

УДК 621.316.721

Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-1-93-104

**Для цитирования:** Копылов Е. А., Лобанов Д. К., Мизрах Е. А. Автоматизированный стенд для электрических испытаний и диагностики ресурсных характеристик литий-ионных аккумуляторов // Сибирский аэрокосмический журнал. 2022. Т. 23, № 1. С. 93–104. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-1-93-104.

**For citation:** Kopylov E. A., Lobanov D. K., Mizrakh E. A. Automated stand for electrical testing and diagnostics of life characteristics of lithium-ion batteries. *Siberian Aerospace Journal*. 2022, Vol. 23, No. 1, P. 93–104. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-1-93-104.

## **Автоматизированный стенд для электрических испытаний и диагностики ресурсных характеристик литий-ионных аккумуляторов**

Е. А. Копылов, Д. К. Лобанов, Е. А. Мизрах\*

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
\*E-mail: enis-home@mail.ru

*Литий-ионные аккумуляторные батареи (ЛИАБ) широко применяют в качестве накопителей электроэнергии в системах электропитания (СЭП) космических аппаратов (КА).*

*В статье рассмотрен автоматизированный стенд СИА 12/24 для проведения электрических испытаний и диагностики ресурсных характеристик литий-ионных аккумуляторов (ЛИА), на основе которых разрабатываются и изготавливаются ЛИАБ СЭП КА. Ресурсные испытания ЛИА являются наиболее трудоемкими и длительными, их проводят в наземных условиях в течение нескольких месяцев при многократном циклическом воспроизведении режимов заряд/разряд и температур аккумулятора до достижения условий завершения испытаний при периодическом контроле, измерении и регистрации параметров ЛИА. Применение автоматизированного стенда, позволяющего проводить ресурсные испытания ЛИА на основе методики динамического стрессового тестирования (ДСТ), позволяет сократить сроки ресурсных испытаний ЛИА и тем самым существенно ускорить проектирование и отработку ЛИАБ и СЭП КА. Приведены структура, описание составных частей и технические характеристики стенда СИА 12/24, позволяющего проводить электрические испытания одновременно двенадцати ЛИА. Рассмотрены принцип действия и технические характеристики оригинального зарядно-разрядного устройства с нагрузочным преобразователем (ЗРУ-НП), составляющего основу стенда. Предложенные оригинальные топологии ЗРУ-НП и нагрузочного преобразователя (НП) с двухступенчатым преобразованием мощности и стабилизацией входного напряжения мостового трансформаторного преобразователя (МТП) позволяют автоматизировать процесс электрических испытаний литий-ионных аккумуляторов путем автоматического воспроизведения функционально необходимых режимов испытаний и обеспечить энергосбережение в режимах заряда – разряда аккумуляторов.*

*Для ЗРУ-НП с двухступенчатым преобразованием мощности показано, что применение стабилизации входного напряжения МТП позволяет придать НП следующие положительные свойства:*

- расширение диапазонов регулирования атрибутов ЛИА: тока, напряжения, мощности;*
- слабую зависимость статической погрешности стабилизации атрибутов ЛИА и показателей качества переходных процессов от типа нагрузки НП.*

*Ключевые слова:* стенд, литий-ионный аккумулятор, испытания, ресурсные характеристики, зарядно-разрядное устройство, нагрузочный преобразователь.

## Automated stand for electrical testing and diagnostics of life characteristics of lithium-ion batteries

E. A. Kopylov, D. K. Lobanov, E. A. Mizrakh\*

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

\*E-mail: enis-home@mail.ru

*Lithium-ion batteries (LIB) are widely used as energy accumulators in the electrical power systems (EPS) of spacecraft. The article considers the automated bench SIA 12/24 for electrical tests and diagnostics of the resource characteristics of lithium-ion cells (LIC), on the basis of which the EPS LIB of spacecraft is developed and manufactured. LIC resource tests are the most time-consuming and lengthy, they are carried out in ground conditions for several months with repeated cycling of charge/discharge and cell temperatures until the conditions for completion of the tests are reached with periodic monitoring, measurement and registration of LIC parameters. The use of the automated bench, which makes it possible to carry out resource testing of LIC based on dynamic stress testing (DST), makes it possible to shorten the resource testing of LIC and thereby significantly accelerate the design and development of EPS LIB of spacecraft. The structure, the description of the component parts and the technical characteristics of the bench SIA 12/24 allowing to perform electrical tests simultaneously of twelve LIC are given. The principle of operation and technical characteristics of the original charging-discharge device with a load converter (CDD-LC) forming the basis of the bench are considered. The proposed original CDD-LC and load converter (LC) topologies with two-stage power conversion and stabilized bridge transformer converter (BTC) input voltage make it possible to automate the process of lithium-ion cells electric testing by automatically reproducing functionally necessary test modes and by ensuring energy saving in cells charging-discharge modes.*

*For a two-stage power conversion CDD-LC, it is shown that the use of BTC input voltage stabilization gives the following benefits:*

- extension of the LIC attribute control ranges: current, voltage, power;*
- low dependency of static error of stabilization of LIC attributes and transition quality indicators on the type of LC load.*

*Keywords: bench, lithium-ion cell, tests, resource characteristics, charger-discharge device, load converter.*

### Введение

Литий-ионные аккумуляторные батареи (ЛИАБ) широко применяют в качестве накопителей электроэнергии современных систем электропитания (СЭП) космических аппаратов (КА) [1–3] для обеспечения электропотребления КА на «теневых» участках орбиты и в режимах максимальной мощности потребления (коррекции положения КА, потребление полезной нагрузки, радиопередающих и др. систем). Ресурс ЛИАБ практически определяет срок активного существования КА.

С целью обеспечения требуемых параметров и качества ЛИАБ на предприятиях-изготовителях выполняют электрические испытания одновременно нескольких аккумуляторов (ЛИА) [4–5].

Технологический процесс электрических испытаний ЛИА включает в себя:

- определение номинальных значений емкости, мощности и энергии;
- испытания на хранение заряда;
- испытания на энергоэффективность;
- ресурсные испытания для подтверждения циклического ресурса ЛИА.

Из перечисленных выше видов электрических испытаний, ресурсные испытания ЛИА являются наиболее трудоемкими и длительными, их проводят в наземных условиях в течение нескольких месяцев при многократном циклическом воспроизведении режимов заряд/ разряд и температур аккумулятора до достижения условий завершения испытаний при периодическом контроле, измерении и регистрации параметров ЛИА. Сокращение сроков ресурсных испытаний ЛИА позволяет существенно ускорить и удешевить проектирование и отработку ЛИАБ и СЭП КА. С этой целью разработаны стандарты [6–8], в которых проведение ресурсных испытаний ЛИА основывается на методике динамического стрессового тестирования (ДСТ), использующей режимы заряда/разряда с увеличенными значениями постоянных токов и мощности вплоть до максимальных величин, установленных производителем.

В специальной литературе, в основном, освещены вопросы проектирования зарядно-разрядных устройств (ЗРУ) ЛИАБ, имеющих относительно большие номинальные напряжения (40–100В) [9–12] и практически не рассмотрены вопросы разработки и проектирования ЗРУ для отдельных ЛИА с относительно низким напряжением (меньшим 4,5 В).

Таким образом, имеет место противоречие между современными требованиями к методам и режимам технологических процессов электрических испытаний ЛИА и недостаточной разработанностью аппаратного обеспечения процессов испытаний ЛИА.

### **Цель работы**

Исходя из современных требований к технологическим процессам электрических испытаний ЛИА, предложить принципы построения и основные характеристики перспективного стенда, позволяющего проводить электрические, в том числе ускоренные ресурсные, испытания ЛИА большой ёмкости для КА.

### **Материалы и методы решения задачи**

Стенд для ресурсных испытаний литий-ионных аккумуляторов (СИА 12/24) предназначен для решения следующих задач:

- воспроизведение электрических и временных режимов эксплуатации аккумулятора как в режиме заданной мощности, так и в режиме заданного тока;
- измерение и регистрация электрических, температурных и временных параметров режимов эксплуатации аккумулятора;
- обеспечение управления электрическими и температурными испытаниями аккумулятора в соответствии с заданными циклограммами;
- обеспечение автоматической диагностики исправности стенда и защиты аккумулятора от аварийных режимов.

### **Структурная схема СИА 12/24**

Структурная схема СИА 12/24 приведена на рис. 1. В состав СИА 12/24 входят функционально необходимые блоки:

- блок защитных автоматов (БЗА);
- три источника бесперебойного питания (ИБП) – ЕАТОН 9130;
- блок нагрузок стенда (БНС-30);
- двенадцать гальванически независимых разрядно-зарядных устройств (ЗРУ 160-5);
- двенадцать стабилизирующих источников питания (СИП) – LAMBDA GEN 8-180;
- управляющий измерительный вычислительный комплекс (УИВК) – NI PXIe-1082;
- термокамера с исследуемыми аккумуляторами (ТК);
- устройство сопряжения (УС).

Блок защитных автоматов предназначен для подключения (отключения) ИБП СИА 12/24 к промышленной трехфазной сети  $\sim 380/220$  В  $\pm 10$  % частотой (50 $\pm$ 1) Гц. Источники бесперебойного питания обеспечивают непрерывное питание комплекса в случае аварийного отключения сети питания.

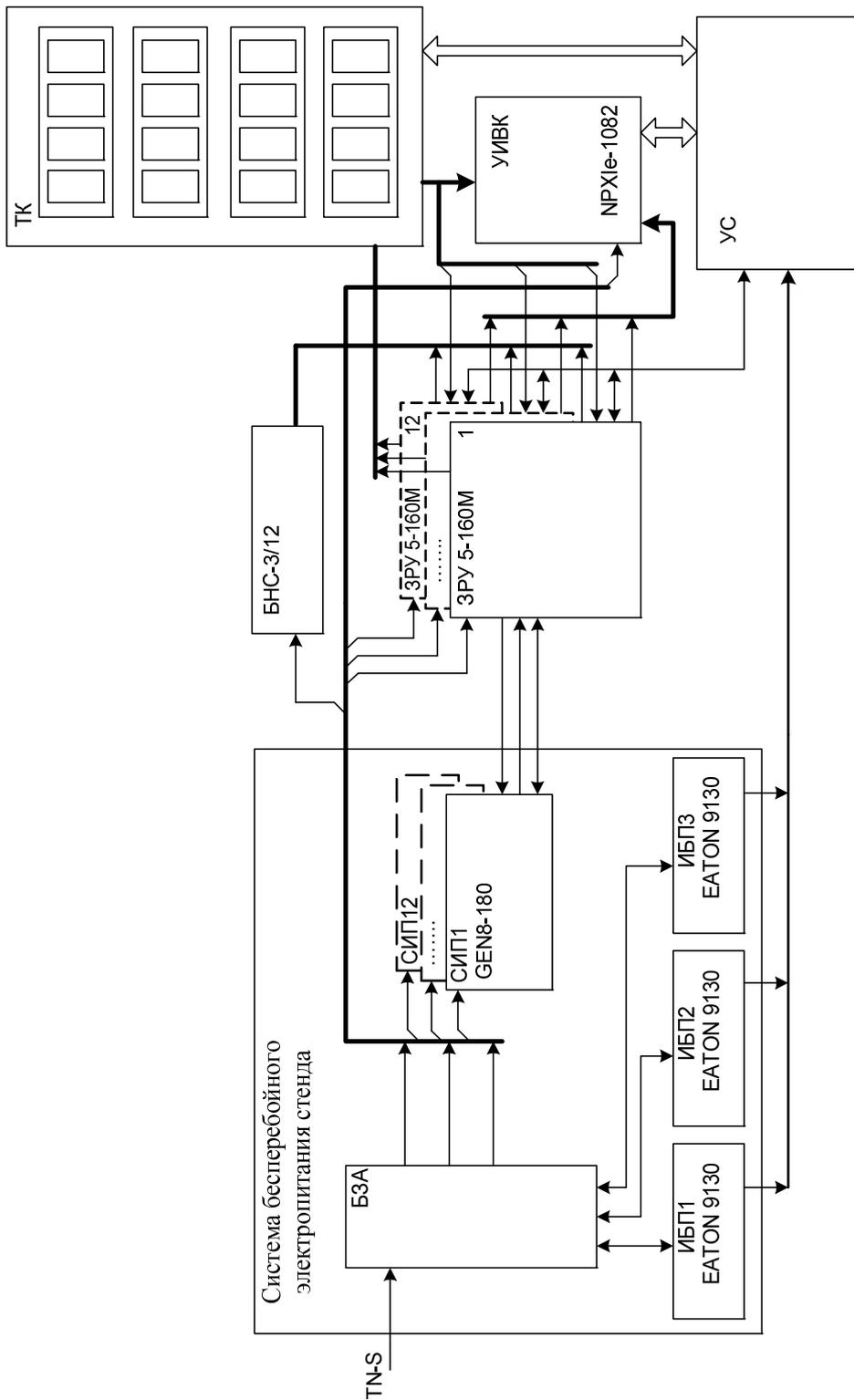


Рис. 1. Структурная схема стенда СИА 12/24

Fig. 1. Structural diagram of the bench SIA 12/24

Каждое из двенадцати зарядно-разрядных устройств ЗРУ 160-5 подключено к борнам соответствующего аккумулятора и регулирует ток заряда и разряда аккумулятора в соответствии с циклограммой, задаваемой с УИВК. Для утилизации избыточной электроэнергии каждое ЗРУ соединено с соответствующей нагрузкой, расположенной в блоке нагрузок стенда БНС-30.

Также в блоке нагрузок стенда БНС-30 расположено устройство распределения электропитания от ИБП EATON 9130 между УИВК, двенадцатью ЗРУ 160-5 и двенадцатью соединенных с ними СИП LAMBDA GEN 8-180.

Температурные испытания аккумуляторов проводятся в термокамере, управляемой УИВК. Управление термокамерой обеспечивает выполнение следующих функций:

- измерение и регистрацию показаний датчиков температуры аккумуляторов в термокамере;
- управление терморегулирующей аппаратурой;
- сигнализацию и отключение линии питания аккумулятора при выходе температуры аккумулятора за разрешенный предел.

УИВК регистрирует атрибуты процесса испытания аккумуляторов (токи, мощности, напряжения и температуры аккумуляторов) и позволяет:

- задавать режимы испытания аккумуляторов, программируя ЗРУ;
- задавать значения аппаратных и программных защит;
- контролировать функционирование ИБП;
- сигнализировать и выводить информацию об аварийных ситуациях.

*Технические характеристики стенда СИА 12/24*

Диапазон изменения напряжения аккумулятора от  $-5$  до  $+5$  В (дискретность  $0,05$  В).

Диапазон изменения тока заряда аккумулятора от  $1$  А до  $80$  А (дискретность  $0,1$  А).

Диапазон изменения тока разряда в диапазоне от  $1$  А до  $160$  А (дискретность  $1$  А).

Диапазон изменения временных интервалов от  $1$  с до нескольких часов с шагом не более  $1$  с, точность воспроизведения интервала должна быть в пределах  $\pm 0,1$  с.

Диапазон изменения температуры аккумулятора от  $-10$  до  $+60$  °С.

Точность регистрации параметров представлена в таблице.

**Погрешность регистрации токов заряда и разряда**

Диапазон, А	Погрешность, мА
0–5	$\pm 30$
5–50	$\pm 50$
50–160	$\pm 200$

Погрешность регистрации напряжения аккумулятора не более  $\pm 5$  мВ.

Погрешность регистрации временного интервала в пределах  $\pm 0,1$  с

Погрешность регистрации температуры аккумулятора, не более  $\pm 2$  °С.

Количество одновременно испытываемых аккумуляторов: от одного до двенадцати. Все аккумуляторы гальванически развязаны друг от друга.

Стенд допускает параллельную работу двух модулей, при этом объединенные модули обеспечивают ток заряда до  $160$  А, ток разряда до  $320$  А.

Габаритные размеры стенда Ш×В×Г, мм:  $560 \times 910 \times 820$ .

Вес, кг:  $200 \pm 5$ .

Основу испытательных стендов ЛИАБ составляют зарядно-разрядные устройства (ЗРУ). В настоящее время широко применяют ЗРУ с нагрузочным преобразователем (НП), содержащим [11–12] инвертор, ведомый сетью (ИВС), обеспечивающий рекуперацию избыточной электроэнергии в промышленную сеть переменного напряжения.

Общими недостатками таких ЗРУ–НП при испытаниях ЛИА являются:

- ограничение максимального значения тока ЛИА при низких уровнях напряжений ЛИА, вследствие наличия конечного сопротивления ключей и активного сопротивления дросселя;

– отсутствие возможности разряда аккумуляторов постоянным током до изменения полярности напряжения (переполусовки);

– невозможность штатного завершения испытаний и выключения испытательного комплекса (стенда) ЛИА при аварийном отключении сети переменного тока.

Эти недостатки не позволяют исследовать и испытывать ЛИА большой ёмкости во всех требуемых режимах.

### Структурная схема ЗРУ 160-5

Поэтому авторами была разработана новая структура зарядно-разрядного устройства – ЗРУ 160–5 [13; 15; 16]. В предлагаемой схеме (рис. 2) ЗУ и РУ объединены в одно устройство, содержащее источник бесперебойного питания, регулируемый стабилизирующий источник питания (СИП), трёхпозиционный коммутатор, оригинальный управляемый нагрузочный преобразователь (НП) рекуперативного типа [14]. Аккумулятор (А), последовательно соединённый с датчиком тока (ДТ) аккумулятора, включён в диагональ коммутатора, образованного мостовой схемой из полупроводниковых ключей  $K_1$  –  $K_4$ . НП в режиме стабилизации тока стабилизирует и регулирует токи заряда/разряда в требуемом диапазоне. В режиме стабилизации мощности и режиме заряда со стабилизацией напряжения ЛИА величина тока вычисляется с учетом измеренного напряжения ЛИА.

Регулируемый СИП стабилизирует падение напряжения на НП, что позволяет ограничить мощность НП, обеспечить разряд ЛИА большим током, разряд до нулевого напряжения (с компенсацией падения напряжения на активных сопротивлениях токоведущих цепей) и до отрицательных значений напряжения ЛИА. Напряжение стабилизации выбирается из условия обеспечения требуемого широкого диапазона регулирования тока аккумулятора (А).

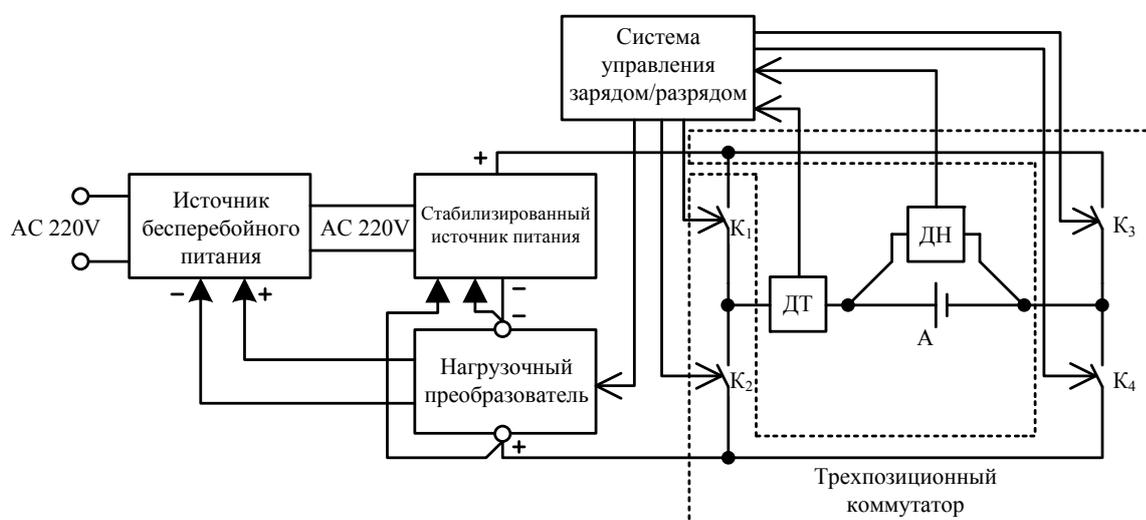


Рис. 2. Структурная схема ЗРУ 160-5:  
А – аккумулятор; ДТ – датчик тока; ДН – датчик напряжения

Fig. 2. Structural diagram of the CDD 160-5

В предложенном ЗРУ (рис. 2) регулирование и стабилизацию тока в режимах заряда (рис. 3) и разряда (рис. 4) производит НП в соответствии с программой электрических испытаний ЛИА при циклическом воспроизведении зарядно-разрядных профилей.

### Технические характеристики НП

1. Диапазон изменения тока от 0,1 до 160 А (дискретность 0,1 А) при постоянном входном напряжении НП.

2. Диапазон изменения временных интервалов от 1 с до нескольких часов с шагом не более 1 с.
3. Максимальная скорость изменения тока – 60 А/с.
4. Погрешности стабилизации и установки атрибутов:
  - а)  $\pm 1\%$  для тока;
  - б)  $\pm 0,1\%$  для времени;
  - в)  $\pm 1,1\%$  для мощности.

Для обеспечения требуемого профиля заряда/ разряда ЛИА НП содержит стабилизатор входного тока, состоящий из СУ, импульсного повышающего преобразователя (ИПП) и датчика входного тока ИПП.

Выбор ИПП в качестве первой ступени стабилизатора тока заряда/ разряда ЛИА обусловлен существенным уменьшением (особенно при больших значениях преобразуемых токов) пульсаций тока аккумулятора за счет использования функционального необходимого входного дросселя ИПП.

Устройство может работать в режиме заряда, разряда и прерывания тока (пауза) аккумулятора. Данные режимы обеспечиваются с помощью трёхпозиционного коммутатора, реализованного на ключах  $K_1 - K_4$

Для работы устройства в режиме заряда аккумулятора СУ замыкает электронные ключи  $K_1$  и  $K_4$ . В этом режиме ЛИА заряжается по цепи: положительный вывод СИП, первый электронный ключ  $K_1$ , ДТ, затем электронный ключ  $K_4$ , НП и отрицательный вывод СИП (рис. 3). СУ зарядом/ разрядом регулирует зарядный ток НП рекуперативного типа в зависимости от значения напряжения ДТ и ДН ЛИА. НП возвращает (рекуперировать) избыточную электроэнергию в сеть постоянного напряжения ИБП, от которого осуществляется питание СИП.

Для работы устройства в режиме разряда аккумулятора, СУ зарядом/ разрядом замыкает электронные ключи  $K_2$  и  $K_3$ . В этом режиме аккумулятор разряжается (рис. 4) по цепи: ДТ, электронный ключ  $K_2$ , НП, отрицательный вывод СИП, затем положительный вывод СИП и электронный ключ  $K_3$ . В этом режиме НП также рекуперировать избыточную электроэнергию в сеть постоянного напряжения ИБП.

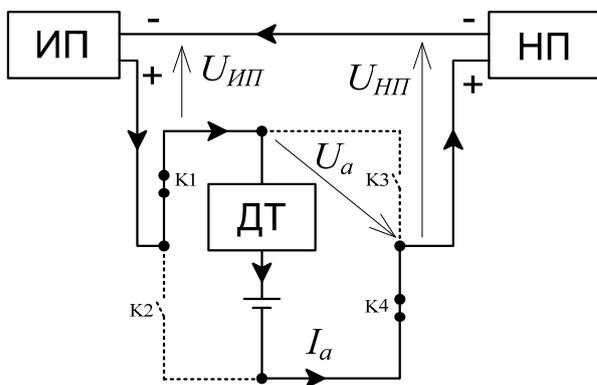


Рис. 3. Схема ЗРУ в режиме заряда аккумулятора

Fig. 3. CDD circuit in cell charge mode

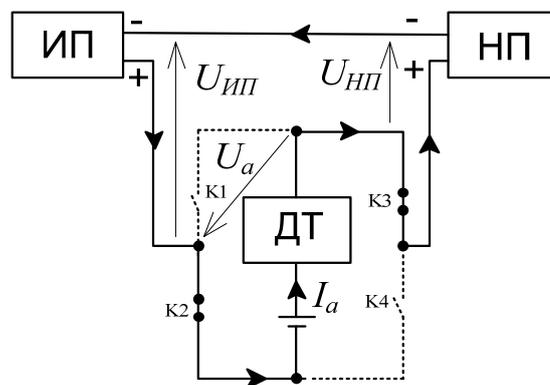


Рис. 4. Схема ЗРУ в режиме разряда аккумулятора

Fig. 4. CDD circuit in cell discharge mode

Мощность НП для максимального тока  $I_a^{\max}$  ЛИА пропорциональна величине напряжения  $U_{НП}$ :

$$P_{НП} = I_a^{\max} \cdot U_{НП}.$$

Для ограничения мощности НП, напряжение  $U_{НП}$  стабилизируется СИП. Анализ показал, что минимальное напряжение  $U_{НП}$  должно быть практически равно максимальному напряжению ЛИА, т. е.  $U_{НП} \approx 4,0$  В.

Напряжение  $U_{\text{СИП}}$  зависит от режима работы ЛИА, так при заряде

$$U_{\text{НП}} = U_{\text{СИП}} - U_a; \quad (1)$$

при разряде

$$U_{\text{НП}} = U_{\text{СИП}} + U_a.$$

Из (1) следует, что максимальное напряжение  $U_{\text{СИП}}^{\text{max}}$  источника СИП необходимо выбирать из условия

$$U_{\text{СИП}}^{\text{max}} \geq U_{\text{НП}} + U_a^{\text{max}}.$$

Таким образом, СИП должен обеспечивать максимальный ток  $I_a^{\text{max}} = 160$  А, максимальное напряжение  $U_{\text{СИП}}^{\text{max}}$ . В качестве СИП авторами выбран стабилизирующий источник напряжения – LAMBDA GEN 8–180 полностью удовлетворяющий перечисленным требованиям.

Внешний вид разработанного ЗРУ 160-5 представлен на рис. 5.

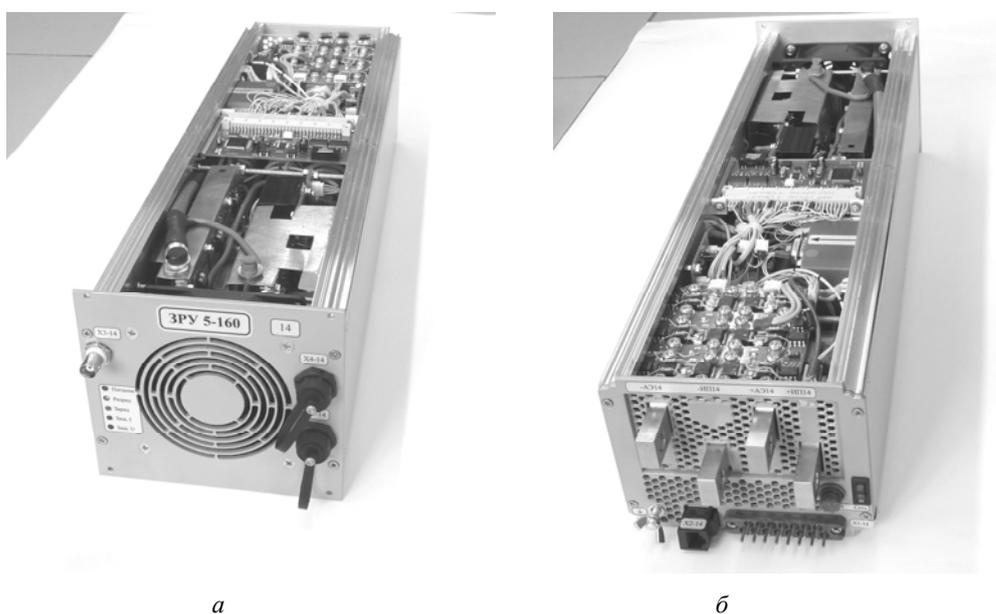


Рис. 5. Внешний вид ЗРУ-НП без верхней крышки:  
а – со стороны фронтальной панели; б – со стороны задней панели

Fig. 5. Appearance of the CDD-LC without the top cover:  
a – from the front panel; b – from the back panel

### Стенд СИА 12/24

Для одновременного исследования электрических характеристик двенадцати ЛИА, на базе разработанного ЗРУ 160-5, авторами изготовлен и введен в эксплуатацию стенд (рис. 6) СИА 12/24 СГАУ. 565211.023 в следующем составе:

- зарядно-разрядное устройство ЗРУ1-14;
- управляющий измерительный комплекс National Instruments
- источник питания программируемый GEN8-180;
- блок нагрузки БН-27;
- нагрузка тестовая НТ-5-160;
- устройство сопряжения УС.

Управляющий измерительный комплекс основан на стандартных модулях системы PXI производства National Instruments (NI), что обеспечивает надежность, точность, гибкость и расширяемость СУ.

Для реализации СУ была использована платформа NI PXI с контроллером NI PXI-8115, модулями изолированных аналоговых входов NI PXIe-4300 (3 шт.), модулями аналоговых входов NI PXI-6225 (1 шт.), а также интерфейс RS-485 на модулях NI PXI-8433/2 (1 шт.).

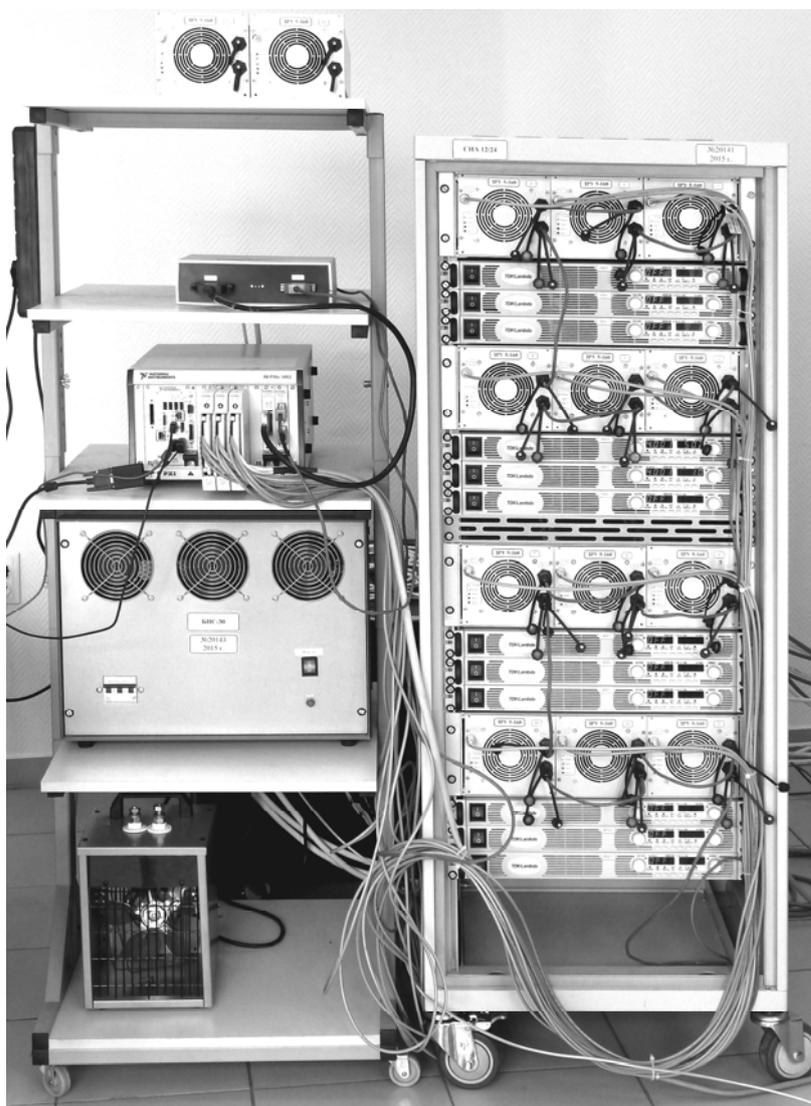


Рис. 6. Внешний вид стенда СИА12/24

Fig. 6. Appearance of the bench SIA12/24

Исследуемые ЛИА гальванически не связаны между собой, поэтому сигналы с датчиков напряжения и тока АБ поступают на модуль изолированных аналоговых входов NI PXIe-4300. Для сбора информации с датчиков температуры типа TMP36FT9 используется модуль аналоговых входов NI PXI-6225. Для измерения тока АБ используется высокоточный датчик тока LEM, сигнал с которого поступает на вход модуля PXIe-4300.

### Заключение

1. Анализ возможных топологий ЗРУ показал, что объединение регуляторов-стабилизаторов зарядного и разрядного устройств в одном устройстве – нагрузочном преобразователе (НП) позволяет уменьшить массу, габариты и улучшить эксплуатационные свойства ЗРУ НП.

2. Предложенные оригинальные топологии ЗРУ-НП (патент на полезную модель № 123530) и нагрузочного преобразователя (патент на полезную модель №153595) с двухступенчатым

преобразованием мощности и стабилизацией входного напряжения мостового трансформаторного преобразователя (МТП) позволяют автоматизировать процесс электрических испытаний литий-ионных аккумуляторов путем автоматического воспроизведения функционально необходимых режимов испытаний и обеспечить энергосбережение в режимах заряда – разряда аккумуляторов.

3. Для ЗРУ-НП с двухступенчатым преобразованием мощности показано, что применение стабилизации входного напряжения МТП позволяет придать НП следующие положительные свойства:

- расширение диапазонов регулирования атрибутов ЛИА: тока, напряжения, мощности;
- слабую зависимость статической погрешности стабилизации атрибутов ЛИА и показателей качества переходных процессов от типа нагрузки НП.

Данные свойства упрощают выбор параметров ЗРУ-НП, обеспечивающих требуемую погрешность стабилизации атрибутов ЛИА.

### Библиографические ссылки

1. Груздев А. И. Концептуальные подходы к разработке аккумуляторных батарей с повышенной удельной энергоемкостью для авиационно-космических применений // Вопросы электромеханики. Тр. ВНИИЭМ. 2015. Т. 147. С. 38–43.
2. Progress of ongoing NASA Lithium-Ion cell Verification testing for aerospace applications / V. I. VcKissock et al. // NASA/TM-2008-215154. 2008.
3. Pearson C., Thwaite C., Russel N. Small Cell Lithium-Ion Batteries: The Responsive Solution for Space Energy Storage // Paper AIAA RS3-2005-5003 presented at the 3rd Responsive Space Conference. Los Angeles, CA, USA, 2005. С. 25–28.
4. Borthomieu Y., Broussely M., Planchat J. P. VES140 S Li-Ion Cell GEO Life Test Results // SAFT, SIXTH EUROPEAN SPACE POWER CONFERENCE (ESPC). Porto, Portugal, 6–10 May 2002.
5. Результаты анализа деградации электродов ЛИА при проведении ресурсных испытаний. / В. А. Попов, В. П. Кулыга, С. Д. Лихоносов, Д. Н. Махоткин // Фундаментальные проблемы преобразования энергии в литиевых электрохимических системах»: материалы XXII Междунар. конф. / под ред. В. В. Галкина ; Кубанский гос. ун-т. Краснодар, 2012. С. 26–27.
6. ГОСТ Р МЭК 61427-1-2014 Аккумуляторы и аккумуляторные батареи для возобновляемых источников энергии. Общие требования и методы испытаний. Ч. 1. Применение в автономных фотоэлектрических системах. М. : Стандартинформ, 2014. 13 с.
7. ГОСТ Р МЭК 61960-2007 Аккумуляторы и аккумуляторные батареи, содержащие щелочной и другие не кислотные аккумуляторы. Аккумуляторы и аккумуляторные батареи литиевые для портативного применения. М. : Стандартинформ, 2007. 9 с.
8. ГОСТ Р МЭК 62660-1-2014 Аккумуляторы литий-ионные для электрических дорожных транспортных средств. Ч. 1. Определение рабочих характеристик. М. : Стандартинформ, 2015. 29 с.
9. Патент RU 2390477 С1, МПК Н01М 10/42 (2006.01), В64G 1/42(2006.01) Способ проведения ресурсных испытаний аккумуляторов космического назначения и устройство для его реализации / Почебут Д. В., Коротких В. В., Кудряшов В. С., Нестеришин М. В., Шанаврин В. С. № 2009108898/11 ; заявл. 10.03.09 ; опубл. 27.05.10 ; Бюл. № 15.
10. Life cycles test on a lithium battery system [Электронный ресурс] / F. Vellucci, V. Sglavo, Yuang Pede E. Pasca et al. // IECON 2014 – 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society). 2014. С. 3129–3134.
11. Автоматизированное рабочее место отработки и испытаний энергопреобразующей аппаратуры системы электропитания космического аппарата / О. В. Бубнов, Ю. А. Кремзуков, В. А. Пчельников и др. // Доклады ТУСУРа. 2017. Т.20, № 3. С. 35–39.

12. Унифицированная станция для заряда и тестирования литий-ионных аккумуляторных систем космического и наземного применения. / Г. В. Носкин, А. С. Зернов, В. Н. Мишин и др. // Изв. Росс. Акад. наук. Энергетика. 2012. № 2. С. 120–125.

13. Патент на полезную модель № 123530 Российская Федерация, МПК G01N27/416. Устройство для испытания аккумуляторного элемента: № 2012127508; заявл. 02.07.12; опубл. 27.12.12 / Мизрах Е. А., Копылов Е. А., Нестеришин М. В., Козлов Р. В., Лобанов Д. К. ; заявитель СибГУ им. М. Ф. Решетнева. 4 с.

14. Патент на полезную модель № 153595 Российская Федерация, МПК H02M 3/335, H02M 3/337, H02M 3/28, H02M 3/24. Преобразователь напряжения: № 2014147920 ; заявл. 27.11.14 ; опубл. 30.06.15 / Мизрах Е. А., Лобанов Д. К., Федченко А. С., Копылов Е. А. ; заявитель СибГУ им. М. Ф. Решетнева. 4 с.

15. Study of a lithium-ion battery charge-discharge test unit characteristics / A. S. Fedchenko, E. A. Kopylov, D. K. Lobanov, E. A. Mizrah // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2016. No. 122. P. 012015. Doi: 10.1088/1757-899X/122/1/012015.

16. On the Static Accuracy of Charge-Discharge Units Intended for Electrical Tests of High Capacity Li-ion Batteries / E. A. Mizrah, D. K. Lobanov, E. A. Kopylov et al. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, International Siberian Conference Reshetnev Readings-2016. 2016. Doi: 10/1088/1757-899X/255/1/012016.

## References

1. Gruzdev A. I. [Conceptual approaches to the development of batteries with increased specific energy intensity for aerospace applications]. *Matters of Electromechanics. VNIIEP Proceedings*. 2015, Vol. 147, P. 38–43 (In Russ.).

2. VcKissock B. I. et al. Progress of ongoing NASA Lithium-Ion cell Verification testing for aerospace applications. *NASA/TM-2008-215154*. 2008.

3. Pearson C., Thwaite C., Russel N. Small Cell Lithium-Ion Batteries: The Responsive Solution for Space Energy Storage. *Paper AIAA RS3-2005-5003 presented at the 3rd Responsive Space Conference*. Los Angeles, CA, USA, April, 2005, P. 25–28.

4. Borthomieu Y., Broussely Y., Planchat J. P. VES140 S Li-Ion Cell GEO Life Test Results. *SAFT, SIXTH EUROPEAN SPACE POWER CONFERENCE (ESPC)*. Porto, Portugal, 6–10 May 2002.

5. Popov V. A., Kulyga V. P., Lihonosov S. D., Mahotkin D. N. [Results of the analysis of degradation of LIA electrodes in life tests]. *Fundamentalnye problemy preobrazovaniya energii v litievykh elektrohimicheskikh sistemah. Matireals of the XXII International Conference*. Krasnodar, 2012, P. 26–27 (In Russ.).

6. GOST R MEK 61427-1-2014. *Akkumulyatory i akkumulyatornye batarei dlya vozobnovlyаемых istochnikov energii. Obshchie trebovaniya i metody ispytaniy. Chast 1. Primenenie v avtonomnykh fotoelektricheskikh sistemah* [State Standard R MEK 61427-1-2014: Accumulator cells and batteries for renewable energy sources. General requirements and test methods. Part 1. Applications in autonomous photovoltaic systems]. Moscow, Standartinform Publ., 2014, 13 p.

7. GOST R MEK 61960-2007. *Akkumulyatory i akkumulyatornye batarei, sodержashchie shchelochnoj i drugie ne kislotnye akkumulyatory. Akkumulyatory i akkumulyatornye batarei litievye dlya portativnogo primeneniya* [Accumulator cells and batteries containing alkaline and other non-acid batteries. Accumulator cells and batteries for portable use]. Moscow, Standartinform Publ., 2007, 9 p.

8. GOST R MEK 62660-1-2014. *Akkumulyatory litij-ionnye dlya elektricheskikh dorozhnykh transportnykh sredstv. Chast 1. Opredelenie rabochnih harakteristik* [Lithium ion accumulators for electric road vehicles. Part 1. Determination of operating characteristics]. Moscow, Standartinform Publ., 2015, 29 p.

9. Pochebut D. V. et al. [Method for carrying out life tests of space-purpose accumulators and device for carrying out said method]. Patent RF, no. № 2009108898/11, 2009.

10. Vellucci F. et al. Life cycles test on a lithium battery system. *IECON 2014 – 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. 2014. P. 3129–3134.
11. Bubnov O. V., Kremzukov Yu. A., Pchel'nikov V. A., Rulevskij V. M., Shurygin Yu. A. [Automated workstation for the development and testing of energy conversion equipment of the spacecraft electrical power supply system]. *Proceedings of TUSUR University*. 2017, Vol. 20, No. 3, P. 35–39 (In Russ.).
12. Noskin G. V., Zernov A. S., Mishin V. N., Pchel'nikov V. A., Smolencev A. A., Filin V. M. [Unified station for charge and testing of space and ground-based lithium-ion battery systems]. *News from the Russian Academy of Sciences. Energy*. 2012, No. 2, P. 120–125 (In Russ.).
13. Mizrakh E. A. et al. [Accumulator cell test device]. Patent RF, no. 2012127508, 2014.
14. Mizrakh E. A. et al. [Voltage converter]. Patent RF, no. 2014147920, 2014.
15. Fedchenko A. S. et al. Study of a lithium-ion battery charge-discharge test unit characteristics. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2016, No. 122, P. 012015. Doi: 10.1088/1757-899X/122/1/012015.
16. Mizrah E. A. et al. On the Static Accuracy of Charge-Discharge Units Intended for Electrical Tests of High Capacity Li-ion Batteries. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, International Siberian Conference Reshetnev Readings-2016*. 2016. Doi:10/1088/1757-899X/255/1/012016.

© Копылов Е. А., Лобанов Д.К., Мизрах Е. А., 2022

---

**Копылов Евгений Алексеевич** – научный сотрудник; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: evgesh72@mail.ru.

**Лобанов Дмитрий Константинович** – кандидат технических наук, доцент кафедры систем автоматического управления; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: u649@yandex.ru.

**Мизрах Енис Аврумович** – кандидат технических наук, профессор кафедры систем автоматического управления; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: enis-home@mail.ru.

**Kopylov Evgeny Alekseevich** – scientific researcher Department of Automatic control system; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: evgesh72@mail.ru.

**Lobanov Dmitry Konstantinovich** – Cand. Sc., docent, Department of Automatic control system; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: u649@yandex.ru.

**Mizrah Enis Avrumovich** – Cand. Sc., professor, Department of Automatic control system, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: enis-home@mail.ru.

---