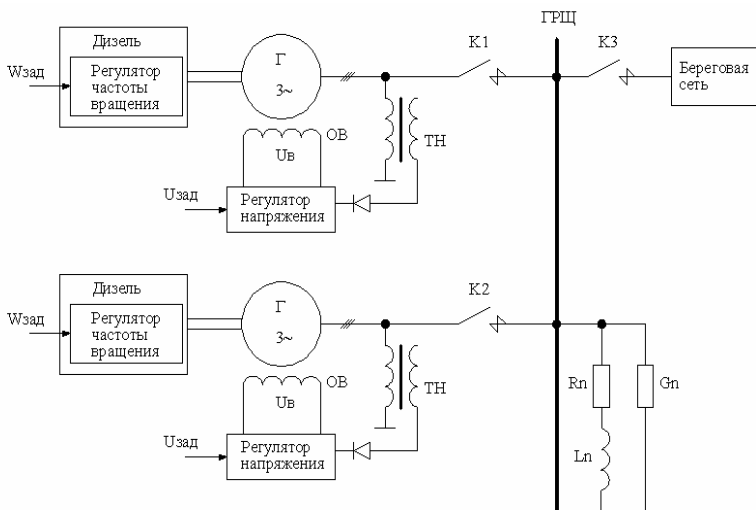


Рис. 1 – Упрощенная схема судовой электростанции

генераторов с активной, активно-индуктивной нагрузкой.

5. Параллельная работа двух синхронных дизель-генераторов с береговой сетью.

Упрощенная схема СЭЭУ, позволяющей моделировать перечисленные режимы показана на рис. 1.

Данная программа является усовершенствованной версией программы, представленной в [2].

Математическая модель синхронного генератора, представленная в виде систем дифференциальных уравнений 1 и 2, построена на основе уравнений Парка-Горева.

$$\begin{cases} p\Psi_d = u_d + (1+s)\Psi_q - R_s i_d, \\ p\Psi_q = u_q - (1+s)\Psi_d - R_s i_q, \\ p\Psi_f = u_f - R_f i_f, \\ p\Psi_{yd} = -R_{yd} i_{yd}, \\ p\Psi_{yq} = -R_{yq} i_{yq}, \\ ps = [M_{ДГТЗ} - (i_d \Psi_q - i_q \Psi_d)]/T_j, \\ p\theta = s \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \Psi_d = x_d i_d + x_{ad} i_f + x_{ad} i_{yd}, \\ \Psi_q = x_q i_q + x_{aq} i_{yq} \\ \Psi_f = x_{ad} i_d + x_f i_f + x_{ad} i_{yd}, \\ \Psi_{yd} = x_{ad} i_d + x_{ad} i_f + x_{yd} i_{yd}, \\ \Psi_{yq} = x_{aq} i_q + x_{yq} i_{yq} \end{cases} \quad (2)$$

где u_d и u_q - напряжения статора, которые определяются выражениями;

$(i_d \Psi_q - i_q \Psi_d) = M_{CR}$ - электромагнитный момент синхронного генератора, создающий сопротивление вращению;

$$T_j = \frac{GD^2}{4} \cdot \frac{\omega_B^2}{p^2 S_B} - \text{механическая постоянная времени}$$

агрегатов, имеющих суммарный маховый момент $GD^2/4$;

ω_B - базисная частота, равная частоте напряжения сети ω_c ;

p - число пар полюсов;

S_B - базисная мощность, равная номинальной полной мощности;

$\Psi_d, \Psi_q, \Psi_f, \Psi_{yd}, \Psi_{yq}$ - потокосцепления обмоток модельного синхронного генератора, которые определяются выражениями;

x_{ad} - сопротивление взаимной индукции обмоток синхронного генератора по продольной оси d ;

x_{aq} - сопротивление взаимной индукции обмоток синхронного генератора по поперечной оси q ;

x_s - индуктивное сопротивление рассеяния обмоток статора;

x_f - индуктивное сопротивление обмотки возбуждения;

x_{yd}, x_{yq} - индуктивные сопротивления рассеяния демпферных обмоток по осям d и q ;

R_s, R_f, R_{yd}, R_{yq} - активные сопротивления обмоток.

Возбудитель и пропорциональный регулятор напряжения синхронного генератора описывается дифференциальным уравнением первого порядка:

$$\frac{dU_f}{dt} = [-U_f + K_f (U_{зад} - U_{ген})]/T_v \quad (3)$$

где K_f – коэффициент передачи пропорционального регулятора;

$$U_{\text{ген}} = \sqrt{u_{sd}^2 + u_{sq}^2} \text{ – модуль вектора напряжения;}$$

$U_{\text{зад}}$ – задание регулятора напряжения.

В математической модели синхронного генератора введем ограничение напряжения возбуждения $U_{f\text{min}} \leq U_f \leq U_{f\text{max}}$. Верхнее ограничение возбуждения $U_{f\text{max}}$ определяет форсировочные возможности системы регулирования. Величина $U_{f\text{max}}$ зависит от мощности возбудителя. Величина $U_{f\text{min}}$ составляет 1.1...2.5 номинальных значений напряжения. Нижнее ограничение напряжения возбуждения $U_{f\text{min}}$ устанавливается для создания магнитного потока, который создает минимально необходимый синхронизирующий момент генератора при параллельной работе.

Математические модели элементов СЭЭУ, прошедшие проверку на адекватность были выбраны из работ [3, 4, 6] известных ученых и реализованы в компьютерной программе.

Исходя из нормативных требований к системам защиты и аварийно-предупредительной сигнализации, был сформирован блок оценки качества результатов моделирования.

Для генераторов, предназначенных для параллельной работы, должны быть установлены, по крайней мере, следующие устройства защиты: от перегрузок; от короткого замыкания; от обратного тока или от обратной мощности; от минимального напряжения.

Рекомендуется применять такие устройства защиты генераторов от перегрузок, которые имеют световую и звуковую сигнализацию о перегрузке, действующую с выдержкой до 15 мин для нагрузок от 100 до 110% номинального тока, и выключение генератора с выдержкой времени, соответствующей термической постоянной времени защищаемого генератора для нагрузок в пределах от 110 до 150% номинального тока.

Рекомендуется, чтобы для уставки защиты на 150% номинального тока генератора выдержка не превышала 2 мин для генератора переменного тока и 15 с. для генератора постоянного тока.

При нагрузке, превышающей 150% номинального тока, отключение генератора, должно по возможности происходить без выдержки времени.

Уставки защиты от перегрузок и выдержки времени должны быть подобраны к перегрузочным характеристикам приводного двигателя генератора таким образом, чтобы двигатель мог в течении принятой выдержки времени развивать необходимую мощность.

Для защиты генератора от перегрузки не должны применяться защитные устройства, которые исключают немедленное повторное включение генератора.

Должны быть установлены устройства, автоматически и избирательно отключающие менее ответственных потребителей при перегрузке генераторов.

Отключение потребителей может быть выполнено в одну или несколько ступеней соответственно перегрузочной способностью генератора.

Защита генераторов переменного тока обратной мощности может быть заменена иным не менее эффективным средством защиты. Защита генераторов постоянного тока от обратного тока должна устанавливаться в полюсе противоположном тому, в котором находится уравнительный привод. При снижении приложенного напряжения на 50% защита от обратной мощности или от обратного тока должна быть еще способна к действию, хотя значение обратного тока или обратной мощности могут быть другими.

Защита от обратного тока и от обратной мощности должна обеспечивать возможность передачи мощности, отдаваемой из судовой сети (например, от грузовых лебедок).

Защита от минимального напряжения должна обеспечивать возможность надёжного подключения генераторов к шинам при напряжении 85% и более номинального и исключить возможность подключения генераторов к шинам при напряжении менее 35% номинального, а также отключать генераторы при снижении напряжения на их зажимах в пределах от 70 до 35% номинального.

Защита от минимального напряжения должна действовать с выдержкой времени на отключение генераторов от шин при снижении напряжения, и должна действовать мгновенно при попытке подключения к шинам генератора до достижения указанного выше минимального напряжения.

Для генераторов мощностью 1000 кВА и более рекомендуется устанавливать защиту от внутренних повреждений и защиту токопровода между генератором и его щитом с выключателем.

При раздельной установке генератора и его щита в разных помещениях установка такой защиты обязательна.

Защитные устройства с выдержкой времени срабатывания расцепителей должны подбираться таким образом, чтобы во всех случаях ожидаемый ток короткого замыкания в контуре по истечении выдержки времени всегда был больше минимального тока возврата расцепителя.

Также в программу был дополнительно введен интегральный критерий качества [5].

Моделируя различные режимы работы СЭЭУ, изменяя параметры настройки регуляторов и исследуя переходные процессы, пользователь повышает свою квалификацию, так как улучшается понимание процессов происходящих в СЭЭУ, может прогнозировать возможные аварийные режимы работы и режимы нежелательные для эксплуатации оборудования, входящего в состав СЭЭУ.

Таким образом, программа позволяет моделировать, исследовать переходные процессы и может быть использована для обучения и повышения квалификации обслуживающего персонала с учетом особенностей СЭЭУ. Блок оценки качества позволяет определить результат моделирования и возможность возникновения аварийной ситуации.

Главное окно, разработанной компьютерной программы представлено на рис. 2.

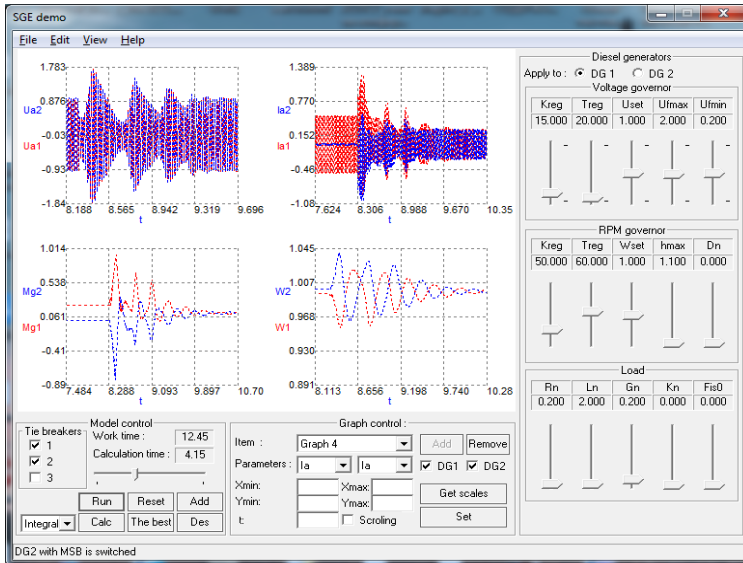


Рис. 2 – Главное окно программы моделирования и оценки результатов

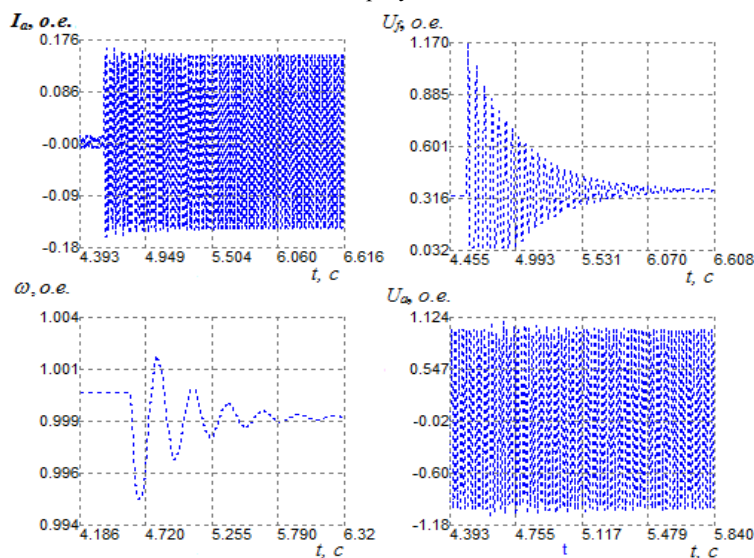


Рис. 3 – Переходные процессы при подключении нагрузки мощностью 30% от мощности генератора

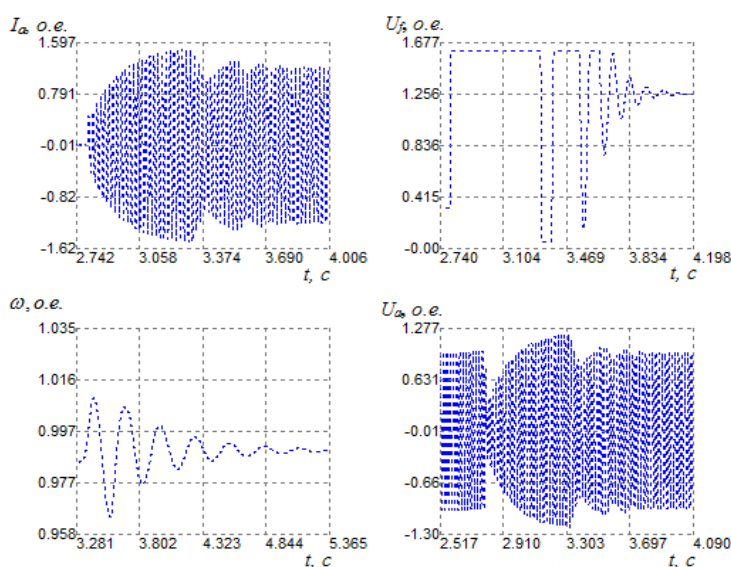


Рис. 4 – Подключение нагрузки, соизмеримой мощности генератора

В качестве демонстрации работы, разработанной системы, рассмотрим режимы включения активно-индуктивной нагрузки равной 30% от номинальной мощности генераторного агрегата и соизмеримой мощностью.

Исследуем работу системы сначала при подключении активно-индуктивной нагрузки равной 30% от номинальной мощности генераторного агрегата.

Графики переходных процессов по току фазы генератора, напряжению возбуждения, частоте вращения и напряжению фазы генератора показаны на рис. 3.

Подключения нагрузки к генератору производится по схеме “звезда-звезда” с изолированной нейтралью. Нагрузка симметричная.

Как видно из графиков переходных процессов, значение тока фазы и времени переходного процесса – не вызывают срабатывания ни системы защиты ни системы аварийно-предупредительной сигнализации.

Исследуем работу системы при подключении активно-индуктивной нагрузки соизмеримой мощности генераторного агрегата.

Графики переходных процессов по току фазы генератора, напряжению возбуждения, частоте вращения и напряжению фазы генератора показаны на рис. 4.

Как видно из графиков переходных процессов, значение тока фазы и времени переходного процесса – неудовлетворительные.

Выводы.

В современных системах управления электроэнергетическими установками начинают активно использовать прогнозирование поведения системы с помощью математических моделей.

Такой подход позволяет предупреждать непредвиденные аварийные ситуации до их появления в реальной установке.

Крупные компании-производители оборудования систем управления и систем управления частично внедряют этот подход.

В данной статье описана компьютерная программа, разработанная авторами, которая содержит в себе математическую модель судовой электроэнергетической установки и блок оценки качества результатов моделирования.

Приведены результаты моделирования различных режимов работы судовой электроэнергетической установки.

Была произведена оценка результатов моделирования на основе приведенных требований нормативных документов.

Рассмотрены возможности использования, разработанной программы, для обучения обслуживающего персонала.

Список литературы

1. Концепт виртуального капитанского мостика от Rolls-Royce: корабль без экипажа [Электронный ресурс] URL: <http://www.novate.ru/blogs/151214/29126>
2. Войтецкий И. Е. Компьютерная программа для исследования режимов работы судовой электроэнергетической установки / И. Е. Войтецкий // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 2007. – № 19. – С. 75-79.
3. Токарев Л. Н. Дифференциальные уравнения (электрических цепей, машин, преобразователей) / Л. Н. Токарев. – СПб. : ЛИТЕО, 2017. – 264с.
4. Krause P. C. Analysis of Electric Machinery and Drive Systems 3rd Edition / P. C. Krause, O. Wasynczuk, S. D. Sudhoff, S. Pekarek // Wiley-IEEE Press. – 2013. – P. 680.
5. Вишнеvский Л. В., Войтецкий И. Е., Веретенник А. М. Выбор критерия для оценки процесса включения генераторов на параллельную работу / Л. В. Вишнеvский, И. Е. Войтецкий, А. М. Веретенник // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. – 2007. – № 2(20). – С. 136-139.
6. Вишнеvский Л. В., Веретенник А. М., Муха Н. И., Козырев И. П. Моделирование включения синхронных генераторов в судовую сеть / Л. В. Вишнеvский, А. М. Веретенник, Н. И. Муха, И. П. Козырев // Электромашинобуд. та електрообл. – 2006. – Вып. 66. – С. 201-204.

References (transliterated)

1. Konsept virtualnogo kapitanskogo mostika ot Rolls-Royce: korabl bez ekipazha [Rolls-Royce virtual captain bridge concept: ship without crew. Elektronnyu resyrs]. URL: <http://www.novate.ru/blogs/151214/29126>. (Rus)
2. Voytetskiy I. E. Komputernaya programma dlya issledovaniya regimov raboty sydovoi elektroenergeticheskoi ustanovki [A computer program for a marine electric power plant operating modes research]. *Sydovie energeticheskie ustanovki: naych.-tehn. sb.* 2007, no. 19, pp. 75-79. (Rus)
3. Tokarev L. N. Diferencialnie uravneniya (elektricheskikh cepey, mashin, preobrazovateley) [Differential equations (electric circuits, machines, converters)]. SPb, LITEO, 2017, 264 p. (Rus)
4. Krause P. C. Analysis of Electric Machinery and Drive Systems 3rd Edition. Wiley-IEEE Press, 2013, P. 680.
5. Vishnevskiy L. V., Voytetskiy I. E., Veretennik A. M. Vibor criteriya dlya ocenki processa vklucheniya generatorov na parallelnuyu raboty [Choice of criteria for evaluating the process of switching generators on parallel operation]. *Avtomatika. Avtomatizaciya. Electrotehnicheskie kompleksi i sistemi.* 2007, no. 2(20), pp. 136-139. (Rus)
6. Vishnevskiy L. V., Veretennik A. M., Myha N. I., Kozirev I. P. Modelirovanie vklucheniya sinchronnih generatorov v sydovuyu set. [Synchronous generators in the ship power network switching mode simulation]. *Elektromashinobud. ta elektroobl.* 2006, Vip. 66, pp. 201-204. (Rus)

Поступила (received) 31.01.2020

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Вишнеvський Л. В. Модельно-орієнтована система підтримки прийняття рішень для підвищення безаварійності судової електроенергетичної установки / Л. В. Вишнеvський, І. С. Войтецький, Т. О. Войтецька // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії». – 2020. – № 3 (1357). – С. 36-40. – doi:10.20998/2409-9295.2020.3.06.

Вишнеvский Л. В. Модельно-ориентированная система поддержки принятия решений для повышения безаварийности судовой электроэнергетической установки / Л. В. Вишнеvский, И. Е. Войтецкий, Т. А. Войтецкая // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії». – 2020. – № 3(1357). – С. 36-40. – doi:10.20998/2409-9295.2020.3.06.

Vishnevskiy L. V. Model-oriented decision-making support system for the safe operation of the ship electric power plant improvement / L. V. Vishnevskiy, I. E. Voytetskiy, T. A. Voytetskaya // Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion." – 2020. – No. 3(1357). – P. 36-40. – doi:10.20998/2409-9295.2020.3.06.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Вишнеvський Леонід Вікторович (Вишнеvский Леонид Викторович, Vishnevskiy Leonid Viktorovich) – доктор технічних наук, професор, Національний університет «Одеська морська академія», завідувач кафедри «Автоматизації судових паросилових установок» НУ «ОМА»; м. Одеса, Україна, тел. (063)563-22-38; e-mail: leovikvish@gmail.com.

Войтецький Ігор Євгенович (Войтецкий Игорь Евгеньевич, Voytetskiy Igor Evgenievich) – Національний університет «Одеська морська академія», старший викладач кафедри «Автоматизації судових паросилових установок» НУ «ОМА»; м. Одеса, Україна, тел. (068)192-73-72; ORCID: 0000-0003-1143-3779; e-mail: ivoytetsky@rambler.ru.

Войтецька Таїсія Олександрівна (Войтецкая Таисия Александровна, Voytetskaya Taisiya Oleksandrovna) – кандидат технічних наук, старший викладач, Одеський національний політехнічний університет, старший викладач кафедри «Комп'ютерних технологій автоматизації» ОНПУ; м. Одеса, Україна, тел. (050)502-97-60; ORCID: 0000-0002-6518-5099; e-mail: bela_donna@mail.ru.