

УДК 621.3

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПАССИВНОЙ И АКТИВНОЙ  
БАЛАНСИРОВКИ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ В MATLAB  
SIMULINK ДЛЯ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА****Авазов Дилшод Сайдали угли,**

магистрант,

e-mail: avazovdilshod11@gmail.com

**Грищенко Александр Геннадьевич,**

канд. техн. наук,

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),  
РФ, г. Москва**Аннотация**

В статье рассматривается моделирование процессов балансировки литий-ионных аккумуляторных батарей для электротранспорта с использованием среды MATLAB Simulink. Проведен сравнительный анализ двух методов балансировки: пассивного (на основе шунтирующих резисторов) и активного (с применением индуктивных элементов). Описаны математические модели, реализованные в Simulink, а также алгоритмы управления процессами зарядки и балансировки. Представлены результаты моделирования, демонстрирующие, что активная балансировка обеспечивает более быстрое и энергоэффективное выравнивание заряда аккумуляторов по сравнению с пассивной, что особенно важно для высокопроизводительных систем электромобилей. Сделаны выводы о применимости каждого метода в зависимости от требований к эффективности, стоимости и сложности реализации.

**Ключевые слова:** литий-ионные аккумуляторы, балансировка аккумуляторов, MATLAB Simulink, пассивная балансировка, активная балансировка

**MODELLING OF PASSIVE AND ACTIVE BALANCING PROCESSES OF  
LITHIUM-ION BATTERIES IN MATLAB SIMULINK FOR ELECTRIC  
VEHICLES****Avazov Dilshod Saydali ugli,**

Master's student,

e-mail: avazovdilshod11@gmail.com

**Grishchenko Alexander Gennadievich,**

PhD in Engineering,

Moscow State Automobile and Road Technical University (MADI), Russian Federation, Moscow

## ABSTRACT

The paper deals with the modelling of balancing processes of lithium-ion batteries for electric transport using MATLAB Simulink environment. A comparative analysis of two methods of balancing is carried out: passive (based on shunt resistors) and active (using inductive elements). The mathematical models implemented in Simulink as well as algorithms for controlling the charging and balancing processes are described. Simulation results are presented demonstrating that active balancing provides faster and more energy-efficient battery charge equalisation than passive balancing, which is particularly important for high-performance electric vehicle systems. Conclusions are drawn on the applicability of each method depending on efficiency requirements, cost and implementation complexity.

**Keywords:** lithium-ion batteries, battery balancing, MATLAB Simulink, passive balancing, active balancing

## Введение

Математическое моделирование процессов балансировки аккумуляторов является важным шагом в разработке и оптимизации систем аккумуляторных батарей [2]. С помощью программного обеспечения MATLAB Simulink можно эффективно решать задачи исследования [3].

MATLAB Simulink – это мощная среда визуального моделирования, широко используемая для проектирования, симуляции и анализа динамических систем [3]. Она особенно полезна в задачах управления, электротехники и энергетики, таких как балансировка аккумуляторных батарей – ключевой процесс для повышения их эффективности и срока службы [6, 8].

Математическое моделирование процессов балансировки в MATLAB Simulink позволит нам визуализировать и анализировать работу систем пассивной и активной балансировки аккумуляторов [5, 7]. Создание соответствующих математических моделей, которые отражают физическую природу и эксплуатационные характеристики, является критически важным для успешной работы наших алгоритмов и систем [2, 3].

## Описание математической модели

Для моделирования процессов балансировки используется литий-ионная батарея из четырёх последовательно соединённых аккумуляторов с разной начальной степенью заряженности (SOC). Селектор шин формирует сигналы о SOC, токе и напряжении [1, 2]. Модель включает: источник постоянного напряжения, резистор, системный блок Powergui (шаг симуляции  $5e-5$ ), а также IGBT-транзисторы, моделируемые как последовательная цепь из резистора, индуктивности и источника напряжения с управляемым переключателем (рис. 1).

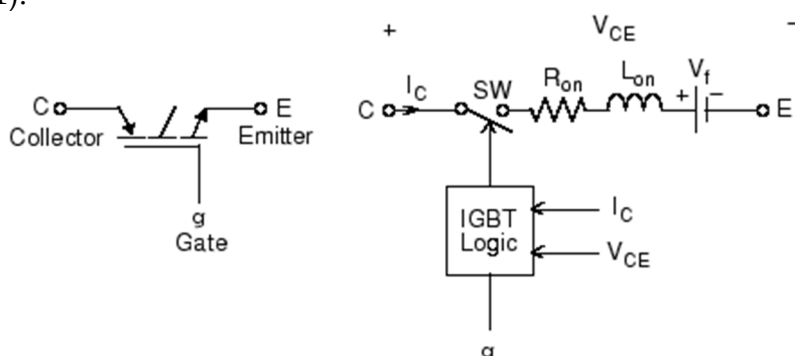


Рисунок 1 – Схема замещения блока «IGBT-транзистор»

Он выключается, когда напряжение коллектор-эмиттер становится положительным и на вход подается сигнал 0 ( $g = 0$ ). IGBT-устройство находится в выключенном состоянии, когда напряжение между коллектором и эмиттером отрицательное. Блок IGBT содержит последовательную демпфирующую схему  $R_s$ - $C_s$ , которая подключена параллельно с устройством IGBT (между клеммами C и E).

Блок Battery моделирует литий-ионные аккумуляторы с использованием уравнений Шеферда. В нём задаются параметры: номинальное напряжение, ёмкость, SOC (различное для каждого аккумулятора) и тип батареи. Значения SOC передаются в MATLAB для сравнения; если разница SOC между аккумуляторами  $\geq 1\%$ , запускается балансировка.

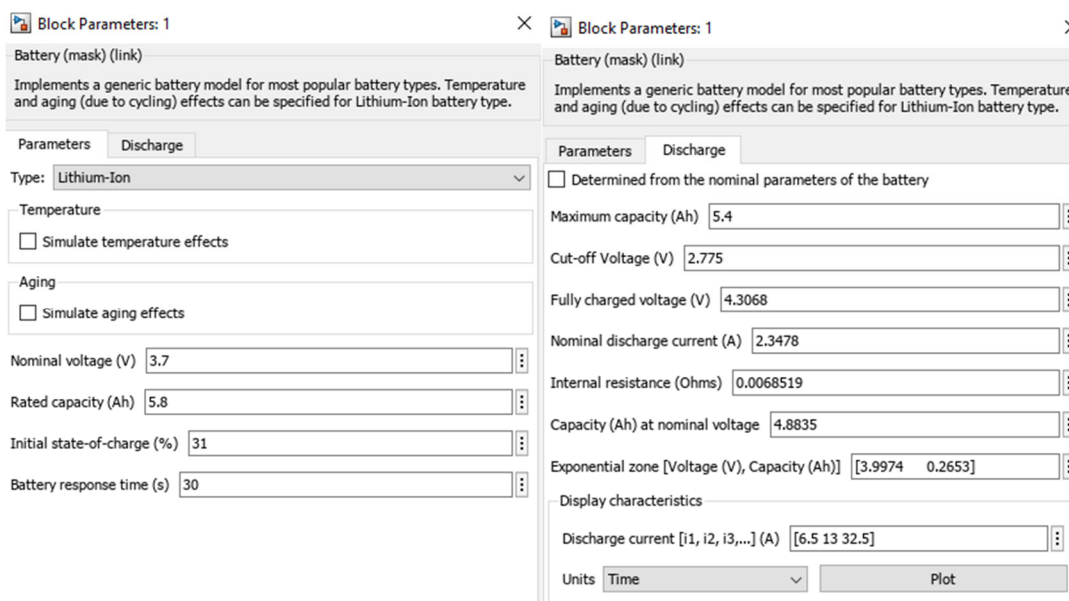


Рисунок 2 – Блок «Battery» с полем для заполнения параметров аккумуляторной батареи

Силовая часть модели включает: фильтрующий конденсатор  $C1$ , индуктивность  $L1$  для подавления помех, транзисторы  $VT1$  и  $VT2$  (ключевой режим), защитный диод  $D1$  и нагрузочный резистор  $R1$  [2, 5]. Управляющий сигнал подаётся на  $VT1$ , который регулирует ток через  $L1$  и  $C1$ . Измерения тока поступают в систему управления для анализа работы схемы.

Таблица – 3. Компоненты силовой цепи

Компоненты	Номинал
Источник $G$	17.5 V
Резистор $R$ (нагрузка)	1 $\Omega$
$L1$ , Катушка (индуктивность)	0.01 H
Конденсатор $C$	100 $\mu F$
Напряжение АБ	3.7 V
Ёмкость АБ	5.8 Ah

Система управления генерирует сигнал, который подаётся на управляющий вход транзистора  $VT1$ . В силовой части транзистор  $VT1$  коммутирует цепь, регулируя ток через катушки  $L1$  и конденсатор  $C1$ . Измеренные параметры тока поступает в блок измерений

(Current Meas), где они обрабатываются системой управления. Результаты измерений отображаются в блоке «Управления током», что позволяет анализировать параметры работы схемы [3].

Блок управления током заряда поддерживает постоянный ток (максимум 20 А, 0,5С). Включает Slider Gain для регулировки тока и ПИ-регулятор, который корректирует сигнал заряда с учётом потерь (рис.3).

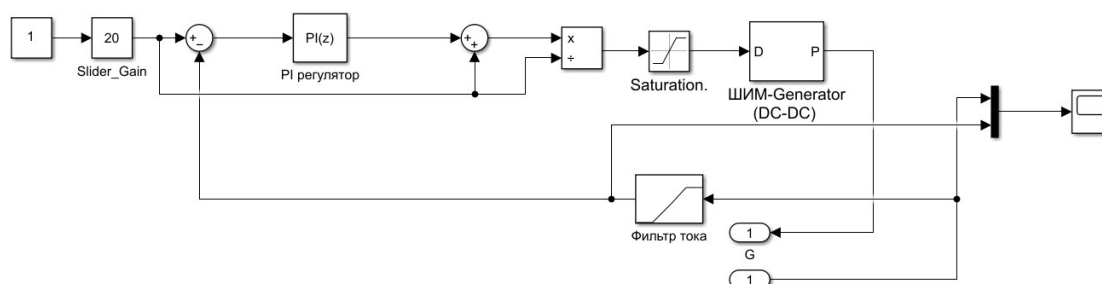


Рисунок 3 – Структура блока управления током

Фильтр тока – блок реализует одну из следующих передаточных функций в зависимости от тока [3].

Фильтр нижних частот:

$$H(s) = \frac{1}{1 + Ts}, \quad [4]$$

Фильтр верхних частот:

$$H(s) = \frac{Ts}{1 + Ts}, \quad [5]$$

где,  $s$  – оператор Лапласа;  $T$  – постоянная времени.

Saturation – блок формирует выходной сигнал, который представляет собой значение входного сигнала, ограниченное верхним и нижним значениями.

ШИМ-генератор (DC-DC) – блок выдает импульс для включения IGBT транзистора одно квадрантного преобразователя. Рабочий цикл генератора определяется входом  $D$ . Значение от 0 до 1 определяет процентную долю периода импульсов, в течение которого включен выходной сигнал [3, 7].

#### Моделирование процессов пассивной балансировки

Пассивная балансировка отводит избыточную энергию на резисторы, подключаемые к аккумуляторам с высоким напряжением [4, 5, 8]. Преимущества – простота и низкая стоимость, недостаток – потери энергии в виде тепла и низкий КПД [4, 5, 8]. Принципиальная схема системы балансировки посредством коммутируемых резисторов представлена на рисунке 4.

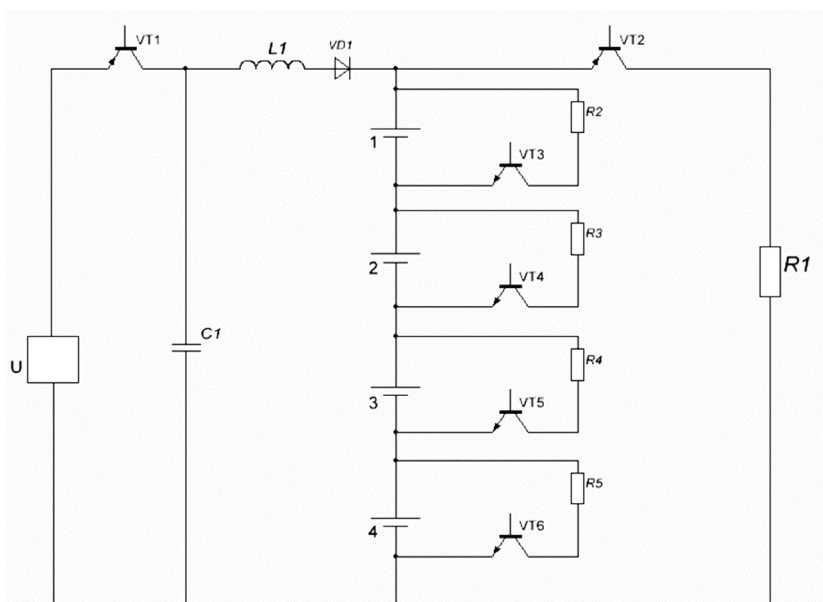


Рисунок 4 – Принципиальная схема системы пассивной балансировки посредством коммутируемых резисторов

Аккумуляторы подключаются к резисторам через IGBT-транзисторы. Балансировка прекращается при выравнивании SOC. В модели используются резисторы 15 Ом для тока 200 мА, что соответствует типовым BMS

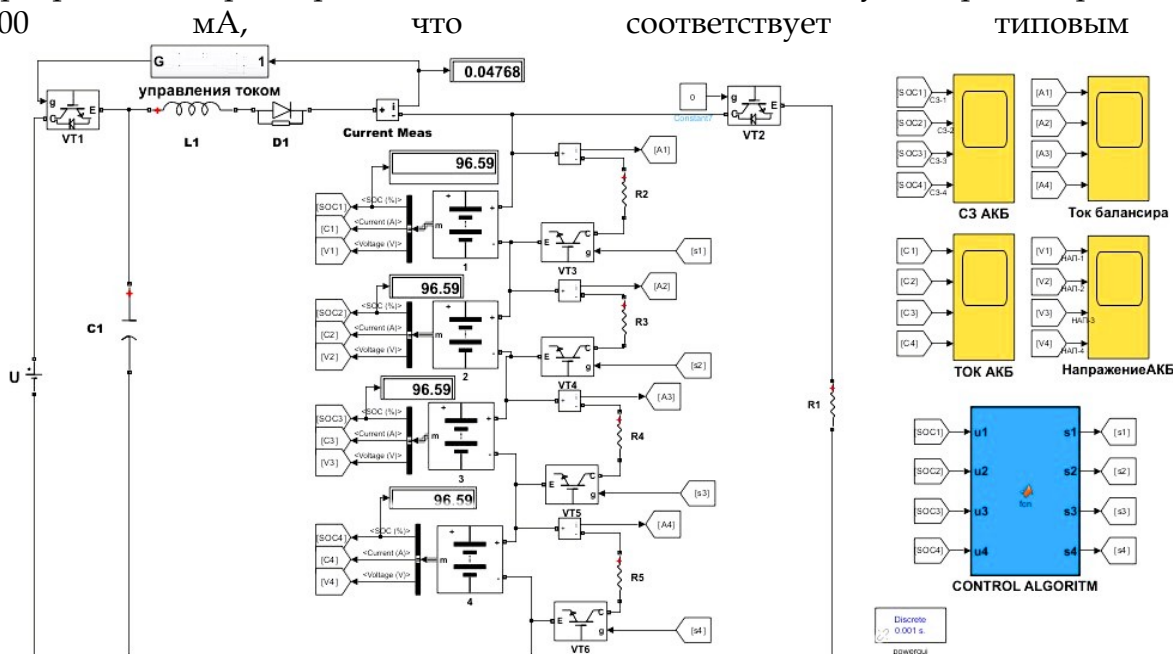


Рисунок 5 – Разработанная схема математической модели системы пассивной балансировки в MATLAB Simulink

Система снижает заряд аккумуляторов с высоким SOC, выравнивая значения, при этом энергия теряется на резисторах [4, 8]. Алгоритм сравнивает SOC всех четырёх аккумуляторов, ориентируясь на минимальное значение. Шаг расчёта –  $5e-5$ .

Результаты моделирования пассивной балансировки в условиях зарядного режима

В рамках исследования была проведена имитационная модель работы пассивной балансировки литий-ионных аккумуляторов в условиях зарядного режима [1, 2]. Начальная

СЗ аккумуляторов батареи составляла: аккумулятор 1 – 31%, аккумулятор 2 – 33%, аккумулятор 3 – 34%, аккумулятор 4 – 30%.

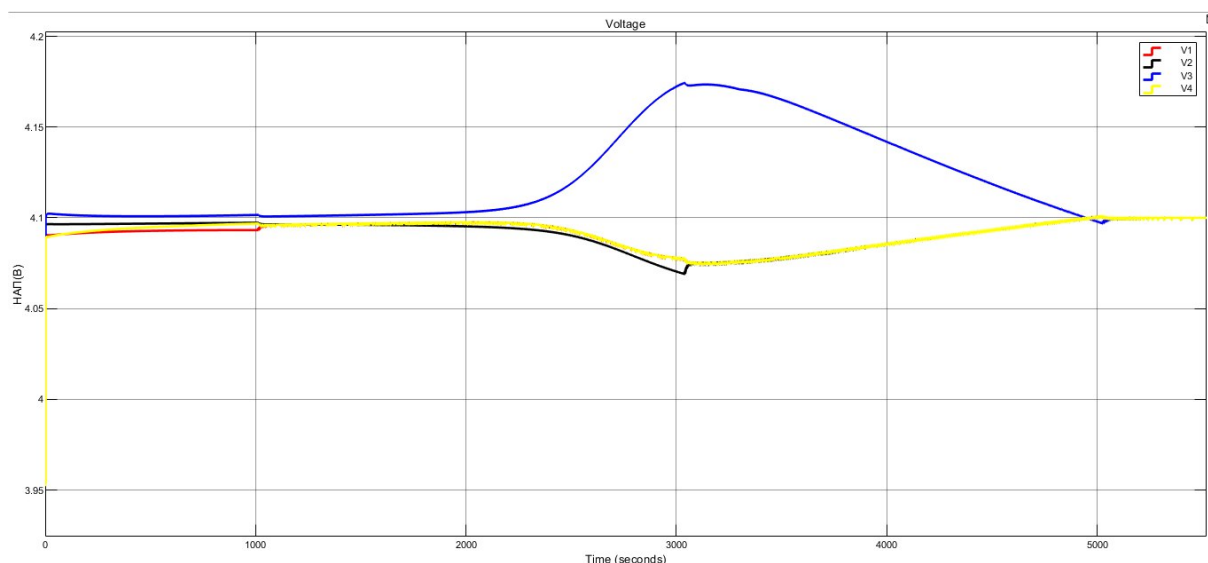


Рисунок 6 – Временные зависимости напряжения в зарядном процессе пассивной балансировки аккумуляторов

К 5000-й секунде напряжения аккумуляторов выравниваются за счёт потерь энергии на резисторах. В модели ток стабилен, но в реальных условиях возможны его колебания из-за сопротивлений и температуры компонентов. В реальных условиях можно наблюдать флуктуации тока в зависимости от сопротивлений балансира, колебаний источника питания и температуры компонентов. Временные зависимости зарядного тока в процессе пассивной балансировки аккумуляторов приложены на рисунке 7.

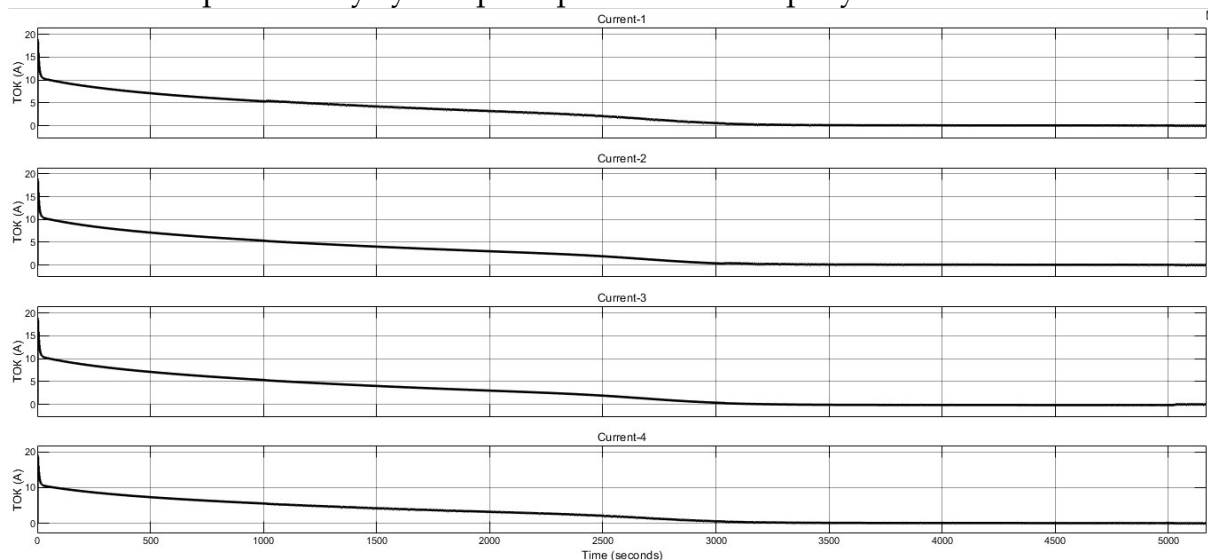


Рисунок 7 – Временные зависимости зарядного тока в процессе пассивной балансировки аккумуляторов

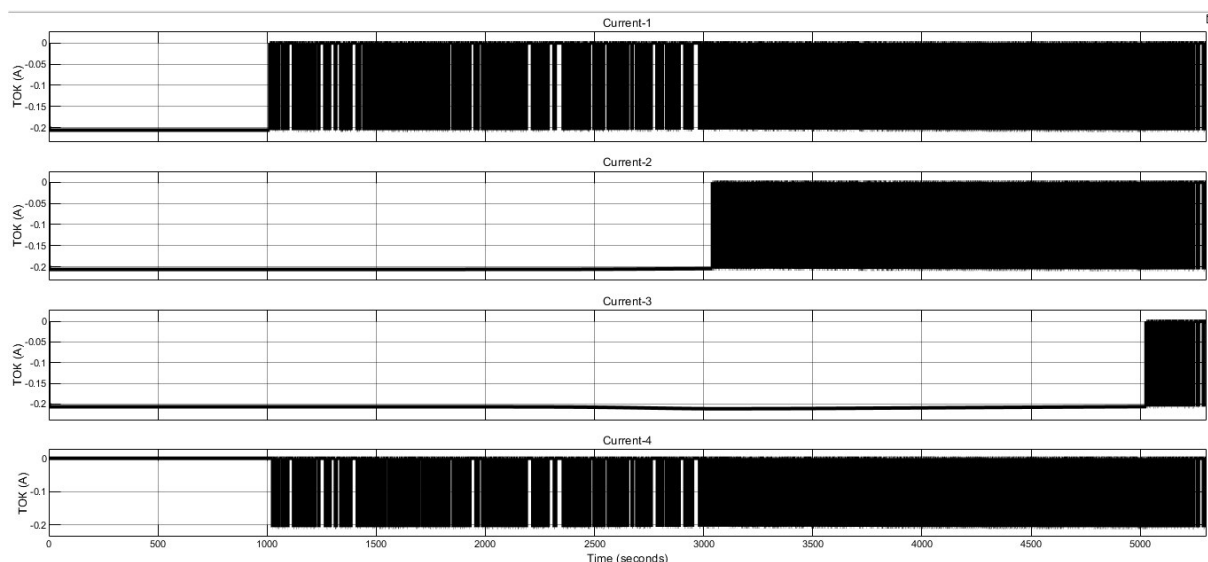


Рисунок 8 – Временные зависимости тока балансировки при заряде аккумуляторов

Пиковые значения балансирующего тока указывают на моменты подключения резисторов. В модели значения тока строго соответствуют управлению (рис. 8). В реальности могут наблюдаться колебания из-за индуктивностей и паразитных ёмкостей, а также временных задержек ключей.

В начале цикла моделирования, аккумулятором с наибольшим напряжением и СЗ является аккумулятор №2, а на аккумулятор №4 наоборот, имеет меньший СЗ. На рисунке 9 представлены временные зависимости степени заряженности аккумуляторов. При анализе результатов моделирования можно увидеть, что аккумуляторы с высоким СЗ разряжаются на шунтирующий резистор 200мА, в тоже время аккумулятор №4 с самым низким напряжением получает наибольший зарядный ток от источника (рис. 11). Во временном интервале с 0 до 5000 сек происходит выравнивание напряжений. Модель рассеивает энергию в аккумуляторах с высоким напряжением что приводит к снижению его СЗ, все напряжения аккумуляторах выравниваются на уровне около 4.1 В и степени заряда всех аккумуляторов достигают 98%. Это показывает, что система эффективно поддерживает безопасные уровни напряжения, предотвращая повреждение аккумуляторов [1, 5, 6].

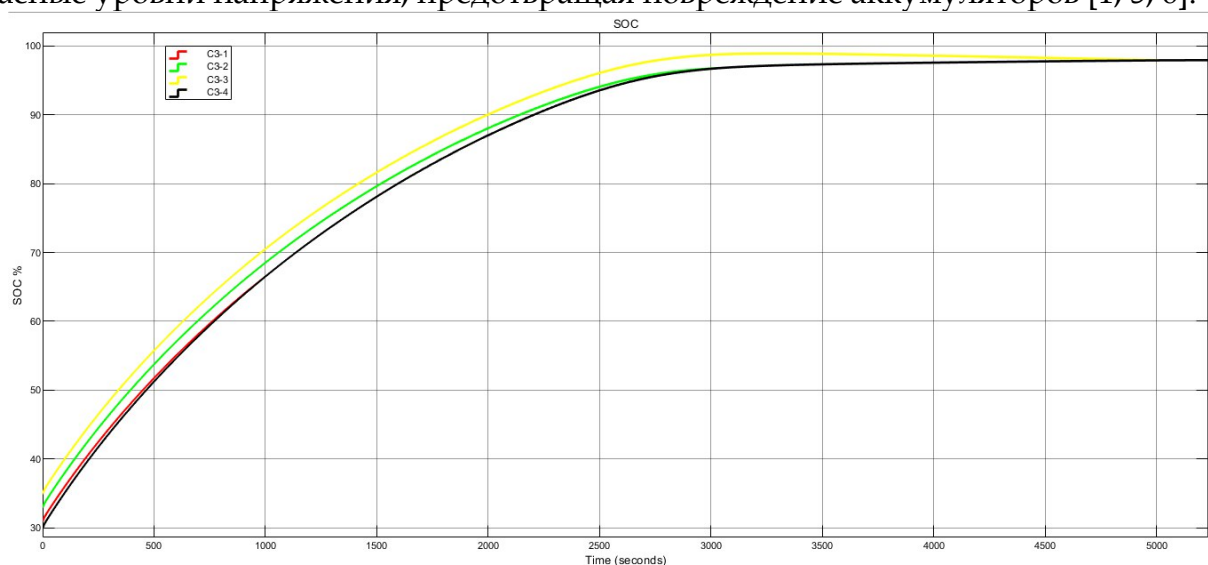


Рисунок 9 – Временные зависимости СЗ при заряде аккумуляторов

Расчеты показывают, что в зарядном процессе пассивной балансировки потери энергия (не учитывая транзисторные ключи) 2,505 кДж; время балансировки 1 час 23 минут;

КПД балансировки 55.25%. Расчет эффективности адекватен для реальных промышленных или бытовых систем [6]. В батареях с аккумуляторами большой ёмкости системы пассивной балансировки редко применяется по причине потерь энергии и значительного времени балансировки [4, 5, 8]. Пассивная балансировка демонстрирует простоту и низкую стоимость реализации. Однако её основной недостаток — значительные тепловые потери из-за диссипации энергии через резисторы и требуется много время. Это снижает общий КПД системы и требует дополнительного охлаждения [4, 5, 8].

#### Моделирование процессов активной балансировки

Активная балансировка снижает потери энергии, передавая заряд между аккумуляторами через индуктивность, что увеличивает срок службы батареи и её эффективность, особенно для электромобилей [4, 5, 7, 8]. Недостатки — сложность схемы и высокая стоимость компонентов [4, 8]. Разработанная схема системы активной балансировки на основе катушки индуктивности представлено на рисунке 10.

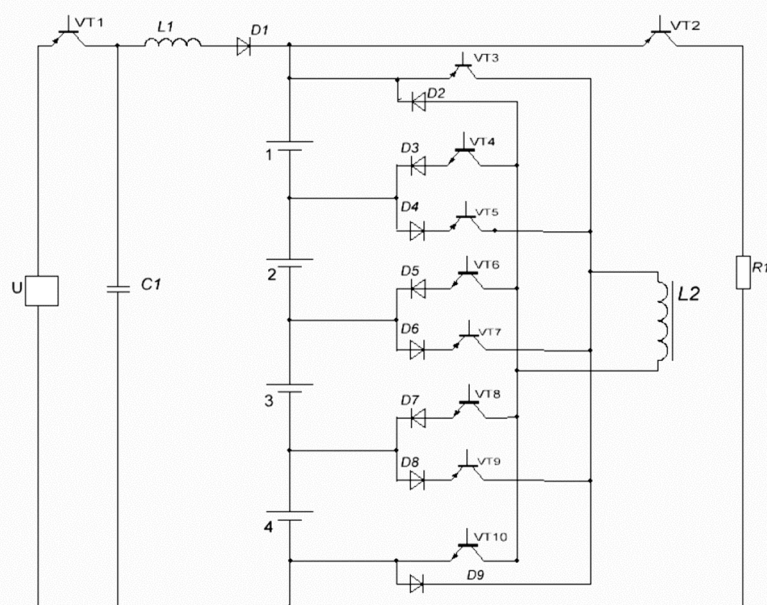


Рисунок 10 – Принципиальная схема системы активной балансировки

Сложность схемы и высокая стоимость компонентов являются его недостатки [4, 8]. Активация и контроль компонентов требуют более сложной схемы и, следовательно, активные элементы, такие как преобразователи и контроллеры, могут значительно увеличить стоимость системы. Большое количество электронных компонентов может привести к повышению вероятности поломок [5, 8]. Рисунок 11 демонстрирует разработанную схему активной балансировки аккумуляторов в MATLAB Simulink.

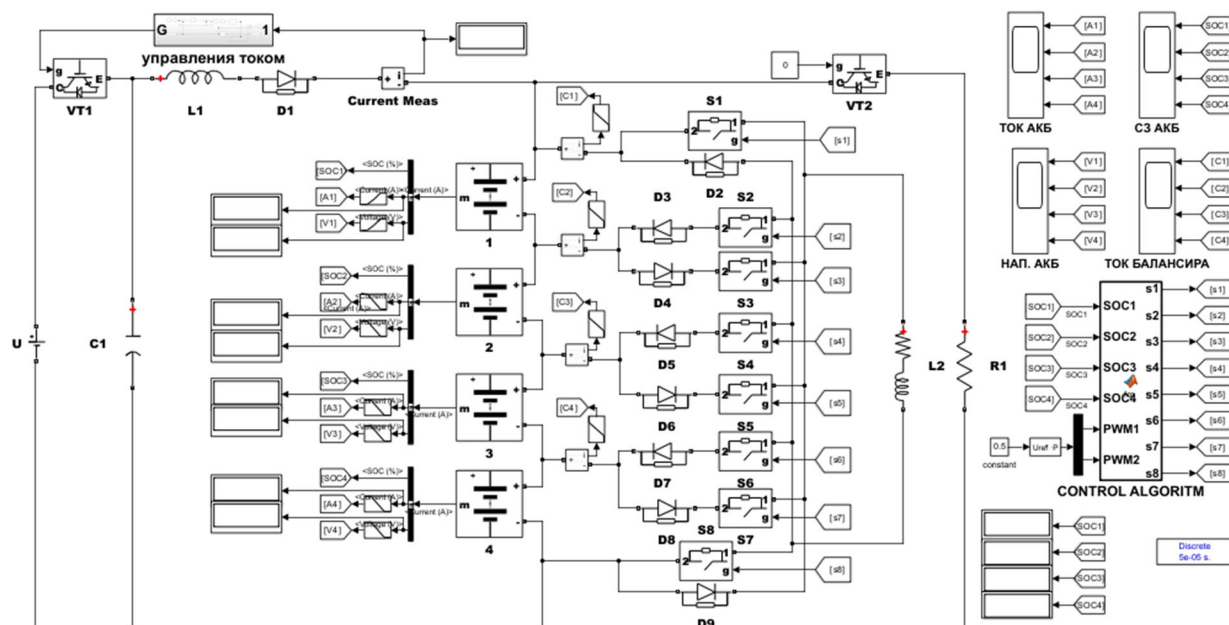


Рисунок 11 – Разработанная схема математической модели системы активной балансировки в МАТЛАБ Simulink

Аккумуляторы подключаются к катушке через диоды и транзисторный ключ (S1, ..., S8) который используется в качестве коммутационного устройства. В модели расчетный шаг составляет  $5e-5$ . Когда степень заряженности всех аккумуляторов равняется, то алгоритм балансировки прекратит свою работу переходит на ожененный режим. В модели катушка индуктивности составляет 0.01 Гн, для обеспечения балансирный ток до 4 А. Выбранные значения соответствуют наиболее распространенным серийным моделям BMS [7].

Ideal switch – блок реализует полупроводниковое устройство, управляемое сигналом. Идеальный коммутационный блок не соответствует конкретному физическому устройству. При использовании с соответствующей логикой переключения его можно использовать для моделирования упрощенных полупроводниковых устройств, таких как MOSFET, или даже силовых выключателей с прерывателем тока. Переключатель моделируется как резистор, соединенный последовательно с переключателем, управляемым сигналом логического элемента g. Идеальный коммутационный блок полностью управляется сигналом затвора. Он обладает следующими характеристиками:

Блокирует любое прямое или обратное приложенное напряжение с нулевым токовым потоком при  $g = 0$ ;

Проводит любой двунаправленный ток с квази нулевым падением напряжения при  $g > 0$ ;

Мгновенно переключается между включенным и выключенным состояниями при срабатывании;

Блок коммутатора Ideal также содержит последовательную демпфирующую схему Rs-Cs, которая может быть подключена параллельно с коммутатором ideal (между узлами 1 и 2).

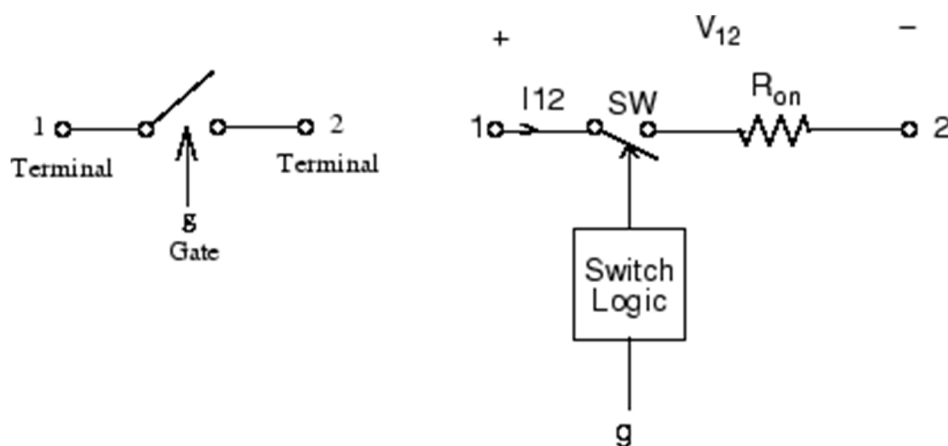


Рисунок 12 – Схема замещения блока «Ideal switch»

При активной балансировке энергия от аккумулятора с высоким SOC передается через индуктивность к менее заряженному. Для этого требуется сложное управление и мониторинг состояния элементов [3, 5, 7].

Результаты моделирования активной балансировки в условиях зарядного режима

В ходе эксперимента по реализации активной балансировки литий-ионных аккумуляторов были получены графические зависимости, отражающие работу системы в зарядном режиме [5, 7]. Рассмотрим каждый из них и проанализируем наблюдаемые процессы.

На рисунке 16, 17 и 18 представлены временные зависимости СЗ, напряжения, тока в зарядном процессе активной балансировки аккумуляторов. На рисунке 19 представлены временные зависимости тока балансировки.

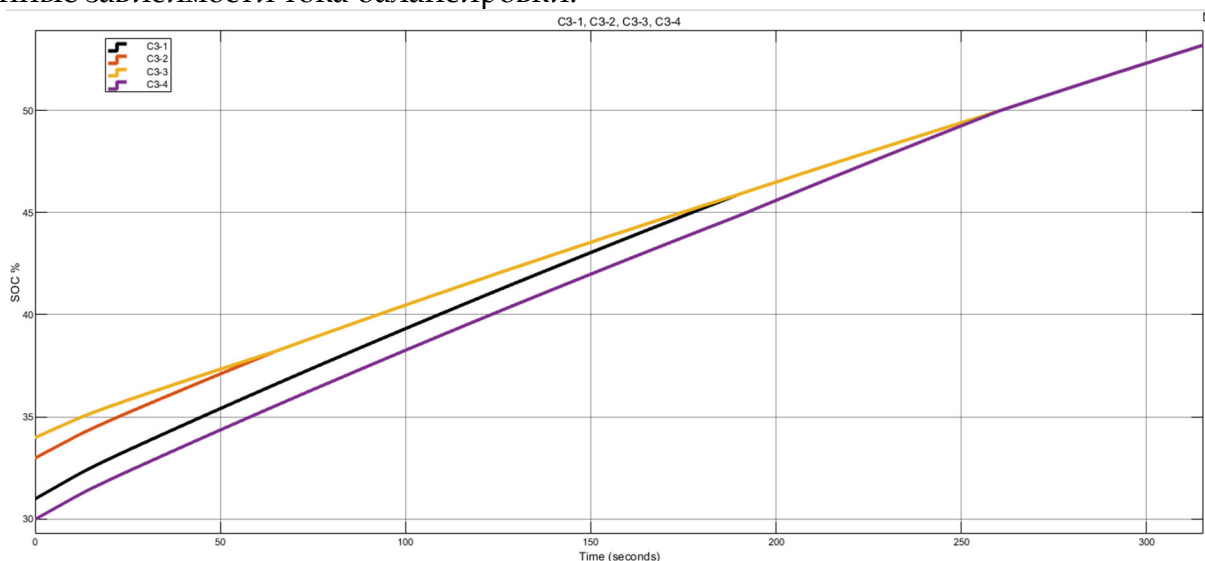


Рисунок 13 – Временные зависимости СЗ в зарядном процессе активной балансировки аккумуляторов

Рисунок 16 иллюстрирует изменение СЗ всех аккумуляторов батареи. Изначально СЗ различных аккумуляторов отличается на 4%, что указывает на неравномерность зарядного состояния. Однако по мере зарядки и включения активной балансировки различия в СЗ нивелируются, и к концу процесса наблюдается почти полное выравнивание. Это доказывает, что система балансировки эффективно справляется с основной задачей — обеспечением равномерного заряда всех аккумуляторов.

На рисунке 14 представлено изменение напряжений отдельных аккумуляторов при заряде. В начальный момент времени наблюдается заметный разброс по напряжению, что указывает на различный уровень заряда аккумуляторов. По мере работы системы активной

балансировки этот разброс уменьшается, и напряжения выравниваются. Данный результат демонстрирует корректную работу модели, обеспечивающей перераспределение заряда от более заряженных аккумуляторов к менее заряженным. Зарядный ток показывает характерные колебания, связанные с корректирующими действиями балансирующей модели. В момент активации балансировки система может изменять параметры заряда для достижения оптимального распределения энергии, что отражено в изменяющейся форме тока (рис. 15).

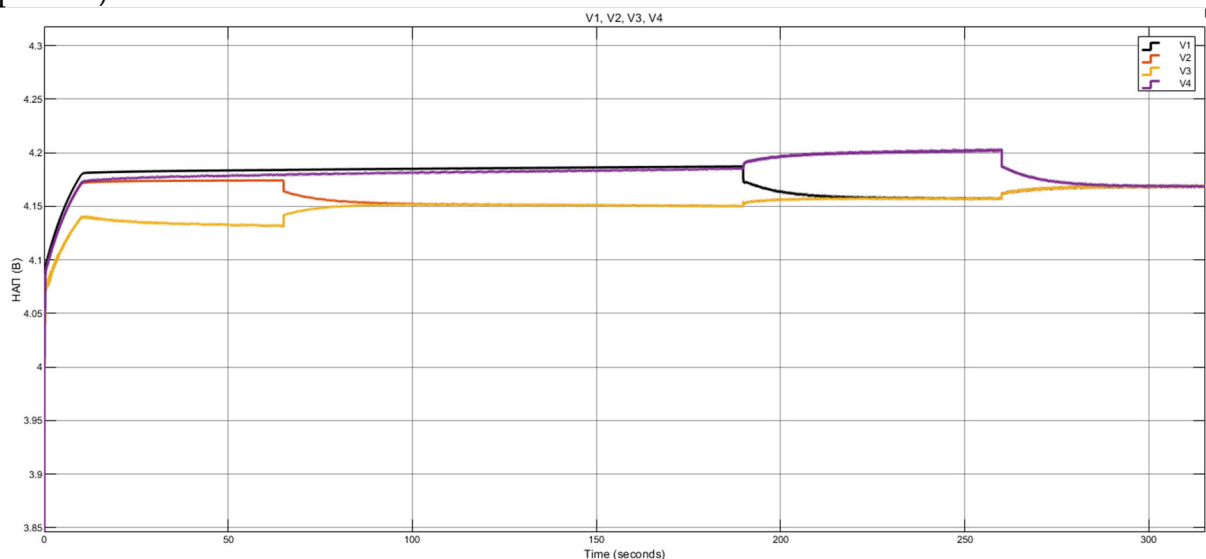


Рисунок 14 – Временные зависимости напряжения в зарядном процессе активной балансировки аккумуляторов

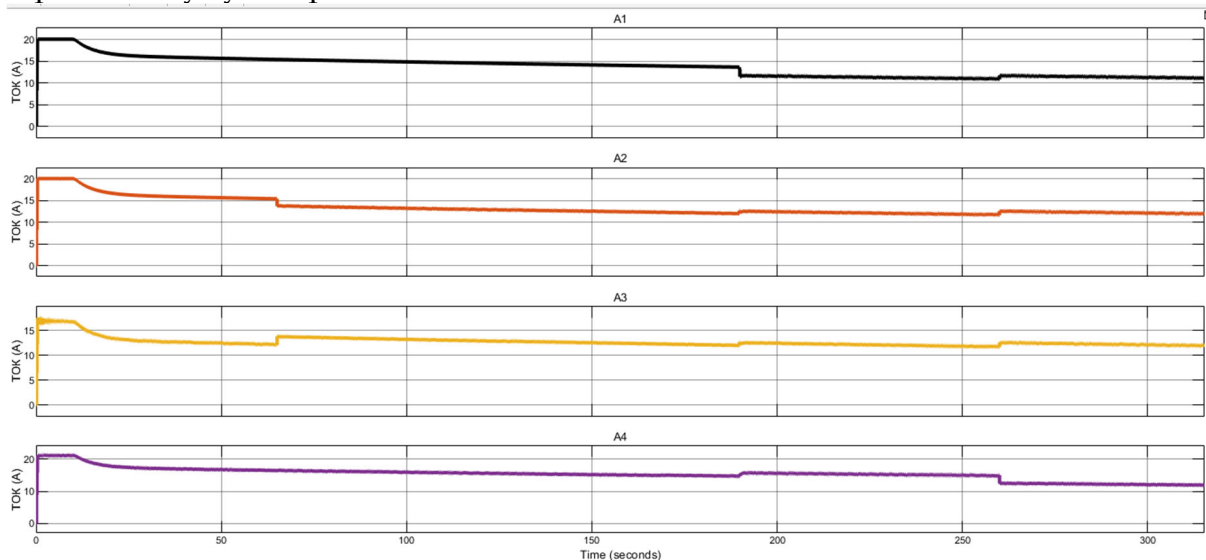


Рисунок 15 – Временные зависимости зарядного тока при активной балансировке аккумуляторов

На рисунке 16 представлено изменение формы тока, формируемого балансирующей схемой. Характер распределения тока — импульсный, направленный на выравнивание уровня энергии между аккумуляторами. Значения тока изменяются во времени, что свидетельствует об адаптивной работе балансирующей системы: ток подается на те аккумуляторы, которые требуют коррекции. Такой способ позволяет эффективно перераспределять энергию без значительных потерь.

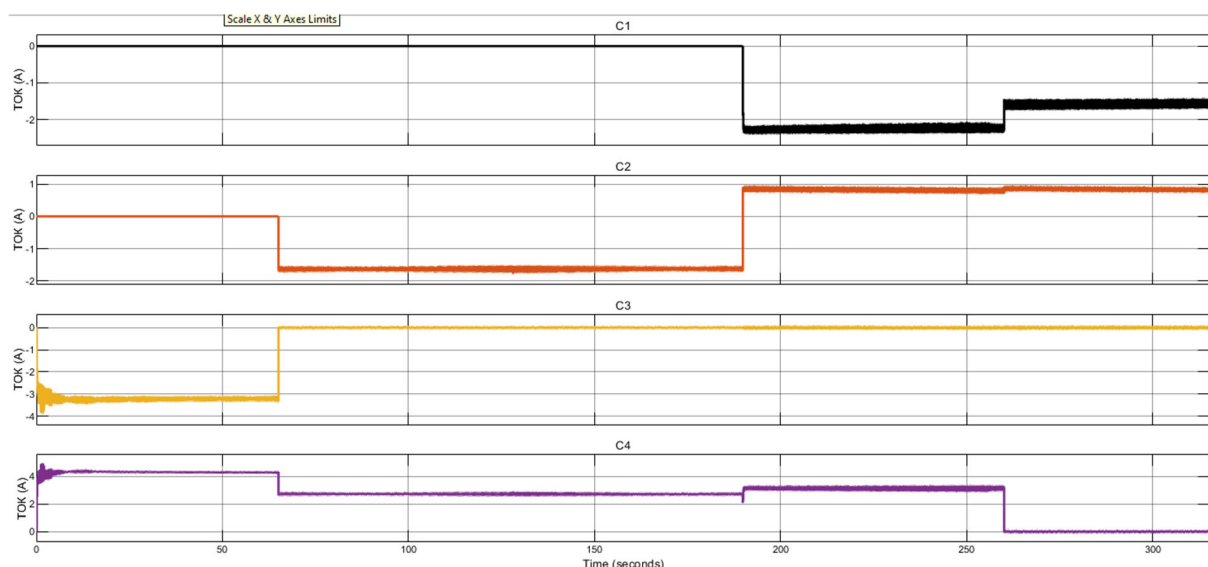


Рисунок 16 – Временные зависимости тока балансировки при заряде аккумуляторов (активная балансировка)

При анализе результатов моделирования можно увидеть, что аккумулятор №3 дает энергию на катушку до 4 А, в тоже время аккумулятор №4 получает зарядный ток от катушки до 4 А (рис.19). Во временном интервале от 0 до 300 сек. происходит активная балансировка между аккумуляторами. При достижении напряжения 4,167 В всем аккумуляторах напряжения будут сбалансированы, что в данном случае достигается при величине СЗ 55%. Далее остальное время все аккумуляторы заряжаются с одинаковым показателем [5, 7].

Результаты моделирования активной балансировки в условиях разрядного режима

В рамках исследования была проведена имитационная модель работы активной балансировки литий-ионных аккумуляторов в условиях разрядного режима [5, 7]. Начальная степень заряда элементов батареи составляла: аккумулятор 1 – 81%, аккумулятор 2 – 83.5%, аккумулятор 3 – 84%, аккумулятор 4 – 80%.

На рисунке 17, 18 и 19 представлены временные зависимости СЗ, напряжения и тока в разрядном процессе активной балансировки аккумуляторов. А на рисунке 20 представлен временные зависимости балансировочного тока.

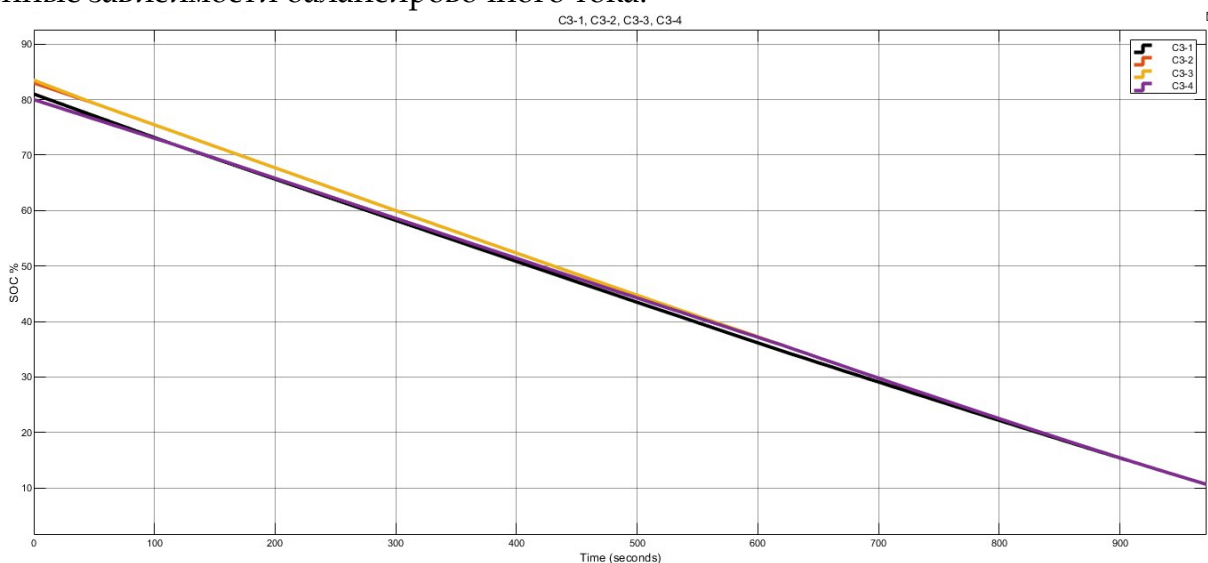


Рисунок 17 – Временные зависимости СЗ при разряде и активной балансировке аккумуляторов

Рисунок 17 демонстрирует, как СЗ аккумуляторов батареи изменяются в разрядном процессе. Видно, что балансировка способствует сближению СЗ разных аккумуляторов, предотвращая преждевременную разрядку одной из них. Это повышает стабильность и эффективность батареи в целом.

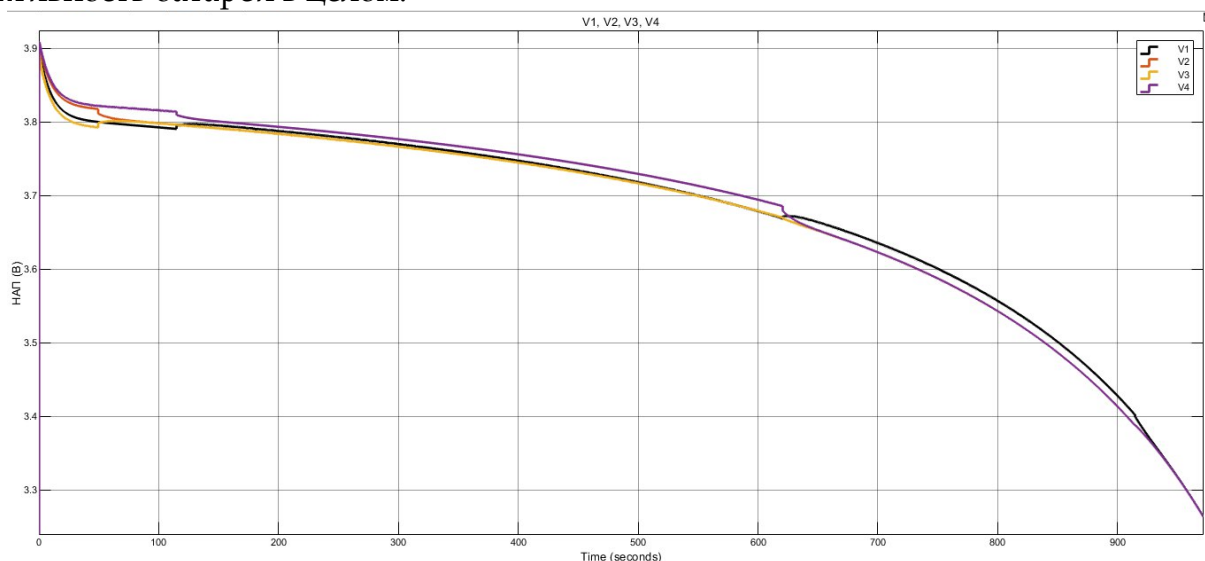


Рисунок 18 – Временные зависимости напряжения при разряде и активной балансировке аккумуляторов

Активная балансировка помогает удерживать уровни напряжения в допустимом диапазоне, минимизируя разброс между аккумуляторами (рис. 18). Это способствует более равномерной разрядке и продлевает срок службы батареи.

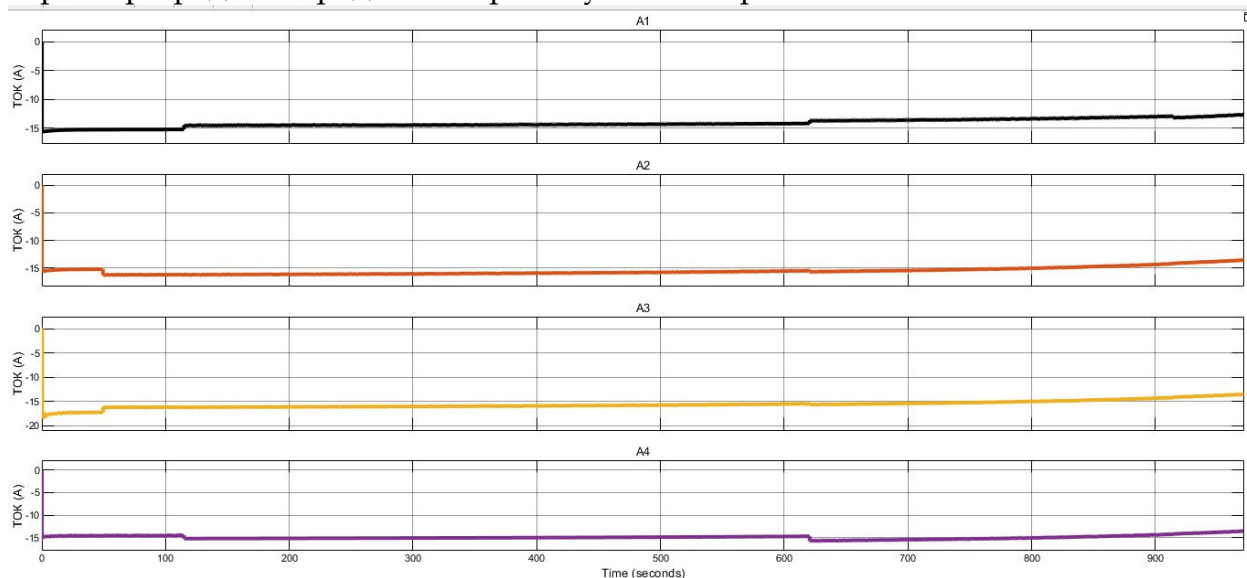


Рисунок 19 – Временные зависимости разрядного тока при активной балансировке аккумуляторов

Ток разряда показывает, как нагрузка влияет на систему. Колебания могут быть связаны с адаптацией режима балансировки. Стабильность тока в процессе указывает на корректную работу схемы разрядки и балансировки (рис. 19).

При анализе результатов моделирования можно увидеть, что аккумулятор №3 дает энергию на катушку до 3 А, в тоже время аккумулятор №4 получает зарядный ток от катушки до 4 А (рис.23). Во временном интервале от 0 до 950 сек. происходит балансировка между аккумуляторами. При снижении напряжения 3,3 В на аккумуляторе с наиболее высоким СЗ, во всех аккумуляторах напряжения будут сбалансированы, что в данном

случае достигается при величине СЗ 15%. Далее остальное время все аккумуляторы разряжаются с одинаковым показателем. Проведённый анализ демонстрирует, что активная балансировка в разрядном режиме способствует выравниванию уровней заряда и напряжений, повышая эффективность и безопасность эксплуатации литий-ионных аккумуляторов [4, 5, 7, 8].

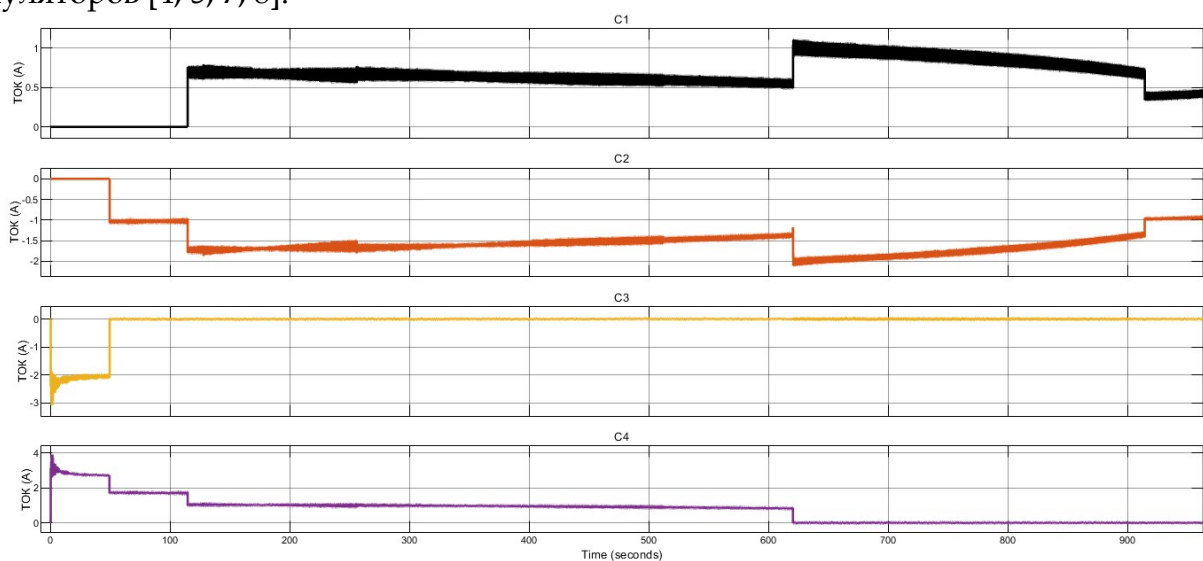


Рисунок 20 – Временные зависимости тока балансира при разрядном процессе и активной балансировке аккумуляторов

Расчеты показывают в зарядном и разрядном процессе активной балансировки потери энергии (не учитывая транзисторные ключи) 417 Дж; КПД балансировки 89.2%. Результаты моделирования подтверждают эффективность предложенного способа в реальных условиях [5, 7].

#### Выводы

1. В ходе исследования методов балансировки элементов батарей в MATLAB Simulink были проанализированы два метода: пассивная балансировка на основе шунтирующих резисторов и активная балансировка с использованием катушек индуктивности [4, 5, 8]. Моделирование позволило сравнить их эффективность, энергетические потери, сложность реализации и применимость в различных сценариях [2, 3].

2. Результаты моделирования в Simulink показывала, что активная балансировка обеспечивает более быстрое выравнивание напряжений (на 20-30% быстрее в тестовых сценариях) [5, 7].

3. Пассивная балансировка целесообразна в системах с низкими требованиями к КПД и бюджетными ограничениями (например, в бытовой электронике) [6]. Активная балансировка показала более высокую энергоэффективность за счёт перераспределения энергии между элементами через индуктивные элементы [5, 7, 8]. Несмотря на сложность схемы (необходимость управления ключами, катушками и обратными диодами), такой способ минимизирует потери и ускоряет процесс балансировки [4, 5]. Активная балансировка предпочтительна для высокопроизводительных систем, таких как электромобили или промышленные накопители, где критичны скорость, энергоэффективность и долговечность [4, 5, 7, 8].

4. Оба метода имеют свои ниши применения. Активная балансировка, несмотря на высокую начальную стоимость, окупается в энергоёмких системах, тогда как пассивная остаётся экономичным решением для простых задач [4, 5, 6, 8].

**Список литературы:**

1. Грищенко А.Г., Математическое моделирование и расчетные исследования процесса заряда тяговой литий-ионной аккумуляторной батареи легкового электромобиля / А. Г. Грищенко // Известия ТулГУ. Технические науки. -2021. Вып.9-с 549-555
2. Строганов В.И. Математическое моделирование основных компонентов силовых установок электромобилей и автомобилей с КЭУ: учеб. пособие / В.И. Строганов, К.М. Сидоров; МАДИ . – М., 2019. – 99 с.: ил., табл., граф. – Библиогр.: с. 99.
3. Кудинов Ю. И. Теория автоматического управления (с использованием MATLAB – SIMULINK) : учебное пособие / Ю. И. Кудинов, Ф. Ф. Пашенко. – 3-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Лань, 2022. – 312 с.
4. Omariba, B.; Zhang, L.; Sun, D. Review of Battery Cell Balancing Methodologies for Optimizing Battery Pack Performance in Electric Vehicles. IEEE Access 2019, 7, 129335–129352. [Google Scholar] [CrossRef]
5. Duraisamy, T.; Deepa, K. Active cell balancing for electric vehicle battery management system. Int. J. Power Electron. Drive Syst. 2020, 11, 571–579. [Google Scholar] [CrossRef]
6. Sihua Wen. Cell balancing buys extra run time and battery life [Электронный ресурс] // URL: <http://www.ti.com/lit/an/slyt322/slyt322.pdf>
7. 16-Cell Li-Ion Battery Active Balance Reference Design // URL: <http://www.ti.com/lit/ug/tidubz7/tidubz7.pdf>
8. Vardwaj, V.; Vishakha, V.; Jadoun, K.; Jayalaksmi, N.; Agarwal, A. Various Methods Used for Battery Balancing in Electric Vehicles: A Comprehensive Review. In Proceedings of the 2020 International Conference on Power Electronics & IoT Applications in Renewable Energy and its Control (PARC), Mathura, Uttar Pradesh, India, 28–29 February 2020; pp. 208–213.

**References:**

1. Grishchenko, A.G., Mathematical modelling and computational studies of the charging process of the traction lithium-ion accumulator battery of a passenger electric car / A.G. Grishchenko // Izvestia TuSU. Technical sciences. -2021. Vop.9-c 549-555
2. Stroganov, V.I. Mathematical modelling of the main components of the power plants of electric cars and cars with ECC: textbook / V.I. Stroganov, K.M. Sidorov; MADI .- M., 2019.- 99 p. : ill. - Bibliogr.: p. 99.
3. Kudinov, Yu. I. Theory of automatic control (using MATLAB - SIMULINK): textbook / Yu. I. Kudinov, F. F. Pashchenko. - 3rd ed., pers. - Saint-Petersburg: Lan, 2022. - 312 c.
4. Omariba, B.; Zhang, L.; Sun, D. Review of Battery Cell Balancing Methodologies for Optimizing Battery Pack Performance in Electric Vehicles. IEEE Access 2019, 7, 129335–129352. [Google Scholar] [CrossRef]
5. Duraisamy, T.; Deepa, K. Active cell balancing for electric vehicle battery management system. Int. J. Power Electron. Drive Syst. 2020, 11, 571–579. [Google Scholar] [CrossRef]
6. Sihua Wen. Cell balancing buys extra running time and battery life [Electronic resource] // URL: <http://www.ti.com/lit/an/slyt322/slyt322.pdf>
7. 16-Cell Li-Ion Battery Active Balance Reference Design // URL: <http://www.ti.com/lit/ug/tidubz7/tidubz7.pdf>

8. Vardwaj, V.; Vishakha, V.; Jadoun, K.; Jayalaksmi, N.; Agarwal, A. Various Methods Used for Battery Balancing in Electric Vehicles: A Comprehensive Review. In Proceedings of the 2020 International Conference on Power Electronics and IoT Applications in Renewable Energy and its Control (PARC), Mathura, Uttar Pradesh, India, 28-29 February 2020; pp. 208-213.