

УДК 621.311.68

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-5-60-72>



## НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

# Разработка и исследование системы бесперебойного питания в сетях с напряжением до 24 В

И.М. Шаров<sup>@</sup>, О.А. Демин, А.А. Судаков, А.Д. Ярлыков

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

<sup>@</sup> Автор для переписки, e-mail: [ctosworld@gmail.com](mailto:ctosworld@gmail.com)

### Резюме

**Цели.** От эффективности и стабильности систем электропитания зависит время бесперебойной работы конечных потребителей. Такие системы должны иметь возможность распределения и накопления энергии от возобновляемых источников с различными параметрами и конфигурациями. Развитие источников возобновляемой энергии постоянно увеличивает требования к системам вторичного электропитания. Целями работы являются разработка научно-обоснованных технических решений и создание эффективной системы бесперебойного вторичного питания в низковольтных сетях постоянного тока.

**Методы.** Используются современные схемотехнические решения для выполнения импульсных преобразований с высокой эффективностью. Для реализации системы контроля параметров применен гибкий программно-аппаратный комплекс.

**Результаты.** Разработана система бесперебойного питания для низковольтных сетей постоянного тока. Приведено описание работы блоков системы и расчеты основных элементов, в т.ч. и силовых. С применением современной элементной базы собран прототип системы, проведена настройка и измерение ее параметров. За счет представленных решений достигается универсальность комплекса по диапазону входных и выходных напряжений. Интегрирована поддержка современного протокола быстрой зарядки Power Delivery. Примененный контроллер зарядки Li+ аккумуляторов позволяет изменять количество заряжаемых ячеек и регулировать токи и напряжения заряда аккумуляторной батареи (АКБ). Блок мониторинга и управления отслеживает текущие параметры сети и управляет автоматикой системы. Использование микроконтроллера в качестве управляющего устройства дает возможность изменения параметров управления без конструктивных изменений благодаря редактированию программного обеспечения. Для безопасности функционирования системы применено двукратное резервирование модуля контроля параметров встроенной аккумуляторной батареи. Поддержка стандартизированного протокола обмена данными по шине I<sup>2</sup>C с отдельной шиной питания позволяет подключать любые необходимые датчики для отслеживания параметров системы. При необходимости могут быть добавлены сторонние устройства повышенной мощности, управляемые сигналом широко-импульсной модуляции (ШИМ). Приведен рекомендуемый производителем профиль заряда Li+ АКБ.

**Выводы.** Спроектированная система позволяет обеспечивать стабильное электропитание потребителей с энергопотреблением до 40 Вт в течение времени не менее 45 мин. Автоматика демонстрирует безотказное функционирование.

**Ключевые слова:** система бесперебойного питания, блок управления, контроллер заряда, протокол Power Delivery, профиль заряда, блок защиты, DC-DC преобразователь, модуль балансировки

• Поступила: 09.11.2021 • Доработана: 01.07.2022 • Принята к опубликованию: 26.08.2022

**Для цитирования:** Шаров И.М., Демин О.А., Судаков А.А., Ярлыков А.Д. Разработка и исследование системы бесперебойного питания в сетях с напряжением до 24 В. *Russ. Technol. J.* 2022;10(5):60–72. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-5-60-72>

**Прозрачность финансовой деятельности:** Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## RESEARCH ARTICLE

# Development and research of uninterruptible power supply system for networks with supply voltage up to 24 V

Igor M. Sharov<sup>@</sup>, Oleg A. Demin, Alexander A. Sudakov, Alexey D. Yarlykov

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

<sup>@</sup> Corresponding author, e-mail: [ctosworld@gmail.com](mailto:ctosworld@gmail.com)

### Abstract

**Objectives.** Due to the continuous rapid development of renewable energy sources, requirements for secondary power supply systems keep increasing from year to year. Productive uptime for end users is dependent on the efficiency and stability of the power supply system. Such systems should be able to distribute and store energy from renewable sources having various parameters and configurations. Therefore, the present work is aimed at developing technical solutions for efficient uninterruptible secondary power supply systems in low voltage DC networks.

**Methods.** Advanced circuitry solutions are used for performing pulse conversions with high efficiency. The flexible hardware-software system is used for implementing the parameter control system.

**Results.** An uninterruptible power supply for low-voltage DC networks is developed. The description of subsystems and calculations for all main elements including the power ones are given. Using a contemporary component base, the system prototype is assembled, configured, and measured by parameters. The presented solutions allow achieving the universality of the system in terms of the input and output voltage range. Support for the fast-charging Power Delivery protocol is integrated. As well as regulating the battery charging current and voltage, the Li+ battery charging controller permits changes in the number of chargeable cells. The monitoring and control unit monitors network parameters and controls the system automation. Using a microcontroller as the control device, it is possible to easily change control parameters by changing software settings. Dual redundancy of the module monitoring the built-in battery parameters is used to ensure the reliability and safety of system functioning. Support for the standardized I<sup>2</sup>C communication protocol with a separate power bus allows any necessary sensors to be connected for monitoring system parameters. External high-power devices controlled by a PWM signal may be added, if required. In the paper, the Li+ battery charging profile recommended by the manufacturer is provided.

**Conclusions.** The designed system provides stable power supply to end users at a power consumption up to 40 W for at least 45 min. The automation demonstrates reliable operation.

**Keywords:** uninterruptible power supply, control unit, charge controller, Power Delivery standard, charging curve, battery protection system, DC-DC converter, battery balancing

• Submitted: 09.11.2021 • Revised: 01.07.2022 • Accepted: 26.08.2022

**For citation:** Sharov I.M., Demin O.A., Sudakov A.A., Yarlykov A.D. Development and research of uninterruptible power supply system for networks with supply voltage up to 24 V. *Russ. Technol. J.* 2022;10(5):60–72. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-5-60-72>

**Financial disclosure:** The authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

## ВВЕДЕНИЕ

Развитие источников возобновляемой энергии и увеличение их мощности требует решения множества проблем, связанных с преобразованием и накоплением энергии [1]. Системы автоматики, используемые для этих целей, должны разрабатываться с применением новых схемотехнических решений, направленных, в т.ч. на повышение эффективности работы, быстродействия и автономности; снижение тепловыделения; безопасное предотвращение нештатной работы; экономичность и т.д. Выходное напряжение систем питания 24 В является стандартным напряжением в промышленной автоматике и на автомобильном транспорте. С помощью этих систем питания может обеспечиваться электропитание мало-мощных устройств в случае аварийных ситуаций.

Прокладка сетей для аварийного оборудования совмещена с дополнительными затратами времени и материалов. Особенно это касается удаленных потребителей, например, таких как системы аварийного освещения [2]. Эти затраты можно сократить при использовании в качестве источника напряжения отдельных блоков питания в стационарном исполнении. Так как затраты электроэнергии на функционирование датчиков малы, время функционирования таких блоков в отсутствие подзарядки является удовлетворительным.

Сети питания 24 В используются в охранных системах, а также для обеспечения систем пожарной безопасности [3]. Очевидно, что эти системы требуют безотказного питания даже в условиях пропадания сети. Компании Штиль<sup>1</sup> и Бастион<sup>2</sup> выпускают источники бесперебойного питания в виде коробов настенного крепления. Также часто напряжение 24 В применяется для питания аудиосистем, например, его использует большое число элементов аппаратуры компании MONACOR<sup>3, 4</sup>. Бесперебойные

системы в виде модулей могут быть интегрированы в устройства или же отдельным блоком обеспечивать непрерывность сети. Также имеется теоретическая возможность использования бесперебойных систем с напряжением 24 В для обеспечения безопасности грузовых автомобилей в случае пропадания напряжения сети<sup>5</sup>. Системы бесперебойного питания (СБП) в виде отдельных блоков – необходимый атрибут шкафов с аппаратурой. Эти системы должны обеспечивать безопасное стабильное функционирование в течение всего срока службы.

## 1. СИСТЕМА БЕСПЕРЕБОЙНОГО ПИТАНИЯ

Типовая СБП состоит из двух независимых устройств, которые могут работать как автономно, так и совместно, что расширяет возможности применения и реконфигурации конечного продукта. Структурная схема такой системы показана на рис. 1.

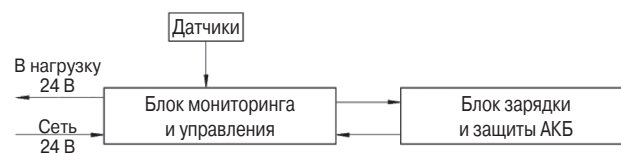


Рис. 1. Структурная схема СБП

СБП состоит из блока мониторинга и управления, блока зарядки и защиты аккумуляторной батареи (АКБ), внешних датчиков. Подобная система была реализована в [4], но с использованием электропитания от сети 220 В.

Блок мониторинга и управления предназначен для контроля параметров сети, параметров АКБ, температуры оборудования. В момент аварийного отключения сетевого напряжения блок коммутирует систему таким образом, чтобы в нагрузку было подано необходимое напряжение от блока зарядки и защиты АКБ. Тем самым обеспечивается бесперебойное питание подключенных устройств от источника резервного питания.

<sup>1</sup> <https://www.shtyl.ru/>, дата обращения 29.08.2022. [<https://www.shtyl.ru/>. Accessed August 29, 2022 (in Russ.).]

<sup>2</sup> <https://bast.ru/>, дата обращения 29.08.2022. [<https://bast.ru/>. Accessed August 29, 2022 (in Russ.).]

<sup>3</sup> <https://www.monacor.com/>, дата обращения 29.08.2022. [<https://www.monacor.com/>. Accessed August 29, 2022.]

<sup>4</sup> MONACOR INTERNATIONAL GmbH & Co. KG; 2016. 164 p. <https://www.blej24.com/catalogs/Monacor.pdf>, дата обращения 29.08.2022. [MONACOR INTERNATIONAL GmbH & Co. KG; 2016. 164 p. <https://www.blej24.com/catalogs/Monacor.pdf>. Accessed August 29, 2022.]

<sup>5</sup> MAN TGA с 2000 г. Руководство по ремонту и эксплуатации. Монолит; 2015. 794 с. [https://monolith.in.ua/catalog/rukovodstvo\\_po\\_remontu\\_man\\_tga\\_2000](https://monolith.in.ua/catalog/rukovodstvo_po_remontu_man_tga_2000), дата обращения 29.08.2022. [MAN TGA с 2000 г. Руководство по ремонту и эксплуатации (MAN TGA from 2000 y. Repair and operation manual). Monolith; 2015. 794 p. [https://monolith.in.ua/catalog/rukovodstvo\\_po\\_remontu\\_man\\_tga\\_2000](https://monolith.in.ua/catalog/rukovodstvo_po_remontu_man_tga_2000). Accessed August 29, 2022 (in Russ.).]

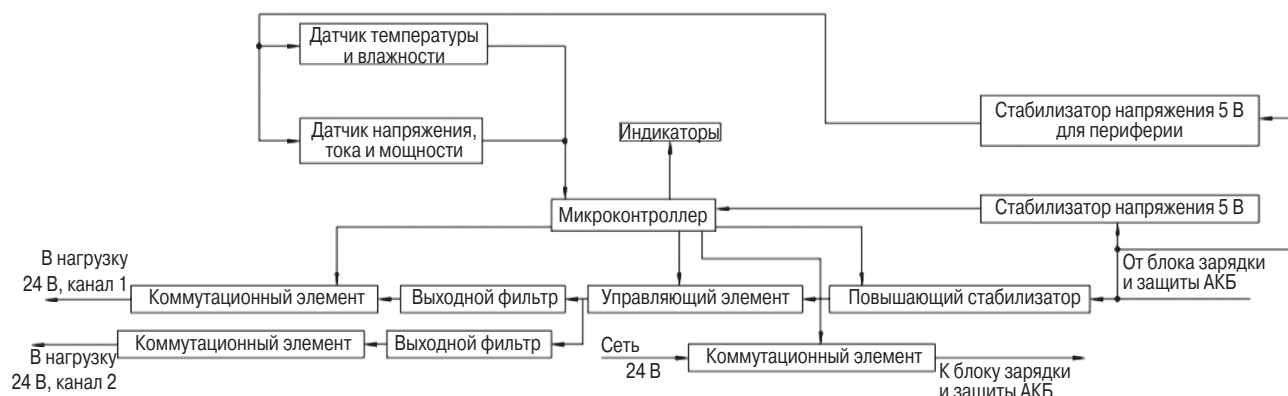


Рис. 2. Структурная схема блока мониторинга и управления

Помимо этого, осуществляется контроль выходных токов и мощности при работе от системы бесперебойного питания. Если происходит превышение допустимой потребляемой мощности от СБП, то нагрузка, подключенная к системе, автоматически отключается.

Блок зарядки и защиты АКБ предназначен для зарядки встраиваемых аккумуляторов и выравнивания потенциала между ячейками. Если встроенная литий-ионная батарея разряжена, то имеется возможность подачи резервного питания от любых аккумуляторов с напряжением больше 9 В, например, от широко распространенных свинцовых автомобильных АКБ. Также подача резервного питания возможна от потребительских портативных аккумуляторов с поддержкой протокола быстрой зарядки (Power Delivery). Блок предотвращает «перезаряд» и глубокий разряд АКБ, контролирует термистором температуру встроенного АКБ. Таким образом дублируются критически важные функции защиты системы.

## 2. БЛОК МОНИТОРИНГА И УПРАВЛЕНИЯ

Рассмотрим блок мониторинга и управления, реализованный на микроконтроллере (МК) ATmega 168 (Amtel Corporation (Microchip), США) [5]. Используется версия МК с тактовой частотой 16 МГц, напряжением питания и логических уровней 5 В<sup>6</sup>. Эта версия выбрана из-за низкой себестоимости и доступности, что особенно актуально в условиях кризиса в полупроводниковой промышленности. При необходимости он может быть заменен без серьезных трудозатрат на более производительный

и энергоэффективный с незначительными доработками принципиальной схемы. Структурная схема блока мониторинга и управления приведена на рис. 2.

Рассмотрим принципиальную схему блока мониторинга и управления, представленную на рис. 3, 5, 6. Он содержит два линейных стабилизатора напряжения 5 В, МК, индикаторы состояния, повышающий стабилизатор, три коммутационных элемента, выходные фильтры, управляющий элемент, и разъем X1 для подключения датчиков по I<sup>2</sup>C шине с подачей питания.

Повышающий стабилизатор напряжения U1 (рис. 3) реализован на микросхеме XL6009 (XLSEMI, Китай). Его входное напряжение изменяется в пределах от 5 В до  $U_{\text{вых}}$ , КПД преобразования может достигать 94% в зависимости от разницы между входным и выходным напряжениями. Частота преобразования составляет 400 кГц. Максимальный коммутируемый ток – 4 А. Встроены функции плавного запуска, термозащиты, токоограничения<sup>7</sup>. Выходное напряжение рассчитывается по формуле:

$$U_{\text{вых}} = 1.25 \left( 1 + \frac{R_{13}}{R_{14}} \right) = 1.25 \left( 1 + \frac{18 \text{ кОм}}{1 \text{ кОм}} \right) = 23.75 \text{ В.} \quad (1)$$

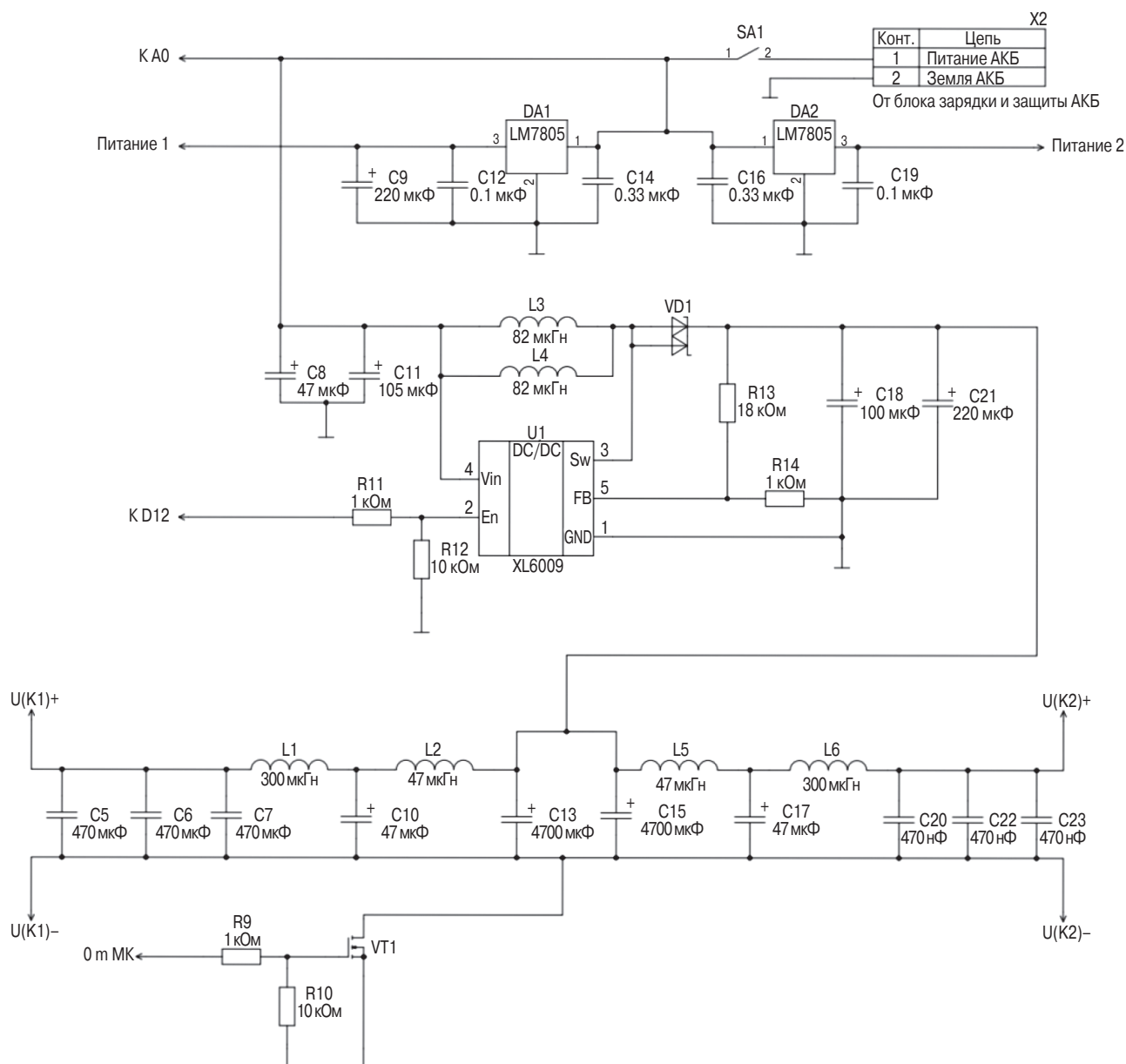
Индуктивности L3 и L4 включены параллельно для обеспечения заданного максимального тока преобразования. Микросхема преобразователя имеет управляющий вход для ее включения, который подключен к выводу МК через токоограничивающий резистор R11. Резистор R12 соединяет вывод микросхемы с «землей», чтобы исключить самопроизвольное срабатывание.

В качестве управляющего элемента VT1 используется полевой транзистор PSMN4R3-30BL (Nexperia, Китай), который управляется ШИМ-сигналом, поступающим с МК, как в [6]. Данный транзистор подобран с учетом рассеиваемой мощности и требуемых выходных характеристик<sup>8</sup>, т.к. управляющее

<sup>7</sup> Switching current boost / buck-boost / inverting DC/DC converter, XL6009. Xinlong Semiconductor Technology; 2017. 8 p.

<sup>8</sup> N-channel MOSFET in D2PAK, PSMN4R3-30BL. Nexperia B.V.; 2017. 15 p.

<sup>6</sup> High performance, low power AVR® 8-bit microcontroller, ATmega48/V/88/V/168/V, DS40002074A. Microchip Technology; 2018. 390 p. [https://www.microchip.com/content/dam/mchp/documents/OTH/ProductDocuments/DataSheets/ATmega48\\_88\\_168\\_megaAVR-Data-Sheet-40002074.pdf](https://www.microchip.com/content/dam/mchp/documents/OTH/ProductDocuments/DataSheets/ATmega48_88_168_megaAVR-Data-Sheet-40002074.pdf), дата обращения 29.08.2022. [High performance, low power AVR® 8-bit microcontroller, ATmega48/V/88/V/168/V, DS40002074A. Microchip Technology; 2018. 390 p. [https://www.microchip.com/content/dam/mchp/documents/OTH/ProductDocuments/DataSheets/ATmega48\\_88\\_168\\_megaAVR-Data-Sheet-40002074.pdf](https://www.microchip.com/content/dam/mchp/documents/OTH/ProductDocuments/DataSheets/ATmega48_88_168_megaAVR-Data-Sheet-40002074.pdf). Accessed August 29, 2022.]



**Рис. 3.** Принципиальная схема питания блока мониторинга и управления. Здесь и на следующих рисунках обозначения элементов схем соответствуют ГОСТ 2.710-81<sup>9</sup>

напряжение, формируемое делителями R9, R10, составляет всего 4.5 В.

По выходной характеристике транзистора (рис. 4) видно, что при управляющем напряжении 4.5 В транзистор может коммутировать постоянный ток до 100 А.

Это значение намного выше необходимого для работы в установившемся режиме, однако при подаче питания на выходные фильтры возникают очень большие токи в цепи между элементами C13, C15 и C21, т.к. конденсаторы C13 и C15 имеют номинальные емкости 4700 мкФ. Эквивалентное

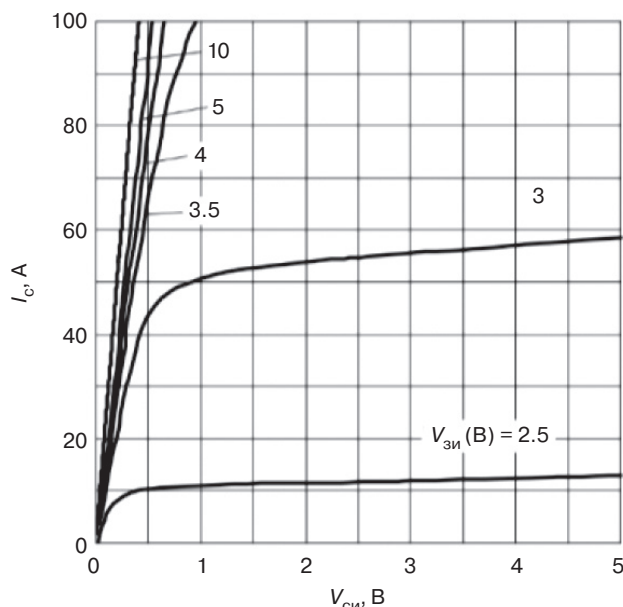
последовательное сопротивление данных конденсаторов составляет 55 мОм, пиковый ток при отпирании затвора транзистора<sup>10</sup> составляет:

$$I_{\text{peak}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{R_{\text{ESR}}} = \frac{23.75}{0.055} = 431.8 \text{ А}, \quad (2)$$

где  $U_{\text{ВЫХ}}$  – напряжение источника, а  $R_{\text{ESR}}$  – эквивалентное последовательное сопротивление конденсатора. Здесь не учитываются последующие емкостные элементы фильтра, т.к. ток будет ограничен

<sup>9</sup> ГОСТ 2.710-81. Единая система конструкторской документации. Обозначения буквенно-цифровые в электрических схемах. М.: Издательство стандартов; 1985. [GOST 2.710-81. Unified system for design documentation. Alpha-numerical designations in electrical diagrams. Moscow: Izdatel'stvo standartov; 1985 (in Russ.).]

<sup>10</sup> Матвиенко В.А. Основы теории цепей: учебное пособие для вузов. Екатеринбург: УМЦ УПИ; 2016. 162 с. [Matvienko V.A. Fundamentals of electric circuit theory: Textbook for universities. Yekaterinburg: UMTs UPI; 2016. 162 p. (in Russ.).]



**Рис. 4.** Выходная характеристика транзистора PSMN4R3-30BL. Зависимость тока стока  $I_c$  от напряжения сток-исток  $V_{си}$  при фиксированных напряжениях затвор-исток  $V_{зи}$

повышающим стабилизатором напряжения U1, но только после того, как разрядятся его выходные емкости. Максимальный пиковый ток выбранного транзистора составляет 465 А, следовательно, его работоспособность не будет нарушена.

Каждый выходной фильтр представляет собой лестничный LC-фильтр, описанный в [7]. Они применяются для дополнительного сглаживания пульсаций после повышающего преобразователя<sup>11</sup>.

Оба линейных стабилизатора напряжения 5 В выполнены на микросхемах LM7805 (Inchange Semiconductor Company, Китай). Конденсаторы C14 и C16 фильтруют входные пульсации, а C9, C12, C19 – выходные.

Коммутационные элементы K1–K3 (рис. 5) реализованы на реле HK19F-DC5V-SHG. (Ever-Way Industry Company, Китай). Заявленный ток коммутации – 2 А при постоянном напряжении 30 В<sup>12</sup>. Реле управляется с МК через оптроны DA3–DA5. Резисторы R15–R17 ограничивают ток через оптрон и светодиод, служащий для индикации состояния элементов K1–K3. Такая реализация позволяет гальванически развязать вывод МК и реле для защиты МК от сетевого напряжения, как описано в [8].

Все используемые датчики подключены по шине I<sup>2</sup>C (рис. 6). В качестве датчика тока,

напряжения и мощности используется микросхема INA219 (Texas Instruments, США), которая определяет ток и напряжение с погрешностью  $\pm 0.2\%$ <sup>13</sup>. В роли датчика температуры и влажности используется микросхема SHT2 (Sensirion, Швейцария), обладающая погрешностью определения относительной влажности  $\pm 2\%$ , температуры  $\pm 0.3^\circ\text{C}$ <sup>14</sup>.

В роли индикаторов выступают светодиоды HL1–HL4, которые отображают оставшийся процент заряда АКБ и режим работы системы; SB1 – кнопка сброса МК. Тактовые кнопки SB2 и SB3 служат для принудительного отключения выходных каналов СБП. Они подключены к аналоговому входу МК DD1 через резистивный делитель.

### 3. БЛОК ЗАРЯДКИ И ЗАЩИТЫ АКБ

Рассмотрим подробнее блок зарядки и защиты АКБ, структурная схема которого приведена на рис. 7.

Нагрузкой для этого блока в спроектированной системе выступает блок управления и мониторинга. Принципиальная схема блока зарядки и защиты АКБ представлена на рис. 8, 10, 11. Автономный импульсный контроллер заряда Li+ АКБ реализован на микросхеме MAX1737 (Maxim integrated, США) (рис. 8). Она контролирует входной ток от источника, выходной ток заряда и напряжение батареи. Допустимый диапазон напряжения зарядки одной ячейки: 4.0...4.4 В.

Внешний термистор подключается через разъем X1. Резистор R1 10 кОм устанавливается, если отсутствует необходимость в контроле температуры. При падении напряжения встроенной батареи ниже минимального порогового значения  $U_{\min}$  (3), срабатывает система защиты от глубокого разряда, и нагрузка отключается транзисторами VT1 и VT2.

$$U_{\min} = 2.5N \text{ В}, \quad (3)$$

где  $N$  – количество подключенных ячеек.

Li+ аккумуляторы заряжаются по специальному профилю, отличному, например, от классических свинцовых АКБ. Это необходимо для увеличения срока службы аккумуляторов, что подробно изложено в [9], и рекомендуется для зарядки многими производителями Li+ батарей. Диаграмма напряжения и тока заряда, а также диаграммы напряжений инверсных выводов индикации этапа быстрой зарядки

<sup>11</sup> Output noise filtering for DC/DC power modules. <https://www.ti.com/lit/an/snva871/snva871.pdf>, дата обращения 29.08.2022. [Output noise filtering for DC/DC power modules. <https://www.ti.com/lit/an/snva871/snva871.pdf>. Accessed August 29, 2022.]

<sup>12</sup> Subminiature DIP Relay, HK19F. Ever-Way Industry Company Limited; 2011. 3 p.

<sup>13</sup> Угрюмов Е.П. *Цифровая схемотехника*: учеб. пособие для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. СПб.: БХВ-Петербург; 2007. 800 с. [Ugryumov E.P. *Digital circuitry*: Textbook for universities. 2nd ed. BHV-Petersburg; 2007. 800 p. (in Russ.).]

<sup>14</sup> Humidity and temperature sensor IC, SHT21. SENSIRION. CMOSens®; 2014. 15 p.

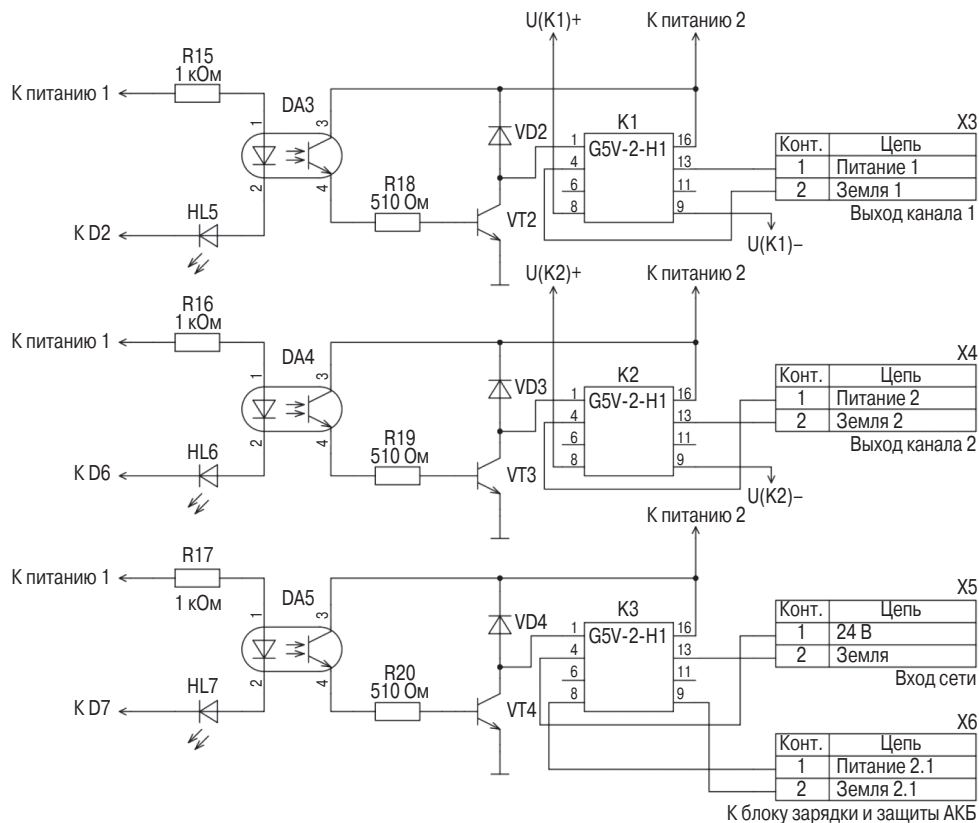


Рис. 5. Принципиальная схема коммутационных элементов блока мониторинга и управления

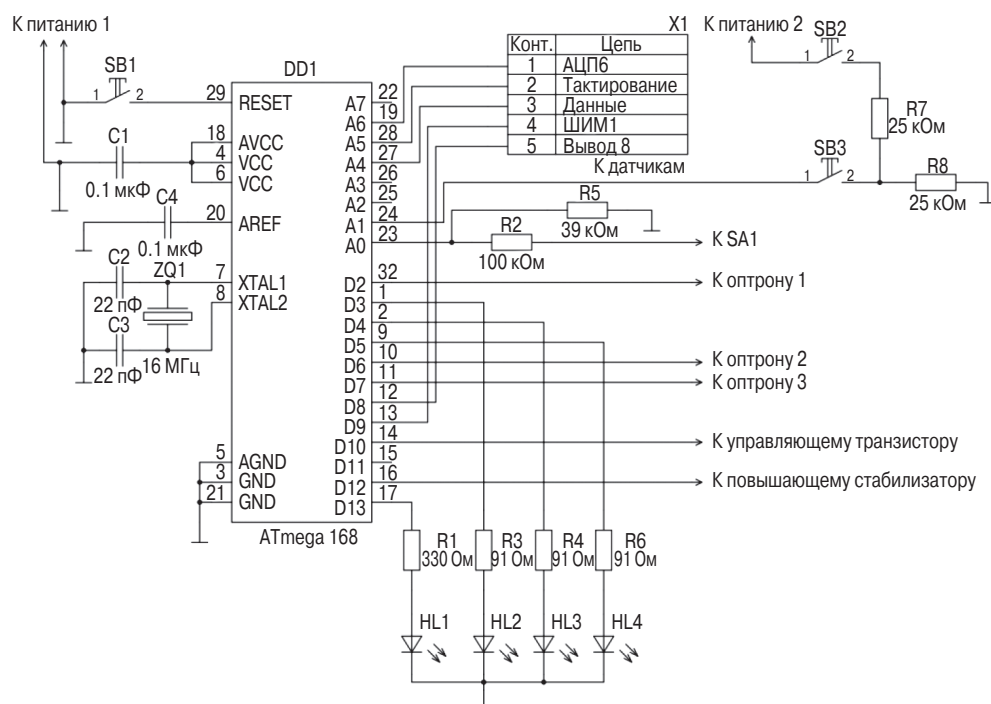


Рис. 6. Принципиальная схема микроконтроллера блока мониторинга и управления

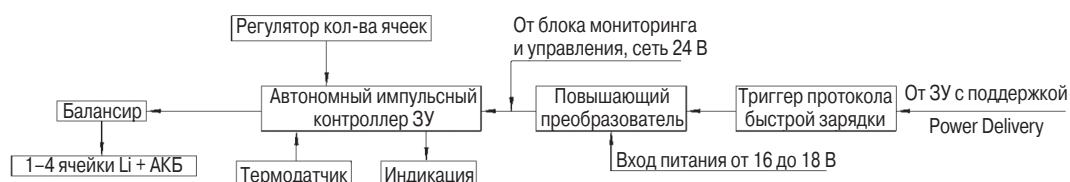


Рис. 7. Структурная схема блока зарядки и защиты АКБ

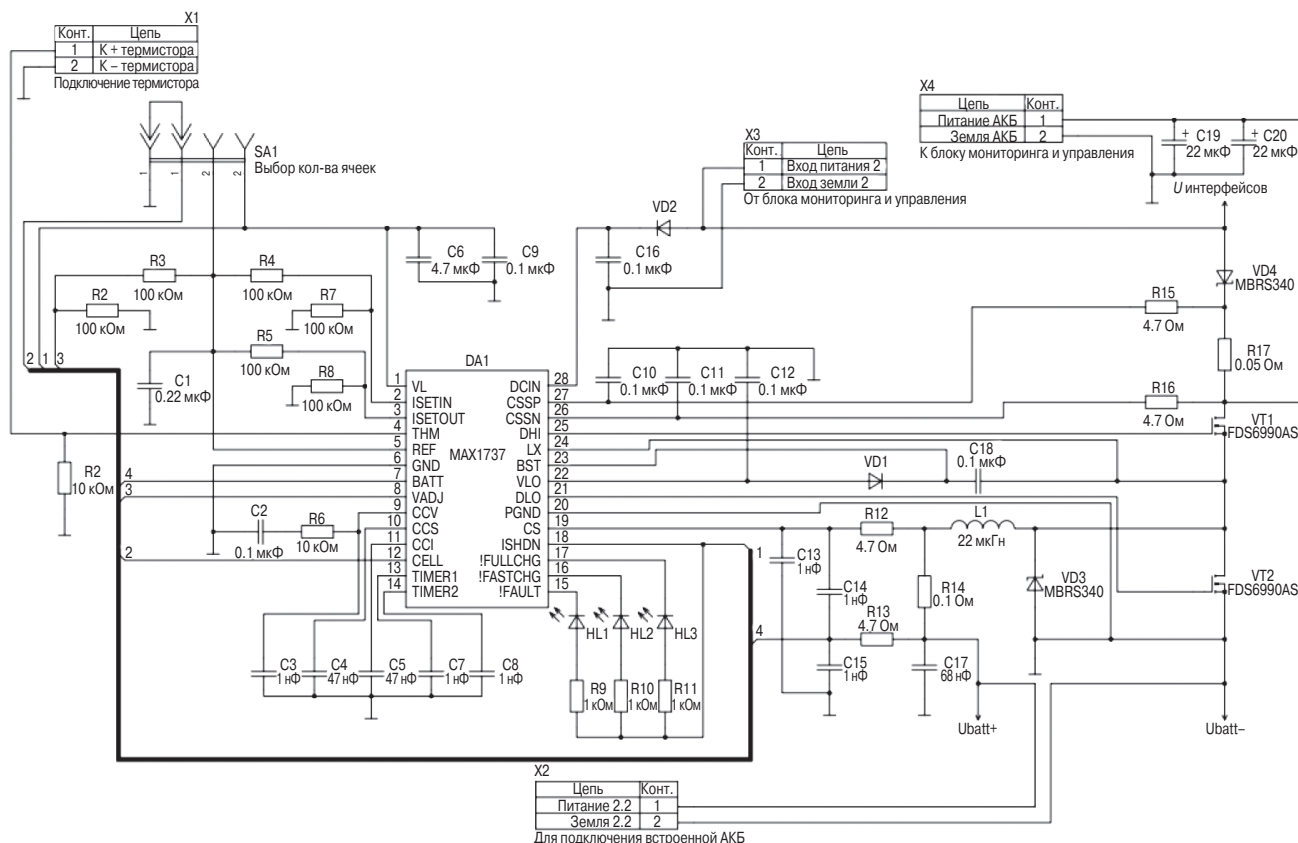


Рис. 8. Принципиальная схема контроллера блока зарядки и защиты АКБ

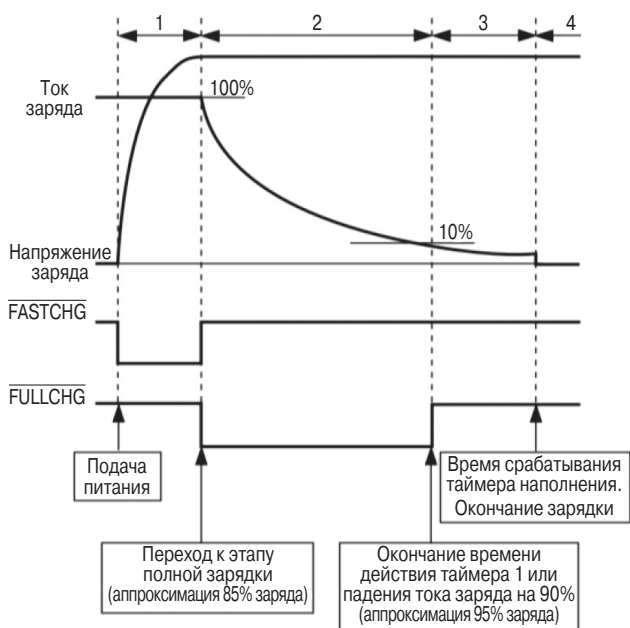


Рис. 9. Диаграммы напряжений и токов профиля заряда

(FASTCHG) и этапа полной зарядки (FULLCHG) представлены на рис. 9.

Весь цикл зарядки разбит на 4 основных этапа:

- 1) этап быстрой зарядки, при котором напряжение на АКБ изменяется нелинейно, а ток остается постоянным;

- 2) этап полной зарядки, при котором напряжение на батарее достигает заданной величины и остается постоянным, а ток уменьшается;
- 3) этап наполнения, при котором начальное значение тока уменьшается на 90% и изменение тока становится практически линейным;
- 4) этап завершения, при котором ток заряда становится равным нулю.

Максимальная длительность каждого из циклов задается внутренними таймерами контроллера заряда. Номинал конденсатора C8 определяет время работы таймера 2, отвечающего за этап быстрой зарядки. Для значения 1 нФ это время составляет 90 мин. Если контроллер не успевает за отведенное таймером 2 время перейти к следующему этапу цикла зарядки, то микросхема отключает дальнейший заряд батареи и включает индикатор ошибки.

Номинал конденсатора C7 задает время работы таймера 1, отвечающего за этап полной зарядки и этап наполнения, а также за время предварительной подготовки. Для значения 1 нФ время этапа полной зарядки составляет 90 мин, этапа наполнения – 45 мин. В предварительную подготовку входит проверка напряжения ячеек на минимальное пороговое значение и проверка температуры. Время проверки составляет 7.5 мин. Если показания не соответствуют рабочему диапазону, контроллер выдает ошибку и цикл зарядки не начинается.

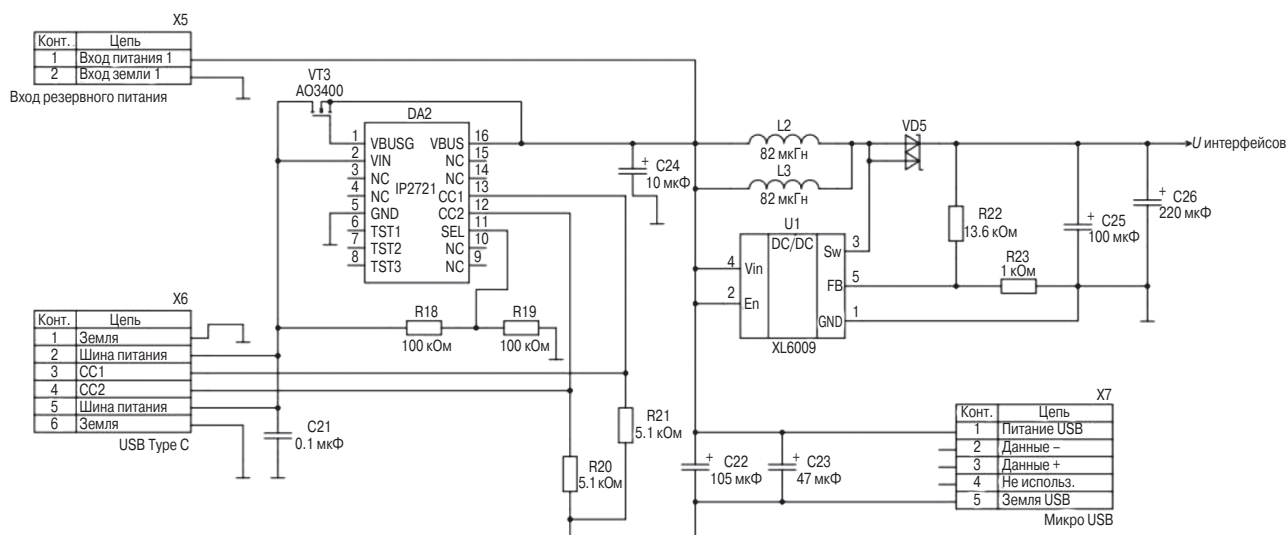


Рис. 10. Принципиальная схема повышающего преобразователя блока зарядки и защиты АКБ

Индикационные светодиоды HL1–HL3 подключены через токоограничивающие резисторы R9–R11 к инверсным выводам индикации состояния контроллера заряда FAULT, FASTCHG, FULLCHG.

Элементы VT1, VT2, C17, L1, VD3 образуют понижающий преобразователь постоянного напряжения. Затворами транзисторов управляет микросхема DA1 (Maxim integrated, США). Она генерирует ШИМ-сигнал с переменным коэффициентом заполнения, зависящим от входного напряжения и напряжения заряда батареи, и частотой 300 кГц. Заявленная эффективность преобразования находится в пределах от 85% до 90%<sup>15</sup>. Выходное напряжение находится в диапазоне от 6 до 28 В, но входное напряжение должно быть выше, чем минимальное напряжение питания контроллера заряда:

$$U_{\min \text{ chg}} = U_{\min} + 1.6 \text{ В.} \quad (4)$$

Падение напряжения на резисторе R17 задает входной ток контроллера заряда  $I_{\text{in}}$ , который рассчитывается по формуле:

$$I_{\text{in}} = \frac{0.1}{R_{17}} \cdot \frac{U_{\text{ISETIN}}}{U_{\text{REF}}} = 1 \text{ А,} \quad (5)$$

где  $U_{\text{ISETIN}}$  – напряжение на выводе 2 (SETIN) DA1, задаваемое делителем напряжения на 2, образованного резисторами R4 и R7 с опорным напряжением на входе  $U_{\text{REF}} = 4.166 \dots 4.242 \text{ В}$ .

Падение напряжения на резисторе R14 регулирует ток заряда АКБ  $I_{\text{chg}}$  и рассчитывается по формуле:

$$I_{\text{chg}} = \frac{0.2}{R_{14}} \cdot \frac{U_{\text{ISETOUT}}}{U_{\text{REF}}} = 1 \text{ А,} \quad (6)$$

<sup>15</sup> Stand-alone switch-mode lithium-ion battery-charger controller, MAX1737, Data Sheet 19-1626. Maxim Integrated; 2017. 19 p.

где  $U_{\text{ISETOUT}}$  – напряжение на выводе  $I_{\text{SETOUT}}$ , задаваемое делителем напряжения на 2, образованного резисторами R5 и R8 с опорным напряжением на  $U_{\text{REF}}$  входе.

Повышающий преобразователь в блоке зарядки и защиты АКБ (рис. 10) используется для формирования напряжения питания контроллера заряда. За счет этого диапазон входных напряжений зарядки встроенного АКБ значительно расширяется и составляет от 5 до 28 В независимо от того, сколько ячеек подключено, т.к. образуется повышающий/понижающий преобразователь.

Поддержка протокола быстрой зарядки Power Delivery, реализованного во многих современных потребительских зарядных устройствах (ЗУ), осуществляется при помощи триггера протокола, реализованного на микросхеме IP2721 (Injoinc, Китай). Вывод SEL задает одно из стандартных значений выходного напряжения подключенного ЗУ при помощи обмена данными по протоколу. При подключении вывода SEL через резистор R18 к выводу питания на выходе ЗУ будет установлено напряжение 12 В, при подключении через резистор R19 к «земле» – 5 В<sup>16</sup>.

Балансировка встроенных ячеек осуществляется модулем балансировки при помощи операционных усилителей DA3, DA4, DA5 (рис. 11). Каждый из них управляет парой транзисторов, сравнивая сумму напряжений<sup>17</sup> на двух ячейках АКБ с напряжением

<sup>16</sup> TYPE-C/PD2.0/PD3.0 Physical Layer IC for USB TYPE-C input Interfaces, IP2721. Injoinc Corp.; 2017. 7 p.

<sup>17</sup> Keep the balance – balancing of supercapacitors, ANP090. <https://www.we-online.com/catalog/media/o671684v410%20ANP090a%20EN.pdf>, дата обращения 29.08.2022. [Keep the balance – balancing of supercapacitors, ANP090. <https://www.we-online.com/catalog/media/o671684v410%20ANP090a%20EN.pdf>. Accessed August 29, 2022.]

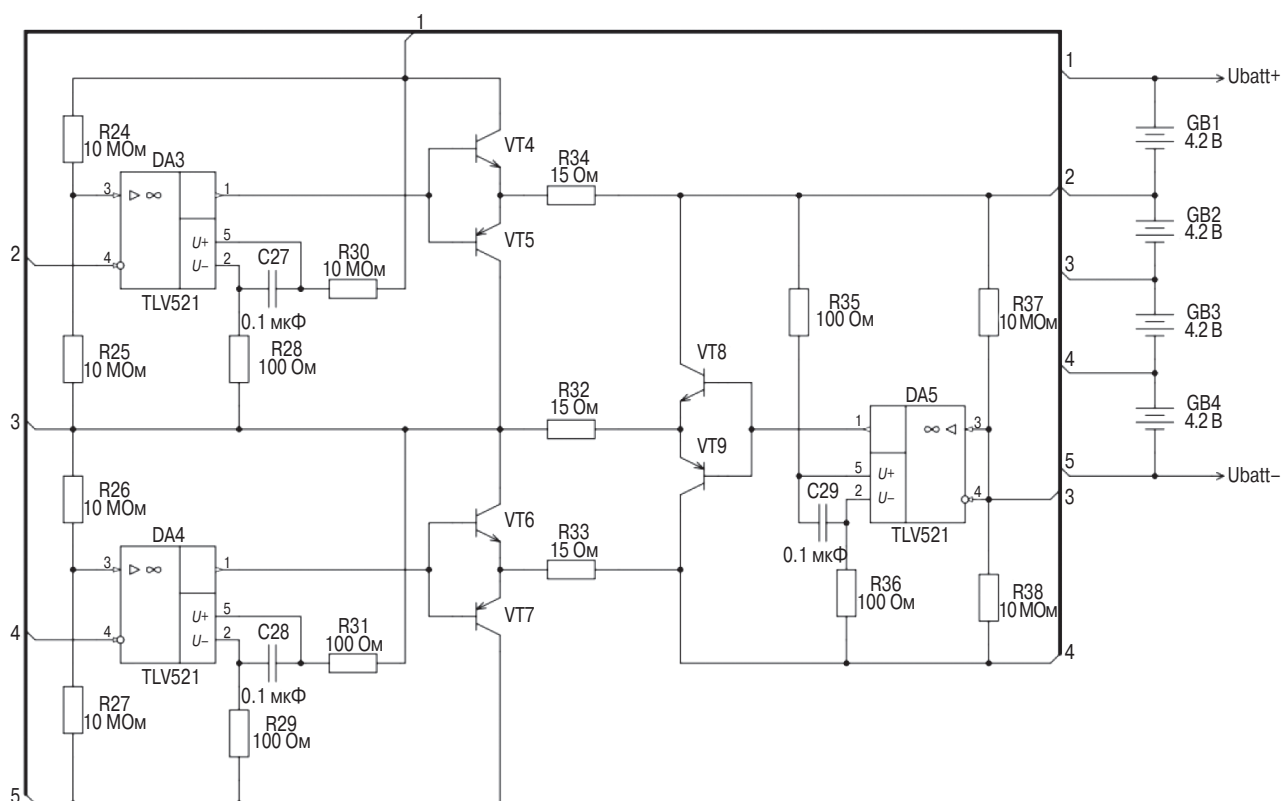


Рис. 11. Принципиальная схема модуля балансировки блока зарядки и защиты АКБ

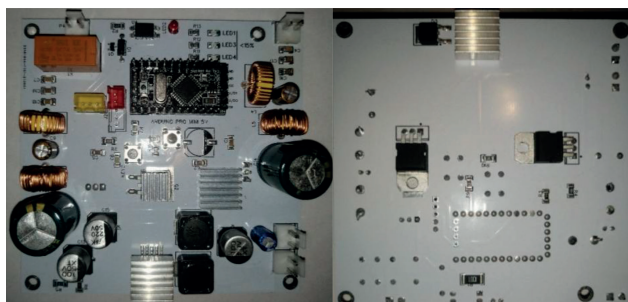


Рис. 12. Прототип блока мониторинга и управления: вид сверху и снизу



Рис. 13. Прототип блока зарядки и защиты АКБ: вид сверху и снизу

между двумя последовательно соединенным ячейками с учетом делителя напряжения, образованного парой резисторов R24–R25 для DA3, R26–R27 для DA4 и R37–R38 для DA5. Встроенная АКБ образована последовательно соединенными ячейками Li+ аккумуляторов GB1–GB4. Операционные усилители TLV521 (Texas Instruments, США) выбраны из-за низкого энергопотребления<sup>18</sup>, чем достигается увеличение энергоэффективности.

Внешний вид изготовленного прототипа блока мониторинга и управления представлен на рис. 12.

Внешний вид изготовленного прототипа блока зарядки и защиты АКБ представлен на рис. 13.

<sup>18</sup> NanoPower, 350nA, RRIO, CMOS Input, operational amplifier, TLV521, Data Sheet SNOSD26. Texas Instruments; 2016. 27 p.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗРАБОТАННОЙ СИСТЕМЫ

Для оценки выходной мощности двух каналов каждый канал был подключен к управляемой электронной нагрузке. Установлен режим работы по постоянной мощности с мощностью 20 Вт на каждый канал. Суммарная мощность, отдаваемая системой в электронную нагрузку при таком режиме работы, составила около 40 Вт. С помощью средств измерения, встроенных в блоки электронных нагрузок, получены временные диаграммы тока, напряжения и мощности.

Временные диаграммы напряжения, тока и мощности первого канала представлены на рис. 14 и 15.

Из рис. 14 видно, что изменение уровня выходного напряжения в процессе работы составляет 0.2 В.

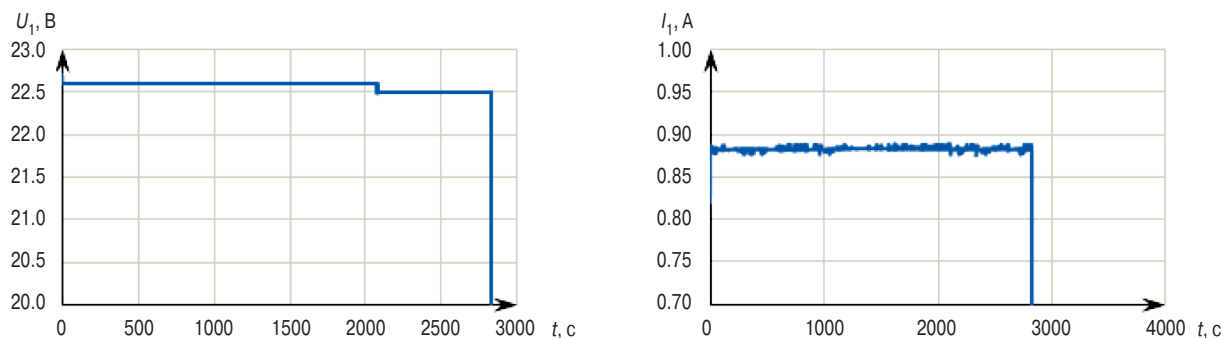


Рис. 14. Временные диаграммы напряжения и тока первого канала

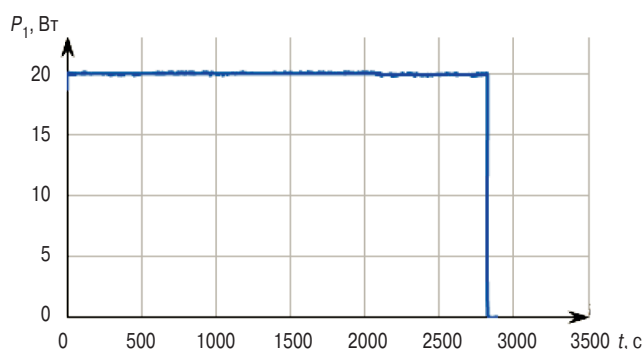


Рис. 15. Временная диаграмма мощности первого канала

Реальный уровень выходного напряжения составляет 22.6 В и отличается от расчетного значения  $U_{\text{вых}}$ . Это вызвано падением напряжения на выходных фильтрах и разбросом параметров резисторов R13, R14. Пульсации выходного тока обусловлены принципом работы управляемой электронной нагрузки.

Временные диаграммы второго канала практически совпадают с временными диаграммами первого канала с учетом незначительного разброса параметров выходных фильтров, поэтому на рис. 16 приведены временные диаграммы суммарного тока и мощности двух каналов.

Как можно заметить из рис. 14–16, в момент времени  $t = 2800$  с происходит скачкообразное падение уровня выходного напряжения и мощности. Это связано с работой автоматики: напряжение встроенных АКБ падает ниже критического значения, они полностью разряжаются, и контроллер заряда отключает их от блока мониторинга и управления.

Из рис. 16 видно, что суммарная выходная мощность составляет около 40 Вт, и время работы системы с такой нагрузкой составляет не менее 45 мин.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создан прототип системы бесперебойного питания с возможностью изменения выходного напряжения под требуемые задачи. Проведено тестирование каждого блока по отдельности и их взаимодействия.

Система формирует стабильное выходное напряжение 22.6 В с мощностью 20 Вт в каждом канале. Блок мониторинга и управления корректно отображает оставшийся процент заряда встроенного АКБ с шагом 25% и обеспечивает отключение потребителей при значении напряжения встроенного АКБ ниже заданного порога, тем самым дублируя функцию защиты блока зарядки и защиты АКБ.

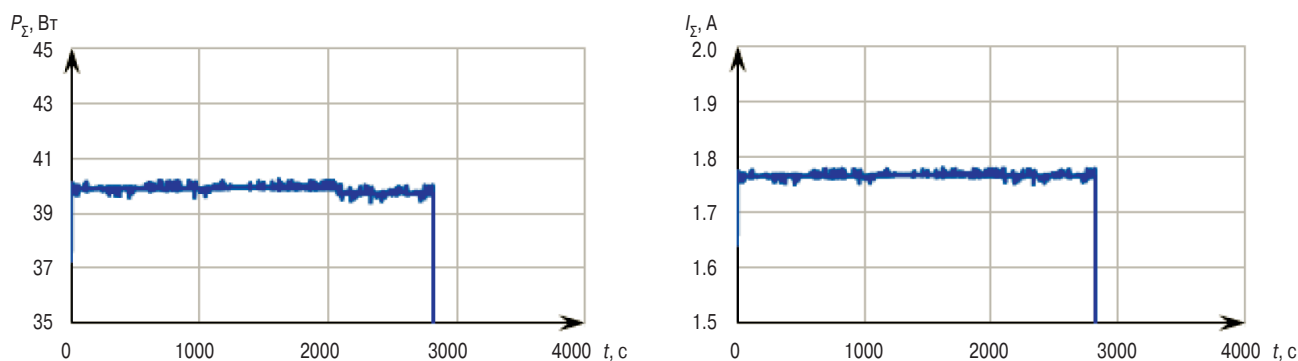


Рис. 16. Временные диаграммы суммарной мощности и тока двух каналов

Блок зарядки и защиты АКБ обеспечивает стабильное электропитание блока мониторинга и управления в течение не менее 45 мин, успешно активирует протокол быстрой зарядки при подключении к ЗУ и выполняет функцию защиты встроенных АКБ от «перезаряда».

В дальнейшем планируется улучшение разработанной системы, а именно:

- доработка выходных фильтров для снижения пульсаций выходного напряжения;
- доработка входных фильтров DC-DC преобразователя для снижения уровня шумов<sup>19</sup>;
- замена транзисторной группы в модуле балансировки для увеличения максимально допустимых

<sup>19</sup> Design and application considerations of input filter to reduce conducted emissions caused by DC/DC converter, No. 62AN101E Rev.003. ROHM Co., Ltd.; 2020. 7 p.

токов балансировки или использование для этих же целей модуля балансировки<sup>20</sup>;

- увеличение выходной мощности и разработка инвертора для обеспечения стандартного сетевого напряжения 220 В;
- реализация управления контроллером заряда с микроконтроллера.

#### Вклад авторов

Все авторы в равной степени внесли свой вклад в исследовательскую работу.

#### Authors' contribution

All authors equally contributed to the research work.

<sup>20</sup> Passive balancing allows all cells to appear to have the same capacity. <https://softei.com/passive-balancing-allows-all-cells-to-appear-to-have-the-same-capacity>, дата обращения 29.08.2022. [Passive balancing allows all cells to appear to have the same capacity. <https://softei.com/passive-balancing-allows-all-cells-to-appear-to-have-the-same-capacity>. Accessed August 29, 2022.]

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лукутин Б.В., Муравлев И.О., Плотников И.А. *Системы электроснабжения с ветровыми и солнечными электростанциями*: учебное пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета; 2015. 128 с.
2. Даченко В.А., Сивков А.А., Герасимов Д.Ю. *Монтаж, ремонт и эксплуатация электрических распределительных сетей в системах электроснабжения промышленных предприятий*: учебное пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета; 2007. 132 с.
3. Traister J.E., Kennedy T. *Low voltage wiring: Security/Fire alarm systems*. NY: The McGraw-Hill Companies; 2002. 408 p.
4. Битюков В.К., Лухт М.А., Михневич Н.Г., Петров В.А. Системная плата учебного лабораторного стенда с виртуальной передней панелью для исследований характеристик линейных стабилизаторов. *Российский технологический журнал*. 2017;5(4):22–31. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2017-5-4-22-31>
5. Ревич Ю.В. *Программирование микроконтроллеров AVR: от Arduino к ассемблеру*. СПб.: БХВ-Петербург; 2020. 448 с. ISBN 978-5-9775-4076-6
6. Битюков В.К., Симачков Д.С., Бабенко В.П. *Источники вторичного электропитания*. Москва; Вологда: Инфра-Инженерия; 2020. 376 с. ISBN 978-5-9729-0471-6
7. Миленина С.А., Миленин Н.К. *Электротехника, электроника и схемотехника*: учебник и практикум для вузов. М.: Юрайт; 2021. 406 с. ISBN 978-5-534-04525-3
8. Гололобов В.Н. *Схемотехника с программой Multisim для любознательных*. СПб.: Наука и техника; 2019. 272 с. ISBN 978-5-94387-880-0
9. Methekar P.N., et al. Optimum charging profile for lithium-ion batteries to maximize energy storage and utilization. *ECS Trans*. 2010;25(35):139–146. <https://doi.org/10.1149/1.3414012>

## REFERENCES

1. Lukutin B.V., Muravlev I.O., Plotnikov I.A. *Sistemy elektrosnabzheniya s vetrovymi i solnechnymi elektrostantsiyami*: uchebnoe posobie (Power supply systems with wind and solar power plants: textbook). Tomsk: Publishing House of Tomsk Polytechnic University; 2015. 128 p. (in Russ.).
2. Datsenko V.A., Sivkov A.A., Gerasimov D.Yu. *Montazh, remont i ekspluatatsiya elektricheskikh raspredelitel'nykh setei v sistemakh elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatii*: uchebnoe posobie (Installation, repair and operation of electrical distribution networks in power supply systems of industrial enterprises: textbook). Tomsk: Publishing House of Tomsk Polytechnic University; 2007. 132 p. (in Russ.).
3. Traister J.E., Kennedy T. *Low voltage wiring: Security/Fire alarm systems*. NY: The McGraw-Hill Companies; 2002. 408 p.
4. Bityukov V.K., Lukht M.A., Mikhnevich N.G., Petrov V.A. Mother board of trainer with virtual front panel for study of linear voltage regulator characteristics. *Russ. Technol. J*. 2017;5(4):22–31 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2017-5-4-22-31>
5. Revich Yu.V. *Programmirovaniye mikrokontrollerov AVR: ot Arduino k assembleru* (Programming of AVR microcontrollers: from Arduino to Assembler). St. Petersburg: BHV-Petersburg; 2020. 448 p. (in Russ.). ISBN 978-5-9775-4076-6
6. Bityukov V.K., Simachkov D.S., Babenko V.P. *Istochniki vtorichnogo elektropitaniya* (Secondary power sources). Moscow; Vologda: Infra-Inzheneriya; 2020. 376 p. (in Russ.). ISBN 978-5-9729-0471-6
7. Milenina S.A., Milenin N.K. *Elektrotehnika, elektronika i skhemotekhnika*: uchebnik i praktikum dlya vuzov (Electrical engineering, electronics and circuit engineering: textbook and workshop for universities). Moscow: Yurait; 2021. 406 p. (in Russ.). ISBN 978-5-534-04525-3

8. Gololobov V.N. *Skhemotekhnika s programmoi Multisim dlya lyuboznatel'nykh (CIRCUIT DESIGN with the Multisim program for the curious)*. St. Petersburg: Nauka i tekhnika; 2019. 272 p. (in Russ.). ISBN 978-5-94387-880-0
9. Methekar P.N., et al. Optimum charging profile for lithium-ion batteries to maximize energy storage and utilization. *ECS Trans.* 2010;25(35):139–146. <https://doi.org/10.1149/1.3414012>

#### Об авторах

**Шаров Игорь Михайлович**, студент, кафедра радиоэлектронных систем и комплексов Института радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: ctosworld@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-3391-3266>

**Демин Олег Александрович**, студент, кафедра радиоэлектронных систем и комплексов Института радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: coin12@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-9864-5338>

**Судаков Александр Анатольевич**, ассистент, кафедра радиоэлектронных систем и комплексов Института радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: sudakov@mirea.ru. SPIN-код РИНЦ 4225-2792, <https://orcid.org/0000-0001-6958-8111>

**Ярлыков Алексей Дмитриевич**, ассистент, кафедра радиоволновых процессов и технологий Института радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: yarlykov@mirea.ru. Scopus Author ID 57290652000, SPIN-код РИНЦ 3450-1587, <https://orcid.org/0000-0002-7232-8588>

#### About the authors

**Igor M. Sharov**, Student, Department of Radio Electronic Systems and Complexes, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: ctosworld@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-3391-3266>

**Oleg A. Demin**, Student, Department of Radio Electronic Systems and Complexes, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: coin12@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-9864-5338>

**Alexander A. Sudakov**, Assistant, Department of Radio Electronic Systems and Complexes, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: sudakov@mirea.ru. RSCI SPIN-code 4225-2792, <https://orcid.org/0000-0001-6958-8111>

**Alexey D. Yarlykov**, Assistant, Department of Radio Wave Processes and Technologies, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: yarlykov@mirea.ru. Scopus Author ID 57290652000, RSCI SPIN-code 3450-1587, <https://orcid.org/0000-0002-7232-8588>