

# Ультразвуковая диагностика литий-ионного аккумулятора в процессе заряда и разряда

А. С. Груздев

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

gruzdev@cee.spbstu.ru

Р. П. Жилавый

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

rus.zhilavyy@mail.ru

**Аннотация.** Литий-ионный аккумулятор занимает важную позицию в современном мире. Без такого критически важного компонента невозможно использовать мобильные устройства связи, приборы для монтажных работ, бытовые гаджеты, которые упрощают жизнь современному человеку. Применение методов контроля за состоянием аккумулятора позволяет значительно продлить их время жизни. Ультразвуковая технология является крайне эффективным методом обнаружения, обладающая такими преимуществами, как бесконтактность, высокая точность, быстрая реакция. Говоря про определение уровня заряда батареи, ультразвуковая технология может рассчитать величину оставшегося заряда батареи путем измерения акустических параметров материала внутри батареи, таких как скорость распространения, скорость затухания и количество звуковых сигналов. Применение ультразвуковой технологии для определения состояния заряда батареи (SOC), анализ преимуществ и недостатков, изучение осуществимости и эффективности в практических приложениях, а также представление полезных идей и методов для решения проблем с низким уровнем заряда батареи.

**Ключевые слова:** литий-ионный аккумулятор, ультразвук, контроль качества, неразрушающий контроль, заряд, разряд, цикл, потери энергии

## I. ВВЕДЕНИЕ

Литий-ионные аккумуляторы (ЛИА), как выдающиеся представители современной технологии накопления энергии, в последние годы привлекли к себе широкое внимание. Они стали предпочтительным типом аккумуляторов в различных областях, включая портативные электронные устройства, электротранспорт и системы возобновляемой энергетики. Широкое применение ЛИА можно объяснить несколькими

существенными преимуществами. Во-первых, они обладают высокой плотностью энергии, что позволяет накапливать значительное количество электрической энергии в относительно компактном объеме. Кроме того, они обладают высоким рабочим напряжением, высокой эффективностью зарядки и длительным сроком службы, что позволяет выполнять многократные циклы зарядки и разрядки без существенного снижения производительности. Стоит отметить, что ячейки не подвержены эффектам памяти, что позволяет заряжать и разряжать в любое время, не оказывая негативного влияния на SOC батареи и срок ее службы [1].

Кроме того, ЛИА обладают относительно низкой скоростью саморазряда, что делает их надежным выбором для хранения энергии.

В большинстве электронных устройств ЛИА обычно используются в виде аккумуляторных блоков. В этих аккумуляторных блоках различные элементы батареи часто имеют разную степень старения, что приводит к различиям в запасенной электрической емкости. Во время процессов зарядки и разрядки могут возникать проблемы, связанные с перезарядкой и чрезмерной разрядкой, как показано на рис. 1.

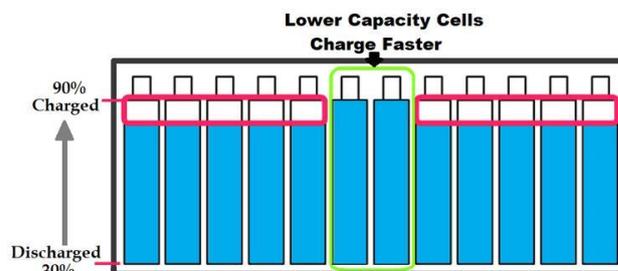


Рис. 1. Балансировка аккумуляторной батареи

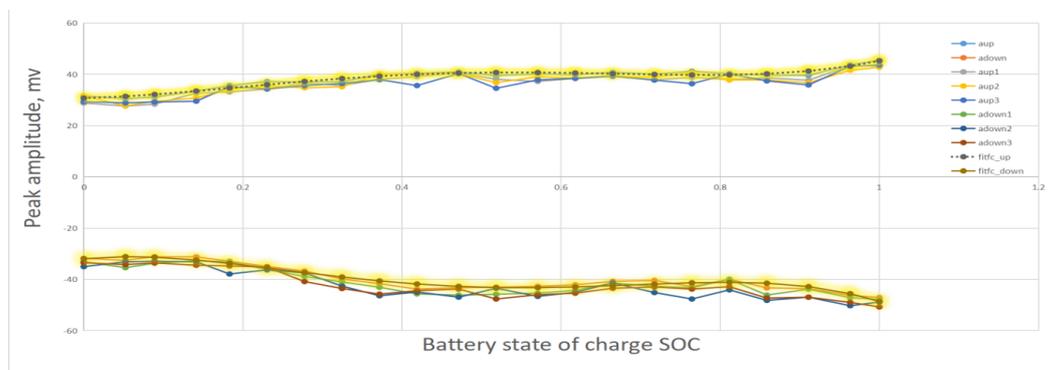


Рис. 2. Соответствующая кривая между пиками волны и SOC батареи (aup относится к верхним пикам, down относится к нижним пикам)

Для предотвращения перезаряда и переразряда, продления срока службы батарей и контроля их состояния мы обычно используем систему управления батареями (BMS) для управления аккумуляторными блоками. BMS может отслеживать рабочее состояние батарей в режиме реального времени и получать различные параметры, включая общее напряжение батареи, общий ток, температуру и напряжение каждого отдельного элемента. Он может прогнозировать состояние заряда ЛИА и обнаруживать дисбаланс напряжения в цепи аккумуляторной батареи.

Однако достижение точной оценки состояния заряда (SOC) батарей в рамках BMS всегда было сложной задачей. Внутренняя структура батарей сложна, и на SOC влияют такие факторы, как ток разряда, внутренняя температура батареи, старение батареи и саморазряд. Распространенные методы измерения SOC включают метод интегрирования тока, метод внутреннего сопротивления батареи, метод тестирования разряда, метод напряжения разомкнутой цепи, метод напряжения нагрузки и более инновационные методы, такие как метод фильтрации Калмана, метод теории нечеткой логики и метод нейронных сетей. Среди них метод определения напряжения разомкнутой цепи и метод проверки разряда не подходят для оценки SOC работающей батареи. Существует проблема накопления ошибок в текущем методе интегрирования, который требует регулярной и точной калибровки. При изменении SOC ЛИА изменения внутреннего сопротивления и напряжения очень малы, что приводит к очень неточным результатам измерений [3]. Метод фильтрации Калмана основан на точности построения модели, сложности алгоритма и большом количестве вычислений [2]. Метод нейронной сети требует извлечения большого объема исчерпывающих данных из целевой выборки для обучения системы [2].

## II. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Предлагаемый процесс ультразвукового контроля ЛИА заключается в следующем: сначала мы генерируем сигнал с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) с помощью микроконтроллера. Затем сигнал ШИМ усиливается для приведения в действие ультразвукового датчика. Ультразвуковой датчик излучает ультразвуковые волны, которые проникают в батарею и передают параметры состояния батареи на приемник. Приемник улавливает ультразвуковые волны и передает сигнал на осциллограф через усилитель. Наконец, после получения сигнала мы анализируем текущее рабочее состояние библиотек на основе формы принятого сигнала. Функциональная блок-схема проиллюстрирована на рис. 3 следующим образом:

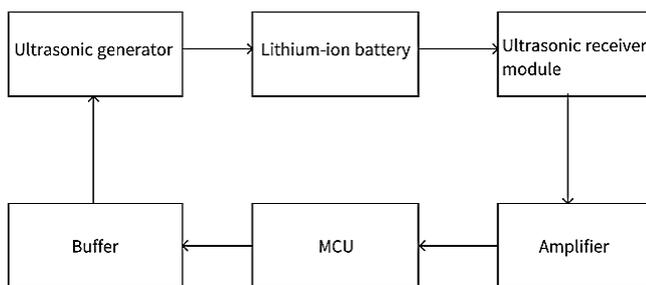


Рис. 3. Схема ультразвукового контроля литий-ионного аккумулятора

В эксперименте мы использовали плату разработки NUCLEO-F767ZI, которая оснащена микроконтроллером STM32F767ZI в качестве ядра. Этот контроллер способен генерировать высокочастотные ШИМ-сигналы для генерации ультразвуковых волн в эксперименте.

Напряжение выходного буфера подается исключительно от Vcc, а входной буфер обрабатывает сигнал ШИМ как логический переключатель. В результате конечный выходной сигнал ШИМ из буфера будет очень стабильным.

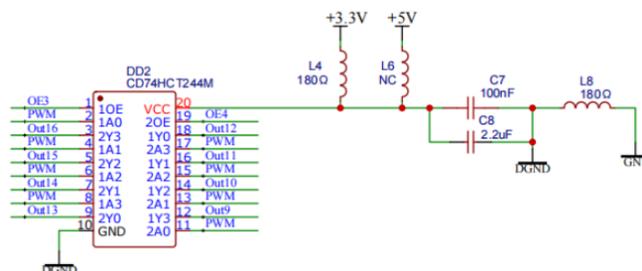


Рис. 4. Схема расщетки излучателя

Ультразвуковой генератор и приемник представляют собой керамические пьезоэлектрические элементы. Керамические пьезоэлектрические элементы – это материалы, которые используют пьезоэлектрический эффект для преобразования механической энергии в электрическую. Они обладают следующими преимуществами:

1. Высокая стабильность: Керамические пьезоэлектрические элементы обладают чрезвычайно стабильными электрическими и механическими характеристиками, минимально подвержены влиянию условий окружающей среды и сохраняют свои эксплуатационные характеристики в течение длительного периода использования.
2. Высокая чувствительность: Керамические пьезоэлектрические элементы могут преобразовывать очень небольшое количество механической энергии в электрические сигналы.
3. Высокочастотный отклик: Керамические пьезоэлектрические элементы имеют быстрое время отклика и могут работать в условиях высокой частоты, что делает их подходящими для различных высокоскоростных и высокоточных применений.
4. Простота обработки и придания формы: Керамическим пьезоэлектрическим элементам можно придавать различные формы и размеры с помощью формования, резки, штамповки и других методов, что позволяет легко интегрировать их в различные устройства.

Из-за чрезвычайно низкого напряжения сигналов, генерируемых при использовании керамических пьезоэлектрических элементов в качестве приемников, нам необходимо использовать усилитель для усиления этих сигналов для дальнейшего наблюдения и измерения. В этом эксперименте мы решили спроектировать выходной усилитель напряжения, при этом основной микросхемой операционного усилителя была микросхема AD8651. Этот чип обладает такими преимуществами, как низкий уровень шума, низкое

напряжение смещения, высокая точность, широкий диапазон рабочих напряжений и небольшой корпус, что делает его очень подходящим для применений, требующих высокой интеграции и точных измерений.

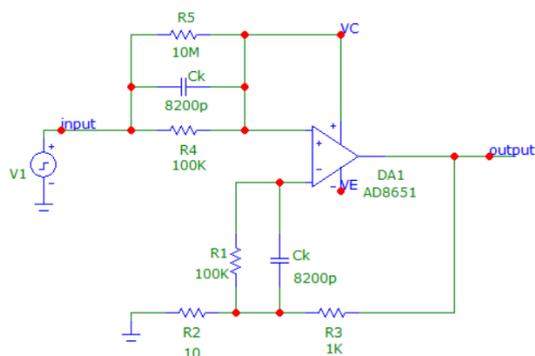


Рис. 5. Схема усилителя приемника

### III. ОПРЕДЕЛЕНИЕ И НАСТРОЙКА ПАРАМЕТРОВ ШИМ

Ультразвуковые волны представляют собой форму механической вибрации с частотами, обычно превышающими 20 кГц. Они обладают хорошей направленностью, высокой энергией и высокой проникающей способностью и широко используются при неразрушающем контроле материалов. В контексте определения SOC батареи (состояния заряда) частота ультразвуковых волн играет решающую роль. Более высокие частоты ультразвуковых сигналов приводят к увеличению разрешения, но уменьшают проникновение, что приводит к большей степени перекрытия формы волны в принимаемых сигналах. И наоборот, более низкие частоты обеспечивают большую проникающую способность при меньшем разрешении и уменьшенном перекрытии формы сигнала. После проведения обширных экспериментов было обнаружено, что для исследуемых батарей и желаемого качества формы сигнала частота ультразвукового сигнала приблизительно 19,8 кГц обеспечивает баланс между разрешением и целостностью формы сигнала.

В этом эксперименте мы использовали микросхему STM32F767ZI с системной тактовой частотой, установленной на 16 МГц. Конфигурация ШИМ-выхода была установлена с использованием канала CN1 счетчика TIM3. TIM3 использует тактовую частоту от шины APB1 с частотой 4 МГц (полученную из системной тактовой частоты 16 МГц, деленной на 4).

Для TIM3 значение предварительного масштабирования было установлено равным 1, а период счетчика был установлен равным 100. Конечная выходная частота ШИМ рассчитывается следующим образом:

$$F_{pwm} = \frac{PCLK1}{(ARR + 1) \times (PSC + 1)}$$

Здесь ARR представляет значение периода счетчика, а PSC – значение предварительного масштабирования. Конечное значение равно 19,8 кГц.

Выходной сигнал от приемника к осциллографу в эксперименте показан на рис. 6.

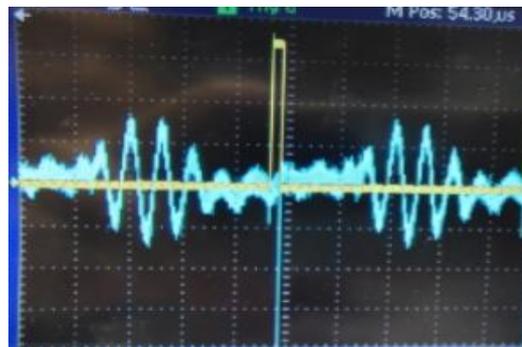


Рис. 6. Форма волны полученного ультразвукового сигнала (синим цветом) и форма волны импульсного сигнала, используемого для генерации ультразвука (желтым цветом).

Мы провели измерения в режиме реального времени в процессе разряда и в конечном итоге получили изображение, иллюстрирующее изменение огибающей формы сигнала во время разряда, как показано на рис. 2.

ТАБЛИЦА I. СООТВЕТСТВИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН И МОЩНОСТИ SOC БАТАРЕИ

Состояние	Ультразвуковые физические параметры	Верхние и нижние пики	Реляционное выражение, соответствующее аккумулятору SOC
Заряд	От пика к пику	Верхний	$y = 0.0004168 \cdot e^{6.093 \cdot x} + 26.92 \cdot e^{0.0096 \cdot x}$
Заряд		Нижний	$y = -1.394 \cdot 10^{-9} \cdot e^{21.96 \cdot x} - 18.9 \cdot e^{0.463 \cdot x}$
Заряд	Изменение временной задержки приема сигнала	—	$y = 1.192 \cdot x + 1.234$
Заряд	Степень затухания от пика сигнала	Верхний	$y = -0.5468 \cdot x^2 + 0.6891 \cdot x + 0.249$
Заряд		Нижний	$y = -1.502 \cdot x^3 + 1.621 \cdot x^2 + 0.09686x + 0.1377$
Разряд	От пика к пику	Верхний	$y = 156.6 \cdot x^4 - 270.8 \cdot x^3 + 121.5 \cdot x^2 + 7.223 \cdot x + 30.71$
Разряд		Нижний	$y = -297.9 \cdot x^4 + 562.2 \cdot x^3 - 310.8 \cdot x^2 + 29.83 \cdot x - 31.93$
Разряд	Изменение временной задержки приема сигнала	—	$y = -0.001588 \cdot e^{6.695 \cdot x} + 0.2326 \cdot e^{1.746 \cdot x}$
Разряд	Степень пикового ослабления сигнала	Верхний	$y = 0.2005 \cdot e^{-0.2392 \cdot x} + 1.719 \cdot 10^{-12} \cdot e^{25.09 \cdot x}$
Разряд		Нижний	$y = 0.3377 \cdot x^2 + 0.02983 \cdot x + 0.3391$

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проанализировав экспериментальные данные, мы в конечном итоге получили соответствующие зависимости между различными физическими параметрами ультразвука и SOC батареи (состоянием заряда), как показано в таблице 1. Таким образом, можно наблюдать ряд соответствующих физических параметров ультразвукового сигнала, что позволяет точно определять состояние заряда и разрядки батареи и SOC с использованием таких алгоритмов, как подгонка кривой или нечеткое управление.

Это также позволяет создавать недорогое и компактное оборудование, способное отслеживать состояние литий-ионной батареи. Такое устройство может быть легко интегрировано в различное аккумуляторное оборудование для мониторинга в режиме реального времени.

Однако недостатком этого метода является то, что соответствующие кривые данных также различаются для разных батарей. Каждый раз при замене батареи это означает, что необходимо выполнять детальное измерение данных для новой целевой батареи.

#### БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают благодарность Дядичеву Сергею Владимировичу за помощь.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Хрусталева Д.А. Аккумуляторы. М: Изумруд, 2003. 224 с.
- [2] Pan T., Jiang H., Yan R., Cai Z. Ultrasonic-based nondestructive testing technology for lithium-ion power batteries // *Science and Technology Innovation and Application*. 2022. №6 (12). P. 28-33. doi: 10.19981/j.CN23-1581 /G3.2022.06.008.
- [3] Zappen H., Fuchs G., Gitis A., Uwe S.D. In-Operando Impedance Spectroscopy and Ultrasonic Measurements during High-Temperature Abuse Experiments on Lithium-Ion Batteries // *Batteries*. 2020. №2(6). P. 25-45. doi:10.3390.
- [4] Davies G., Knehr K.W., Tassell B.V. State of Charge and State of Health Estimation Using Electrochemical Acoustic Time of Flight Analysis // *Journal of the Electrochemical Society*. 2017. №12 (164). P. A2746-A2755
- [5] Ladpli P., Kopsaftopoulos F., Chang F.K. Estimating state of charge and health of lithium-ion batteries with guided waves using built-in piezoelectric sensors/actuators // *Journal of Power Sources*. 2018 (384). P. 342-354.