

Association Connecting Electronics Industries [4]: расстояние между проводниками – 0,1 мм, ширина токопроводящих дорожек – 0,3 мм.

Основным критерием оптимизации при выполнении трассировки печатной платы являлось соблюдение равенства линий связи в дифференциальных парах передачи данных. Трассировка производилась автоматически на основе ортогональных алгоритмов. В результате выполненной автотрассировки были выявлены два дефекта линий связи – острые углы и «клинчи» (тупиковые ситуации). Поэтому производилась корректировка результатов автоматической трассировки. Острые углы в проводниках применять недопустимо, так как они являются «кислотными ловушками», в результате чего образуются дефекты проводников. «Клинчи» устранялись перекладкой проводников вручную. Поэтому при проведении конструировании сложных печатных плат целесообразно применять «интерактивную трассировку».

В соответствии с разработанной конструкцией печатного узла (рисунок 3) сформирован gerber-файл для автоматизированного изготовления печатного узла, а также его сборочный чертёж и рабочий чертёж печатной платы, которые необходимы для выполнения контроля качества изготовления изделия.

При помощи САПР Altium Designer разработана 3-D модель печатного узла, на основе которой будет спроектирована его твердотельная мо-

дель для оценки расположения конструкции в эксплуатационном окружении и соблюдения необходимых тепловых режимов эксплуатации.

Таким образом, в результате выполненной работы разработана конструкция печатного узла и конструкторская документация для его производства.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Министерства образования Республики Беларусь по поддержке студенческой науки (ГБ 20-23).

Литература

1. Лившиц Ю.Е. Универсальная автоматическая система управления устройством позиционирования солнечной батареи / Ю.Е. Лившиц, П.И. Савёлов // Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении: материалы VII международной научно-практической конференции. Минск, 2019. – С. 64–65.
2. Савёлов П.И. Мобильная автономная солнечная электростанция / П.И. Савёлов, Ю.Е. Лившиц // Современные технологии и автоматизация в технике, управлении и образовании: материалы II международной научно-практической конференции – Балаково, 2020. – С. 123–128.
3. Лузин С.Ю. Модели и алгоритмы автоматизированного проектирования радиоэлектронной и электронно-вычислительной аппаратуры / С.Ю. Лузин, Ю.Т. Лячек и др. – СПб: БХВ-Петербург, 2010. – 224 с.
4. IPC – 2221A Generic Standard on Printed Board Design. – 2003. – P. 140.

УДК 621.317.4; 621.317

ПРЕДСКАЗАНИЕ СОСТОЯНИЯ ЛИТИЕВОЙ ЯЧЕЙКИ ДЛЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ МНОГОЯЧЕЕЧНОЙ БАТАРЕЕЙ

Скурту И.Т., Ерошенко А.С., Брановицкий И.И.

*Институт прикладной физики НАН Беларуси
Минск, Республика Беларусь*

Эксплуатация литиевых батарей подразумевает обязательный контроль за уровнем заряда при зарядке и разрядке, а также соблюдение зарядового баланса между отдельными ячейками батареи, из которых она компонуется для достижения требуемых уровней напряжения и тока. Поддержание такого баланса в простейших случаях реализуется с помощью аналоговых следящих систем, однако в случае сложных многоячеечных батарей цена ошибки высока, поэтому необходим микропроцессорный контроль, базирующийся на модели поведения батареи.

Следует выделить основные величины и характеристики: напряжение открытой цепи или OCV (open circuit voltage), уровень заряда или состояние заряда SoC (state of charge), емкость.

OCV нелинейно зависит от SoC на границах безопасных концентраций носителей заряда.

В большей (средней) части зарядно-разрядного диапазона эта зависимость близка к линейной.

Наличие диффузионных процессов (химической инерции) приводит к зарядно-вольтовому гистерезису (OCV-SoC), отсутствие учета которого приводит к значимым ошибкам предсказания состояния батареи.

На рисунке 1 представлена эквивалентная электрическая схема литиевой ячейки, входящей в состав батарей, используемых в составе персонального электротранспорта.

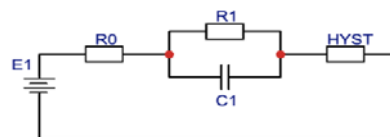


Рисунок 1 – Эквивалентная электрическая схема литий-ионной ячейки

Здесь $E1$ – идеальный источник напряжения, $R0$ – внутреннее сопротивление батареи, $R1$ и $C1$ – эквивалентные сопротивление и емкость, описывающие протекание диффузионных токов, $HYST$ – элемент задержки, воспроизводящий запаздывание между уровнем заряда и напряжением открытой цепи батареи. Каждый из этих элементов зависит от уровня заряда, состояния “здоровья” батареи, количества отработанных циклов, а также температуры батареи.

Более универсальным является метод «черного ящика» при использовании нейросети с гарантированным запасом описательной гибкости. В этом случае происходит формализация сложной зависимости в неявном виде. Преимуществом такого подхода является относительная простота реализации, универсальность, достаточная точность предсказания при балансировке. Экспериментальные данные необходимые для обучения и переобучения модели собираются непосредственно во время работы батареи в составе ПЭТС. Недостатком является необходимость оснащения BMS более мощными вычислительными ресурсами.

В качестве примера структуры с достаточной описательной способностью можно привести авторегрессионную однослойную нейронную сеть, схема которой представлена на рисунке 2.

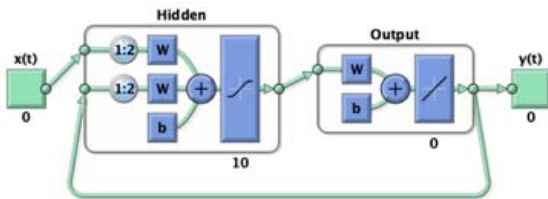


Рисунок 2 – Авторегрессионная нейронная сеть для описания литий-ионной ячейки

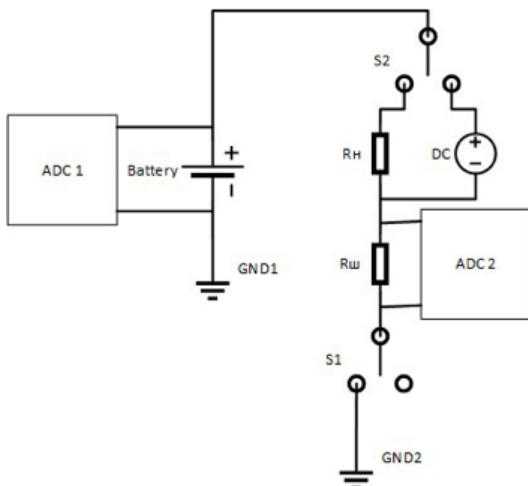


Рисунок 3 – Структурная схема макета для экспериментального исследования зарядно-разрядных циклов литий-ионной ячейки

Данная сеть имеет два входа, на которые поступают отсчеты тока, через ячейку, а также

напряжения ячейки, которые затем задерживаются на два отсчета для учета влияния динамических факторов и фазовых соотношений процесса. На таких данных сеть способна обучаться, а для предсказаний в реальном времени, необходимо установить обратную связь между выходом и входом, чтобы предсказанные отсчеты напряжения могли выступать в качестве входных данных.

Для использования в составе ПЭТС ячейки объединяют, соединяя их последовательно и параллельно в количестве и конфигурации, обеспечивающих требуемые показатели по напряжению и току.

В случае параллельного соединения ячеек уместно говорить уже об объединенной модели секции, поскольку напряжения отдельных ячеек в секции находятся на одном уровне, несмотря на естественный разброс внутренних параметров. Это приводит к изменению эквивалентных параметров секции, однако не меняет описательной сложности ее поведения в зарядно-разрядных циклах.

Последовательное соединение ячеек или параллельных секций требует наличия отдельной модели для каждого такого элемента. Имея одинаковое значение тока (что уменьшает количество необходимых датчиков тока до одного), такое соединение может быть формализовано как несколько параллельных вычислительных потоков, каждый из которых обслуживает потребности конкретной нейронной сети, отвечающей за предсказание напряжения каждого из последовательно соединенных участков.

Важно отметить, что с течением времени необходимо переобучать сеть, поскольку с каждым зарядно-разрядным циклом параметры ячеек необратимо меняются. Типовые ситуации переобучения возникают, например: через определенное количество циклов; при значимых изменениях температуры окружающей среды (единицы градусов); при замене ячеек; при фиксации в реальном времени значимой разницы между предсказанными и измеренными значениями. Переобучение сетей может представлять собой и непрерывный процесс.

В зависимости от числа последовательно включенных секций, модель батареи в целом может рассматриваться как “сумма” моделей отдельных ячеек, при этом целесообразно выделить отдельную нейросеть для анализа и описания обобщенного поведения. Ее показания могут являться дополнительным триггером, запускающим переобучение сетей.

Для оценки описательной способности нейронной сети был разработан макет установки для получения экспериментальных данных при работе ячейки в различных режимах. Его структурная схема приведена на рисунке 3.

Ячейка может исследоваться на макете в трех режимах: *a* – открытая цепь (правое положение реле S1); *b* – разряд через резистор Rn (левое положение S2 и S1); *в* – заряд (правое положение S2 и левое S1). Источник постоянного напряжения DC заряжает батарею напряжением 4.2 В.

На рисунке 4 представлен исходный сигнал напряжения на выходе батареи при нагрузочном тестировании и его приближение, полученное с помощью нейросети на этапе обучения. Сигналы идентичны в высокой степени. Пики ошибок достигают двух процентов. В целом же, на основной протяженности сигнала, они составляют порядка половины процента.

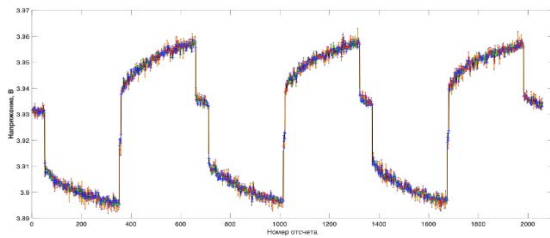


Рисунок 4 – Сигнал напряжения на выходе батареи при нагрузочном тестировании и его приближение, полученное с помощью нейросети на этапе обучения

Следует отметить, что представленная выборка включает в себя лишь несколько периодов заряда-разряда и хорошо подходит для кратко-

срочного прогнозирования. Отдельно следует выделить работу с большими циклами (полный заряд-разряд батареи) и работу на участках насыщения (сверху и снизу), где небольшим изменениям заряда соответствуют значительные изменения напряжения.

Использование модели на основе регрессионной нейронной сети непосредственно во время работы электрического транспортного средства позволяет получать необходимую информацию о состоянии ячейки батареи в ближайшее время (до 4000 секунд для приведенной конфигурации) при текущем нагрузочном профиле, а также при его вариациях.

На основе этой информации алгоритмы системы управления батареями электрического транспортного средства могут принимать более эффективные в долгосрочном периоде решения по балансировке ячеек. При этом нейронная сеть замыкается таким образом, что предсказанные ею данные о напряжении ячейки подаются обратно на вход вместе с новыми отсчетами тока согласно выбранному нагрузочному профилю. Предсказательная способность такой системы ограничена в силу накопления ошибки. С течением времени расхождение между предсказанной последовательностью и реальным напряжением возрастает.

УДК 621.317.08

ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН МЕТОДОМ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА ИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
Смирнова Н.В.¹, Пономарев А.В.²

¹Севастопольский государственный университет
Севастополь, Российская Федерация

²Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова
Ижевск, Российская Федерация

Электрические машины разнообразного назначения находят самое широкое приложение при создании объектов производственной инфраструктуры в различных предметных областях, в том числе и в приборостроении. При этом задача разработки новых и совершенствования существующих методов и средств функционального диагностирования электрических машин: электрогенераторов, электродвигателей, инверторов, электромашинных усилителей, индукционных регуляторов, является важной и актуальной задачей.

В настоящее время разработан значительный арсенал методов функционального диагностирования электрических машин, которые по физической сущности анализируемого информационного процесса можно разбить на следующие группы:

1. Анализ вибрационных и акустических сигналов, генерируемых функционирующей электрической машиной.

2. Анализ магнитных потоков, создаваемых функционирующей электрической машиной.

3. Анализ электромагнитных и температурных полей.

4. Исследование электрических параметров (динамики изменений тока, напряжения и потребляемой мощности) электрической машины в процессе ее работы.

Отметим, что каждый из существующих методов функционального диагностирования электрических машин, обладая своими достоинствами и недостатками, имеет и свою наиболее результативную область приложения. Например, недостатком метода анализа виброакустического сигнала является требование непосредственного доступа к электрической машине, выполнение которого часто просто невозможно, например, на АЭС.

Наиболее перспективными методами функционального диагностирования электрических машин является методы пятой группы.