

УДК 629.331:621.311.61+629.3.01:62-83

МОДЕЛИРОВАНИЕ АКТИВНОГО УСТРОЙСТВА БАЛАНСИРОВКИ АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ В РЕЖИМЕ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ В ПРОГРАММЕ MATLAB/SIMULINK

Д. О. Варламов / А. А. Скворцов, д. ф.-м. н., проф. / В. П. Хортов, доц.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский политехнический университет»

Для эффективной работы тяговой аккумуляторной батареи электромобиля необходимо, чтобы степени заряда всех аккумуляторов были одинаковыми. Со временем из-за различий в токах саморазряда различие в степенях разрядов отдельных аккумуляторов увеличивается. Применение пассивных устройств балансировки, устраняющих избыток энергии аккумуляторов с большей степенью заряда путем её рассеивания на резисторах, позволяет со временем выравнять степени заряда аккумуляторов. Однако такие устройства не позволяют компенсировать различие в ёмкостях аккумуляторов. Время разряда батареи с аккумуляторами различной ёмкости будет ограничено временем работы аккумулятора с наименьшей ёмкостью.

Для решения этой проблемы может быть применено активное устройство балансировки, которое позволяет производить перераспределение энергии между отдельными аккумуляторами: аккумуляторы с большей ёмкостью разряжать большими токами, а аккумуляторы с меньшей ёмкостью — меньшими.

Рассмотрим простой пример. Имеется батарея с четырьмя аккумуляторами. Если ёмкости трёх из четырёх аккумуляторов составляют 10 А·ч, а один из аккумуляторов такой батареи дефектный (имеет ёмкость 5 А·ч), время разряда такой батареи током 10 А составит 30 минут.

Если батарею с дефектным аккумулятором разряжать вместе с активным устройством балансировки, работающим в режиме перераспределения энергии, то время разряда такой батареи составит

$$t_{\text{разрАБ}} = \frac{\sum_{i=1}^n C_i}{n \cdot I_{\text{разр}}}$$

где C_i — ёмкость i -го аккумулятора, А·ч; n — число аккумуляторов; $I_{\text{разр}}$ — величина разрядного тока, А.

$t_{\text{разрАБ}} = (10 \cdot 3 + 5) / 4 \cdot 10 = 0,875$ часа = 52 минуты 30 секунд.

Токи разряда отдельных аккумуляторов при этом будут определяться по формуле

$$i_{\text{разр}i} = C_i / t_{\text{разрАБ}}$$

Таким образом:

$$i_{\text{разр}1} = i_{\text{разр}2} = i_{\text{разр}4} = 10 / 0,875 = 11,43 \text{ А};$$

$$i_{\text{разр}3} = 5 / 0,875 = 5,71 \text{ А}.$$

Определим величину балансировочных токов для этих аккумуляторов:

$$i_{\text{Б}i} = i_{\text{разр}i} - i_{\text{разр}}$$

следовательно:

$$i_{\text{Б}1} = i_{\text{Б}2} = i_{\text{Б}4} = 11,43 - 10 = 1,43 \text{ А};$$

$$i_{\text{Б}3} = 5,71 - 10 = -4,29 \text{ А}.$$

В данном примере если устройство балансировки способно обеспечить ток разряда для нормальных аккумуляторов более 1,43 А и ток подзаряда дефектного аккумулятора 4,29 А, то его можно считать работающим в режиме перераспределения энергии.

В настоящее время на рынке доступно активное устройство балансировки на микросхемах балансира LT8584 и монитора LT6804 компании

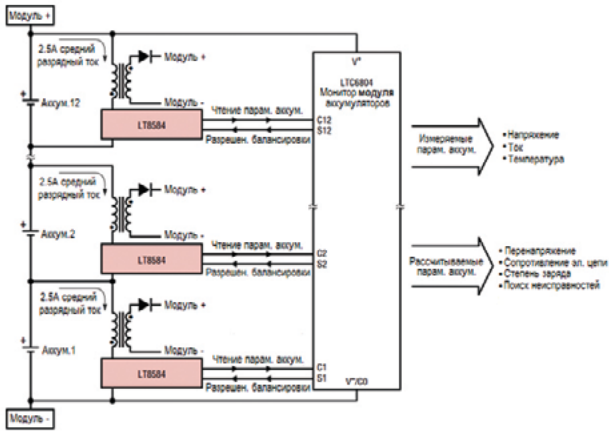


Рисунок 1. Упрощённая схема активного устройства балансировки на повышающих конвертерах компании Linear Technology

Linear Technology. Рассмотрим структурную схему из их спецификации, представленную на рис. 1. Вся батарея разбивается на отдельные модули. В каждом модуле не более 12 аккумуляторов. Параллельно каждому аккумулятору устанавливаются микросхема балансира LT8584 и повышающий трансформатор, вторичная обмотка которого подключается параллельно модулю, в котором находится данный аккумулятор. Во вторичной обмотке каждого трансформатора находится диод, который предотвращает саморазряд модуля через вторичную обмотку трансформатора. Монитор модуля производит чтение параметров с каждого балансира и на их основе позволяет или запрещает проведение дальнейшей балансировки. Если напряжение на каком-либо из аккумуляторов оказывается выше, чем в среднем по модулю, балансиры LT8584 будут коммутировать первичную обмотку трансформатора с частотой 100 кГц, а аккумулятор будет разряжаться током 2,5 А и заряжать модуль батареи, в котором он располагается. Таким образом, балансиры LT8584, трансформаторы и диоды выполняют роль повышающих конвертеров.

В случае применения данного устройства балансировки для приведённого примера можно отметить, что оно будет в состоянии обеспечить режим перераспределения энергии, так как средний рабочий ток балансировки составляет 2,5 А.

Авторами статьи была разработана модель этого устройства балансировки (рис. 2) в программе MATLAB/Simulink. Произведём моделирование, чтобы оценить эффективность его работы с разбалансированной аккумуляторной батареей. В качестве модели аккумуляторов Аккумулятор 1–4 была взята

стандартная модель Li-ion-аккумулятора в программе MATLAB/Simulink [2].

Рассмотрим цепь разряда батареи. Разряд батареи в разработанной модели осуществляется при подключении к батарее нагрузки Rload посредством открытия силового ключа Switch L. Значение сопротивления Rload приблизительно можно определить по формуле

$$R_{load} \approx \frac{U_{cp_разр} \cdot n}{I_{разр}} = \frac{3,15 \cdot 4}{10} = 1,26 \text{ Ом} ,$$

где $U_{cp} = 3,15 \text{ В}$ — среднее напряжение LiFePO4-аккумулятора под нагрузкой током $I_{разр} = 10 \text{ А}$; n — количество аккумуляторов в батарее.

Цепь заряда в рамках данной статьи не рассматривается.

Значения сопротивлений всех силовых ключей на схеме модели в открытом состоянии выбраны одинаковыми и равными 1 МОм, как у лучших современных полевых транзисторов.

Рассмотрим блоки, находящиеся на схеме.

Блок *Signal Distributor* (рис. 4) выполняет следующее распределение сигналов:

- через входы In 1–3 получает информацию о степени заряда, величине напряжения и тока всех аккумуляторов;
- направляет сигналы с информацией о степени заряда аккумуляторов на блок Control Equalizer через выходы Out 1–4;
- направляет сигналы с информацией о степени заряда, величине напряжения и тока на осциллограф через выходы Out 5–7;
- направляет сигналы с информацией о напряжении на аккумуляторах на блок Charge/Discharge Control через выходы Out 8–11.

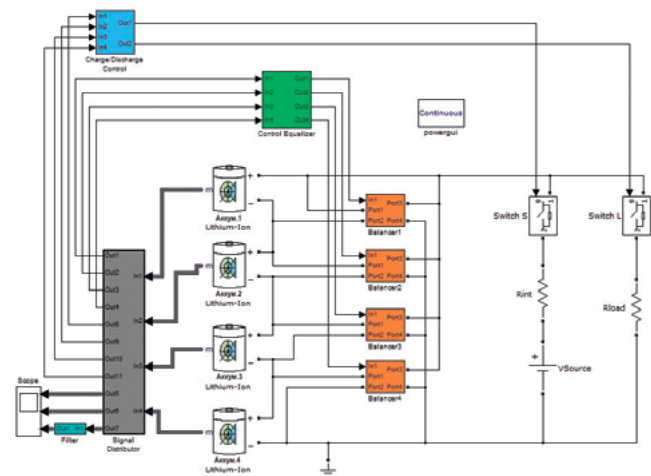


Рисунок 2. Модель активного устройства балансировки на повышающих конвертерах

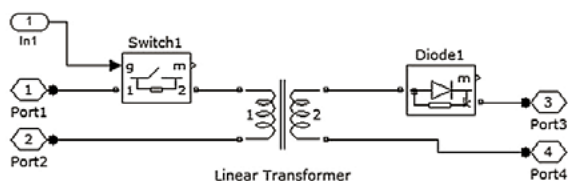


Рисунок 3. Блок Balancer

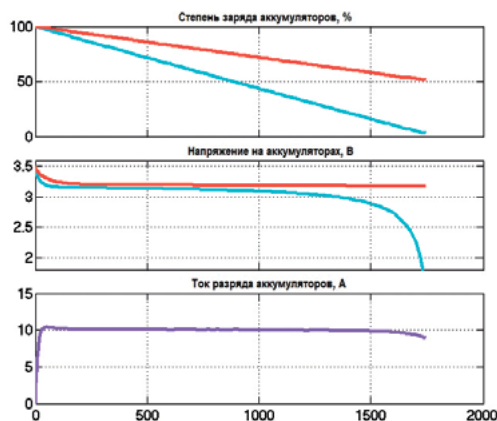


Рисунок 4. Осциллограммы разрядной характеристики Li-ion-аккумуляторной батареи без устройства балансировки

Блок *Charge/Discharge Control* через выходы Out 1 и Out 2 управляет зарядом и разрядом батареи. Алгоритм работы подсистемы следующий.

Как только (при разряде) напряжение на каком-либо аккумуляторе опускается ниже допустимого уровня (2 В), подсистема отключает нагрузку и подключает источник напряжения, посылая сигналы лог. 1 и лог. 0 с выходов Out 1 и Out 2 соответственно.

Как только (при заряде) напряжение на каком-либо аккумуляторе превышает допустимый уровень (3,6 В), подсистема отключает батарею от источника напряжения и подключает нагрузку, посылая сигналы лог. 0 и лог. 1 с выходов Out 1 и Out 2 соответственно.

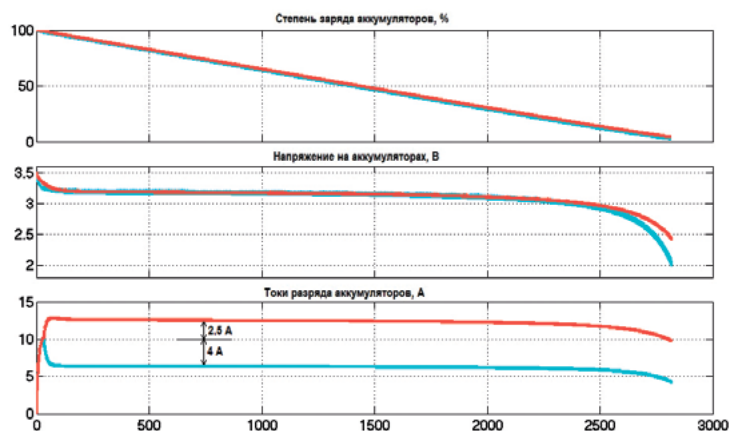


Рисунок 5. Осциллограммы разрядной характеристики Li-ion-аккумуляторной батареи с устройством балансировки на повышающих конверторах в программе MATLAB/Simulink

Каждый из четырёх идентичных блоков Balancer 1–4 (рис. 3) содержит трансформатор с соотношением витков первичной и вторичной обмоток, равным 5. Первичная обмотка трансформатора коммутируется силовым ключом Switch 1, управляемым через вход In 1, к аккумулятору, подключённому к Port 1–2. Вторичная обмотка через Port 3 подключается к «+», а через Port 4 — к «-» батареи. Для предотвращения разряда батареи на вторичной обмотке трансформатора используется диод. Мощность трансформатора подобрана таким образом, чтобы балансирующий ток $I_{\text{баланс}}$ составлял 2,5 А, как в схеме на основе чипа LT8584.

Блок *Balancer Control* управляет подключением к аккумуляторам Аккум. 1–4 балансировочных блоков Balancer 1–4.

На входы In 1–4 приходит информация о степени заряда аккумуляторов Аккум. 1–4. Производится расчёт:

$$\Delta Q_i = Q_i - Q_{\min},$$

где Q_i — степень заряда для i -го входа; Q_{\min} — минимальная степень заряда среди всех входов блока; ΔQ_i — дельта степени заряда для i -го входа.

Для минимизации ΔQ_i блок *Balancer Control* будет коммутировать i -й балансировочный блок на i -й аккумулятор.

Если ΔQ_i уменьшится до 0 %, на выходе i блока *Balancer Control* установится логический ноль и работа i -го балансировочного блока будет заблокирована.

Если ΔQ_i увеличится до 1 %, то на выходе i блока *Balancer Control* установится логическая единица и работа i -го балансировочного блока будет разблокирована.

Блок *Filter* используется для сглаживания пульсаций балансировочных токов, таким образом, на выход блока приходят усреднённые значения балансировочных токов.

Блок *Powergui* представляет собой графический интерфейс пользователя пакета моделирования энергетических систем. Он необходим для задания типа и параметров моделирования (шага интегрирования). Его параметры были выбраны по умолчанию.

Условия моделирования устройства балансировки следующие. Производится полный разряд последовательной цепи из четырёх аккумуляторов, один из которых (Аккумулятор 3) считается дефектным и обладает на 50 % меньшей ёмкостью, чем другие аккумуляторы ($C_1 = C_2 = C_4 = 10 \text{ А} \cdot \text{ч}$, $C_3 = 5 \text{ А} \cdot \text{ч}$). В первом случае моделирование производится с выключенным устройством балансировки, а во втором — с включённым.

Результаты моделирования для первого случая представлены на рис. 4. Характеристики аккумуляторов Аккумулятор 1, Аккумулятор 2, Аккумулятор 4 — красного цвета, а аккумулятора Аккумулятор 3 — бирюзового. Общий ток разряда отмечен сиреневым цветом.

Как видно из осциллограмм, при разряде всех аккумуляторов батареи одинаковым током разряд будет остановлен по аккумулятору Аккумулятор 3 через 1 725 секунд (28 минут 45 секунд).

Результаты моделирования для второго случая представлены на рис. 5.

Судя по осциллограммам, при разряде батареи ко всем аккумуляторам, кроме Аккумулятор 3, подключены балансиры, которые разряжают их током 2,5 А и отдают его в батарею. Третий аккумулятор разряжается током 6 А, а три других — током 12,5 А. Время разряда батареи в этом случае составит 2 818 секунд (47 минут, то есть увеличится почти на 39 %). Полученное значение на 5 минут меньше расчётного.

На диодах повышающих конвертеров в активной схеме балансировки происходит падение напряжения, в результате чего уменьшается ток подзаряда батареи от наиболее заряженных аккумуляторов. Таким образом, время разряда батареи сокращается относительно расчётного.

ВЫВОДЫ

В настоящей статье была представлена модель активного устройства балансировки на повышающих конвертерах и описана её работа с аккумуляторной батареей.

На основе полученных при заданных условиях результатов моделирования можно увидеть, что активное устройство балансировки за счёт перераспределения энергии между аккумуляторами способно значительно увеличивать время разряда батареи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Andrea D. Battery management systems for large lithium-ion battery packs. — Artech House, 2010. — 300 p.
2. LT8584. 2.5A monolithic active cell balancer with telemetry interface // Официальный сайт компании Linear Technology [Электронный ресурс]. URL: <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/8584fb.pdf> (дата обращения: 17.08.2016).
3. Battery // Официальный сайт компании The MathWorks [Электронный ресурс]. URL: <http://www.mathworks.com/help/toolbox/physmod/powersys/ref/battery.html> (дата обращения: 17.08.2016).