

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра радиотехники и электродинамики

**Измерение внутреннего сопротивления химических источников  
тока**  
АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Студента 4 курса 4071 группы  
направления 11.03.03 «Конструирование и технология электронных средств»  
института физики  
Даулетова Николая Эдуардовича

Научный руководитель  
доцент кафедры радиотехники  
и электродинамики, к.ф.-м.н.

  
подпись, дата

Д.А.Колосов

Заведующая кафедрой  
радиотехники и электродинамики  
д.ф.-м.н., профессор

  
подпись, дата

О.Е. Глухова

Саратов 2026 г.

## Введение

Актуальность темы работы обусловлена ростом числа автономных электронных устройств, резервных источников питания и энергетических систем, использующих возобновляемые источники энергии. Одним из ключевых элементов таких систем являются химические источники тока, состояние которых напрямую влияет на надёжность, срок службы и эффективность работы оборудования [1, 7, 8]. При эксплуатации химических источников тока важным диагностическим параметром является внутреннее сопротивление, так как его значение связано с падением напряжения под нагрузкой, тепловыми потерями, способностью элемента отдавать ток и общим состоянием источника питания [2, 5, 6].

Внутреннее сопротивление химического источника тока изменяется в процессе старения, зависит от температуры, степени заряда и условий эксплуатации [2, 6, 9, 11]. Рост данного параметра может указывать на ухудшение состояния аккумулятора, увеличение потерь энергии и возможный отказ. При этом производители не всегда предоставляют подробные сведения о характеристиках конкретных элементов, а конечному пользователю заранее может быть неизвестно, будет ли источник питания соответствовать заявленным свойствам в реальных условиях.

На рынке существуют приборы для измерения внутреннего сопротивления, однако многие из них отличаются высокой стоимостью или требуют специальных навыков. Поэтому актуальной является задача исследования методов измерения внутреннего сопротивления и разработки доступного портативного устройства, пригодного для практической оценки состояния химических источников тока [2, 11].

Целью выпускной квалификационной работы является исследование методов измерения внутреннего сопротивления химических источников тока и разработка портативного устройства для его измерения.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: исследованы виды химических источников тока и проведён анализ существующих методов измерения внутреннего сопротивления; разработан алгоритм обработки измерительных данных; разработаны структурная и принципиальная электрическая схемы устройства; изготовлено устройство и проведена его калибровка; проведены испытания с щелочными элементами, литий-ионными и литий-титанатными ячейками.

Материалами исследования послужили научная и техническая литература по химическим источникам тока, нормативные документы, сведения о методах измерения внутреннего сопротивления, техническая документация на электронные компоненты, данные о микроконтроллерной платформе Arduino Nano, повышающем преобразователе MT3608, датчике температуры DS18B20, зарядно-разрядном устройстве SkyRC iMAX B6 mini, а также экспериментальные данные, полученные при испытании различных химических источников тока [1–22].

Структура выпускной квалификационной работы включает введение, четыре главы, заключение, список литературы и приложения. В первой главе «Теоретические сведения о химических источниках тока» рассматриваются основные виды химических источников тока. Во второй главе «Методы измерения внутреннего сопротивления химических источников тока» анализируются основные методы измерения и область их применения. В третьей главе «Разработка устройства для измерения внутреннего сопротивления» описываются функциональные элементы прибора, схемотехническая реализация, алгоритм работы, изготовление устройства и его

калибровка. В четвёртой главе «Анализ химических источников тока по статистическим данным» представлены результаты экспериментальных исследований щелочных элементов, литий-ионных аккумуляторов и литий-титанатных ячеек.

#### Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи выпускной квалификационной работы, определены материалы исследования и представлена структура работы. Отмечено, что внутреннее сопротивление является важным диагностическим параметром химических источников тока, поскольку характеризует способность элемента работать под нагрузкой и отражает его техническое состояние [2, 6, 11].

В первой главе рассмотрены теоретические сведения о химических источниках тока. Они представляют собой источники электродвижущей силы, в которых электрическая энергия формируется за счёт протекания химических реакций. В зависимости от возможности повторного использования химические источники тока подразделяются на гальванические элементы, электрические аккумуляторы и топливные элементы [1]. Гальванические элементы являются первичными источниками тока и не предназначены для повторной зарядки [1, 4]. Электрические аккумуляторы относятся к вторичным источникам тока и способны многократно преобразовывать электрическую энергию в химическую и обратно. Топливные элементы отличаются тем, что вещества, участвующие в реакции, подаются извне, а продукты реакции удаляются из системы [1].

Особое внимание в работе уделено внутреннему сопротивлению химического источника тока. Данный параметр представляет собой противодействие протеканию тока внутри элемента. Источники питания отличаются от идеального источника напряжения тем, что при подключении нагрузки на их выводах возникает падение напряжения, а часть энергии

преобразуется в теплоту [2, 6]. Внутреннее сопротивление формируется за счёт электронного сопротивления выводов и перемычек, сопротивления электролита, контактных сопротивлений, сопротивления переноса заряда между электродом и электролитом, а также процессов поляризации [5, 6].

В первой главе также рассмотрены особенности различных типов химических источников тока. Для свинцово-кислотных аккумуляторов внутреннее сопротивление определяется сопротивлением выводов, решёток, электролита и контактных соединений. По мере разряда состав электролита изменяется, увеличивается количество продуктов реакции, что приводит к росту сопротивления [1]. Для литий-ионных аккумуляторов внутреннее сопротивление имеет более сложную природу и связано с сопротивлением электролита, контактов, переносом заряда и диффузионными ограничениями [7–10]. У щелочных элементов внутреннее сопротивление возрастает по мере расходования активных веществ и накопления продуктов реакции [1, 4].

Во второй главе рассмотрены методы измерения внутреннего сопротивления химических источников тока. Показано, что сопротивление является одним из ключевых диагностических параметров, позволяющих оценить мощностные характеристики, тепловую стабильность, остаточный ресурс и общее состояние источника питания [11]. В отличие от ёмкости, измеряемой путём интегрирования тока, сопротивление определяется как динамический отклик системы на токовое воздействие и зависит от уровня заряда, температуры, амплитуды и длительности нагрузки, а также степени деградации элемента [2, 11].

Физическая основа метода токовых импульсов связана с законом Ома для полной цепи и анализом изменения напряжения при кратковременном подключении нагрузки [2, 11]. В ходе измерения сначала фиксируется напряжение холостого хода, затем подаётся кратковременный разрядный

импульс, после чего измеряются напряжение под нагрузкой и ток. По величине падения напряжения рассчитывается внутреннее сопротивление. Преимуществами метода являются простота реализации и возможность применения в портативном устройстве. К ограничениям относится зависимость результата от длительности импульса и режима эксплуатации источника перед измерением [2, 11].

Электрохимическая импедансная спектроскопия позволяет получать частотные характеристики импеданса и разделять отдельные физико-химические процессы внутри аккумуляторной ячейки [2, 5]. Результаты обычно представляются в виде диаграмм Найквиста или Боде [5]. Метод является информативным и точным, но требует специализированного оборудования и длительных измерений.

Компонентный метод измерения оценивает отдельные компоненты внутреннего сопротивления по переходным процессам при включении нагрузки [6]. Метод сочетает сравнительную простоту реализации с большей информативностью, однако требует точной синхронизации разрядных импульсов и настройки режима работы. Также рассмотрен метод широкополосного возбуждения с использованием случайной последовательности. Такой подход может применяться для диагностики батарей во время работы оборудования, но отличается большей сложностью реализации [12].

По результатам анализа сделан вывод, что ни один метод измерения внутреннего сопротивления не является универсальным. Для лабораторных исследований наиболее информативной является импедансная спектроскопия, для встроенного мониторинга может применяться широкополосное возбуждение, а для прикладной оперативной оценки состояния химических источников тока оптимальным является метод токового импульса [2, 5, 11, 12].

Именно он выбран в работе как основной метод для реализации в разрабатываемом устройстве.

В третьей главе описана разработка устройства для измерения внутреннего сопротивления химических источников тока. Для реализации выбранного метода разработана измерительная система, центральным элементом которой является микроконтроллер. Устройство выполняет три основные функции: формирование управляющего сигнала для токовой нагрузки, синхронизированное измерение напряжения и тока, а также обработку и отображение результатов измерения.

Структурная схема прибора включает микроконтроллер, цепь измерения тока, выводы для подключения исследуемого химического источника тока и интерфейс пользователя. В качестве управляющего и вычислительного устройства выбрана плата Arduino Nano. Её применение обусловлено компактностью, доступностью, наличием аналоговых входов, достаточными вычислительными возможностями и поддержкой стандартных интерфейсов связи [13, 14]. Цепь формирования токового импульса построена с использованием N-канального MOSFET-транзистора, выполняющего функцию электронного ключа. Для измерения тока используется шунтирующий резистор сопротивлением 0,05 Ом. Напряжение с шунта оцифровывается микроконтроллером, что позволяет учитывать фактический ток нагрузки при расчёте внутреннего сопротивления. Для визуализации результатов предусмотрен дисплей.

Алгоритм работы устройства включает несколько этапов. После включения выполняется инициализация микроконтроллера и АЦП. Затем устройство контролирует наличие подключённого химического источника тока и ожидает стабилизации напряжения. После этого микроконтроллер формирует управляющий сигнал на затвор MOSFET-транзистора, подключая нагрузку. Во

время импульса измеряется напряжение исследуемого источника и напряжение на шунте. Данные многократно считываются и усредняются, после чего микроконтроллер рассчитывает внутреннее сопротивление и выводит полученное значение на дисплей.

Для повышения точности измерений необходимо обеспечить стабильное питание микроконтроллера, поскольку АЦП сравнивает измеряемое напряжение с опорным напряжением. В устройстве используется аккумуляторная батарея и повышающий преобразователь на базе микросхемы МТ3608 [15]. Он обеспечивает стабилизированное питание контроллера на уровне 5 В. В работе описан принцип действия повышающего преобразователя, основанный на накоплении энергии в индуктивности и её передаче в нагрузку через диод и выходной конденсатор [15, 16].

Для контроля температуры применяется цифровой датчик DS18B20, работающий по интерфейсу 1-Wire [17, 18]. Использование температурного датчика связано с тем, что внутреннее сопротивление химических источников тока существенно зависит от температуры [2, 9, 11]. Датчик позволяет фиксировать условия измерения и учитывать влияние внешней среды на результаты.

В рамках разработки была создана принципиальная схема устройства и подготовлена печатная плата. Для прибора выбрана односторонняя печатная плата, что позволило обеспечить приемлемую стоимость изготовления и разместить функциональные элементы в ограниченных габаритах корпуса [19]. По подготовленным файлам была изготовлена плата, после чего компоненты установлены и зафиксированы ручной пайкой. В результате был получен действующий прототип устройства для измерения внутреннего сопротивления химических источников тока.

Структура разработанного устройства представлена на рисунке 1.



постоянного тока. Поэтому прямое сравнение абсолютных значений сопротивления не является полностью корректным.

В четвёртой главе представлены результаты анализа химических источников тока по экспериментальным данным. Исследования проводились для трёх групп источников: первичных щелочных элементов различных производителей, литий-ионных аккумуляторов различной ёмкости и литий-титанатных аккумуляторных ячеек.

Первый эксперимент был посвящён сравнению щелочных элементов типоразмера AA различных производителей. Целью исследования являлось определение внутреннего сопротивления элементов и сопоставление полученных значений с их рыночной стоимостью. Помимо абсолютного значения внутреннего сопротивления был рассчитан относительный экономический показатель, учитывающий проводимость элемента и его стоимость. Чем выше данный показатель, тем выгоднее элемент с точки зрения низкого внутреннего сопротивления на единицу стоимости. Полученные результаты показали, что низкое внутреннее сопротивление не всегда напрямую связано с высокой ценой элемента. Результаты эксперимента наиболее применимы для оценки пригодности элементов в устройствах, чувствительных к падению напряжения и внутренним потерям.

Второй эксперимент был посвящён исследованию литий-ионных аккумуляторов различной номинальной ёмкости. Целью было выявить характер зависимости между ёмкостью элемента и его внутренним сопротивлением. Сравнение проводилось для литий-ионных элементов при близкой степени заряда и одинаковой температуре.

По результатам измерений была построена зависимость внутреннего сопротивления от ёмкости. В исследованной выборке наблюдалось нелинейное

снижение внутреннего сопротивления по мере увеличения ёмкости. Результаты измерений для литий-ионных аккумуляторов представлены на рисунке 3.

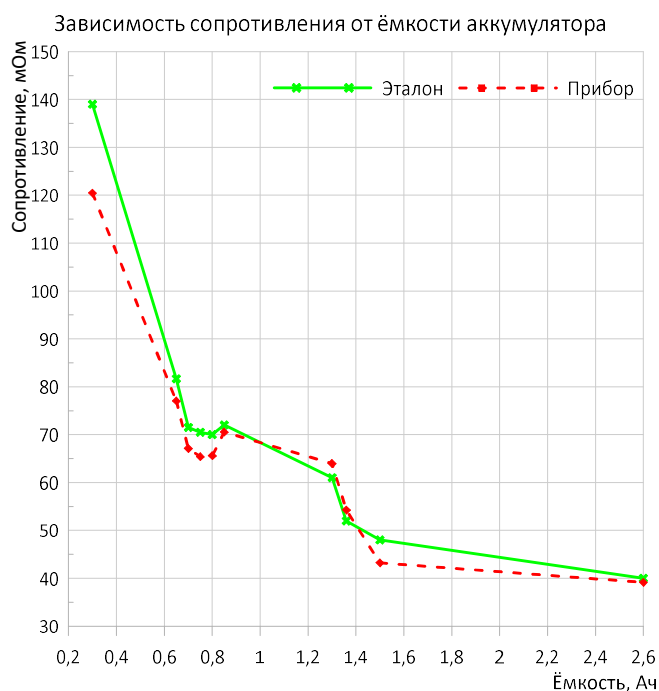


Рисунок 3 — Зависимость внутреннего сопротивления Li-Ion аккумуляторов от ёмкости

Третий эксперимент был посвящён исследованию литий-титанатного аккумуляторного элемента при низких температурах. Целью являлось определение влияния охлаждения на способность элемента отдавать ток. Литий-титанатные аккумуляторы относятся к разновидности литий-ионных аккумуляторов, в которых в качестве материала отрицательного электрода используется литий-титанат [21, 22]. Измерения проводились сначала при комнатной температуре, затем при последовательно понижаемых температурах до  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Для достижения температурного равновесия элемент удерживался в охлаждённой среде в течение часа. По результатам измерений была построена зависимость внутреннего сопротивления от температуры.

Эксперимент показал, что при снижении температуры внутреннее сопротивление литий-титанатного элемента возрастает. При низкой

температуре значение сопротивления оказалось примерно в 8 раз выше, чем при комнатной температуре 20 °С. Рост сопротивления носит нелинейный характер: наиболее выраженное изменение наблюдается в диапазоне температур от -14 до 10 °С, тогда как вне этого диапазона изменение менее резкое. Результаты температурных испытаний литий-титанатной ячейки представлены на рисунке 4.

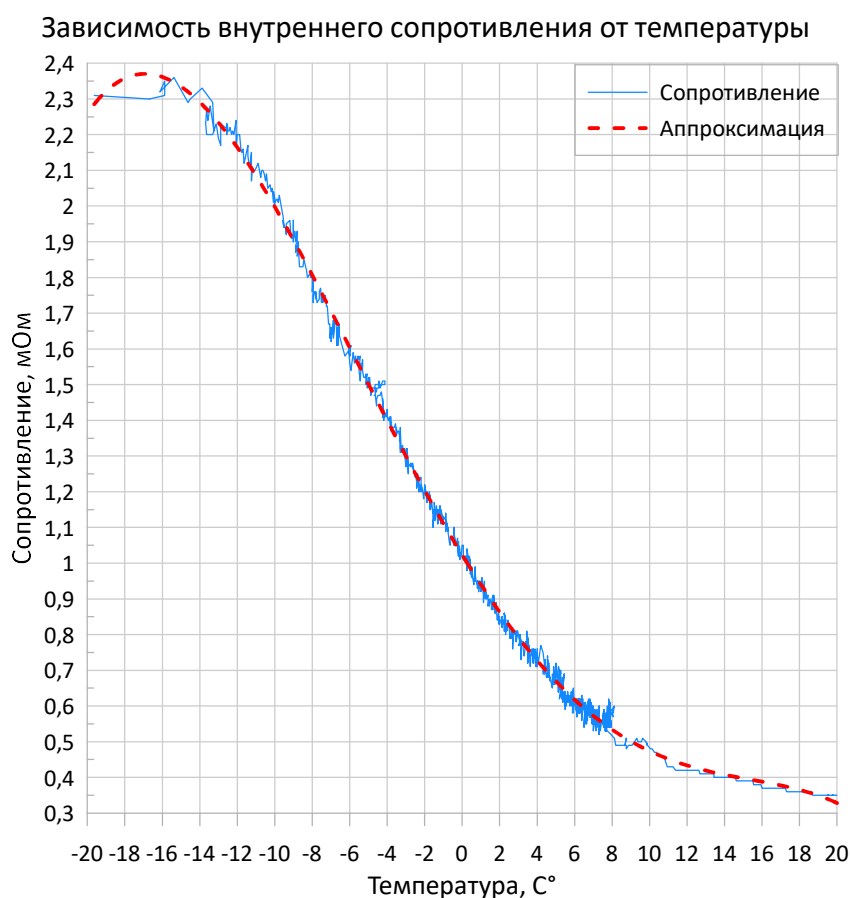


Рисунок 4 — Зависимость внутреннего сопротивления LTO-ячейки от температуры

Таким образом, в основной части выпускной квалификационной работы были последовательно рассмотрены теоретические основы внутреннего сопротивления химических источников тока, проведён анализ методов измерения, разработан и изготовлено измерительное устройство и проведены экспериментальные исследования различных типов источников питания.

## Заключение

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы были исследованы методы измерения внутреннего сопротивления химических источников тока и разработано портативное устройство для его измерения.

Разработанный алгоритм обработки измерительных данных включает определение стабильного напряжения химического источника тока до импульса, кратковременное подключение токовой нагрузки, измерение напряжения источника и напряжения на шунте, усреднение данных АЦП и расчёт внутреннего сопротивления. Такой алгоритм позволяет выполнять оперативную оценку состояния исследуемого источника питания.

Разработаны структурная и принципиальная электрические схемы устройства. Основой прибора является микроконтроллер Arduino Nano, управляющий MOSFET-ключом и обрабатывающий данные с аналоговых входов [13, 14]. В устройстве предусмотрен шунтирующий резистор для оценки тока, повышающий преобразователь МТ3608 для стабилизированного питания [15, 16] и цифровой датчик температуры DS18B20 для контроля условий измерения [17, 18].

Изготовлен действующий прототип устройства и проведена его калибровка. Сравнение результатов показало приемлемое соответствие показаний, что подтверждает работоспособность разработанного прибора и возможность его применения для практической оценки внутреннего сопротивления химических источников тока.

Проведены испытания трёх типов химических источников тока: щелочных батареек, литий-ионных аккумуляторов и литий-титанатных ячеек. Для щелочных элементов получены сравнительные значения внутреннего сопротивления и выполнена оценка с учётом рыночной стоимости. Для литий-ионных аккумуляторов выявлена нелинейная зависимость внутреннего

сопротивления от ёмкости. Для литий-титанатной ячейки получена температурная зависимость внутреннего сопротивления, показавшая значительный рост сопротивления при охлаждении.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования разработанного устройства для оперативной оценки состояния химических источников тока. Прибор может применяться для сравнения элементов питания, выявления источников с повышенным внутренним сопротивлением, анализа влияния температуры и оценки пригодности аккумуляторов или батареек для работы под нагрузкой.

Таким образом, выполненная работа имеет прикладное значение, поскольку сочетает анализ методов измерения внутреннего сопротивления, разработку аппаратной части прибора, создание алгоритма обработки данных и экспериментальную проверку устройства на различных типах химических источников тока.