

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ЗАРЯДНО-ДЕСУЛЬФАТИРУЮЩЕЙ СТАНЦИИ ДЛЯ СВИНЦОВО-КИСЛОТНЫХ АККУМУЛЯТОРОВ

М.Б. Маньков, К.В. Сидоров, К.Б. Корнеев

© Маньков М.Б., Сидоров К.В.,
Корнеев К.Б., 2026

***Аннотация.** В статье представлена имитационная модель зарядно-десульфатирующей станции (ЗДС) для свинцово-кислотных аккумуляторов, выполненная в среде GNU Octave. Приведены результаты имитационного моделирования совместной работы ЗДС, источника напряжения и свинцово-кислотного аккумулятора при вариации параметров асимметричного зарядного тока. Оценены практическая реализуемость и потенциал предлагаемого подхода.*

***Ключевые слова:** свинцово-кислотный аккумулятор, зарядно-десульфатирующая станция, асимметричный ток, имитационное моделирование, GNU Octave.*

Аккумуляирование электроэнергии представляет собой ключевое звено в функционировании значительного числа современных электротехнических систем и комплексов. В настоящее время широкое распространение в различных сферах сохраняют свинцово-кислотные аккумуляторы (СКА), востребованность которых обусловлена совокупностью практических преимуществ: экономичностью, высокой удельной мощностью, эксплуатационной надежностью и развитой инфраструктурой для вторичной переработки [1]. Однако долговечность и производительность данных накопителей энергии ограничиваются доминирующим фактором деградации – процессом сульфатации электродов. Следовательно, разработка эффективных методов борьбы с сульфатацией для увеличения эксплуатационного периода СКА представляет собой актуальную инженерную проблему. Ее решение позволит минимизировать масштабы преждевременной утилизации аккумуляторов, что приведет к повышению технико-экономической и экологической эффективности их применения [2].

Среди известных методов десульфатации воздействие асимметричным током выделяется своей эффективностью, что подтверждается рядом исследований [3–5]. Данный метод активно используется и совершенствуется в зарядных устройствах благодаря своей практической

результативности. В настоящий момент авторами разработано устройство для зарядки и десульфатации аккумуляторов с применением асимметричного тока [6, 7]. Это возможно за счет использования коммутатора, подключенного параллельно генератору импульсов, для поочередного соединения с зарядной и разрядной цепями. Создание блока силового коммутатора дает возможность применять как сетевой источник электропитания, так и солнечную панель. Однако разработка зарядно-десульфатирующей станции (ЗДС) для аккумуляторов является трудоемким и дорогостоящим итеративным процессом в связи с проведением значительного числа экспериментальных исследований для рассматриваемых вариантов схемотехнических решений. Эта разработка предполагает создание тестовой схемы устройства с оценкой ее результативности и последующей модификацией на каждой итерации.

Цель данной работы – исследование влияния параметров асимметричного тока на показатели эффективности устройства с использованием имитационной модели ЗДС в среде GNU Octave.

При создании устройства ЗДС используется модельно-ориентированное проектирование, блок-схема процесса показана на рис. 1.

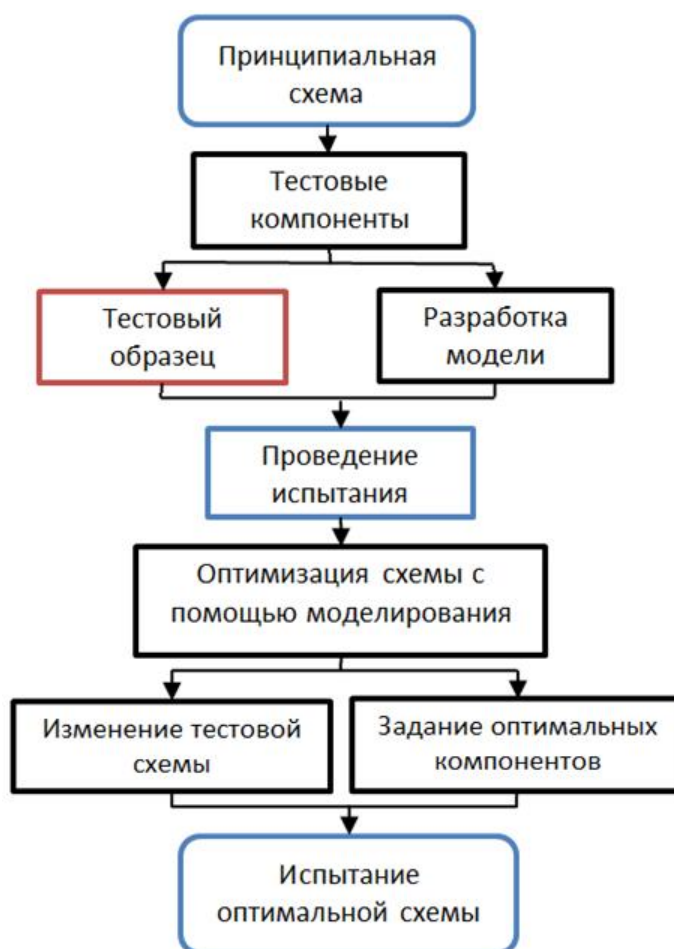


Рис. 1. Блок-схема процесса модельно-ориентированного проектирования

Модельно-ориентированное проектирование позволяет сделать процесс более производительным, включающим лишь несколько итераций модификации схемы устройства с повторной проверкой оптимальности. Имитационное моделирование применяется с целью сокращения объема физических испытаний, необходимых для выбора компонентов электронной схемы устройства.

Разработана имитационная модель ЗДС для СКА с использованием программного пакета GNU Octave (рис. 2). Архитектура модели выполнена по модульному принципу, где каждый функциональный блок выделен в самостоятельную подсистему. Подобная организация структуры существенно повышает наглядность общей имитационной модели и обеспечивает независимую настройку параметров для каждого модуля.

Разработка модели электронной части ЗДС реализуется на уровне физических компонентов с применением специализированной библиотеки Simscape. Данный подход напоминает лабораторную практику создания экспериментальных установок, а структурное представление разрабатываемой модели соответствует классической принципиальной электрической схеме с реальными характеристиками элементов [8]. Это позволяет осуществить выбор и настройку параметров опытного образца ЗДС. Развернутая структура основных подсистем модели ЗДС представлена на рис. 3 и 4. Одной из ключевых особенностей используемого программного комплекса является автоматическое формирование и решение систем уравнений, математически описывающих физическое поведение смоделированной системы. Эти уравнения, сгенерированные в среде Simscape, органично интегрируются в более общие модели платформы Simulink, что обеспечивает комплексную работу всей электротехнической станции [9].

В модели ЗДС (рис. 2) используется идеальный источник постоянного напряжения – блок *DC Voltage Source*, напряжение на выходных клеммах которого не зависит от протекающего через него тока. При моделировании ЗДС использовалась модель батареи, выполненная в виде стандартного блока *Battery* из библиотеки SimPowerSystems. Эта модель, предложенная в работе [10], демонстрирует высокую степень адекватности при описании реальных характеристик различных типов аккумуляторных батарей. При этом она опирается всего на три контрольные точки разрядной характеристики, предоставленной производителем. Соответствие поведения модели экспериментальным данным при резких коммутационных переходах между режимами заряда и разряда подтверждает ее способность корректно воспроизводить динамические процессы в батарее в условиях переменных нагрузок.

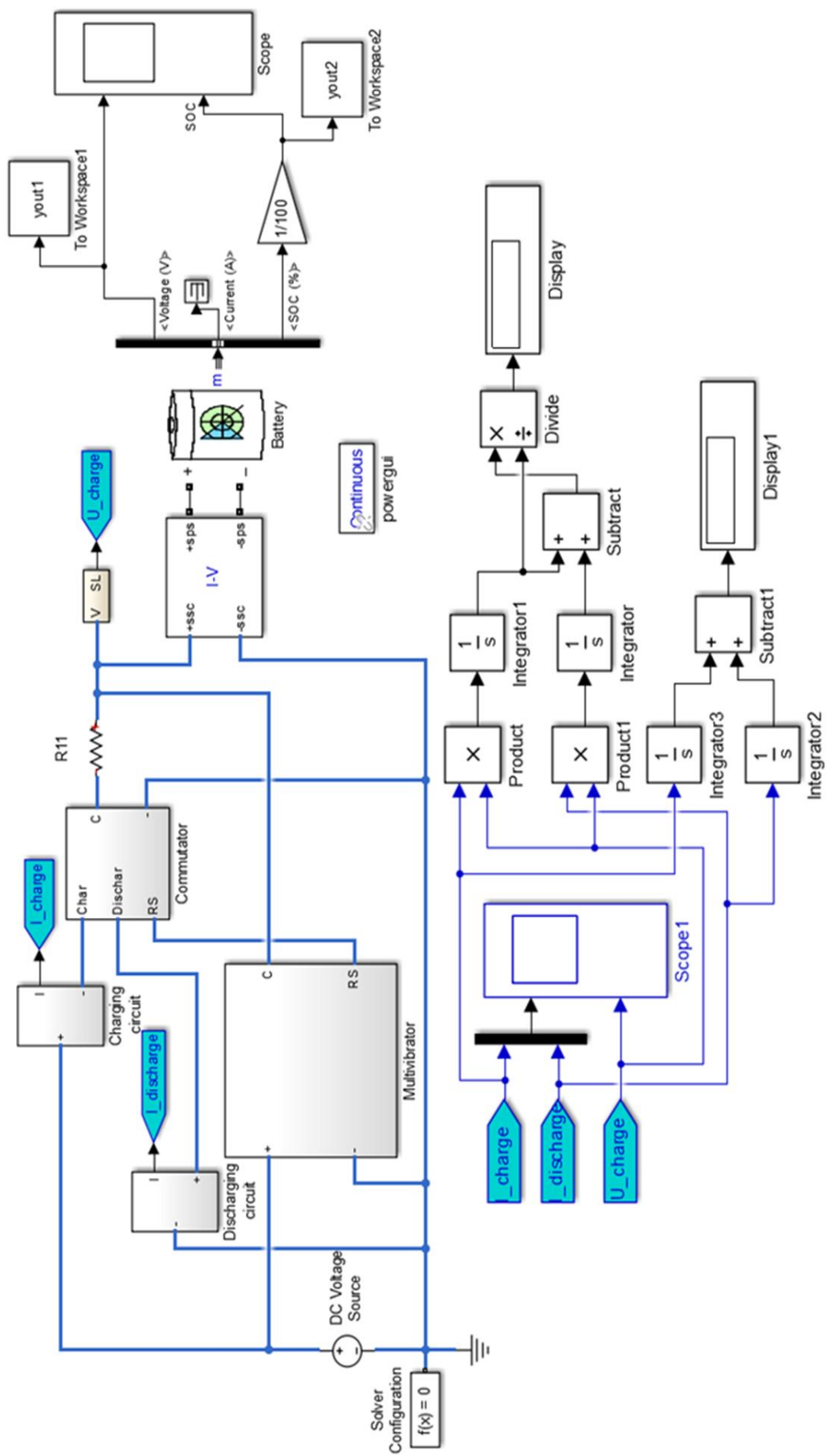
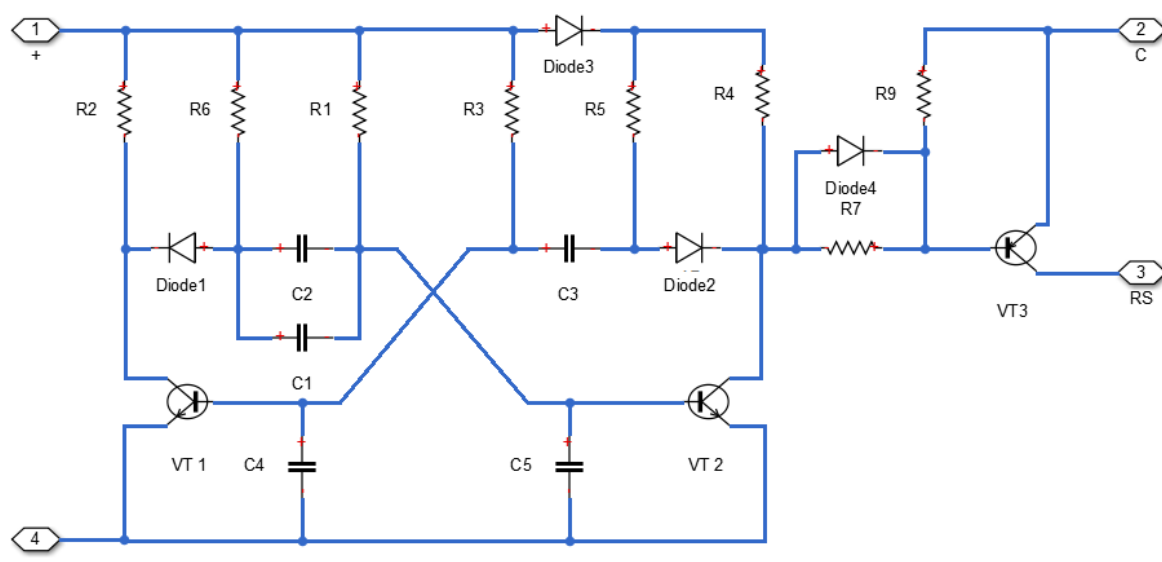
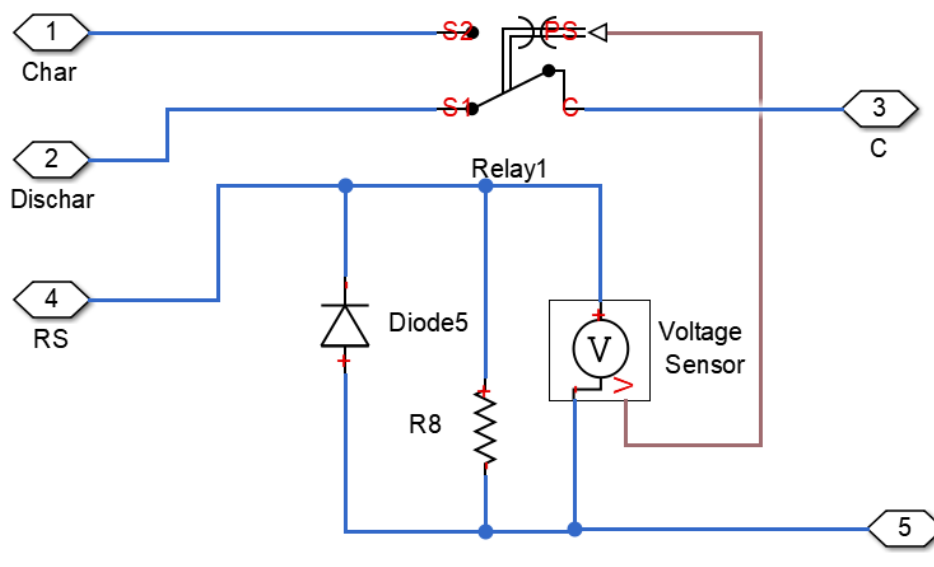


Рис. 2. Имитационная модель ЗДС для СКА



а



б

Рис. 3. Подсистемы ЗДС для СКА:

а – блок генерации импульсов *Multivibrator*;

б – блок переключения зарядных и разрядных импульсов *Commutator*

Соединение цепи *SimPowerSystems* с электрическими цепями *Simscape Electronics* осуществляется через блок *Current-Voltage Simscape Interface*. Кроме того, для работы *SimPowerSystems*-модели необходим блок *Powergui*, который не подключается к другим элементам.

Для снятия параметров асимметричного тока и напряжения на аккумуляторе использовались подсистемы измерителей (рис. 5). Они содержат датчики тока *Current Sensor* и напряжения *Voltage Sensor*, а также преобразователи сигналов *PS-Simulink Converter*, передающие сигналы на блоки осциллографов.

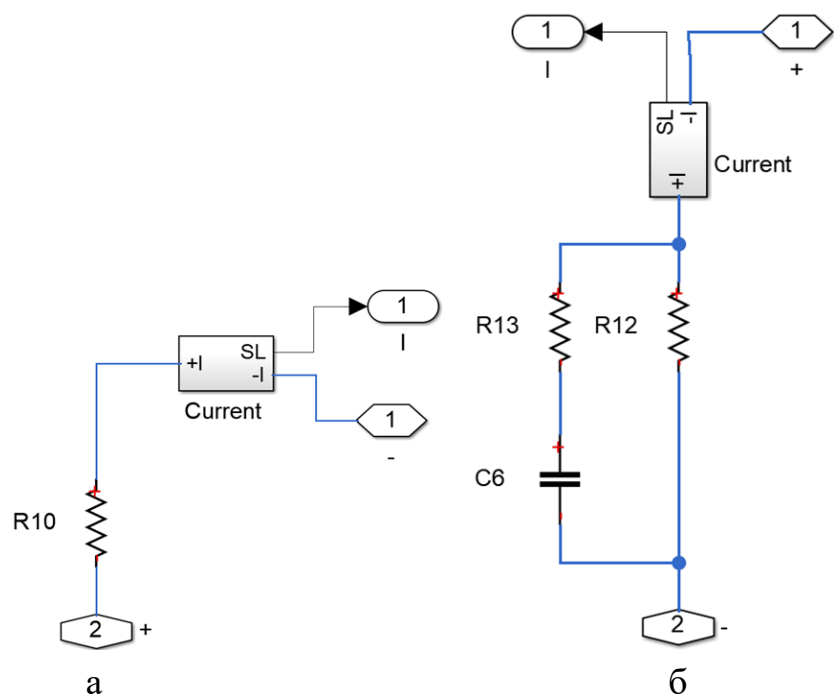


Рис. 4. Подсистемы ЗДС для СКА:
а – блоки формирования импульсов *Charging_circuit*;
б – *Discharging_circuit*

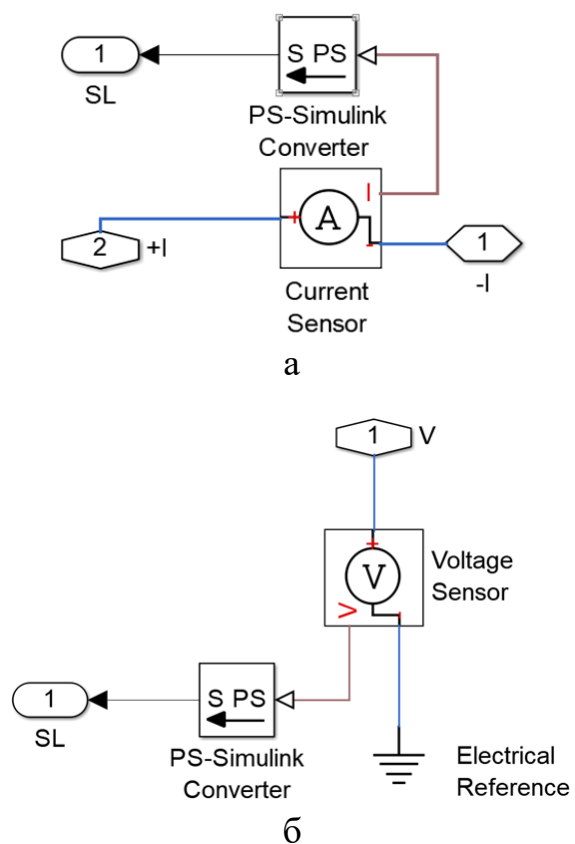


Рис. 5. Подсистемы ЗДС для СКА:
а – блоки измерителей тока; б – блоки измерителей напряжения

Осциллографы *Scope* применялись для анализа и регистрации динамики сигналов в процессе моделирования, с их помощью проводился мониторинг изменений параметров в реальном времени и осуществлялось построение временных графиков проверяемых величин.

При проведении исследований использовался СКА емкостью 7,2 А·ч, 12 В. В процессе разработки имитационной модели ЗДС выполнены вычислительные эксперименты, в ходе которых изменялись значения параметров основных элементов схемы с последующим анализом их влияния на характеристики устройства: частоту, коэффициент заполнения, амплитуды зарядного и разрядного импульсов. Важный аспект этого подхода – возможность проведения многовариантного моделирования для осуществления сравнительной оценки эффективности работы нескольких устройств и выявления оптимальных технических решений.

В данной работе приводятся результаты имитационного моделирования ЗДС для СКА при различных соотношениях зарядной и разрядной составляющих асимметричного тока. Моделирование осуществлялось для значений состояния заряда батареи (SOC) в диапазоне от 0,5 до 0,9 А·ч. На рис. 6 показаны осциллограммы асимметричного тока и напряжения, полученные при исследовании влияния различных вариантов построения электрической схемы на эффективность работы устройства.

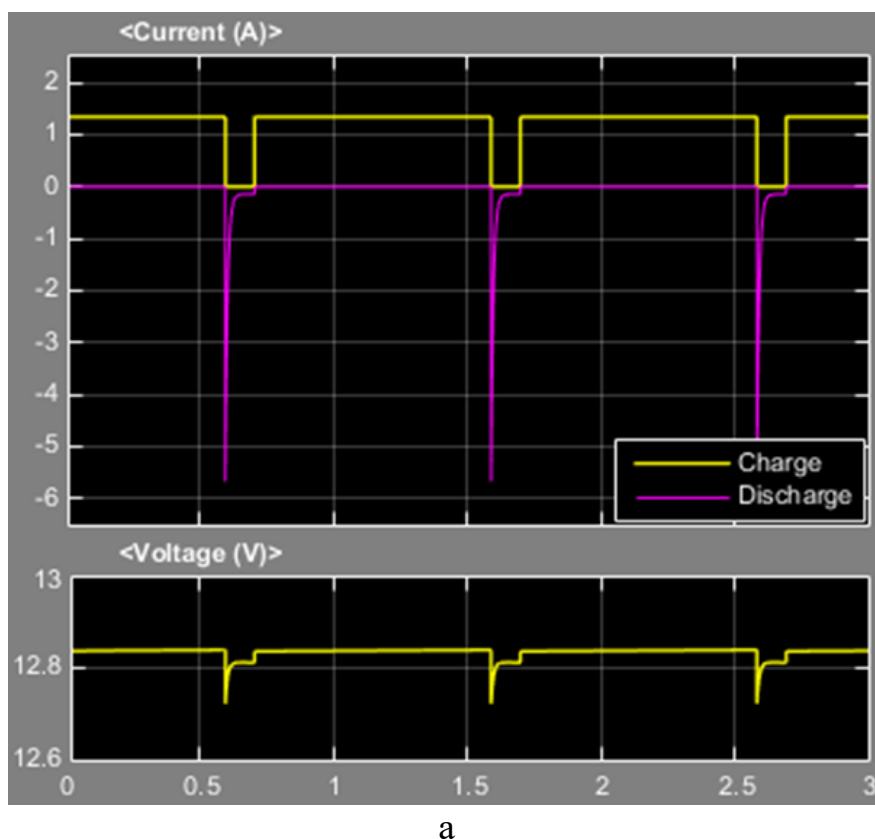
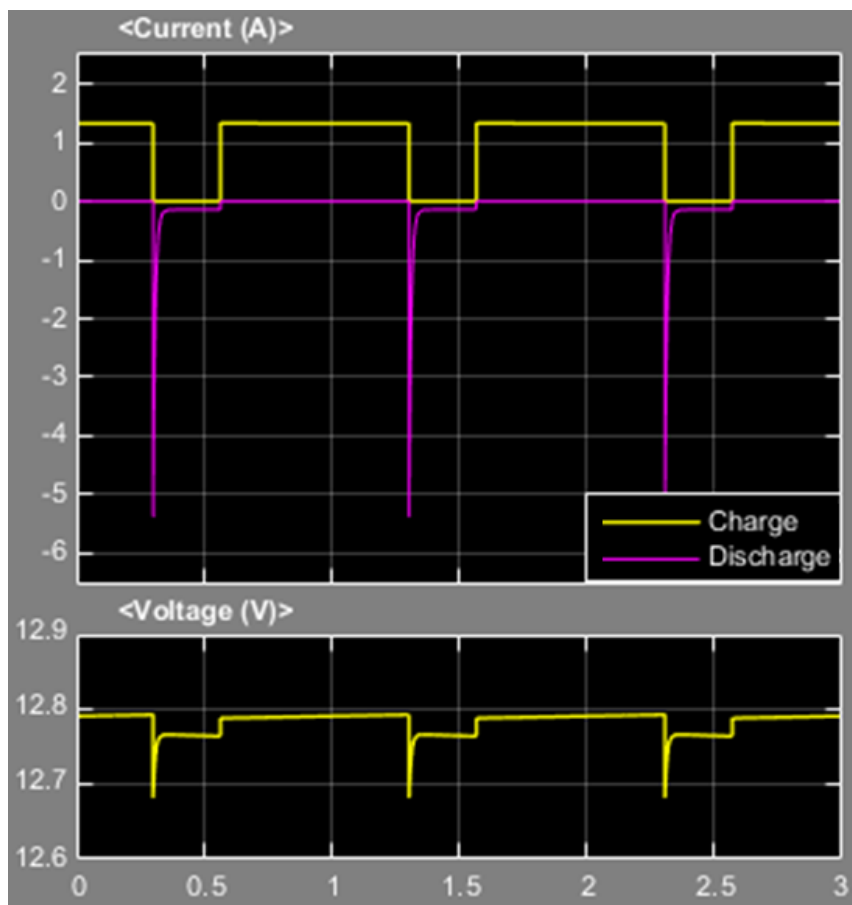
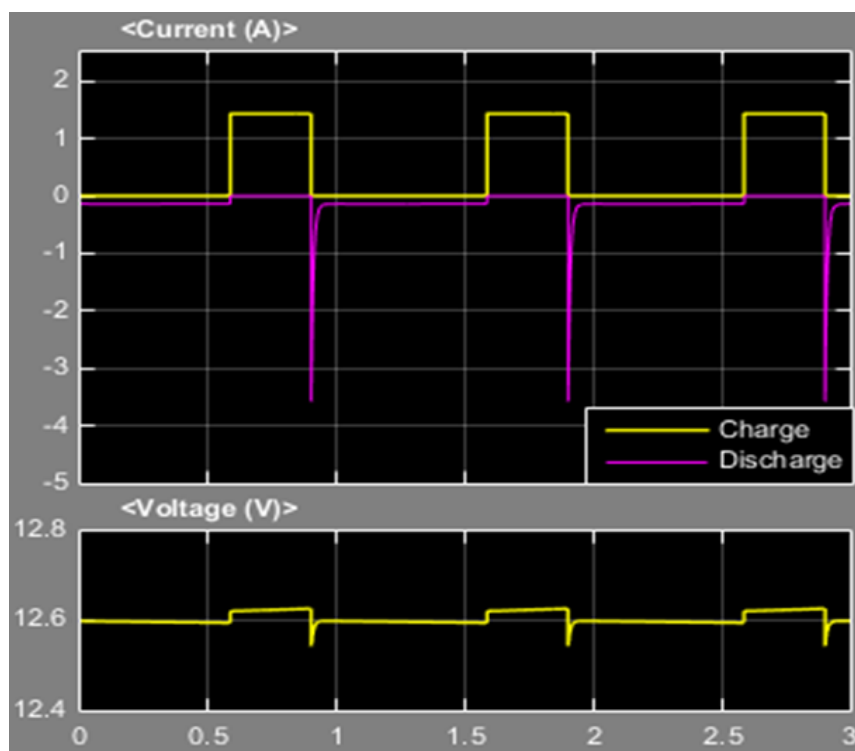


Рис. 6. Осциллограммы тока (зарядная и разрядная составляющие) и напряжения для коэффициентов заполнения: а – 90 %; б – 75 %; в – 33 %



б



в

Рис. 6. Продолжение

Динамика изменения напряжения и SOC аккумулятора в процессе имитационного моделирования приведена на рис. 7. Результаты получены на временном промежутке от 0 до 500 с при разных значениях коэффициента заполнения.

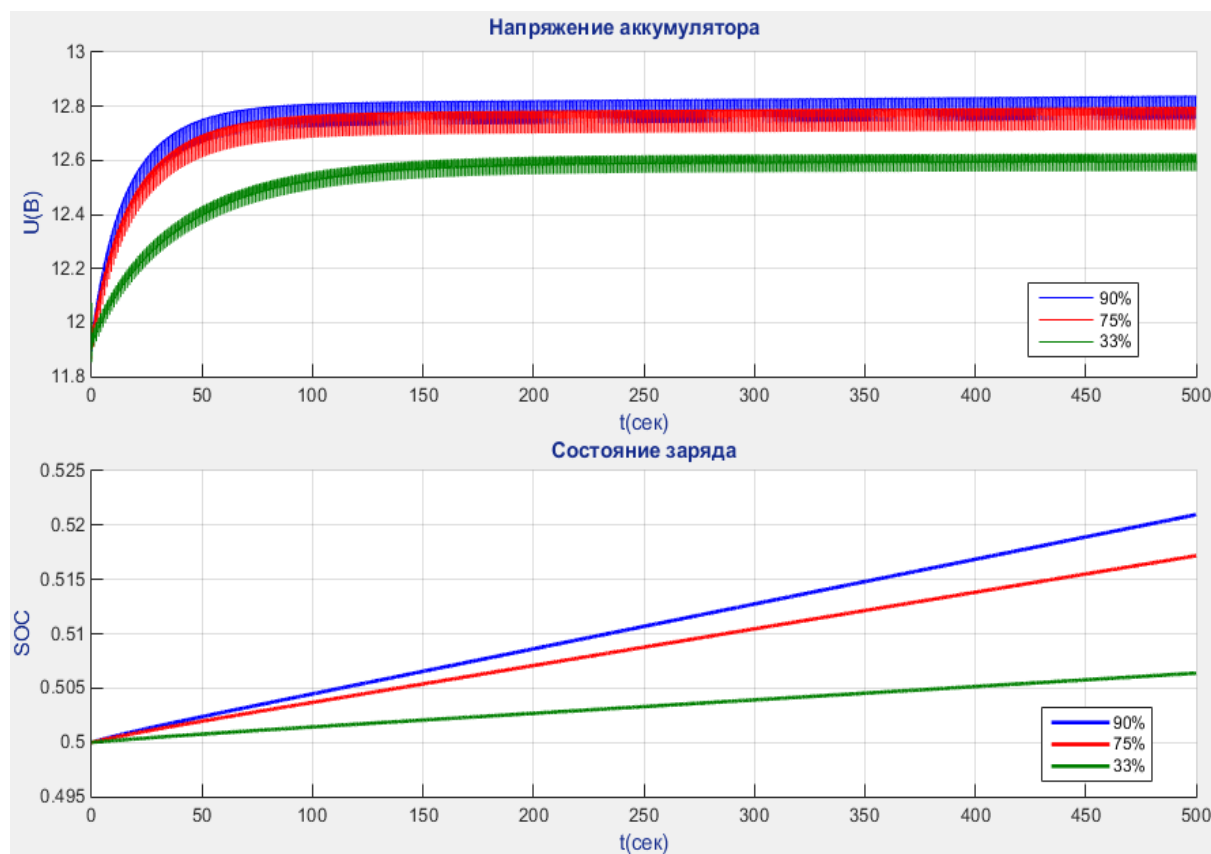


Рис. 7. Напряжение и состояние заряда (SOC) для СКА в процессе имитационного моделирования

Анализ эффективности функционирования предложенного устройства ЗДС проводился на основании имитационного моделирования. В качестве количественных критериев использовались коэффициент полезного действия (КПД), средний ток (I_{CP}) и время заряда ($t_{зар}$). Для определения параметров, подлежащих сравнительному анализу, привлекались блоки стандартной библиотеки математических операций: вычисление суммы (или разности) текущих значений сигналов *Add* и *Subtract*, вычисление произведения (или отношения) текущих значений сигналов *Product* и *Divide*, умножение сигнала на константу *Gain*, интегрирование сигнала *Integrator* (см. рис. 2).

Расчет энергетических затрат производился путем вычисления определенных интегралов от мощности зарядных и разрядных импульсов на соответствующих временных интервалах, а КПД определялся отношением энергии, переданной в аккумулятор, к суммарной затраченной энергии за период воздействия. Среднее значение зарядного тока

определено интегрированием его временной зависимости на заданном промежутке времени, что обеспечивает точную характеристику данного режима работы моделируемой системы.

Результаты сравнительного анализа, полученные на основе имитационного моделирования конфигураций ЗДС с различными коэффициентами заполнения (90, 75 и 33 %), представлены ниже:

- а) при 90 %: КПД = 0,95; $I_{CP} = 1,3$ А; $t_{ЗАР} = 4,4$ ч;
- б) при 75 %: КПД = 0,92; $I_{CP} = 1$ А; $t_{ЗАР} = 5,6$ ч;
- в) при 33 %: КПД = 0,77; $I_{CP} = 0,4$ А; $t_{ЗАР} = 14,2$ ч.

Выявленный характер изменения оцениваемых параметров для трех исследуемых вариантов продемонстрировал повышение эффективности функционирования ЗДС с ростом коэффициента заполнения. По результатам сравнения был выбран вариант с коэффициентом 90 %. Реальные характеристики компонентов, полученные в результате моделирования, легли в основу оптимальной конфигурации схемы зарядной станции. Однако для подтверждения эффективности в восстановлении емкости аккумуляторов необходимы натурные испытания экспериментального образца станции.

Таким образом, в рамках проведенного исследования разработана и всесторонне изучена имитационная модель ЗДС для СКА, позволяющая сформировать требования к основным функциональным модулям, что является условием обеспечения высокой эффективности работы устройства ЗДС. Рассмотрена работа ЗДС при различных соотношениях зарядной и разрядной составляющих асимметричного тока. Результаты исследования демонстрируют, что путем имитации рабочих режимов представляется возможным достичь приемлемого уровня КПД и скорости заряда, и это может обеспечить эффективное восстановление эксплуатационных характеристик аккумуляторных батарей с применением предлагаемой технологии.

Имитационное моделирование с использованием среды GNU Octave обеспечивает перспективы совершенствования модели дополнением разрабатываемой ЗДС для СКА новыми функциональными блоками, а также имеет потенциал для расширения анализируемых показателей при постановке новых задач. Дальнейшая работа предполагает реализацию имитационного моделирования зарядки аккумулятора от солнечной батареи.

Библиографический список

1. Хрусталева Д.А. Аккумуляторы. М.: Изумруд, 2003. 224 с.
2. Корнеев К.Б., Маньков М.Б. Повышение ресурсных характеристик аккумуляторных батарей за счет использования метода управляемой десульфатации // Вестник Тверского государственного технического

университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2025. № 1 (25). С. 44–53.

3. Каменев Ю.Б., Чунц Н.И. Ускоренный метод заряда свинцово-кислотного аккумулятора. 4. Импульсный заряд асимметричным током, газовыделение и ресурс // Электрохимическая энергетика. 2020. Т. 20. № 3. С. 146–156.

4. Устройство заряда аккумуляторной батареи асимметричным током / И.С. Шемолин [и др.] // Приборы и техника эксперимента. 2022. № 2. С. 57–60.

5. Устюгов А.А. Исследование зарядного устройства аккумуляторной батареи асимметричным током // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР. 2024. № 1-1. С. 278–282.

6. Маньков М.Б., Марголис Б.И. Моделирование и исследование режимов работы зарядно-десульфатирующего устройства для аккумуляторных батарей // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. Вып. 10. С. 69–73.

7. Устройство для заряда и десульфатации аккумуляторов: пат. 2824038 Рос. Федерация. № 2023136203 / Маньков М.Б., Сидоров К.В.; заявл. 29.12.2023; опубл. 01.08.2024, Бюл. № 22. 11 с.

8. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, Simulink и SimPowerSystems. М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. 288 с.

9. Дьяконов В.П. Simulink 5/6/7: самоучитель. М.: ДМК Пресс, 2008. 784 с.

10. Tremblay O., Dessaint L.A. Experimental validation of a battery dynamic model for EV applications // World Electric Vehicle Journal. 2009. Vol. 3 (2). P. 289–298.

RESEARCH RESULTS APPLICATION OF SIMULATION MODELING IN THE DEVELOPMENT OF A CHARGE-DESULFATING STATION FOR LEAD-ACID BATTERIES

M.B. Mankov, K.V. Sidorov, K.B. Korneev

Abstract. *This paper presents a simulation model of a charging and desulfation station (CDS) for lead-acid batteries, developed in the GNU Octave environment. The results of simulating the interaction between the CDS, a voltage source, and a lead-acid battery under varying parameters of the asymmetric charging current are provided. The practical feasibility and potential of the proposed approach are assessed.*

Keywords: *lead-acid battery, charging and desulfation station, asymmetric current, simulation modeling, GNU Octave.*

Об авторах:

МАНЬКОВ Матвей Борисович – ассистент кафедры автоматизации технологических процессов, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: dr.mankoff@yandex.ru

СИДОРОВ Константин Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации технологических процессов, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: bmisidorov@mail.ru

КОРНЕЕВ Константин Борисович – кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения и электротехники, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: energy-tver@mail.ru

About the authors:

MANKOV Matvey Borisovich – Assistant of the Department of Technological Process Automation, Tver State Technical University, Tver. E-mail: dr.mankoff@yandex.ru

SIDOROV Konstantin Vladimirovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technological Process Automation, Tver State Technical University, Tver. E-mail: bmisidorov@mail.ru

KORNEEV Konstantin Borisovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University, Tver. E-mail: energy-tver@mail.ru