

УДК 629.12; 629.12.066

**ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ДЛЯ
КОМПЕНСАЦИИ ИМПУЛЬСНЫХ НАГРУЗОК В СУДОВЫХ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ С ГЛАВНЫМ
РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫМ УСТРОЙСТВОМ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

Романовский Виктор Викторович¹, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электродвижения и автоматики судов

e-mail: romanovskiyvv@gumrf.ru

Бежик Артём Сергеевич¹, аспирант

e-mail: kaf_edas@gumrf.ru

¹ Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Статья посвящена применению систем накопления электроэнергии (СНЭ) в судовых электроэнергетических системах с главным распределительным устройством постоянного тока. Актуальность работы обусловлена ростом интереса к гибридным электроэнергетическим системам на флоте, позволяющим повысить эффективность использования топлива, отказоустойчивость и стабильность работы сети. Особое внимание уделяется компенсации импульсных нагрузок, возникающих при изменении погодных условий, ледовой обстановки и других факторов эксплуатации. Рассмотрены преимущества применения двунаправленных преобразователей постоянного тока, обеспечивающих интеграцию накопителей. Выполнен анализ типов накопителей: литий-ионных батарей (для длительных нагрузок) и специальных конденсаторов (для кратковременных пиков). Предложена гибридная система активной каскадной топологии, в которой батареи управляются по току, а конденсаторы — по напряжению. Для исследования разработана компьютерная модель в среде SimInTech, имитирующая работу судовой электроэнергетической системы с СНЭ. Моделирование подтвердило, что система накопления способна частично компенсировать изменения нагрузки на главном распределительном устройстве, снижая динамические воздействия на дизель-генераторы. Полученные графики изменения тока нагрузки и тока питания демонстрируют стабилизирующий эффект СНЭ. Делается вывод о положительном влиянии на качество электроэнергии, уменьшение вероятности аварийных режимов и снижение расхода топлива.

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

**APPLICATION OF ELECTRIC ENERGY STORAGE SYSTEMS TO COMPENSATE
IMPULSE LOADS IN MARINE ELECTRIC POWER SYSTEMS WITH A DC MAIN
DISTRIBUTION UNIT**

Viktor V. Romanovsky¹, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Ship Electric Propulsion and Automation

e-mail: romanovskiyvv@gumrf.ru

Artem S. Bezhik¹, Doctoral Student

e-mail: kaf_edas@gumrf.ru

¹ Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Saint Petersburg, Russia

Abstract. The article is devoted to the application of energy storage systems (ESS) in ship power systems with a main DC switchgear. The relevance of the work is due to the growing interest in hybrid power systems in the fleet, which allow to increase the efficiency of fuel use, fault-tolerance and stability of the network. Special attention is paid to the compensation of impulse loads arising from changes in weather conditions, ice conditions and other factors of operation. The advantages of using bidirectional DC converters, which provide the integration of storage devices, are considered. The analysis of storage types was performed: lithium-ion batteries (for long-term loads) and special capacitors (for short-term peaks). A hybrid system of active cascade topology was proposed, in which batteries are controlled by current and capacitors are controlled by voltage. A computer model was developed in the SimInTech environment to simulate the operation of a ship's power system with renewable energy sources. The simulation confirmed that the storage system can partially compensate for load changes at the main switchgear, reducing the dynamic effects on the diesel generators. The obtained graphs of load current and supply current changes demonstrate the stabilizing effect of the SNE. It is concluded that there is a positive effect on the quality of electricity, a decrease in the probability of emergency modes, and a decrease in fuel consumption.

Keywords: propeller electric unit, distributed DC bus system, auxiliary fleet vessels, power storage devices, SimInTech.

В настоящее время развитие главных распределительных устройств постоянного тока повышает интерес к их внедрению в судовые электроэнергетические системы (рис. 1), тем самым способствуя появлению все большего количества судов с гибридной электроэнергетической системой [1].



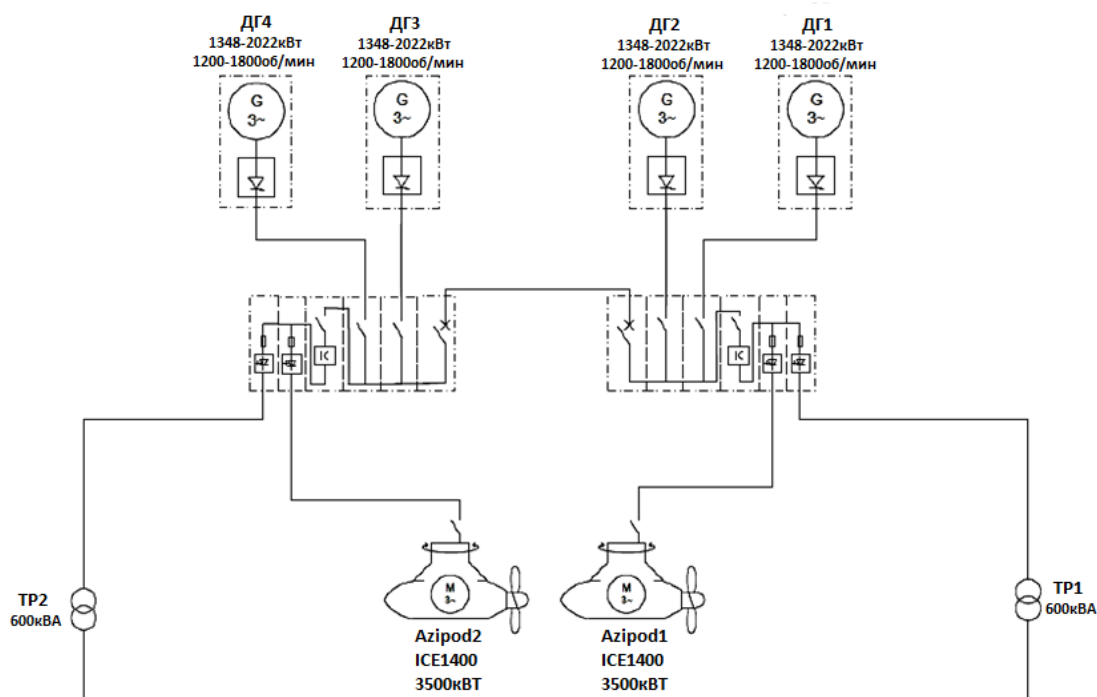


Рисунок 1 – Однолинейная схема электроэнергетической системы с главным распределительным устройством портового буксира

Применение гибридной электроэнергетической системы на флоте направлено на упрощение использования альтернативных источников электрической энергии, улучшения рабочих параметров электрической сети, оптимизации потребления топливных ресурсов, затрачиваемых на генерирование электрической энергии, повышения отказоустойчивости судовой электроэнергетической системы [2].

Применение различных типов источников электрической энергии способствует оптимизации потребления ресурсов, затрачиваемых на генерирование электрической энергии. Однако использование большого количества источников электрической энергии без систем накопления электроэнергии сопряжено с усложнением работы систем управления.

Также эксплуатация судна всегда сопряжена с работой систем в сложных погодных условиях, таких как: сильный ветер, волнения на воде, ледовая обстановка и другие. Для судов, где применены гребные электрические установки, изменение условий эксплуатации в первую очередь сказывается на нагрузке на электроэнергетическую сеть. Резкие изменения в количестве потребляемой электрической энергии отрицательным образом сказываются на вероятности возникновения аварийных случаев в системах генерирования электрической энергии, расходе топливных ресурсов, возможности непреднамеренного отключения источников электроэнергии.

Применение на судах систем распределения постоянного тока позволяет использовать двунаправленные преобразователи постоянного тока, тем самым упрощая внедрение систем накопления электрической энергии. Внедрение систем накопления электрической энергии в состав судовой электроэнергетической сети в первую очередь направлено на компенсацию резкоменяющейся нагрузки в электрической сети [3]. Объясняется это возможностью накопления излишне генерируемой энергии, тем самым повышая нагрузку электрической сети, и применения запасенной энергии для электроснабжения судовых электрических потребителей, уменьшая нагрузку на системы генерирования электрической энергии. Таким образом, становится возможным поддерживать постоянство нагрузки на

электрическую сеть, что является важным фактором для судов, где системы контроля расхода топлива крайне чувствительны к резкому изменению количества потребляемой электроэнергии.

При разработке судовой электроэнергетической системы в виду условий эксплуатации судна выполняется тщательный выбор систем накопления электрической энергии с целью достижения улучшения экономических и технических показателей. При требовании большой мощности на единицу веса предпочтение отдается литий-ионным батареям. Однако если предполагается, что электроэнергетическая система будет испытывать импульсные нагрузки, не превышающих нескольких секунд, необходим выбор специальных конденсаторов, как накопителей электроэнергии.

Применение тех или иных накопителей электроэнергии сопряжено с наличием ограничений, свойственных их типу. Одним из решений в устранении ограничений является применение нескольких типов накопителей электроэнергии. При данном решении система накопления электроэнергии является гибридной. В большинстве типов гибридных систем накопления электроэнергии используются аккумуляторные батареи и специальные конденсаторы, благодаря их доступности, принципу работы.

Для судовых электроэнергетических систем ввиду специфики эксплуатации наиболее подходящими являются гибридные электроэнергетические системы активной каскадной топологии (рис. 2). В данных системах двунаправленные преобразователи постоянного тока изолируют накопители электроэнергии от главного распределительного устройства постоянного тока. Управление таким преобразователем выполняется током, тем самым осуществляя плавную работу аккумуляторной батареи. При данном способе управления аккумуляторные батареи не испытывают процессы импульсного заряда или разряда. Специальные конденсаторы также имеют подключение через двунаправленный преобразователь постоянного тока, при этом управление преобразователем выполняется по напряжению с целью регулирования напряжения главного распределительного устройства при высокочастотных изменениях нагрузки. Так как специальный конденсатор может обладать большим рабочим напряжением, возможна значительная разница напряжениями специального конденсатора и главного распределительного устройства постоянного тока, из-за чего могут возникать большие потери мощности в преобразователе постоянного тока. Объясняется это сложностью в осуществлении эффективного алгоритма работы преобразователя в широком диапазоне рабочих напряжений.

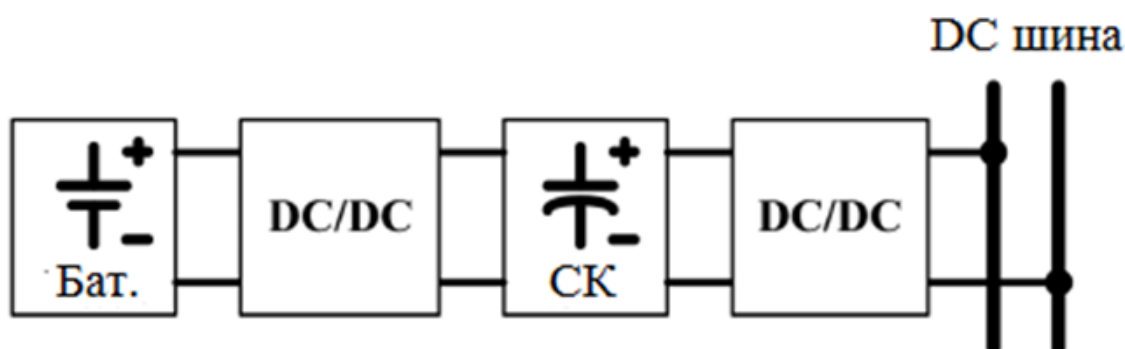


Рисунок 2 – Каскадная активная топология гибридной системы накопления электроэнергии

С целью выполнения анализа влияния системы накопления электрической энергии на работу судовой электроэнергетической системы, схема которой изображена на рисунке 1, разработана компьютерная модель (рис. 3) [4], выполненная в программной среде SimInTech.

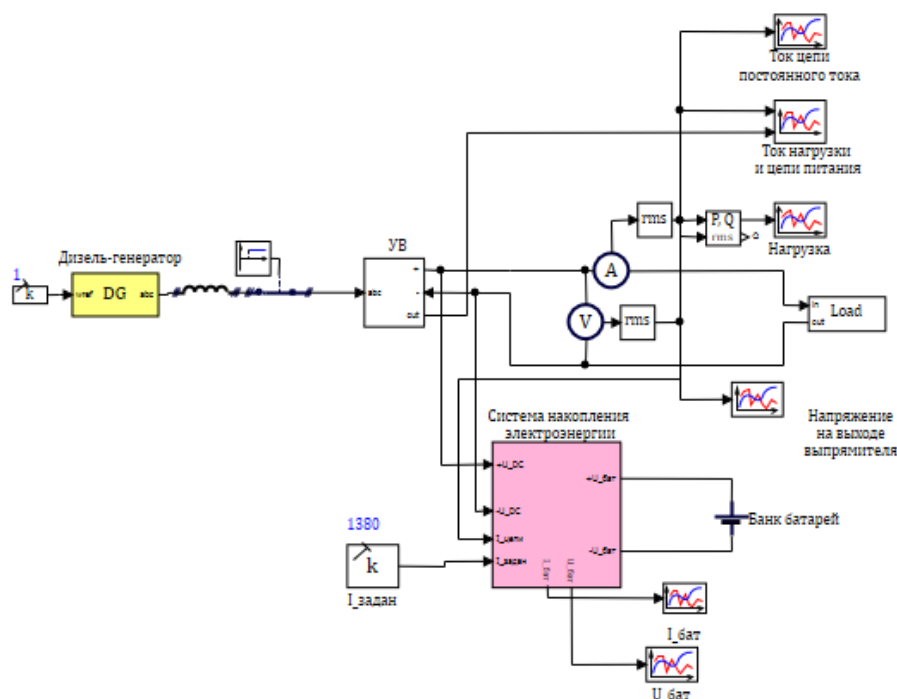


Рисунок 3 – Компьютерная модель судовой электроэнергетической системы с системой накопления электроэнергии

При компьютерном моделировании рабочих режимов судовой электроэнергетической системы получены графики изменения тока нагрузки и тока питания в зависимости от времени (рис. 4). Из графиков видно, что при изменении нагрузки на главном распределительном устройстве постоянного тока нагрузка системы генерирования частично компенсируется за счет накопленной электрической энергии в системе накопления электроэнергии.

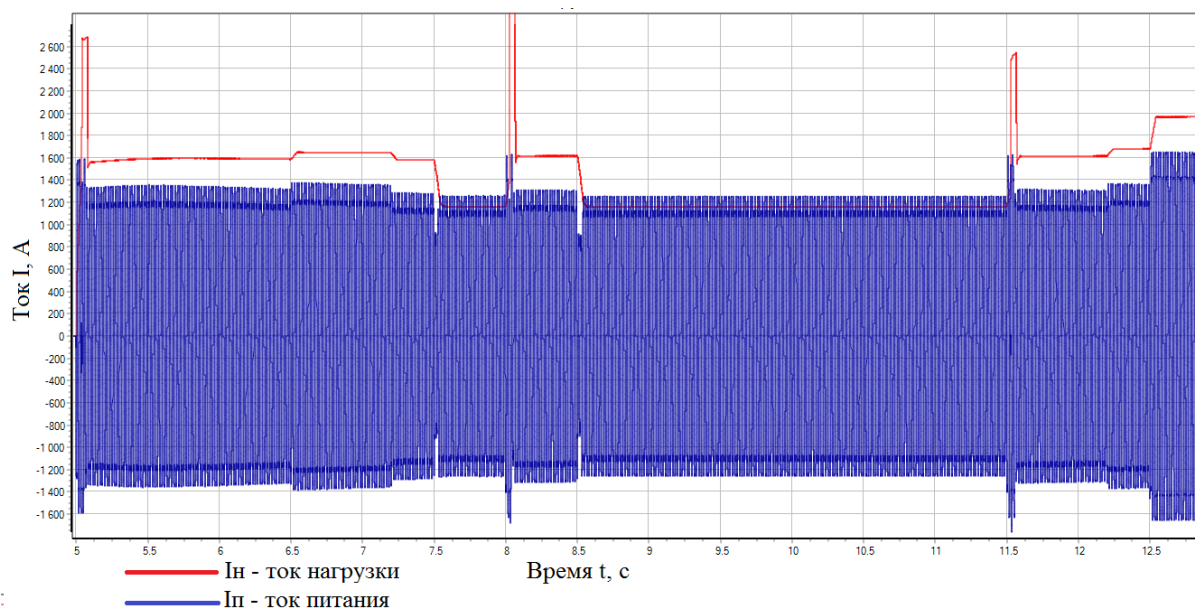


Рисунок 4 – График изменения тока нагрузки и тока питания в зависимости от времени

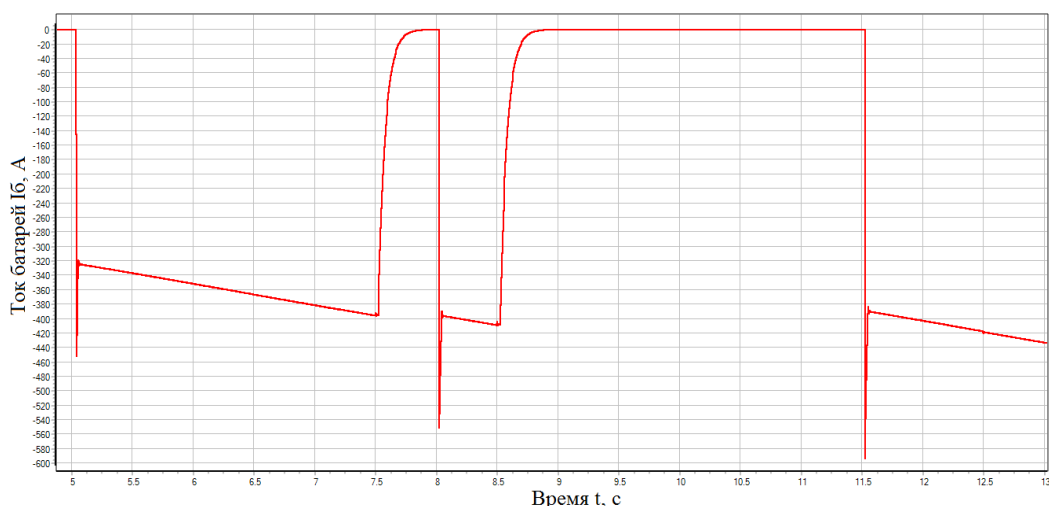


Рисунок 5 – График изменения тока батарей в зависимости от времени

Система накопления электроэнергии способствует поддержанию постоянства нагрузки в главных системах генерирования электрической энергии, которыми на судах в большинстве случаев являются дизель-генераторы. Данный фактор способен положительным образом влиять на качество электрической сети, минимизацию вероятности возникновения аварийной работы систем генерирования электроэнергии, и за счет стабилизации работы уменьшению расхода топливных ресурсов.

Список литературы:

1. Бежик А.С. Анализ схемных решений гребных электрических установок с распределенной шиной постоянного тока / А.С. Бежик, В.В. Романовский, В.А. Малышев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова.- 2019.-Т.11.-№1.- С. 169-181ю
2. Бежик А. С. Применение на судах электроэнергетических систем с распределенной шиной постоянного тока / А. С. Бежик, А. К. Лебедев, В. В. Романовский, А. Б. Власов // Вестник Мурманского государственного технического университета. – 2024. – Т. 27. – №. 4. – С. 534-546.
3. Бежик А.С. Судовые гибридные электроэнергетические системы с распределенной шиной постоянного тока / А.С. Бежик, В.В. Романовский, В.А. Малышев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова.- 2020.-Т.12.-№3.- С. 591-605.
4. Бежик А.С. Повышение качества электрической энергии в судовых электроэнергетических системах / А.С. Бежик, В.В. Романовский // Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 1. — С. 87–101.