

**О СТАТИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ ОДНОГО КЛАССА ЗАРЯДНО-РАЗРЯДНЫХ УСТРОЙСТВ
ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ
БОЛЬШОЙ ЁМКОСТИ**

Е. А. Мизрах*, Д. К. Лобанов, Е. А. Копылов, Р. В. Балакирев, А. С. Федченко

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

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

Перезаряжаемые накопители энергии являются одними из основных компонентов систем электропитания космических аппаратов. Характеристики таких накопителей существенно влияют на продолжительность жизненного цикла космического аппарата на орбите. В последние годы разработчики систем электропитания широко применяют литий-ионные аккумуляторы в качестве перезаряжаемых накопителей энергии. Это обусловлено тем, что удельные энергетические характеристики литий-ионных аккумуляторов заметно выше, чем у аккумуляторов других типов при аналогичном количестве циклов заряда-разряда. Для верификации заданных для аккумулятора требований изготовитель батареи проводит ряд квалификационных испытаний, в частности, специально разработанные ресурсные испытания, которые позволяют оценить предельное количество циклов заряда-разряда аккумулятора. Проведение таких испытаний занимает несколько месяцев (точный срок зависит от конкретной модели аккумулятора), что отрицательно сказывается на общей длительности и стоимости разработки космического аппарата в целом.

Проведение ресурсных испытаний по принципам проведения динамических стрессовых тестов даёт возможность существенно сократить общее время разработки и производства аккумуляторных батарей, что, в свою очередь, позволяет снизить стоимость проектирования и отработки энергосистем космических аппаратов. Динамические стрессовые тесты представляют собой вид нагрузочных испытаний, которые позволяют оценить, способен ли аккумулятор обеспечить потребителя требуемой мощностью во всех ожидаемых режимах работы. Основные принципы динамических стрессовых тестов: заряд и разряд аккумулятора токами большой величины и разряд аккумулятора постоянной мощностью согласно специальной программе.

Проведение стрессовых испытаний требует наличия специальных зарядно-разрядных устройств, позволяющих проводить полный цикл электрических испытаний аккумуляторов, включая ресурсные испытания. Обеспечение требуемой точности измерения и стабилизации определённых атрибутов режимов эксплуатации литий-ионных аккумуляторов является одной из проблем, которые возникают при разработке таких зарядно-разрядных устройств. Наибольший интерес представляют следующие атрибуты: токи заряда и разряда, мощности разряда, напряжения аккумулятора.

Анализ зарядно-разрядного устройства как системы автоматического управления даёт возможность оценить статическую ошибку стабилизации рассматриваемых атрибутов разрабатываемого устройства. Кроме того, использование цифрового интегратора в системе управления зарядно-разрядного устройства позволяет обеспечить заданную величину статической погрешности стабилизации требуемых атрибутов в различных режимах испытаний.

Ключевые слова: ресурсные испытания, литий-ионный аккумулятор, зарядно-разрядное устройство, погрешность измерения, статические ошибки стабилизации, динамический стрессовый тест.

Sibirskii Gosudarstvennyi Aerokosmicheskii Universitet
imeni Akademika M. F. Reshetneva. Vestnik
Vol. 18, No. 1, P. 140–148**ON THE STATIC ACCURACY OF CHARGE-DISCHARGE UNITS OF ONE CLASS INTENDED
FOR ELECTRICAL TESTS OF HIGH CAPACITY LI-ION BATTERIES**

E. A. Mizrah*, D. K. Lobanov, E. A. Kopylov, R. V. Balakirev, A. S. Fedchenko

Reshetnev Siberian State Aerospace University
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

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

Rechargeable energy storages are one of the basic components of spacecraft power systems. Characteristics of such energy storages significantly effect on the duration of the spacecraft life cycle in the orbit. In recent years, designers of spacecraft power systems frequently use Li-ion batteries as rechargeable energy storage. This is due to the fact that

the inherent energy characteristics of Li-ion batteries are distinctly higher than that of other types of batteries with a similar cycle life. To verify whether a battery satisfies the stated requirements, battery manufacturer performs a series of qualification tests, in particular, the specially designed cyclic tests, which allow estimating the battery cycle life. These tests can take several months (the exact duration depends on the battery model), which negatively affects the overall spacecraft production duration and cost.

Performing of the cycle testing according to the principles of Dynamic Stress Test can significantly reduce the overall time of development and production of batteries, which in turn allows reducing the cost of designing and testing of the spacecraft power systems. Dynamic Stress Test is a type of loading testing that allows verifying whether the battery can deliver the specified power to the consumer under all anticipated operating conditions. Basic principles of Dynamic Stress Test are charging and discharging of the battery by currents of large magnitude, and discharging of the battery at constant power, according to special program.

Performing of Dynamic Stress Test requires special charge-discharge units that allow performing a full cycle of electrical tests of batteries, including cyclic testing. Providing the required accuracy of measurement and stabilization of certain attributes of Li-ion battery operating modes is one of the problems that arise during the development of such charge-discharge units. The following attributes are of particular interest: charge and discharge currents, discharge powers, battery voltages.

The analysis of the charge-discharge unit as a control system allows evaluating the steady-state stabilization error of the required attributes of the developed device. Moreover, using a digital integrator in the control system of the charge-discharge unit allows providing specified values of steady-state stabilization error of required attributes in different test modes.

Keywords: cycle testing, Li-ion battery, charge-discharge unit, measurement error, steady-state stabilization errors, dynamic stress test.

Введение. Литий-ионные аккумуляторы широко используются в системах электропитания космических аппаратов. Характеристики литий-ионных аккумуляторов во многом влияют на время и во многом определяют срок активного функционирования космических аппаратов на орбите. При разработке и производстве литий-ионных аккумуляторов на заводе-изготовителе выполняют электрические испытания аккумуляторов, в частности, для оценки сроков эксплуатации аккумулятора проводятся ресурсные испытания. Эти испытания аккумуляторов включают в себя многократное циклическое воспроизведение режимов заряда/разряда с целью снижения полной емкости аккумуляторов и мощности до установленного минимального значения.

Сокращение сроков ресурсных испытаний позволяет существенно ускорить и удешевить проектирование и отработку энергосистемы космического аппарата. Для уменьшения сроков ресурсных испытаний разработаны методики ресурсных испытаний литий-ионных аккумуляторов, основанных на методике стрессовых испытаний [1–3]. Эта методика подразумевает увеличение токов заряда/разряда вплоть до максимальных значений токов испытываемого аккумулятора, включая режимы разряда постоянной мощностью. Заряд аккумуляторов обычно производят по методике производителя, а разряд – по методикам стрессовых испытаний.

В отечественной практике и за рубежом широко применяются зарядно-разрядные устройства (ЗРУ) отдельных литий-ионных аккумуляторных батарей [4–8], но эти устройства не могут использоваться для испытаний, в том числе и ресурсных, нескольких гальванически развязанных аккумуляторов, имеющих относительно небольшие напряжения и большие ёмкости. Существуют также устройства, позволяющие прово-

дить испытания составных литий-ионных батарей [9; 10]. К недостаткам перечисленных выше устройств можно отнести:

- недостаточно большой входной ток преобразователя: для испытаний аккумуляторов номинальной емкостью более 90 А·ч требуется ток более 100 А, для обеспечения которого потребуется использовать несколько параллельно подключённых устройств;

- отсутствие возможности разряда аккумуляторов до отрицательного напряжения (переплюсовки), что не позволяет исследовать работу аккумуляторных элементов в аварийных режимах.

Описание зарядно-разрядного устройства. Автоматизированное ЗРУ [11; 12] (рис. 1) позволяет проводить полный цикл электрических испытаний.

Источник бесперебойного питания (ИБП) предотвращает прерывание испытаний в случае аварийного отключения питающей сети переменного тока. Смена режимов заряда и разряда батареи происходит за счёт смены позиции ключей К1–К4 и за счёт работы управляемого стабилизатора напряжения (УСН). УСН позволяет обеспечивать стабильность работы режимов заряда и разряда. Избыточная энергия, потреблённая ЗРУ, рассеивается на нагрузочном устройстве (НУ).

Необходимость регулирования тока в широких пределах (0–160 А), необходимость в гальванической развязке между ключами К1–К4 и НУ и сложность высокочастотного трансформатора создают необходимость использования двух дополнительных импульсных стабилизаторов тока (ИСТ) и напряжения (ИСН). ИСТ стабилизирует свой входной ток, ИСН стабилизирует выходное напряжение ИСТ. ИСТ состоит из импульсного регулятора тока, основанного на повышающем преобразователе. ИСН состоит из импульсного регулятора напряжения, основанного на мостовом понижающем преобразователе [13; 14].

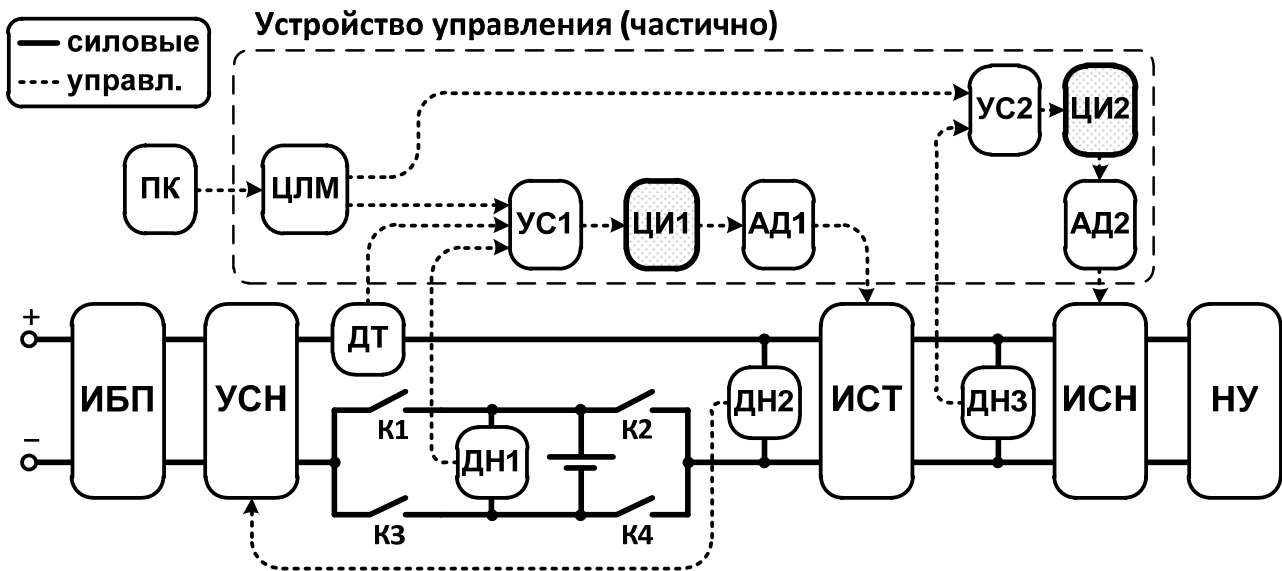


Рис. 1. Структурная схема зарядно-разрядного устройства

Для обеспечения высоких токов при низких напряжениях аккумулятора необходимо поддерживать выходное напряжение ИСН на относительно высоком уровне. По этой причине стабилизация входного напряжения ИСТ осуществляется УСН (датчик напряжения ДН2 формирует сигнал обратной связи для УСН). Таким образом, независимо от напряжения аккумулятора и режима работы (заряд и разряд батареи) УСН стабилизирует входное напряжение ИСТ на уровне 4 В. Более того, стабилизация входного напряжения ИСТ позволяет разряжать аккумулятор до смены полярности.

Устройство управления (УУ), в соответствии с предварительно записанными установками и измеренными значениями токов и напряжений аккумуляторов, выдаёт сигналы управления для ключей К1–К4 (связи, по которым передаются сигналы управления от УУ к ключам, не показаны на структурной схеме), формирует управляющие сигналы для ИСТ и ИСН и обеспечивает безопасное завершение испытаний в случае, если уровень заряда батарей ИБП мал и если напряжение в сети переменного тока отсутствует. УУ включает в себя цифровой логический модуль, который подключён к персональному компьютеру (ПК) и который формирует уставки, суммирующиеся в узлах суммирования (УС) сигналов управления ИСТ и ИСН и складывающиеся с сигналами с датчиков напряжения (ДН1, ДН3) и тока (ДТ). Сигналы управления для ИСТ и ИСН фильтруются цифровыми интеграторами (ЦИ) (более подробное их описание будет дано ниже) и усиливаются на аналоговых драйверах (АД).

ЗРУ выполняет следующие функции:

- стабилизация и регулирование токов заряда и разряда;
- стабилизация и регулирование мощности разряда;
- воспроизведение электрических и временных режимов работы батарей;
- автоматическая диагностика состояния ЗРУ;
- защита от аварийных режимов работы.

В документе [15] даны рекомендации по определению рабочих характеристик, проведению ресурсных испытаний литий-ионных аккумуляторов, а также погрешности измерений параметров аккумуляторов, которые составляют:

- а) $\pm 0,1$ % для напряжений;
- б) ± 1 % для токов;
- в) $\pm 0,1$ % для временных характеристик.

В то же время, [15] не устанавливает требования к погрешности обеспечения требуемых значений токов заряда и разряда и мощности разряда. В соответствии с принятой в системах автоматического управления практикой прием погрешности стабилизации атрибутов равными погрешностям измерения:

- а) ± 1 % для токов;
- б) $\pm 0,1$ % для временных характеристик;
- в) $\pm 1,1$ % для мощности.

Обеспечение требуемой погрешности измерения токов достигается использованием прецизионных датчиков тока и калибровкой датчиков тока. Калибровка датчиков тока производится с периодичностью, установленной в программе испытаний аккумулятора, и автоматически перед началом работы. Калибровка позволяет избавиться от статистической составляющей погрешности датчика тока.

Измерение напряжений аккумуляторов и датчиков тока производится с помощью специализированного измерительного комплекса на основе модулей National Instruments. Так как требуется гальваническая развязка каналов измерения, используются модули NI PXIe-4300 [16]. Они обеспечивают измерение по 8 каналам одновременно и имеют собственную приведенную погрешность измерения модулей не более 0,0245 %.

Стабилизация и регулирование атрибутов реализована на основе цифровой обработки сигналов в однокристалльном компьютере. Погрешность стабилизации состоит из суммы погрешностей:

- погрешности измерения токов и напряжений (рассмотрены выше);

- погрешности, обусловленной разрядностью аналого-цифрового преобразователя (АЦП);
- погрешности источника опорного напряжения;
- погрешности контура стабилизации атрибута.

Требования к погрешностям АЦП и прецизионного источника опорного напряжения обеспечены выбором соответствующих электронных компонентов. Зарядно-разрядное устройство, рассмотренное авторами в [11; 12], содержит импульсный стабилизатор входного тока и импульсный стабилизатор выходного напряжения ИСТ.

Математическая модель. Математическая модель силовой части ЗРУ основана на структурной схеме (см. рис. 1) и эквивалентной электрической схеме (рис. 2). Эта модель позволяет анализировать статическую точность стабилизации ЗРУ.

Изменение величин напряжений и токов в цепях в установившемся режиме пренебрежительно мало, что позволяет не учитывать параметры реактивных элементов в математической модели (индуктивности и емкости). Линеаризованная система уравнений в установившемся режиме (1) описывает взаимосвязи между токами и напряжениями в цепи, показанной на рис. 2:

$$\begin{cases} V_S = V_{CVS} + E_B, \\ v_{IN1} = V_S - i_{IN1}(R_{CVS} + R_B), \\ i_{IN1} = I_{IN1}D_I + I_{IN1}d_i + i_{in1}D_I + i_{IN2}, \\ v_{IN2} = v_{IN1} - i_{IN1}R_{L1} + V_{IN2}D_I + v_{in2}D_I + V_{IN2}d_i, \\ i_{IN2} = (I_{LU}D_V + i_{lu}D_V + I_{LU}d_v)n, \\ v_{LU} = (V_{IN2}D_V + v_{in2}D_V + V_{IN2}d_v)n - i_{LU}R_{L2}, \\ i_{LU} = v_{LU}G_{LU}, \end{cases} \quad (1)$$

где V_S – напряжение источника; V_{CVS} – постоянное напряжение на выходе УСН; E_B – постоянное напряжение на клеммах аккумулятора; v_{IN1} – входное напряжение ИСТ; $i_{IN1} = I_{IN1} + i_{in1}$ – полное значение входного тока ИСТ; I_{IN1} – точка линеаризации i_{IN1} ; i_{in1} – отклонение значения i_{IN1} ; R_{CVS} – сопротивление УСН; R_B – сопротивление аккумулятора; $d_i = D_I + d_i$ – полное значение коэффициента заполнения ИСТ; D_I – точка линеаризации d_i ; d_i – отклонение значения d_i ;

$v_{IN2} = V_{IN2} + v_{in2}$ – полное значение входного напряжения ИСН; V_{IN2} – точка линеаризации v_{IN2} ; v_{in2} – отклонение значения v_{IN2} ; R_{L1} – сопротивление L_1 ; i_{IN2} – входной ток ИСН; $i_{LU} = I_{LU} + i_{lu}$ – полное значение тока НУ; I_{LU} – точка линеаризации i_{LU} ; i_{lu} – отклонение значения i_{LU} ; $d_v = D_V + d_v$ – полное значение коэффициента заполнения ИСН; D_V – точка линеаризации d_v ; d_v – отклонение значения d_v ; n – коэффициент трансформации T ; v_{LU} – напряжение НУ; R_{L2} – сопротивление L_2 ; G_{LU} – проводимость НУ.

Система уравнений (2) описывает систему управления ЗРУ. Совместно с (1) она формирует математическую модель ЗРУ. Функциональная схема ЗРУ в установившемся режиме (рис. 3) состоит из систем (1) и (2):

$$\begin{cases} d_I = (V_{REFI} - i_{IN1}K_{CS})K_I K_{PMMI}, \\ d_V = (v_{IN2}K_{VS} - V_{REFV})K_V K_{PMMV}, \end{cases} \quad (2)$$

где V_{REFI} – уставка тока ИСТ; K_{CS} – коэффициент датчика тока; K_I – коэффициент усиления контура управления ИСТ; K_{PMMI} – коэффициент широтно-импульсного модулятора (ШИМ) ИСТ; V_{REFV} – уставка напряжения ИСН; K_{VS} – коэффициент датчика напряжения; K_V – коэффициент усиления контура управления ИСН; K_{PMMV} – коэффициент ШИМ ИСН.

Выражения для тока и напряжения со смещением, которое появилось в результате наличия установившейся ошибки, были получены из систем (1) и (2):

$$i_{IN1} = f(V_S, V_{REFI}, V_{REFV}, K_I, K_V), \quad (3)$$

$$v_{IN2} = f(V_S, V_{REFI}, V_{REFV}, K_I, K_V). \quad (4)$$

Передаточные функции контуров управления ИСТ и ИСН в установившемся режиме будут представлять собой коэффициенты разомкнутых контуров (РК) ИСТ K_{OLI} и ИСН K_{OLV} соответственно, которые представляют собой функции следующих переменных:

$$K_{OLI} = f(V_S, V_{REFI}, V_{REFV}, K_I, K_V), \quad (5)$$

$$K_{OLV} = f(V_S, V_{REFI}, V_{REFV}, K_I, K_V). \quad (6)$$

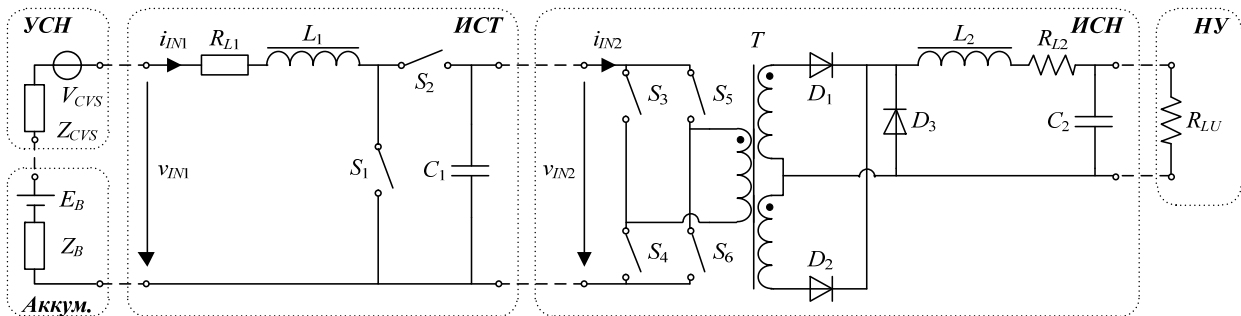


Рис. 2. Эквивалентная электрическая схема силовой части ЗРУ

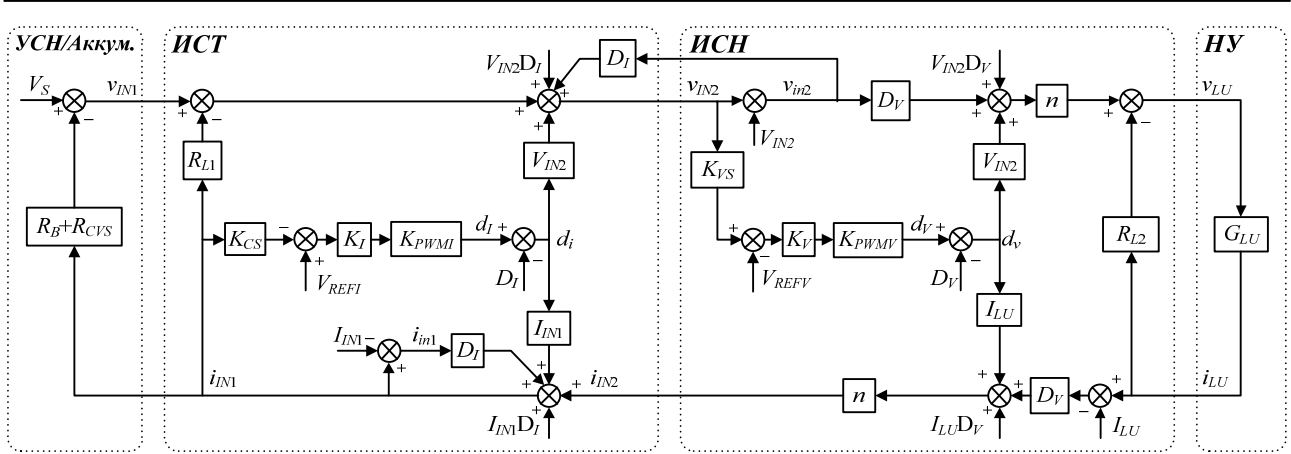


Рис. 3. Функциональная схема линейризованной модели ЗРУ в установившемся режиме

Поскольку входной ток ЗРУ изменяется в широких пределах, вплоть до нулевых значений, то применение для оценки точности относительной погрешности может дать большие ошибки при малых токах. Более удобным для задач оценки является применение приведенных погрешностей δ_M [17; 18]. Для оценки погрешности стабилизации входного тока ИСТ используется приведенная методическая ошибка δ_{MI} по току, которая определяется как

$$\delta_{MI} = \left| \frac{I_{IN1} - i_{IN1}}{I_{IN1max}} \right|, \quad (7)$$

где $i_{IN1} = I_{IN1} + i_{in1}$ – полное значение входного тока ИСТ; I_{IN1} – точка линеаризации i_{IN1} ; I_{IN1max} – максимальный ток ЗРУ ($I_{IN1max} = 160$ А).

Приведенная погрешность стабилизации входного тока ЗРУ δ_{MI} при проектировании была задана равной 0,5 %.

Аналогично для оценки погрешности стабилизации напряжения на входе ИСН используется приведенная методическая ошибка δ_{MV} по напряжению:

$$\delta_{MV} = \left| \frac{V_{IN2} - v_{IN2}}{V_{IN2max}} \right|, \quad (8)$$

где $v_{IN2} = V_{IN2} + v_{in2}$ – полное значение входного напряжения ИСН; V_{IN2} – точка линеаризации v_{IN2} ; V_{IN2max} – максимальное входное напряжение ИСН.

Результаты расчётов и экспериментов. Исследование влияния различных режимов работы ЗРУ на приведенную ошибку по входному току позволяет определить параметры устройства, обеспечивающие требуемую точность стабилизации входного тока ЗРУ. Режимы работы ЗРУ определяются различными значениями следующих величин: величины входного тока I_{IN1} , величины входного напряжения V_S , величин коэффициентов передачи РК ИСТ K_{OLI} и ИСН K_{OLV} .

Уравнения (3)–(8) позволяют получить неявные зависимости приведенных ошибок ИСТ δ_{MI} и ИСН δ_{MV} от коэффициентов передачи РК ИСТ K_{OLI} и ИСН K_{OLV} (рис. 4–9).

Рис. 4 и 5 иллюстрируют тот факт, что с увеличением коэффициента передачи РК ИСТ K_{OLI} величина δ_{MI}

уменьшается независимо от действия различных дестабилизирующих факторов.

График на рис. 6 иллюстрирует тот факт, что приведенная ошибка по входному току ИСТ δ_{MI} остаётся практически неизменной с увеличением коэффициента передачи РК ИСН K_{OLV} и уменьшается в увеличением коэффициента передачи РК ИСТ K_{OLI} .

Величина коэффициента передачи РК ИСН K_{OLV} определяет погрешность стабилизации ИСН δ_{MV} . Экспериментально установлено, что для нормального функционирования ЗРУ величина приведенной ошибки стабилизации входного напряжения ИСН δ_{MV} должна составлять 3–5 % во всём диапазоне входных токов и напряжений. Рис. 7–9 показывают, что для обеспечения этого требования коэффициент передачи ИСН K_{OLV} должен быть достаточно большой величины.

Графики на рис. 7 и 8 иллюстрируют тот факт, что приведенная ошибка ИСН δ_{MV} уменьшается с увеличением коэффициента передачи РК ИСН K_{OLV} и не зависит от входного напряжения V_S .

График на рис. 9 иллюстрирует тот факт, что приведенная погрешность ИСН δ_{MV} значительно зависит от коэффициента передачи РК K_{OLI} и входного тока I_{IN1} , что накладывает ограничения на минимальную величину коэффициента передачи РК ИСТ K_{OLI} .

Из результатов математического моделирования можно заключить, что коэффициенты передачи РК ИСТ K_{OLI} и ИСН K_{OLV} взаимосвязаны. Методически целесообразно сначала выбрать коэффициент передачи РК ИСН K_{OLV} , а затем выбрать коэффициент передачи РК ИСТ K_{OLI} достаточно большой величины.

В рассматриваемом ЗРУ требуемая точность стабилизации атрибутов достигается обеспечением астатических свойств в ИСТ путём введения цифрового интегратора контура управления ИСТ [19].

Разностное уравнение цифрового интегратора имеет вид

$$E_g[n] = k \cdot E_g[n] + E_g[n-1], \quad (9)$$

где n – безразмерное время; k – коэффициент интегрирования.

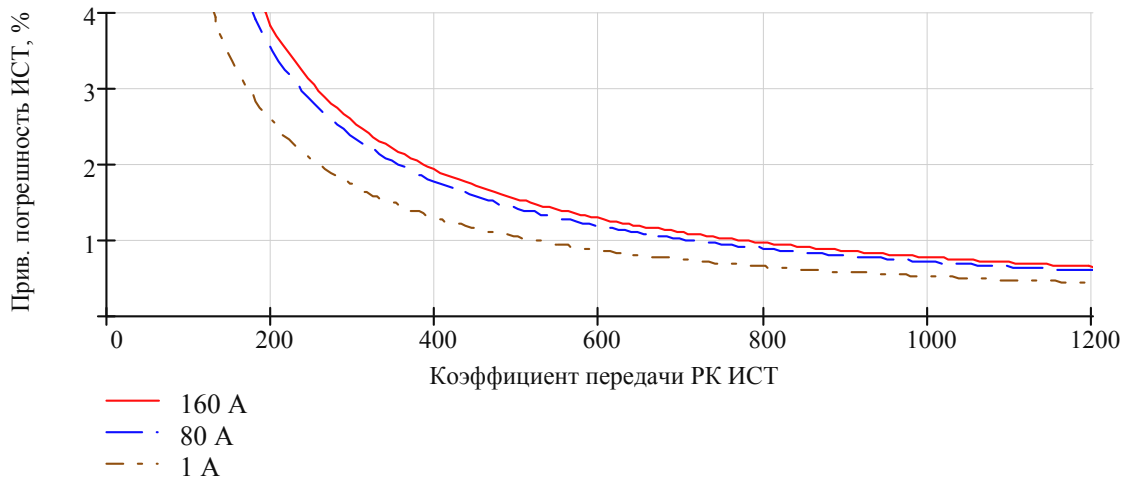


Рис. 4. Неявная зависимость приведённой погрешности ИСТ δ_{MI} от коэффициента передачи РК ИСТ K_{OLI} при разных значениях входного тока I_{IN1}

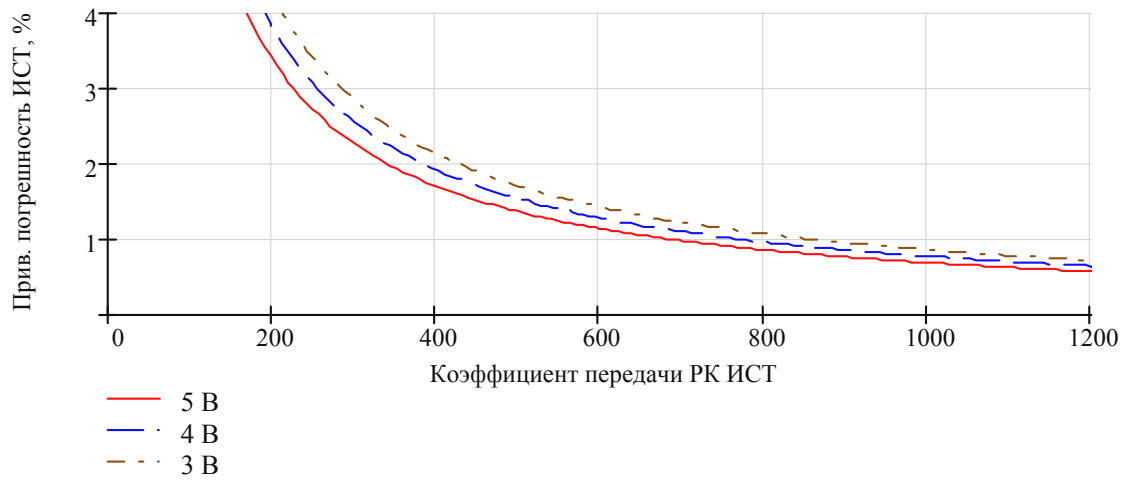


Рис. 5. Неявная зависимость приведённой погрешности ИСТ δ_{MI} от коэффициента передачи РК ИСТ K_{OLI} при разных значениях входного напряжения V_S

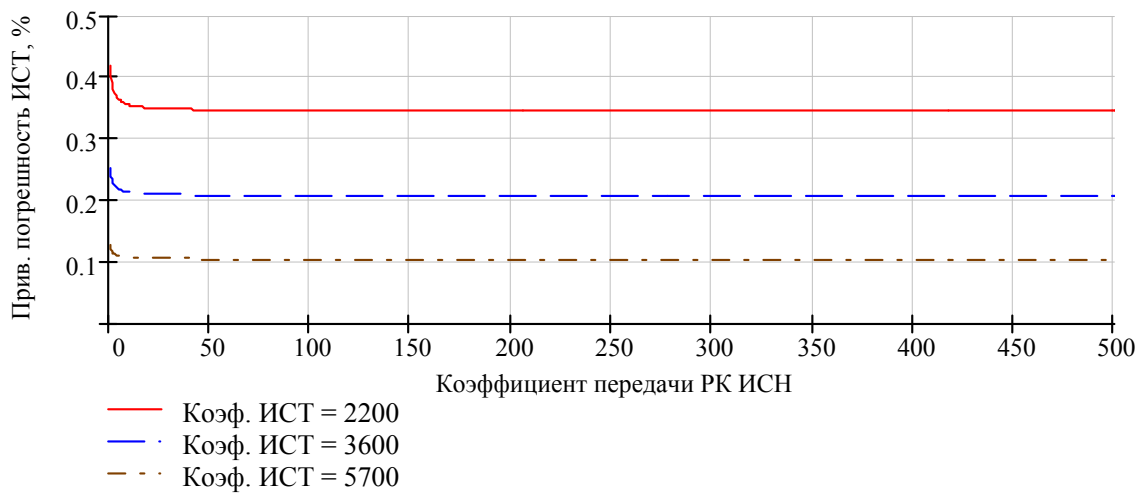


Рис. 6. Неявная зависимость приведённой погрешности ИСТ δ_{MI} от коэффициента передачи РК ИСТ K_{OLI} при разных значениях коэффициента передачи РК K_{OLI}

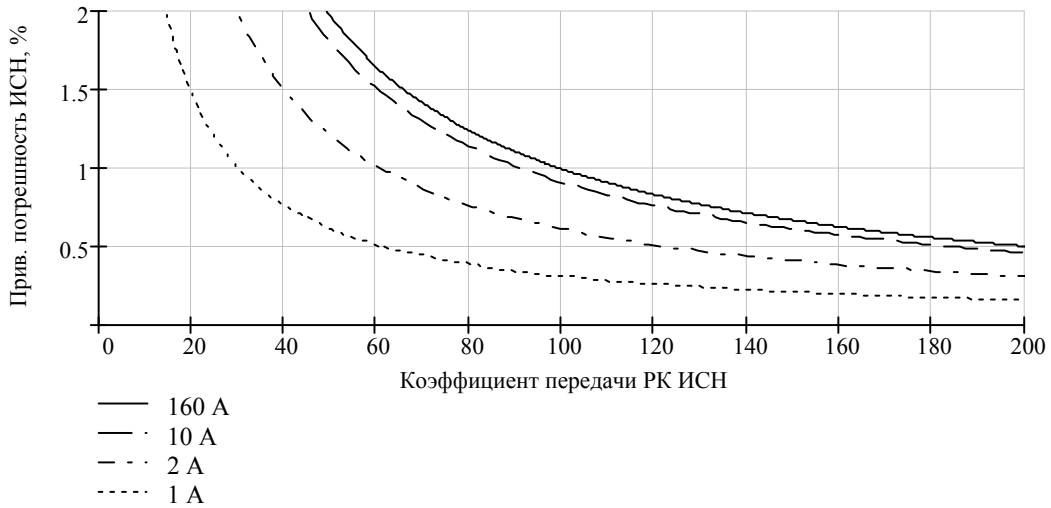


Рис. 7. Неявная зависимость приведённой погрешности ИСН δ_{MV} от коэффициента передачи РК ИСН K_{OLV} при разных значениях входного тока I_{IN1}

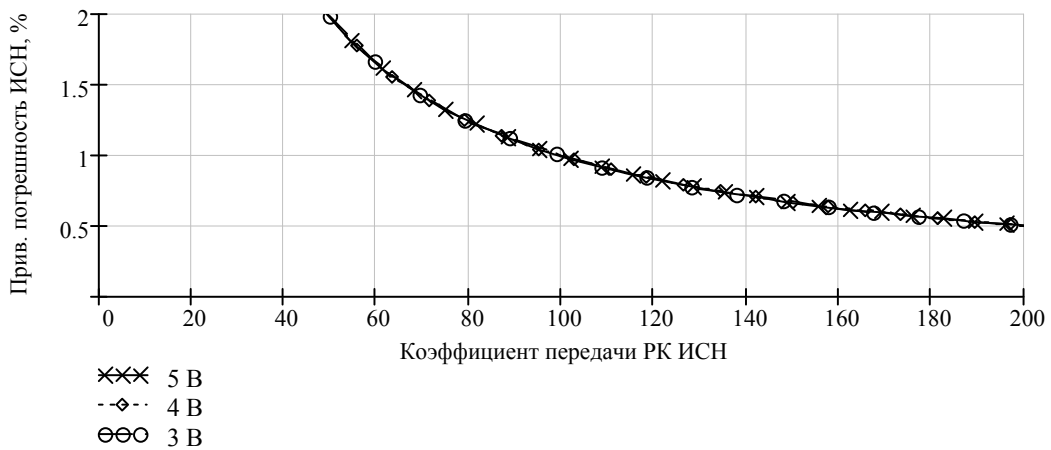


Рис. 8. Неявная зависимость приведённой погрешности ИСН δ_{MV} от коэффициента передачи РК ИСН K_{OLV} при разных значениях входного напряжения V_S

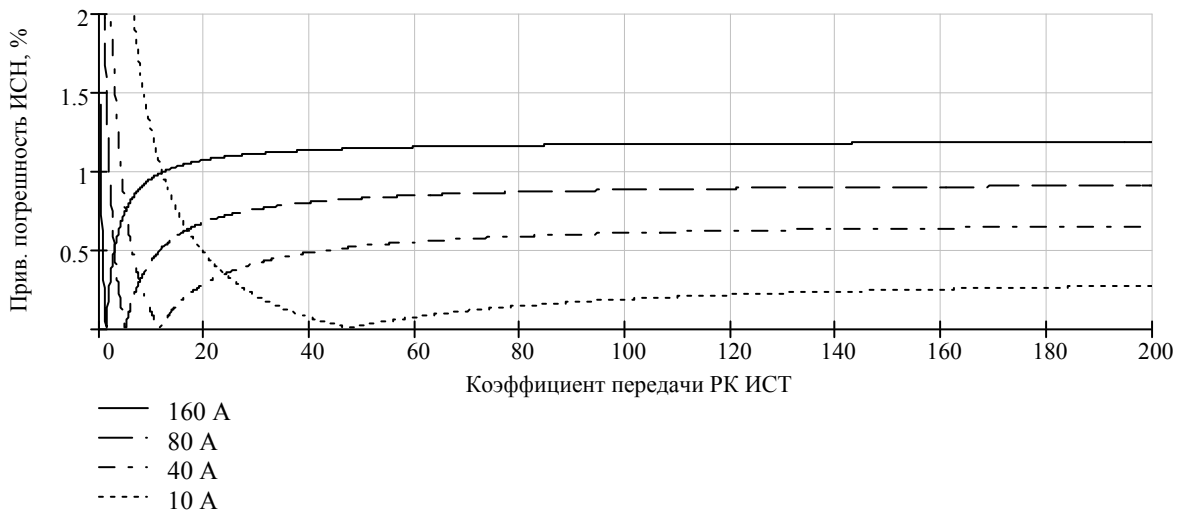


Рис. 9. Неявная зависимость приведённой погрешности ИСН δ_{MV} и коэффициента передачи РК ИСН K_{OLI} для различных значений входного тока I_{IN1}

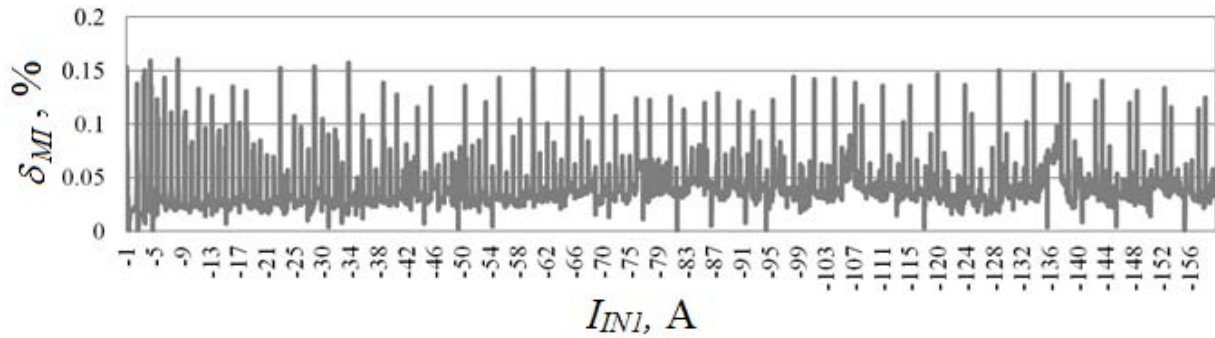


Рис. 10. Экспериментально полученная зависимость приведённой ошибки ИСТ δ_{MI} от входного тока I_{INI}

Для иллюстрации правильности разработанного подхода к выбору параметров ЗРУ были проведены экспериментальные исследования погрешности при испытаниях литий-ионного аккумулятора ЛИГП-85 [20] (рис. 10).

Результаты эксперимента подтверждают, что величина приведённой погрешности стабилизации входного тока ИСТ не превышает 0,2 %, что согласуется с выбранными при разработке условиями ($\delta_{MI} = 0,5 \%$).

Заключение. Предложенный подход к выбору параметров ЗРУ обеспечивает заданную точность стабилизации требуемых атрибутов режимов эксплуатации литий-ионных аккумуляторов. Из результатов математического моделирования следует, что коэффициенты разомкнутых контуров ИСТ K_{OLI} и ИСН K_{OLV} взаимосвязаны. По этой причине методически целесообразно вначале выбрать величину коэффициента разомкнутого контура ИСН K_{OLV} , а затем выбрать коэффициент разомкнутого контура ИСТ K_{OLI} достаточно большой величины. Требуемая точность стабилизации атрибутов была достигнута обеспечением астатических свойств в ИСТ путём введения цифрового интегратора в контур его управления.

Благодарности. Работа поддержана Министерством образования и науки Российской Федерации (соглашение о предоставлении субсидии № 14.577.21.0082, уникальный идентификатор RFMEFI57714X008) и АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва.

Acknowledgements. This study was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (Government Contract 14.577.21.0082, unique identifier RFMEFI57714X008) and JSC “Information satellite system” name after academician M. F. Reshetnev”.

Библиографические ссылки

1. A comparative study of three model-based algorithms for estimating state-of-charge of lithium-ion batteries under a new combined dynamic loading profile / F. Y. Yang [et al.] // *Applied Energy*. 2016. Vol. 164. P. 387–399. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.11.072.

2. Hussein A. A. Capacity Fade Estimation in Electric Vehicle Li-Ion Batteries Using Artificial Neural Networks // *IEEE Trans. on Industry Applications*. 2015. Vol. 51. P. 2321–2330. DOI: 10.1109/TIA.2014.2365152.

3. State of charge estimation of lithium-ion batteries using the open-circuit voltage at various ambient temperatures / Y. Xing [et al.] // *Applied Energy*. 2014. Vol. 113. P. 106–115. DOI: 10.1016/j.apenergy.2013.07.008.

4. Пат. 7576545 В2 США, МПК⁷ G 01 N 27/416. Lithium-ion battery prognostic testing and process / Sight H. N. № US 11/550,566 ; заявл. 18.10.2006 ; опубл. 18.08.2009.

5. Пат. 6300763 В1 США, МПК⁷ H 01 M 10/44, G 01 R 31/36. Method of calculating dynamic state-of-charge within a battery / Kwok W. Y. № US 09/722,858 ; заявл. 27.11.2000 ; опубл. 09.10.2001.

6. Пат. 7576545 В2 США, МПК⁷ G 01 R 31/36, H 01 M 10/48, H 02 J 7/00. Method and apparatus for determining the state of charge of a lithium-ion battery / Sight H. N. № US 09/721,003 ; заявл. 22.11.2000 ; опубл. 01.07.2003.

7. Пат. 4949046 А США, МПК⁷ G 01 R 31/36, H 02 J 7/00. Battery state of charge indicator / Sayfang G. R. № US 07/210,166 ; заявл. 21.06.1988 ; опубл. 14.08.1990.

8. Пат. 20050269993 А1 США, МПК⁷ H 02 J 7/00, G 01 R 31/36. Method and apparatus for determining the available of energy of a lithium ion battery / Palanisamy T. [et al.] № US 10/860,308 ; заявл. 04.06.2004 ; опубл. 08.12.2005.

9. Chroma Systems Solutions, Inc. 17011 Programmable Charge/Discharge Tester [Электронный ресурс]. URL: <http://www.chromausa.com/product/17011-programmable-charge-discharge-tester/> (дата обращения: 01.02.2017).

10. Cadex Electronics Inc. C8000 BATTERY TESTING SYSTEM [Электронный ресурс]. URL: <http://www.cadex.com/en/products/c8000-battery-testing-system/> (дата обращения: 01.02.2017).

11. Study of a lithium-ion battery charge-discharge test unit characteristics / E. A. Kopylov [et al.] // *IOP Conf. Series : Materials Science and Engineering*. 2016. Vol. 122. DOI: 10.1088/1757-899X/122/1/012015.

12. Static accuracy of the automated stand for lithiumion batteries testing / A. S. Fedchenko [et al.] // *18th Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON)*. Lemesos, 2016. DOI: 10.1109/MELCON.2016.7495336.

13. Hybrid-Switching Full-Bridge DC–DC Converter With Minimal Voltage Stress of Bridge Rectifier, Reduced Circulating Losses, and Filter Requirement for Electric Vehicle Battery Chargers / B. Gu [et al.] // *IEEE Trans. on Power Electronics*. 2013. Vol. 28. P. 1132–1144. DOI: 10.1109/TPEL.2012.2210565.

14. A Zero-Voltage Switching Full-Bridge DC–DC Converter With Capacitive Output Filter for Plug-In Hybrid Electric Vehicle Battery Charging / D. S. Gautam [et al.] // *IEEE Trans. on Power Electronics*. 2013. Vol. 28. P. 5728–5735. DOI: 10.1109/TPEL.2013.2249671.

15. ГОСТ Р МЭК 62660-1–2014. Аккумуляторы литий-ионные для электрических дорожных транспортных средств. Ч. 1. Определение рабочих характеристик. М. : Стандартинформ, 2015. 34 с.

16. National Instruments Corporation PXIe-4300 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ni.com/ru-ru/support/model.pxi-4300.html> (дата обращения: 01.02.2017).

17. Мизрах Е. А. Методология оценки точности имитаторов первичных источников электроэнергии космических аппаратов // *Вестник СибГАУ*. 2001. № 2(8). С. 10–14.

18. Мизрах Е. А. Исследование статической точности имитаторов солнечных батарей // *Вестник СибГАУ*. 2005. № 4(12). С. 24–27.

19. Selvaraj J., Rahim N. A. Multilevel Inverter For Grid-Connected PV System Employing Digital PI Controller // *IEEE Trans. on Industrial Electronics*. 2008. Vol. 56. P. 149–158. DOI: 10.1109/TIE.2008.928116.

20. ПАО «Сатурн». ЛИГП-85 [Электронный ресурс]. URL: http://www.saturn.kuban.ru/liab_spec.html (дата обращения: 01.02.2017).

References

1. Yang F. Y., Xing Y., Wang D., Tsui K.-L. A comparative study of three model-based algorithms for estimating state-of-charge of lithium-ion batteries under a new combined dynamic loading profile. *Applied Energy*. 2016, Vol. 164, P. 387–399. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.11.072.

2. Hussein A. A. Capacity Fade Estimation in Electric Vehicle Li-Ion Batteries Using Artificial Neural Networks. *IEEE Trans. on Industry Applications*. 2015, Vol. 51, No. 3, P. 2321–2330. DOI: 10.1109/TIA.2014.2365152.

3. Xing Y., He W., Pecht M., Tsui K. L. State of charge estimation of lithium-ion batteries using the open-circuit voltage at various ambient temperatures. *Applied Energy*. 2014, Vol. 113, P. 106–115. DOI: 10.1016/j.apenergy.2013.07.008.

4. Sight H. N. *Lithium-ion battery prognostic testing and process*. Patent US, No. 7576545 B2, 2009.

5. Kwok W. Y. *Method of calculating dynamic state-of-charge within a battery*. Patent US, No. 6300763 B1, 2001.

6. Guiheen J. V., Sight H., Palanisamy T. G. Method and apparatus for determining the state of charge of a lithium-ion battery. Patent US, No. 6586130 B1, 2003.

7. Sayfang G. R. Battery state of charge indicator. Patent US, No. 4949046 A, 1990.

8. Palanisamy T., Sight H., Atehortua H., Hoenig S. Method and apparatus for determining the available of energy of a lithium ion battery. Patent US, No. 20050269993 A1, 2005.

9. Chroma Systems Solutions, Inc. *17011 Programmable Charge/Discharge Tester*. Available at: <http://www.chromausa.com/product/17011-programmable-chargedischage-tester/> (accessed 01.02.2017).

10. Cadex Electronics Inc. *C8000 BATTERY TESTING SYSTEM*. Available at: <http://www.cadex.com/en/products/c8000-battery-testing-system/> (accessed 01.02.2017).

11. Kopylov E. A., Mizrah E. A., Fedchenko A. S., Lobanov D. K. Study of a lithium-ion battery charge-discharge test unit characteristics. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2016, Vol. 122. DOI: 10.1088/1757-899X/122/1/012015.

12. Fedchenko A. S., Kopylov E. A., Lobanov D. K., Mizrah E. A. Static accuracy of the automated stand for lithiumion batteries testing. *18th Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON)*, Lemesos, 2016. DOI: 10.1109/MELCON.2016.7495336.

13. Gu B., Lai J.-S., Kees N., Zheng C. Hybrid-Switching Full-Bridge DC–DC Converter With Minimal Voltage Stress of Bridge Rectifier, Reduced Circulating Losses, and Filter Requirement for Electric Vehicle Battery Chargers. *IEEE Trans. on Power Electronics*. 2013, Vol. 28, No. 3, P. 1132–1144. Doi: 10.1109/TPEL.2012.2210565.

14. Gautam D. S., Musavi F., Eberle W., Dunford W. G. A Zero-Voltage Switching Full-Bridge DC–DC Converter With Capacitive Output Filter for Plug-In Hybrid Electric Vehicle Battery Charging. *IEEE Trans. on Power Electronics*. 2013, Vol. 28, No. 12, P. 5728–5735. DOI: 10.1109/TPEL.2013.2249671.

15. ГОСТ Р МЭК 62660-1–2014. *Akkumulyatory lityi-ionnyye dlya elektricheskikh dorozhnykh transportnykh sredstv. Chast' 1. Opredelenie rabochikh kharakteristik*. [IEC 62660-1:2010. Secondary lithium-ion cells for the propulsion of electric road vehicles. Part 1. Performance testing]. Moscow, Standartinform Publ., 2015. 34 p.

16. National Instruments Corporation PXIe-4300. Available at: <http://www.ni.com/ru-ru/support/model.pxi-4300.html> (accessed 01.02.2017).

17. Mizrah E. A. [Method for assessing the accuracy of spacecraft primary energy source simulators]. *Vestnik SibGAU*. 2001, Vol. 8, No. 2, P. 10–14 (In Russ.).

18. Mizrah E. A. [The analysis of static accuracy of solar batteries simulators]. *Vestnik SibGAU*. 2005, Vol. 12, No. 4, P. 24–27 (In Russ.).

19. Selvaraj J., Rahim N. A. Multilevel Inverter For Grid-Connected PV System Employing Digital PI Controller. *IEEE Trans. on Industrial Electronics*. 2008, Vol. 56, No. 1, P. 149–158. DOI: 10.1109/TIE.2008.928116.

20. JSC “Saturn” LISP-85. Available at: http://www.saturn.kuban.ru/liab_spec.html (accessed 01.02.2017).