Контроллер активной индуктивной балансировки литий-железо-фосфатной аккумуляторной батареи LIFEPO4 на базе микросхем ETA3000

Дандаров Вадим Дмитриевич
инженер, Инженерно-исследовательского центра космических технологий, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, dandarovvd03@gmail.com,

Сухоруков Максим Петрович
и.о. директора Научно-исследовательского института космических технологий, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, maksim.p.sukhorukov@tusur.ru,

Апасов Владимир Иванович
кандидат технических наук, старший научный сотрудник Инженерно-исследовательского центра космических технологий, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, avi@ie.tusur.ru,

Гебгардт Виктор Александрович
начальник сектора проектирования и сопровождения летной эксплуатации системы электропитания космических аппаратов, разрабатываемых по коммерческим заказам, АО «“Информационные спутниковые системы” имени академика М.Ф. Решетнёва», gebgardt33@mail.ru,

Юдинцев Антон Геннадьевич
кандидат технических наук, директор научно-исследовательского института автоматики и электромеханики (НИИ АЭМ), Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, yag@niiaem.tusur.ru

Представлены результаты экспериментального исследования контроллера активной индуктивной балансировки литий-железо-фосфатной аккумуляторной батареи LiFePO4, выполненного на базе специализированных микросхем ETA3000. Контроллер входит в состав устройства заряда аккумуляторной батареи малого космического аппарата и обеспечивает выравнивание напряжений последовательно соединённых ячеек за счёт переноса энергии через внешнюю индуктивность. Исследование проведено на лабораторном макете с восьмиэлементной аккумуляторной батареи в пяти характерных режимах работы. Подтверждена работоспособность контроллера во всех исследованных режимах и показано, что наибольшая эффективность активной индуктивной балансировки достигается в режиме заряда аккумуляторной батареи.
Ключевые слова: активная индуктивная балансировка, ETA3000, малый космический аппарат, разброс напряжений ячеек, экспериментальное исследование, буферный режим.

Работа выполнена в рамках проекта: исследование методов и технологий создания информационно-телекоммуникационных систем радиомониторинга и связи, их компонентов и узлов, на основе численных и экспериментальных методов анализа электромагнитных сигналов и физических явлений в твердом теле (FEWM-2026-0007).

Введение

Аккумуляторная батарея является одним из ключевых элементов системы электропитания малого космического аппарата. В условиях циклического чередования солнечных и теневых участков орбиты аккумуляторная батарея должна обеспечивать устойчивое энергоснабжение нагрузки, а ограниченное время заряда предъявляет дополнительные требования к эффективности систем управления и балансировки отдельных аккумуляторных ячеек [1]. В настоящей работе рассматривается аккумуляторная батарея на основе литий-железо-фосфатных ячеек LiFePO4, для которых состояние отдельных элементов и различия их электрических параметров существенно влияют на характеристики последовательной аккумуляторной батареи [2].

В последовательной аккумуляторной батарее неизбежно возникает разброс напряжений и состояний заряда отдельных ячеек, обусловленный технологическими отклонениями ёмкости и внутреннего сопротивления, различиями в условиях эксплуатации и неодинаковой скоростью деградации. При последовательном соединении рабочий диапазон всей аккумуляторной батареи ограничивается характеристиками наиболее заряженной или наиболее разряженной ячейки. Поэтому для повышения степени использования доступной ёмкости и предотвращения увеличения разбаланса применяются системы выравнивания состояния аккумуляторных элементов [5].

Наиболее простым решением является пассивная балансировка, при которой избыточная энергия более заряженных ячеек рассеивается на балансировочных резисторах. Современные методы пассивного выравнивания отличаются сравнительно простой схемотехнической реализацией, однако принципиально связаны с рассеянием части энергии в виде тепла [5]. В активных системах балансировки энергия перераспределяется между элементами аккумуляторной батареи с использованием индуктивных, трансформаторных, ёмкостных и преобразовательных структур [3, 6, 7, 10, 11]. Эффективность таких систем определяется не только схемотехнической реализацией, но и алгоритмом управления, режимом работы аккумуляторной батареи и величиной балансировочного тока [4, 5, 8, 9].

Одним из вариантов практической реализации активной индуктивной балансировки является применение специализированной микросхемы ETA3000, содержащей силовые ключи и систему автоматического управления переносом энергии между двумя соседними аккумуляторными ячейками через внешний накопительный дроссель [12].

Целью данной статьи является экспериментальное исследование контроллера активной индуктивной балансировки LiFePO4-аккумуляторной батареи на базе микросхем ETA3000 и оценка эффективности выравнивания напряжений ячеек в различных режимах работы аккумуляторной батареи.

1. Подключение и принцип работы микросхемы ETA3000

Для реализации активной индуктивной балансировки используется специализированная микросхема ETA3000D2I, предназначенная для выравнивания напряжений двух соседних последовательно соединённых аккумуляторных ячеек. Микросхема содержит встроенные силовые ключи, узел определения разбаланса, схему выбора направления передачи энергии и систему ограничения балансировочного тока. Внешним накопительным элементом является дроссель, через который осуществляется перенос энергии между соседними ячейками [12].

Типовая схема подключения ETA3000 приведена на рис. 1.

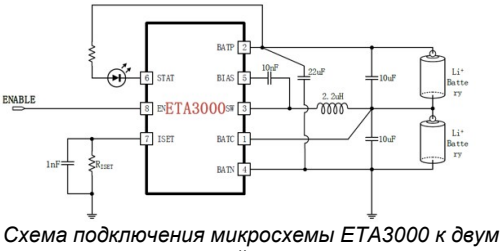


Рис. 1 – Схема подключения микросхемы ETA3000 к двум соседним аккумуляторным ячейкам

Вывод **BATP** подключается к положительному выводу верхней ячейки, вывод **BATC** — к общей точке между двумя соседними ячейками, а вывод **BATN** — к отрицательному выводу нижней ячейки. Таким образом, микросхема непосредственно контролирует напряжения двух соседних элементов аккумуляторной батареи. Внешний накопительный дроссель подключается к коммутационному выводу **SW** и используется для промежуточного накопления энергии в процессе балансировки.

Балансировочный ток задаётся внешним резистором, подключённым к выводу **ISET**. В исследуемом контроллере используются резисторы сопротивлением 25 кОм, которым соответствует балансировочный ток около 2 А. В качестве накопительного элемента применяется дроссель индуктивностью 2,2 мкГн.

ETA3000 периодически сравнивает напряжения подключённых ячеек. Если разность между ними превышает внутренний порог обнаружения разбаланса 100мВ, микросхема автоматически определяет направление передачи энергии и начинает процесс балансировки. При более высоком напряжении верхней ячейки энергия передаётся в направлении от верхней ячейки к нижней. Если более высокое напряжение имеет нижняя ячейка, направление переноса энергии изменяется на противоположное.

Для внешнего управления предусмотрен вход EN, а выход STAT используется для контроля состояния балансировочного канала. Сравнение напряжений, выбор направления переноса энергии и управление силовыми ключами выполняются непосредственно микросхемой ETA3000 [12].

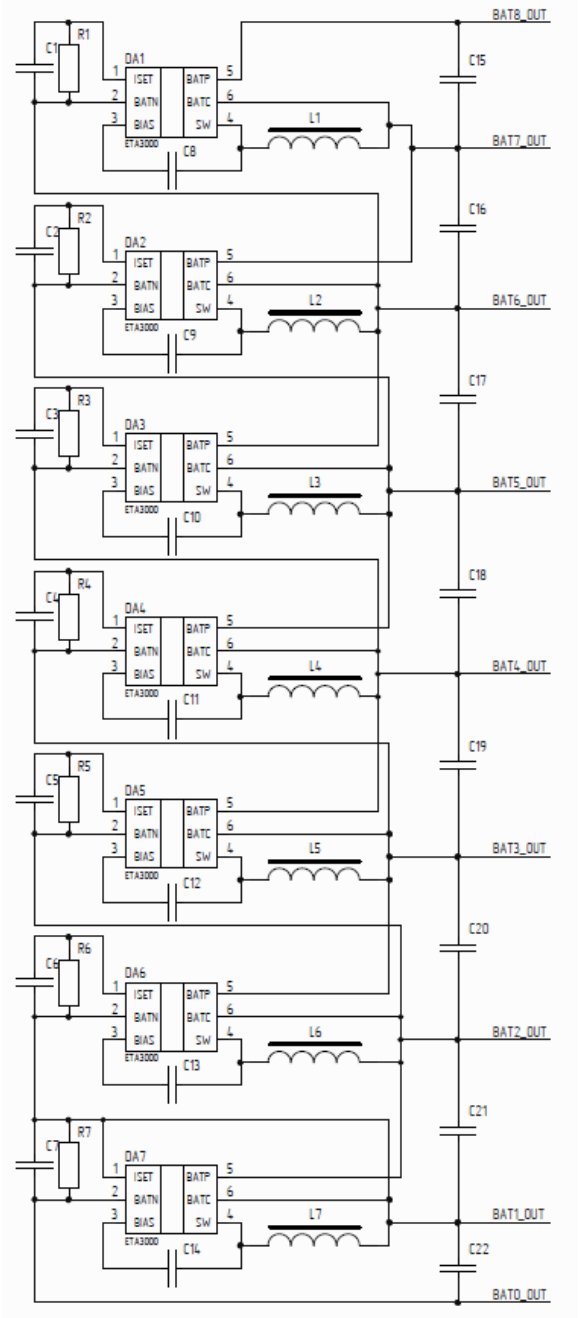


Рисунок 2 - Подключение микросхем ETA3000 для восьмиэлементной аккумуляторной батареи

Для многоэлементной аккумуляторной батареи микросхемы ETA3000 устанавливаются между соседними парами ячеек. В исследуемой восьмиэлементной батарее используются семь балансировочных каналов, схема подключения которых приведена на рис. 2. При разбалансе удалённых элементов передача энергии осуществляется последовательно через промежуточные каналы.

2. Лабораторный макет и методика испытаний

Лабораторный макет для исследования контроллера активной индуктивной балансировки содержит аккумуляторную батарею из восьми последовательно соединённых литий-железо-фосфатных ячеек LiFePO4 3.2V, PLB IFR26650-40A, 4000 мАч, плату контроллера балансировки, лабораторные источники питания QJ3004XIII, цифровые мультиметры Agilent 34401A, электронная нагрузка АКИП-1375/1E и осциллограф RIGOL MSO5354. Восьмиэлементная батарея использована как лабораторный фрагмент аккумуляторной батареи, позволяющий оценить работу контроллера в различных режимах работы. Внешний вид макета приведён на рис. 3.

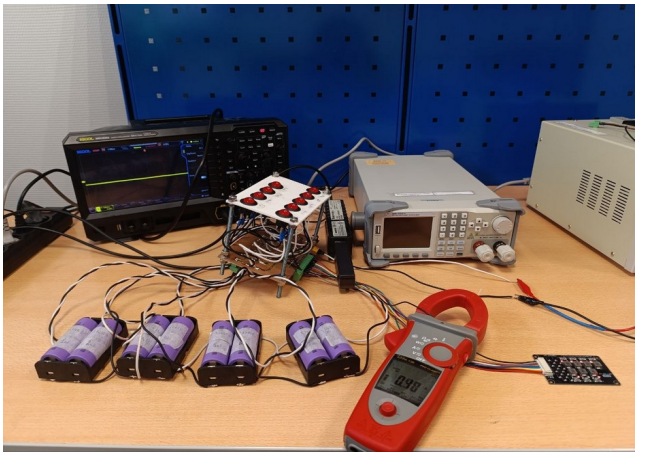


Рис. 3 – Внешний вид экспериментального макета контроллера активной индуктивной балансировки аккумуляторной батареи

В качестве критерия эффективности балансировки в работе принят разброс напряжений между ячейками:

$$\Delta U = Umax - Umin, \quad (1)$$

где Umax — напряжение самой заряженной ячейки;

Umin — напряжение самой разряженной ячейки.

Уменьшение ΔU в процессе эксперимента свидетельствует о выравнивании напряжений ячеек, то есть о корректной работе системы активной балансировки.

Экспериментальные исследования проводились в пяти характерных режимах: при исходном разбросе напряжений ячеек; при наличии одной существенно разряженной ячейки; при разряде аккумуляторной батареи на внешнюю нагрузку; при заряде от лабораторного источника; в буферном режиме при одновременном подключении источника заряда и нагрузки. В каждом эксперименте фиксировались напряжения отдельных ячеек через заданные интервалы времени, по которым строились временные диаграммы и рассчитывались начальные и конечные значения разброса ΔU.

3. Результаты экспериментального исследования

3.1. Балансировка при исходном разбросе напряжений ячеек

В первом эксперименте исследовалась работа контроллера балансировки при наличии естественного разброса напряжений между ячейками аккумуляторной батареи без подключения внешних источников и нагрузок. Временные диаграммы напряжений восьми ячеек приведены на рис. 4.

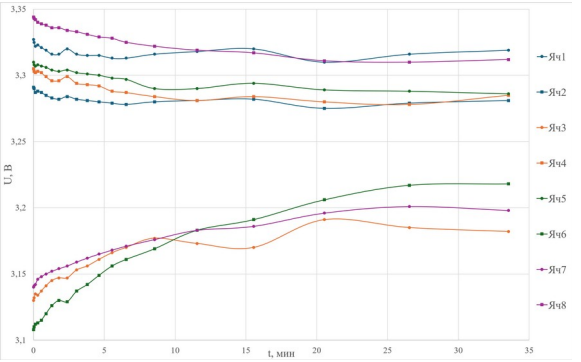


Рис. 4 – Балансировка ячеек аккумуляторной батареи при исходном разбросе напряжений

По результатам эксперимента начальный разброс напряжений составлял 236 мВ при минимальном напряжении 3,108 В (ячейка 6) и максимальном 3,344 В (ячейка 8). После работы контроллера балансировки в течение 2013 с минимальное напряжение увеличилось до 3,182 В, максимальное снизилось до 3,319 В, конечный разброс составил 137 мВ. Снижение разброса напряжений составило 99 мВ, что соответствует уменьшению величины ΔU на 41,9 %. Характерным признаком корректной работы балансира является одновременное повышение напряжений наиболее разряженных ячеек и снижение напряжений наиболее заряженных ячеек, что подтверждает перераспределение энергии между ячейками аккумуляторной батареи.

3.2. Балансировка при одной существенно разряженной ячейке

Во втором эксперименте имитировалась ситуация значительного отклонения напряжения одной из ячеек от остальных. Ячейка 8 была предварительно разряжена до 2,652 В, в то время как напряжения остальных ячеек находились в диапазоне 3,294–3,412 В. Начальный разброс напряжений составил 760 мВ. Временные диаграммы процесса балансировки приведены на рис. 5.

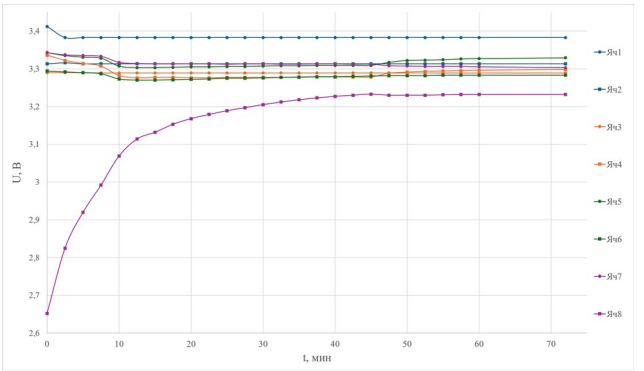


Рис. 5 – Балансировка ячеек аккумуляторной батареи при одной существенно разряженной ячейке

В процессе работы контроллера напряжение ячейки 8 увеличилось с 2,652 до 3,232 В, то есть на 580 мВ. Параллельно происходило снижение напряжений наиболее заряженных ячеек, что связано с перераспределением энергии в пользу разряженной ячейки. Конечный разброс напряжений составил 151 мВ, что соответствует снижению величины ΔU на 609 мВ, или на 80,1 %. Полученный результат подтверждает работоспособность контроллера в условиях значительного начального разбаланса.

С энергетической точки зрения пассивная и активная балансировки принципиально различаются. При пассивной резистивной балансировке энергия, отбираемая у более заряженной ячейки, рассеивается в виде тепла, поэтому эффективность передачи энергии между ячейками практически равна нулю. В схеме на базе ETA3000 энергия передаётся через накопительный дроссель, а заявленная производителем эффективность передачи энергии достигает 92 % [13]. Остальные потери обусловлены проводниковыми и коммутационными потерями силовых ключей, а также потерями в дросселе и соединениях.

3.3. Балансировка в режиме разряда

В третьем эксперименте проверялась работа контроллера балансировки при разряде аккумуляторной батареи на внешнюю нагрузку, ток нагрузки 2А. Временные диаграммы напряжений ячеек приведены на рис. 6.

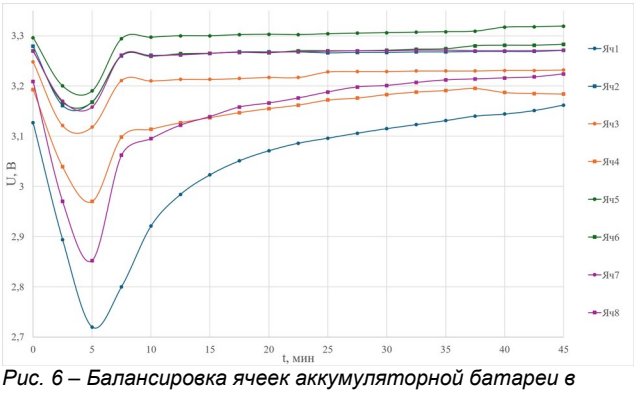


Рис. 6 – Балансировка ячеек аккумуляторной батареи в режиме разряда

Начальный разброс напряжений составил 169 мВ. После подключения внешней нагрузки наблюдалось первоначальное снижение напряжений ячеек, обусловленное возникновением омического падения напряжения на внутреннем сопротивлении аккумуляторов и развитием электрохимической поляризации при протекании разрядного тока [14]. В процессе разряда напряжение ячейки 1, имевшей наименьшее начальное напряжение, первоначально снизилось ещё больше под действием разрядного тока, что привело к кратковременному увеличению ΔU = 500мВ. После выхода контроллера балансировки в установившийся режим наблюдалось постепенное снижение разброса напряжений. К моменту окончания эксперимента (45 мин) конечное значение ΔU составило 157 мВ, что соответствует снижению разброса на 12 мВ, или на 7,1 %.

Несмотря на влияние разрядного тока, контроллер сохраняет работоспособность и препятствует увеличению разброса напряжений ячеек.

3.4. Балансировка в режиме заряда

В четвёртом эксперименте исследовалась работа контроллера балансировки при заряде аккумуляторной батареи от лабораторного источника напряжения 29,1 В с ограничением тока 2 А. Временные диаграммы напряжений ячеек приведены на рис. 7.

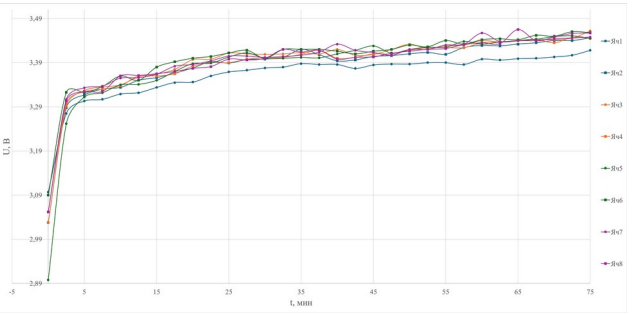


Рис. 7. – Балансировка ячеек аккумуляторной батареи в режиме заряда (Uвх = 29,1 В; I = 2 А)

Начальный разброс напряжений составил 199 мВ. В течение первых пяти минут наблюдалось резкое снижение разброса до 30–40 мВ, после чего ΔU удерживалось в диапазоне 30–70 мВ на протяжении основной части эксперимента. К моменту окончания эксперимента (75 мин) конечное значение разброса составило 44 мВ, что соответствует снижению ΔU на 155 мВ, или на 77,9 %. Среднее напряжение по аккумуляторной батареи за время эксперимента увеличилось с 3,037 до 3,447 В, что подтверждает корректность процесса заряда.

Наибольшая эффективность балансировки в режиме заряда обусловлена ограничением опережающего роста напряжения более заряженных ячеек за счёт передачи энергии менее заряженным элементам.

3.5. Балансировка в буферном режиме

В пятом эксперименте моделировался буферный режим работы аккумуляторной батареи, характерный для систем электропитания малых космических аппаратов: батарея одновременно подзаряжается от источника энергии и питает нагрузку. К аккумуляторной батареи параллельно подключались зарядный источник и эквивалентная нагрузка, при этом ток балансировки в каналах контроллера составил около 0,25 А. Временные диаграммы напряжений ячеек приведены на рис. 8.

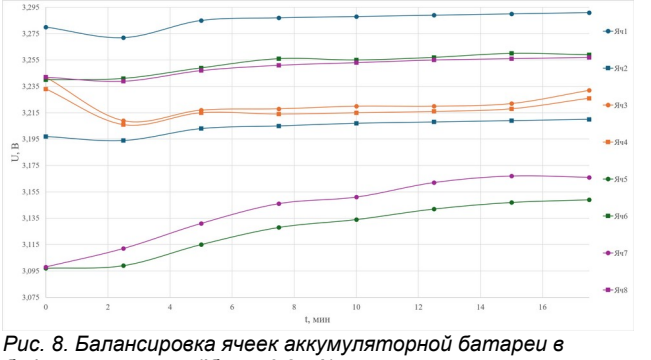


Рис. 8. Балансировка ячеек аккумуляторной батареи в буферном режиме (Iбал ≈ 0,25 А)

Начальный разброс напряжений составил 183 мВ, конечный (после 17,5 мин) — 142 мВ. Снижение ΔU составило 41 мВ, или 22,4 %. В буферном режиме контроллер сохраняет работоспособность и обеспечивает снижение разброса напряжений при одновременном воздействии источника заряда и нагрузки.

4. Обсуждение результатов

Сводные результаты по всем пяти исследованным режимам приведены в табл. 1.

Таблица 1
Сводные результаты экспериментов

Режим работы	ΔU_0, мВ	ΔU, мВ	$\Delta\Delta U$, мВ	Отн. снижение, %	Длительность
Исходный разбаланс	236	137	99	41,9	33,5 мин
Одна разряженная ячейка	760	151	609	80,1	72 мин
Режим разряда	169	157	12	7,1	45 мин
Режим заряда	199	44	155	77,9	75 мин
Буферный режим	183	142	41	22,4	17,5 мин

Сравнение исследованных режимов показывает существенную зависимость эффективности активной балансировки от режима работы аккумуляторной батареи. Наибольшее снижение разброса получено при наличии одной существенно разряженной ячейки — 80,1 % и в режиме заряда — 77,9 %. При исходном разбалансе снижение составило 41,9 %, в буферном режиме — 22,4 %, а в режиме разряда — 7,1 %. Полученная зависимость согласуется с современными исследованиями активных систем выравнивания, в которых эффективность балансировки связывается с режимом работы аккумуляторной батареи и состоянием отдельных ячеек [5, 8, 9].

Сравнительно небольшое снижение разброса в режиме разряда обусловлено одновременным воздействием тока нагрузки на напряжения ячеек и ограниченным балансировочным током ETA3000. В режиме заряда, напротив, перенос энергии к менее заряженным элементам препятствует опережающему росту напряжения наиболее заряженных ячеек. Полученные результаты подтверждают работоспособность контроллера в режимах заряда, разряда и при одновременном подключении источника и нагрузки, соответствующем исследованному буферному режиму.

Заключение

В работе проведено экспериментальное исследование контроллера активной индуктивной балансировки LiFePO4-аккумуляторной батареи на базе микросхем ETA3000 в пяти режимах работы. Подтверждена работоспособность контроллера при исходном разбалансе, наличии существенно разряженной ячейки, заряде, разряде и в буферном режиме. Наибольшее снижение разброса напряжений получено при наличии существенно разряженной ячейки — 80,1 % и в режиме заряда — 77,9 %, тогда как в режиме разряда снижение составило 7,1 %. Полученные результаты подтверждают возможность применения контроллера активной индуктивной балансировки на базе ETA3000 в составе аккумуляторной батареи системы электропитания малого космического аппарата.

Список литературы

1. Lee E.-S., Park J.-E., Lee S.-W., Heo D.-H., Han J.-K. High-Speed Chain-Structured Cell Balancing Circuit for Low Earth Orbit Satellites // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. — 2025. — Vol. 61, no. 6. — P. 17972–17983. — DOI: 10.1109/TAES.2025.3612350.
2. Rao K. D., Chander A. H., Ghosh S. Robust Observer Design for Mitigating the Impact of Unknown Disturbances on State of Charge Estimation of Lithium Iron Phosphate Batteries Using Fractional Calculus // IEEE Transactions on Vehicular Technology. — 2021. — Vol. 70, no. 4. — P. 3218–3231. — DOI: 10.1109/TVT.2021.3066249.
3. Noh G., Lee J., Ha J.-I. Design and Analysis of Single-Inductor Power Converter for Both Battery Balancing and Voltage Regulation // IEEE Transactions on Industrial Electronics. — 2022. — Vol. 69, no. 3. — P. 2874–2884. — DOI: 10.1109/TIE.2021.3065606.
4. Ouyang Q., Zhang Y., Ghaeminezhad N., Chen J., Wang Z., Hu X., Li J. Module-Based Active Equalization for Battery Packs: A Two-Layer Model Predictive Control Strategy // IEEE Transactions on Transportation Electrification. — 2022. — Vol. 8, no. 1. — P. 149–159. — DOI: 10.1109/TTE.2021.3095497.
5. Hoekstra F. S. J., Bergveld H. J., Donkers M. C. F. Optimal Control of Active Cell Balancing: Extending the Range and Useful Lifetime of a Battery Pack // IEEE Transactions on Control Systems Technology. — 2022. — Vol. 30, no. 6. — P. 2759–2766. — DOI: 10.1109/TCST.2022.3161764.
6. Milas N. T., Tatakis E. C. Fast Battery Cell Voltage Equalizer Based on the Bidirectional Flyback Converter // IEEE Transactions on Transportation Electrification. — 2023. — Vol. 9, no. 4. — P. 4922–4940. — DOI: 10.1109/TTE.2022.3186520.
7. Manjunath K., Kalpana R., Singh B., Kiran R. A Two-Stage Module Based Cell-to-Cell Active Balancing Circuit for Series Connected Lithium-Ion Battery Packs // IEEE Transactions on Energy Conversion. — 2023. — Vol. 38, no. 4. — P. 2282–2297. — DOI: 10.1109/TEC.2023.3283424.
8. Azimi V., Allam A., Onori S. Extending Life of Lithium-Ion Battery Systems by Embracing Heterogeneities via an Optimal Control-Based Active Balancing Strategy // IEEE Transactions on Control Systems Technology. — 2023. — Vol. 31, no. 3. — P. 1235–1249. — DOI: 10.1109/TCST.2022.3215610.
9. Yang Y., He J., Chen C., Wei J. Balancing Awareness Fast Charging Control for Lithium-Ion Battery Pack Using Deep Reinforcement Learning // IEEE Transactions on Industrial Electronics. — 2024. — Vol. 71, no. 4. — P. 3718–3727. — DOI: 10.1109/TIE.2023.3274853.
10. Liu L., Yan Z., Xu B., Zhang P., Cai C., Yang H. A Highly Scalable Integrated Voltage Equalizer Based on Parallel-Transformers for High-Voltage Energy Storage Systems // IEEE Transactions on Industrial Electronics. — 2024. — Vol. 71, no. 1. — P. 595–603. — DOI: 10.1109/TIE.2023.3241382.
11. Tazehkand M. Z., Baghdadi M. High-Performance Continuous-Current Capacitive Battery Balancer With Flexibility in Battery Cells Connection and Independent of Cells Location // IEEE Transactions on Power Electronics. — 2025. — Vol. 40, no. 9. — P. 13767–13777. — DOI: 10.1109/TPEL.2025.3558417.
12. ETA3000: Inductive Cell Balancer IC with Balancing Current Up to 2A : datasheet / ETA Solutions Co. Limited. — URL: https://datasheet4u.com/download/1424958/ETA3000.html (дата обращения: 22.06.2026). — Текст: электронный.
13. Li J., Gao F., Yan G., Zhang T., Li J. Modeling and SOC estimation of lithium iron phosphate battery considering capacity loss // Protection and Control of Modern Power Systems. — 2018. — Vol. 3. — Article 5. — DOI: 10.1186/s41601-018-0078-0.

ACTIVE INDUCTIVE BALANCING CONTROLLER FOR A LiFePO4 BATTERY BASED ON ETA3000 ICs

Dandarov V.D., Sukhorukov M.P., Apasov V.I., Gebgardt V.A., Yudintsev A.G.
Space Technology Research Center (STC) of TUSUR

JEL classification: C10, C50, C60, C61, C80, C87, C90

The paper presents the results of an experimental study of an active inductive balancing controller for a lithium iron phosphate (LiFePO4) battery based on specialized ETA3000 integrated circuits. The controller is incorporated into the battery charging system of a small spacecraft and provides voltage equalization of series-connected cells by transferring energy through an external inductor. The experimental study was carried out using a laboratory prototype with an eight-cell battery pack under five representative operating modes. The operability of the controller was confirmed in all investigated modes. The results demonstrate that active inductive balancing achieves its highest effectiveness during battery charging.

Keywords: active inductive balancing, ETA3000, small spacecraft, cell voltage imbalance, experimental study, buffer operating mode.

References

1. Lee E.-S., Park J.-E., Lee S.-W., Heo D.-H., Han J.-K. High-Speed Chain-Structured Cell Balancing Circuit for Low Earth Orbit Satellites // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. — 2025. — Vol. 61, no. 6. — P. 17972–17983. — DOI: 10.1109/TAES.2025.3612350.
2. Rao K. D., Chander A. H., Ghosh S. Robust Observer Design for Mitigating the Impact of Unknown Disturbances on State of Charge Estimation of Lithium Iron Phosphate Batteries Using Fractional Calculus // IEEE Transactions on Vehicular Technology. — 2021. — Vol. 70, no. 4. — P. 3218–3231. — DOI: 10.1109/TVT.2021.3066249.
3. Noh G., Lee J., Ha J.-I. Design and Analysis of Single-Inductor Power Converter for Both Battery Balancing and Voltage Regulation // IEEE Transactions on Industrial Electronics. — 2022. — Vol. 69, no. 3. — P. 2874–2884. — DOI: 10.1109/TIE.2021.3065606.
4. Ouyang Q., Zhang Y., Ghaeminezhad N., Chen J., Wang Z., Hu X., Li J. Module-Based Active Equalization for Battery Packs: A Two-Layer Model Predictive Control Strategy // IEEE Transactions on Transportation Electrification. — 2022. — Vol. 8, no. 1. — P. 149–159. — DOI: 10.1109/TTE.2021.3095497.
5. Hoekstra F. S. J., Bergveld H. J., Donkers M. C. F. Optimal Control of Active Cell Balancing: Extending the Range and Useful Lifetime of a Battery Pack // IEEE Transactions on Control Systems Technology. — 2022. — Vol. 30, no. 6. — P. 2759–2766. — DOI: 10.1109/TCST.2022.3161764.
6. Milas N. T., Tatakis E. C. Fast Battery Cell Voltage Equalizer Based on the Bidirectional Flyback Converter // IEEE Transactions on Transportation Electrification. — 2023. — Vol. 9, no. 4. — P. 4922–4940. — DOI: 10.1109/TTE.2022.3186520.
7. Manjunath K., Kalpana R., Singh B., Kiran R. A Two-Stage Module Based Cell-to-Cell Active Balancing Circuit for Series Connected Lithium-Ion Battery Packs // IEEE Transactions on Energy Conversion. — 2023. — Vol. 38, no. 4. — P. 2282–2297. — DOI: 10.1109/TEC.2023.3283424.