

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего  
профессионального образования  
«Омский государственный технический университет»

На правах рукописи

**ЧУПИН Дмитрий Павлович**

**ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ  
ХАРАКТЕРИСТИК АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ**

Специальность 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ,  
материалов и изделий

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель –  
кандидат технических наук, доцент  
Кобенко Вадим Юрьевич

Омск - 2014

## СОДЕРЖАНИЕ

	СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	5
	ВВЕДЕНИЕ.....	6
Глава 1	АНАЛИЗ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ.....	12
1.1	Типы аккумуляторных батарей.....	12
1.2	Диагностические параметры аккумуляторных батарей.....	17
1.2.1	Напряжение разомкнутой цепи.....	17
1.2.2	Напряжение под нагрузкой.....	20
1.2.3	Внутреннее сопротивление.....	21
1.3	Характеристики аккумуляторных батарей.....	26
1.4	Методы диагностики щелочных аккумуляторных батарей .....	28
1.4.1	Оценка качества новых аккумуляторных батарей .....	28
1.4.2	Оценка остаточной емкости аккумуляторных батарей .....	31
1.4.3	Оценка технического состояния аккумуляторных батарей в процессе эксплуатации .....	36
1.5	Методы диагностики свинцово-кислотных аккумуляторных батарей .....	38
1.5.1	Оценка качества новых свинцово-кислотных аккумуляторных батарей .....	38
1.5.2	Оценка степени заряженности аккумуляторных батарей .....	41
1.5.3	Особенности контроля параметров в процессе эксплуатации аккумуляторных батарей .....	44
1.5.4	Оценка технического состояния аккумуляторных батарей .....	47
1.6	Методы восстановления аккумуляторных батарей .....	50
1.7	Выводы по главе.....	53
Глава 2	МЕТОД КОНТРОЛЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ.....	55
2.1	Исследование параметров аккумуляторных батарей .....	55

2.1.1	Выбор эквивалентной схемы аккумуляторной батареи.....	55
2.1.2	Физическая модель колебательных процессов в растворе электролита.....	64
2.1.3	Добротность эквивалентной схемы аккумуляторной батареи.....	67
2.1.4	Принципы измерения параметров аккумуляторных батарей....	72
2.1.5	Исследование активного сопротивления аккумуляторных батарей .....	75
2.2	Разработка методов контроля характеристик аккумуляторных батарей .....	79
2.2.1	Метод контроля по активному сопротивлению.....	79
2.2.2	Метод контроля по характеристической частоте.....	87
2.2.3	Совместное применение активного сопротивления и характеристической частоты.....	93
2.2.4	Метод вычисления характеристической частоты.....	101
2.2.5	Сравнение существующих методов оценки эксплуатационных характеристик аккумуляторных батарей с предложенным методом	108
2.3	Выводы по главе.....	114
Глава 3	<b>КЛАССИФИКАЦИЯ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ.....</b>	<b>116</b>
3.1	Классификация по критерию активного сопротивления.....	116
3.2	Классификация по параметру характеристической частоты.....	129
3.3	Классификация по напряжению разомкнутой цепи.....	130
3.4	Классификация внутри типа.....	132
3.5	Выводы по главе.....	137
Глава 4	<b>ПРОГРАММНО-АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ.....</b>	<b>139</b>
4.1	Программно-аппаратная реализация «Измерителя параметров АБ».....	140
4.1.1	Программная реализация «Измерителя параметров АБ».....	141
4.1.2	Аппаратная реализация «Измерителя параметров АБ».....	154

4.2	Программная реализация «Анализатора АБ».....	158
4.3	Выводы по главе.....	169
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	170
	ЛИТЕРАТУРА.....	172
	ПРИЛОЖЕНИЕ 1.....	182
	ПРИЛОЖЕНИЕ 2.....	185
	ПРИЛОЖЕНИЕ 3.....	192
	ПРИЛОЖЕНИЕ 4.....	200
	ПРИЛОЖЕНИЕ 5.....	202

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

AGM – absorbed in Glass Mat

LabVIEW – Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench

Li-Ion – литий-ионный аккумулятор

Ni-Cd – никель-кадмиевый аккумулятор

Ni-MH – никель-металлгидридный аккумулятор

АБ – аккумуляторная батарея

ДЭС – двойной электрический слой

КТЦ – контрольно-тренировочный цикл

НРЦ – напряжение разомкнутой цепи

ООО – общество с ограниченной ответственностью

ПО – программное обеспечение

СКО – среднеквадратичное отклонение

ФЦП – федеральная целевая программа

ХИТ – химический источник тока

ЭДС – электродвижущая сила

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность работы.** В настоящее время аккумуляторные батареи (АБ) широко применяются как источники питания портативных устройств, стартерные батареи в автотранспорте, источники бесперебойного питания и как аккумуляторы энергии в альтернативных энергетических установках (солнечные и ветровые электростанции). В каком бы приложении батарея не применялась, ее преждевременный отказ может повлечь последствия разной степени тяжести: от потери информации на персональном компьютере или остановки сложных технологических процессов на производстве до отключения систем жизнеобеспечения. В связи с этим возникает необходимость в получении оперативной и достоверной информации о текущем состоянии АБ для своевременной ее замены.

Основными эксплуатационными характеристиками АБ, является ее емкость (резервная или номинальная). Прямое измерение резервной и номинальной емкости связано с непосредственным разрядом АБ, что занимает много времени и требует отключения АБ от питаемой ею системы.

Методы оперативной оценки состояния АБ основываются на характеристиках, полученных косвенно, в результате анализа параметров, которые можно измерить достаточно быстро. Основой таких методов являются специальные приборы - анализаторы АБ. Принцип их действия основан на измерении параметров батареи (обычно внутреннего сопротивления) на переменном токе всего за 10-20 секунд. Значения измеренных параметров позволяют оценить степень деградации батареи и спрогнозировать значения резервной и номинальной емкости, тока стартерного разряда АБ.

Сведения о таких параметрах и их зависимостях от основных эксплуатационных характеристик встречаются в работах таких авторов как А.А. Таганова, Ю.И. Бубнов, С.Б. Орлов, И.Ф. Дантенко, С. Родригес (S. Rodrigues), С. Ченг (S. Cheng), А. Хаммоч (A. Hammouche), Ю.М. Поваров, В.Н. Митькин, Е.А. Нижниковский, И.Ф. Даниленко. Для правильной интерпретации параметров

АБ измеренных на переменном токе необходимо знание процессов происходящих в растворе электролита. Теория электрохимического импеданса и физика колебательных процессов в растворах электролитов раскрыта в работах таких ученых, как А.Б. Климник, З.Б. Стойнов, Б.М. Графов, Б. Савова-Стойнова, В.В. Елкин. Проблемы диагностики и неразрушающего контроля так же активно развиваются в работах Ю.М. Вешкурцева, В.Н. Костюкова, В.Ю. Тэттэра, В.В. Ключева.

Качественная диагностика АБ методами косвенной оценки ее характеристик по быстро измеримым электрическим параметрам требует знания электрической эквивалентной схемы АБ. В представленной работе проведен анализ существующих эквивалентных схем АБ, обоснован выбор модели АБ в виде последовательной *RLC*-цепи. На основании выбранной модели выбран дополнительный диагностический параметр АБ – характеристическая частота.

**Объектами исследования** выступают свинцово-кислотные аккумуляторные батареи.

**Предметом исследования** являются параметры и характеристики аккумуляторных батарей.

**Идея диссертационной работы** заключается в совместном измерении параметров активного сопротивления и характеристической частоты аккумуляторной батареи, представленной в виде модели последовательной *RLC*-цепи.

**Цель диссертационной работы** – разработка метода контроля аккумуляторных батарей, позволяющего повысить достоверность оценки их эксплуатационных характеристик.

Для достижения поставленной цели были поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Подбор математической модели аккумуляторной батареи, из известных моделей двухполюсников, адекватно описывающей поведение реальной АБ при эксплуатации и диагностике на переменном токе.

2. Разработка метода контроля эксплуатационных характеристик аккумуляторной батареи по двум параметрам: активному сопротивлению и характеристической частоте.

3. Разработка метода вычисления характеристической частоты аккумуляторной батареи.

4. Разработка алгоритма автоматической классификации аккумуляторных батарей по степени заряженности и номинальной емкости.

5. Разработка программного обеспечения (ПО) для определения эксплуатационных характеристик АБ по двум параметрам и автоматического определения степени заряженности, номинальной емкости и классификации аккумуляторных батарей.

**Методы исследования.** При выполнении исследований применялся комплексный подход, основанный на применении теоретических основ электротехники, цифровой обработки сигналов, теории вероятности и математической статистики и методов регрессивного и корреляционного анализа. Обработка экспериментальных данных проводилась на персональном компьютере с помощью программного обеспечения, разработанного в среде LabVIEW, а также с помощью электронных таблиц MS Excel.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Метод контроля эксплуатационных характеристик АБ по двум параметрам: активному сопротивлению и характеристической частоте.

2. Результаты применения метода контроля эксплуатационных характеристик АБ по двум параметрам: активному сопротивлению и характеристической частоте.

3. Алгоритм вычисления параметра характеристической частоты аккумуляторной батареи.

4. Программное обеспечение и алгоритмы, реализующие метод контроля эксплуатационных характеристик АБ по двум параметрам и алгоритм автоматической классификации АБ.



## **Научная новизна**

1. Метод контроля эксплуатационных характеристик АБ по двум параметрам: активному сопротивлению и характеристической частоте.

2. Результаты вычисления эксплуатационных характеристик аккумуляторной батареи по методу, основанному на использовании двух параметров, что повышает достоверность оценки характеристик аккумуляторной батареи.

3. Результаты диагностики аккумуляторных батарей, которые демонстрируют увеличение количества качественных состояний (диагностических классов) АБ.

4. Алгоритм вычисления параметра характеристической частоты аккумуляторной батареи.

**Достоверность научных результатов** подтверждается результатами моделирования в среде LabView и физическими экспериментами. Алгоритмы обработки данных основаны на известных методах цифровой обработки сигналов, теории вероятности и математической статистики, регрессивного и корреляционного анализа и многократно проверены путем сравнения модельных результатов с результатами физических измерений.

**Практическая ценность работы** подтверждается следующими достижениями:

1. Результаты диссертационной работы использованы на предприятии ООО «Фирма «Алекто-Электроникс» в части рассмотрения эквивалентной схемы АБ в виде последовательной RLC-цепи и в части методики оценки эксплуатационных характеристик АБ.

2. Результаты диссертационной работы использованы на предприятии ООО «Сфера экономных технологий» в части рассмотрения эквивалентной схемы АБ в виде последовательной RLC-цепи и в части методики оценки эксплуатационных характеристик АБ.

3. Результаты работы были использованы при выполнении следующих тем:

- ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2007-2013 годы» государственный контракт № 16.516.11.6091 от 08.07.2011 по теме: *«Проведение поисковых научно-*

*исследовательских работ в области разработки и создания оборудования для диагностики и эксплуатации энергетического оборудования».*

- Государственное задание Министерства образования и науки Российской Федерации высшим учебным заведениям на 2012 и на плановый период 2013 и 2014 годов в части проведения научно-исследовательских работ по теме № 7.3785.2011 «*Разработка теоретических основ и прикладных аспектов идентификационной алгебры сигналов*».

- Договор № 13227 от 07.11.2013 о выполнении составной части научно-исследовательской работы по теме «*Разработка и натурная отработка методов и алгоритмов обнаружения и классификации малоразмерных объектов, находящихся в водном слое, на дне и захороненных в слое донных осадков*».

4. Программное обеспечение для контроля эксплуатационных характеристик аккумуляторной батареи по двум параметрам и автоматической классификации аккумуляторных батарей, подлежащее внедрению в технологический процесс производства АБ, станций технического обслуживания АБ и службы контроля состояния АБ.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались на научно-технических конференциях: всероссийская научно-практическая конференция ученых, преподавателей, аспирантов, студентов, специалистов промышленности и связи, посвященной 15-летию «ИРСИД» (Омск, 2012); восьмая международная научно-техническая конференция «Динамика систем, механизмов и машин» (Омск, 2012); международная научная конференция «Молодежь третьего тысячелетия» (Омск, 2012); I всероссийская конференция «Территория и практика Успеха» (Омск, 2013); II всероссийская конференция «Территория и практика Успеха» (Омск, 2014).

**Публикации.** Основные научные результаты по теме диссертации опубликованы в 17 научных работах, из них в изданиях, входящих в перечень рекомендованных ВАК РФ – 3, в свидетельствах о регистрации электронных

ресурсов – 3, в материалах конференций 11. Лично, без соавторов, выполнено 12 работ.

**Структура диссертационной работы.** Диссертация состоит из четырех глав, введения, заключения, списка литературы из 96 наименований, приложения. Общий объем работы составляет 203 страницы (в том числе 157 страниц основного текста), 80 рисунков, 26 таблиц, 5 приложений.

## ГЛАВА 1 АНАЛИЗ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ

Сложно представить нашу жизнь без носимых электронных устройств (телефонов, плееров, планшетных компьютеров, ноутбуков и т.д.), не менее сложно человеку обойтись без автотранспорта. Именно аккумуляторные батареи (АБ) являются источником питания каждого из этих устройств, без которого они становятся, практически бесполезны. Также АБ широко применяются в системах автономного питания, которые в экстренный момент могут предотвратить потерю информации или остановку сложного производственного процесса. В связи с ростом сфер применения АБ становится актуальным решение вопроса оперативной и достоверной оценки ее эксплуатационных характеристик.

### 1.1 Типы аккумуляторных батарей

Среди множества разновидностей аккумуляторных батарей можно выделить наиболее часто используемые. К ним относятся никель-кадмиевые, никель-металлгидридные, свинцово-кислотные, литий-ионные и литий-полимерные АБ.

*Никель-кадмиевые АБ (Ni-Cd)* применяются достаточно долго, однако обладают невысокой энергетической плотностью (45÷80) Вт/кг. Они имеют длительный срок службы до 1500 циклов разряд/заряд и способны обеспечить высокие пиковые токи разряда  $I_{раз}$  до  $20I_5$  (где  $I_5$  – ток 5-часового разряда).

Нужно заметить, что изготовители и потребители аккумуляторов и батарей традиционно выражают токи заряда и разряда, используемые для них, как кратные величины их емкости. Например, ток 20 А, используемый для заряда аккумулятора номинальной емкостью  $C = 100$  Ач может быть выражен как  $0,2C$ . Однако, такой метод обозначения тока некорректен с точки зрения размерности физической величины, так как кратность емкости батареи будет выражаться в ампер-часах, а не в амперах, как требуется для размерности токов. Для исправления такого несоответствия был использован метод, который устанавливает, что ток, рекомендуемый для испытаний,  $I_n$  выражается согласно формуле:

$$I_n = \frac{C_n}{t_1},$$

где  $I_n$  – рекомендуемый ток (ток  $n$ -часового разряда), А;  $C_n$  – номинальная емкость, установленная изготовителем, Ач;  $t_1 = 1$  – продолжительность разряда, ч.

В таком случае номинальная емкость – количество электричества  $C_n$  (Ач), указанное изготовителем, которое может отдать аккумулятор при разряде током  $I_n/n$  (А) до конечного напряжения  $U_k$  (емкость  $n$ -часового разряда). Каждому из типов аккумуляторов в соответствии установлено свое значение  $U_k$ . Для щелочных  $U_k = 1$  В на элемент, для свинцово-кислотных -  $U_k = 1,75$  В.

Никель-кадмиевые батареи, как правило, применяются в качестве источников питания радиостанций, биологического и медицинского оборудования, профессиональных видеокамер и электроинструмента.

Никель-кадмиевые батареи не критичны к режиму быстрого заряда в течение  $t_{зар} = 1$  ч и допускают полный разряд малыми токами  $I_{раз}$ . Более того, периодический полный разряд просто необходим батареям этого типа. Иначе на пластинах элементов формируются крупные кристаллы, существенно снижающие их емкость (так называемый «эффект памяти»). Это единственный тип батарей, которые способны работать в самых жестких температурных условиях при  $T_{окр}$  от  $-40$  до  $+60$  °С.

К недостаткам никель-кадмиевых АБ можно отнести токсичность применяемых при их производстве материалов и относительно высокий саморазряд до  $\sim 20\%$  емкости в месяц [89].

*Никель-металлгидридные АБ* (Ni-MH) обладают большей энергетической плотностью ( $80 \div 120$ ) Вт/кг, но и меньший срок службы 300-500 циклов разряд/заряд, который снижается при высоких токах нагрузки. Хотя высокие токи разряда допустимы (до  $I_{раз} = 5I_5$ ), длительная эксплуатация в таких режимах значительно снижает срок службы батарей. Оптимальным считается ток разряда равный  $I_{раз} = (0,2 \div 0,5)I_5$ . При эксплуатации батарей этого типа не желательно допускать глубокого разряда.

Батареям этого типа свойственен высокий саморазряд, порядка 30% емкости в месяц. Они значительно меньше подвержены «эффекту памяти», чем никель-кадмиевые. Кроме того они не требуют регулярного контроля при хранении и транспортировке, сохраняют работоспособность при температуре  $T_{окр}$  от  $-20$  до  $+60$  °С. Никель-металлгидридные батареи содержат только очень слабые токсины и могут быть переработаны вторично.

Недостатками батарей этого типа является необходимость применения сложного алгоритма заряда, поскольку в его процессе выделяется большое количество тепла. Кроме того батареи периодически требуют контрольно-тренировочного цикла (полный разряд/заряд) [11].

*Свинцово-кислотные АБ* имеют наименьшую энергетическую плотностью ( $30\div 50$ ) Вт/кг. Пиковый ток нагрузки может достигать  $I_{раз} = 5I_{20}$  (где  $I_{20}$  – ток 20-часового разряда). Батареи такого типа сохраняют работоспособность при температурах окружающей среды  $T_{окр}$  от  $-20$  до  $+60$  °С. Также они обладают довольно низкой скоростью саморазряда, порядка 5% номинальной емкости в месяц. Батареи такого типа наиболее удобны для использования в энергоемких приложениях, где их существенные вес и габариты не играют роли. Они считаются самыми надежными, долговечными и не требующими высоких эксплуатационных затрат химическими источниками тока. Чаще всего они применяются в больничном оборудовании, креслах-каталках, в системах аварийного освещения и источниках бесперебойного питания, в автомобильной технике.

В настоящее время активно эксплуатируются три поколения аккумуляторных батарей. Первое поколение – это батареи с жидким электролитом открытого или закрытого типа, с номинальной емкостью  $C_{20}$  от 35 до 5300 Ач и сроком службы ( $10\div 20$ ) лет. Батареи открытого типа не имеют крышек, и электролит соприкасается непосредственно с воздухом. Такие батареи нуждаются в частой доливке дистиллированной воды, и должны эксплуатироваться в хорошо вентилируемых помещениях.

Батареи закрытого типа имеют крышку со специальными пробками, обеспечивающими задержку аэрозоли серной кислоты. Эти пробки вывинчиваются

при эксплуатации или заливке электролита и добавление воды. АБ закрытого типа могут быть необслуживаемыми, они поставляются залитыми и заряженными. Благодаря конструкции пробок, обеспечивающих удержание паров воды в виде конденсата, такие батареи не нуждаются в доливке воды.

Второе поколение – герметизированные гелевые батареи. Такие батареи содержат гелеобразный электролит, полученный смешиванием серной кислоты с загустителем. Гелевые батареи не нуждаются в обслуживании в течение всего срока эксплуатации. Однако они критичны к стабильности напряжения зарядного устройства. Нестабильность напряжения заряда не должна превышать 1% от  $U_{зар}$ . Превышение максимально допустимого напряжения заряда приводит к обильному газовыделению и образованию полостей незаполненных электролитом на границе с электродом.

Третье поколение часто называют герметизированными AGM-батареями. AGM (Absorbed in Glass Mat) – это технология изготовления батарей, при которой электролит абсорбирован в сепараторах из стекловолокна, размещенных между электродами. Такой сепаратор представляет собой пористую систему, в которой электролит удерживают капиллярные силы. При этом количество электролита дозируется так, чтобы мелкие поры были заполнены, а крупные оставались свободными для циркуляции выделяющихся газов. Не смотря на то, что в батареях такого типа газообразование существенно меньше, они так же критичны к стабильности напряжения заряда (не хуже 1 %) [77, 74].

*Литий-ионные АБ (Li-Ion)* обладают очень высокой энергетической плотностью (110÷160) Вт/кг. Пиковый ток нагрузки  $I_{раз}$  может превышать  $2I_5$ . Батареи такого типа сохраняют работоспособность при температурах окружающей среды  $T_{окр}$  от – 20 до +60 °С. Также они обладают довольно низкой скоростью саморазряда, порядка 10% от номинальной емкости в месяц. Однако при этом требуют строгого соблюдения правил эксплуатации и техники безопасности. Они наилучшим образом подходят для приложений, в которых необходима высокая емкость батарей и одновременно предъявляются жесткие требования к их весу. Применяются в ноутбуках и мобильных телефонах.

Литий-ионные батареи обладают хорошими нагрузочными характеристиками и нетребовательны к обслуживанию. У них отсутствует «эффект памяти», для них не требуется проведения контрольно-тренировочных циклов. Высокое напряжение на элементе батареи  $U_{НРЦ} = 3,7$  В позволяет выпускать аккумуляторные источники питания, состоящие всего лишь из одного элемента. При производстве мощных батарей, состоящих из нескольких элементов, большое преимущество дает очень низкое внутреннее сопротивление элементов. В плане экологической безопасности литий-ионные батареи значительно более безвредные, чем АБ на основе свинца или кадмия.

Однако, такие батареи обладают и недостатками. Они требуют применения схем защиты, которые ограничивают пиковое напряжение на каждом элементе в процессе заряда и предупреждают падение напряжения ниже допустимого значения при разряде. Кроме того большинству типов литий-ионных батарей свойственно старение. Вне зависимости от того, использовалась батарея или нет, емкость батареи снижается уже через год. Через 2-3 года батареи чаще всего выходят из строя.

*Литий-полимерные АБ* представляют более дешевую версию литий-ионных батарей. Они обладают высокой энергетической плотностью (100÷130) Вт/кг. Пиковый ток нагрузки  $I_{раз}$  может превышать  $2I_5$ . Батареи такого типа сохраняют работоспособность лишь при положительных температурах окружающей среды  $T_{окр} = (0÷60)$  °С. Также они обладают довольно низкой скоростью саморазряда, порядка 10% от номинальной емкости в месяц. Они могут иметь тонкий корпус и чаще всего применяются в мобильных телефонах, коммуникаторах и планшетных компьютерах.

Литий-полимерные батареи отличаются от обычных литий-ионных тем, что они используют твердый сухой электролит из полимера, не проводящий электрический ток, но пропускающий через себя ионы. Полимерный электролит заменяет пористый сепаратор, пропитываемый жидким электролитом. Такие АБ оказываются проще в производстве, более безопасны и имеют удобную тонкопрофильную геометрию. Литий-полимерный элемент можно изготовить толщиной всего в 1 мм.



Недостатком литий-полимерных батарей является слишком высокое внутреннее сопротивление, которое не позволяет обеспечивать высокие токи. Большинство батарей, используемых для питания мобильных телефонов, являются гибридными. В таких батареях вместо сепараторов применяется твердый электролит с добавлением гелевого, что улучшает ионообменные процессы и снижается внутреннее сопротивление. Такие батареи правильнее называть - литий-ионные полимерные батареи [10,18,60].

## 1.2 Диагностические параметры аккумуляторных батарей

При реализации задачи оперативной диагностики аккумуляторных батарей необходимо решить три проблемы:

- поиск параметров, которые позволят достаточно точно оценить состояние АБ;
- получение числовых значений этих параметров для исследуемых батарей и степени их разброса для однотипных АБ;
- изыскание существующей или разработка новой простой и дешевой диагностической аппаратуры.

Для проведения диагностики аккумуляторов и аккумуляторных батарей сегодня используются такие электрические характеристики как напряжение разомкнутой цепи и под нагрузкой, внутреннее сопротивление и реакция на специфический тестовый сигнал, который позволяет определить значения составляющих полного сопротивления. Однако, при проведении диагностики АБ различных электрохимических систем, ее результаты оказываются различными [76].

### 1.2.1 Напряжение разомкнутой цепи

Попытки использовать напряжение разомкнутой цепи (НРЦ)  $U_{НРЦ}$  в качестве диагностического параметра, прежде всего, предпринимались для оценки состояния первичных источников тока. Однако этот параметр элементов мало зависит от степени их заряженности. В диапазоне от 100 до 10 % заряда изменения этого параметра соизмеримы с разбросом  $U_{НРЦ}$  новых, полностью исправных элементов, и это справедливо для элементов почти всех электрохимических систем.

Оценка степени заряженности щелочных аккумуляторов по  $U_{НРЦ}$  также затруднительна. Это вызвано множеством факторов, от которых значение  $U_{НРЦ}$  зависит в одинаковой степени, и привязать его изменение к одному из этих факторов крайне сложно.

В процессе разряда свинцово-кислотных аккумуляторов факторы влияющие на значение  $U_{НРЦ}$  (концентрация и электропроводность электролита) изменяются линейно и значительно. Поэтому оценка остаточной емкости  $C_{ост}(\%)$  таких батарей по значению  $U_{НРЦ}$  представляется более реальной (рис. 1.1).

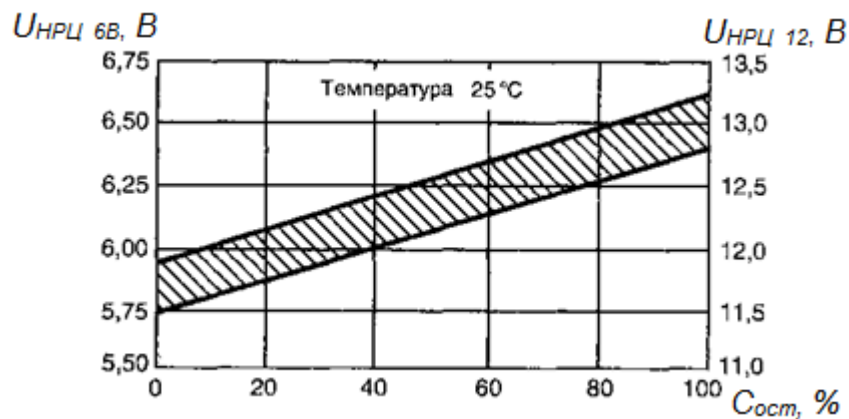


Рис. 1.1. Зависимость  $U_{НРЦ}$  от значения остаточной емкости  $C_{ост}$  герметизированных свинцово-кислотных аккумуляторов Panasonic

Зависимости степени заряженности (остаточной емкости) от значения  $U_{НРЦ}$  для батарей разных производителей различаются мало. Однако, нужно заметить, что точность оценки степени заряженности по значению параметра  $U_{НРЦ}$  невелика. Это обусловлено некоторой шириной «коридора» характеристик однотипных аккумуляторов (рис. 1.1).

При диагностике щелочных аккумуляторов параметр  $U_{НРЦ}$  позволяет оценить их саморазряд в течение продолжительного промежутка времени после очередного полного заряда. Однако, особенности технологий производства щелочных аккумуляторов разных изготовителей приводят к некоторому различию в характере зависимости значения  $U_{НРЦ}$  и величины остаточной емкости  $C_{ост}$ . Эксперименты, проведенные с цилиндрическими никель-кадмиевыми и никель-металлгидридными аккумуляторами Saft (с одинаковыми положительными оксидноникелевыми

электродами) [75] показали, что зависимость значения  $U_{НРЦ}$  от величины потерь емкости  $C_{пот}$  в диапазоне (0÷40) % для всех исследуемых аккумуляторов имеет одинаковый характер (рис. 1.2). Эту зависимость можно описать эмпирическим уравнением:

$$U_{НРЦ} = 1,4 - \frac{C_{пот}}{250}. \quad (1.1)$$

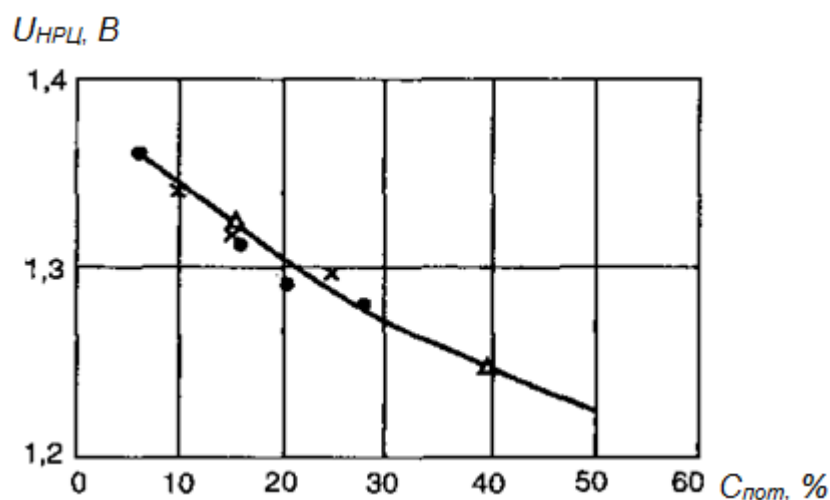


Рис. 1.2. Зависимость  $U_{НРЦ}$  щелочных аккумуляторов Saft от величины потерь емкости  $C_{пот}$  при хранении

Зависимость значения НРЦ от величины разряженности призматических никель-кадмиевых аккумуляторов производства ОАО "НИАИ "Источник" имеет несколько иной характер (рис. 1.3).

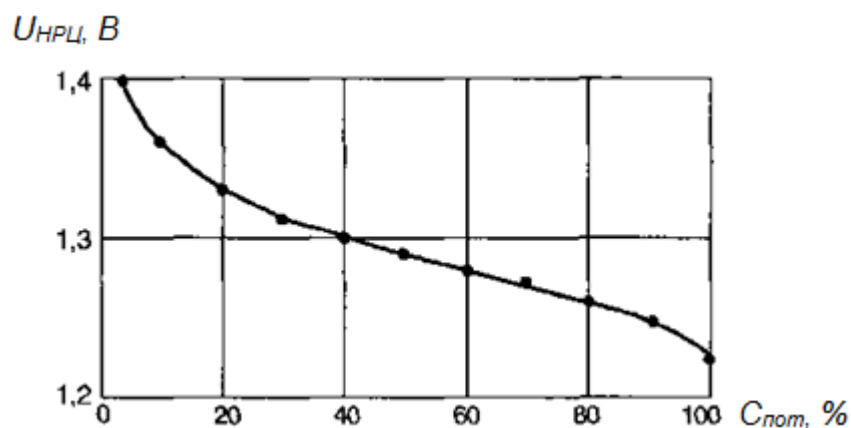


Рис. 1.3. Зависимость  $U_{НРЦ}$  от величины потерь емкости  $C_{пот}$  никель-кадмиевых аккумуляторов ОАО "НИАИ "Источник" при хранении

Как можно видеть, начальный участок кривой (0÷20) % на рис. 1.3 имеет нелинейный характер. Такая нелинейность обусловлена тем, что максимальная скорость саморазряда никель-кадмиевых и никель-металлгидридных щелочных аккумуляторов приходится на первые сутки после заряда. В это время интенсивно разлагаются высшие оксиды на поверхности заряженного оксидноникелевого электрода. Линейная же зависимость потерь емкости  $C_{nom}$  в диапазоне (20÷80) % может быть описана уравнением:

$$U_{НРЦ} = 1,3 - \frac{C_{nom} - 20}{800}. \quad (1.2)$$

При сопоставлении зависимостей на рис. 1.2 и 1.3 видно, что, несмотря на их внешнее сходство, они описываются разными уравнениями (1.1) и (1.2). Следовательно, для оценки степени саморазряда по значению НРЦ при диагностике аккумулятора необходимо иметь заранее определенную типовую зависимость для каждого типа производства. Кроме того, оценка остаточной емкости по описанным выше уравнениям (1.1) и (1.2) становится невозможной из-за увеличения скорости саморазряда за счет утечек тока через дендритные металлические мостики между электродами, которые неизбежно нарастают при эксплуатации аккумулятора [76].

### 1.2.2 Напряжение под нагрузкой

Если параметр  $U_{НРЦ}$  не позволяет в полной мере оценить состояние аккумулятора, то можно предположить, что значение напряжения на его выводах при подключении некоторой нагрузки может быть более информативным. В таком случае, для аккумуляторов каждой электрохимической системы необходимо выбрать некоторый диапазон значений рабочего напряжения  $U_{раб}$  соответствующих определенным состояниям аккумулятора при разряде в номинальном режиме. Однако, учитывая то, что обеспечение стабильности рабочего напряжения является одной из главных проблем при проектировании и отработке технологии источника тока, а также при его выборе для определенного технического приложения, то

становится очевидным, что и этот параметр, может обеспечить весьма ограниченные возможности для оценки степени заряженности источника тока.

Для большинства источников тока значение параметра  $U_{раб}$  имеет зону низкой чувствительности в 80 % их полной емкости  $C_5$ . Более того, величина рабочего напряжения зависит еще и от индивидуальных особенностей и предыстории эксплуатации аккумулятора. Поэтому оценить величину его остаточной емкости по этому параметру крайне затруднительно. Сколько-нибудь четко параметр  $U_{раб}$  позволяет отличить только практически полностью разряженный источник тока от того, который еще сохраняет некоторую энергию.

Индивидуальные особенности источника тока можно оценить, увеличивая ток нагрузки. При этом, в качестве диагностического параметра используется отклик аккумулятора на пиковую нагрузку током, близким к предельно допустимому. Такая нагрузка должна быть максимально кратковременной. Для этого необходимо унифицировать величину импульса (в величинах кратных емкости источника тока) и его продолжительность. Точность оценки напряжения (отклика) при этом зависит от условий измерения и аппаратуры, обеспечивающей генерацию тестового сигнала (импульсной нагрузки) и измерение отклика.

Такой тест используется, например, компанией VARTA, которая для отбраковки некачественных серебряно-цинковых элементов для часов использует кратковременную (порядка 0,2 с) нагрузку в 400 Ом. Соответственно, для качественной продукции определена величина допустимого снижения напряжения. Разумеется, у аналогичных элементов других компаний параметры теста могут быть иными, и для их определения необходимо обследование большей выборки элементов [76].

### 1.2.3 Внутреннее сопротивление

При тестировании источника тока кратковременной нагрузкой тока большой величины напряжение на клеммах аккумулятора  $U$  имеет сложный характер (рис. 1.4). Оно может быть выражено уравнением:

$$U = U_{НРЦ} - IR = U_{НРЦ} - I(R_a + R_{пол}),$$

где  $I$  – ток разряда;  $R$  – полное сопротивление аккумулятора;  $R_a$  – активное сопротивление, определяемое токоподводящими деталями электродов, их активными массами и сопротивлением электролита;  $R_{пол}$  – поляризационное сопротивление, отражающее скорость электрохимических реакций.

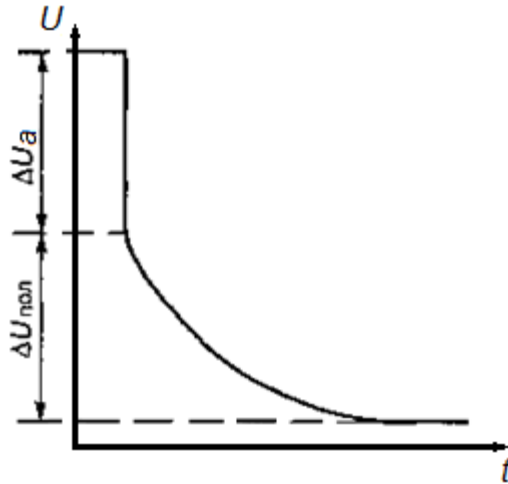


Рис. 1.4. Зависимость напряжения на клеммах аккумулятора  $U$  от времени  $t$  при разряде постоянным током  $I$

При анализе характеристики напряжения аккумулятора  $U$  при разряде постоянным током можно определить значения составляющих полного сопротивления  $R$ . На активной составляющей полного сопротивления  $R_a$  происходит мгновенное падение напряжения (участок кривой  $\Delta U_a$  на рис. 1.4). Дальнейшее плавное изменение напряжения источника тока вплоть до стационарного состояния обусловлено изменением поляризационной составляющей  $R_{пол}$  (участок  $\Delta U_{пол}$  на рис. 1.4).

Измерения внутреннего сопротивления источника тока на переменном токе позволяет получить более детальное представление о поляризационной составляющей  $R_{пол}$ . Особенность этой составляющей заключается в том, что ток через аккумулятор протекает и как фарадеевский за счет электрохимических реакций и как ток заряжения двойного слоя, образованного на границе сред электрод/электролит [88, 74]. Протекание окислительно-восстановительных реакций электрохимической системы в простейшем случае отражается эквивалентной схемой источника тока (рис. 1.5). В нее входят активное сопротивление источника

тока  $R_a$ , емкость двойного электрического слоя  $C_{дв}$ , сопротивление переноса заряда через границу электрод/электролит  $R_0$  и диффузионный импеданс Варбурга  $Z_w$ , определяемый кинетикой активных частиц [77, 88].

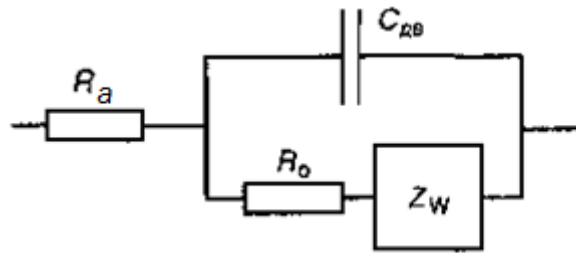


Рис. 1.5. Эквивалентная схема источника тока

Для анализа состояния аккумулятора строят импедансную диаграмму. Эта диаграмма изображает зависимость  $f(\text{Re}(Z); \text{Im}(Z))$  в декартовых координатах. Принято на горизонтальную ось наносить данные для  $\text{Re}(Z)$ , а на вертикальную  $\text{Im}(Z)$  с отрицательным знаком. Такая диаграмма является основной общепринятой формой для изображения электрохимического импеданса. Для того чтобы отразить и частотную информацию, на такой диаграмме специально выделяют декадные точки  $10^{-3}$ ;  $10^0$ ;  $10^3$ ;  $10^6$  Гц. На рис. 1.6 приведена импедансная диаграмма электрохимической системы [88, 73].

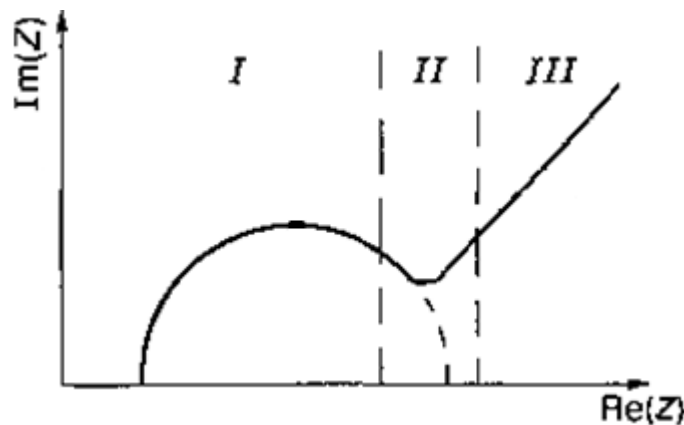


Рис. 1.6. Диаграмма импеданса электрохимической системы

На рис. 1.6 обозначены области годографа: I - область кинетического контроля; II - переходная область; III - область диффузионного контроля. Специфика процесса преодоления энергетического барьера при переносе заряда, неоднородность

поверхности электрода отражаются в уплощении высокочастотного полукруга (область I). При более низких частотах из области кинетического контроля (I) часто формируются "хвосты", характер которых зависит от меры неоднородности поверхности электрода. Они могут приобретать даже вид петли, когда  $Im(Z)$  становится положительным, а  $Re(Z)$  уменьшается с уменьшением частоты. При частотах  $\omega \rightarrow 0$  годограф плавно, почти по траектории полуокружности, снижается до предельного значения, определяемого параметрами диффузионного процесса. Адсорбционные процессы более всего сказываются в переходной области импеданса (II). Наклон годографа в диффузионной области (III) зависит от типа электрода. Для пористого электрода - угол наклона составляет  $\pi/8$ . Кроме того по диаграмме можно оценить величину активного сопротивления в точке пересечения кривой диаграммы с осью  $Re(Z)$  (рис. 1.6).

Описанные выше методы измерения параметра внутреннего сопротивления разрешают использовать государственные стандарты РФ [2-8]. Однако эти методы дают разные значения сопротивления, что необходимо учитывать при сравнении характеристик аналогичной продукции отечественных и зарубежных производителей. Значение внутреннего сопротивления, которое указывают зарубежные производители в каталогах, измеряются при регламентируемом стандартами [2-7] переменном токе частотой  $1000 \pm 100$  Гц. Измерения производятся в течение 1-5 с, результаты в последствии усредняют.

В России характеристика внутреннего сопротивления источников тока традиционно измеряется при подаче импульса постоянного тока. При этом оценивается величина полного сопротивления:

$$R_{\text{полное}} = R_a + R_{\text{пол}} = \frac{U_1 - U_2}{I_2 - I_1},$$

где  $U_1$  и  $U_2$  - напряжение, которое регистрируется после пропускания тока  $I_1$  и  $I_2$  соответственно, в течение регламентированных интервалов времени  $\tau_1$  и  $\tau_2$ .

В табл. 1.1 указаны значения токов и временных интервалов для источников тока разных электрохимических систем, регламентируемые государственными



стандартами [15-21]. В таблице  $I_5$  – ток 5-часового разряда,  $I_{10}$  – ток 10-часового разряда. При такой методике измеренная величина кроме  $R_a$  включает еще и поляризационное сопротивление, то есть имеет значение, превышающее значение импеданса при 1000 Гц.

Таблица 1.1

Источники тока	$I_1, A$	$I_2, A$	$\tau_1, c$	$\tau_2, c$
Щелочные никель-кадмиевые				
- длительного разряда	$0,2 I_5$	$2 I_5$	10	3
- среднего и короткого разряда	$0,5 I_5$	$5 I_5$	10	3
- сверхкороткого разряда	$1,0 I_5$	$1 I_5$	10	3
Щелочные никель-металлгидридные	$0,2 I_5$	$2 I_5$	10	3
Литиевые	$0,2 I_5$	$1 I_5$	10	1
Свинцово-кислотные	$4,0 I_{10}$	$20 I_{10}$	20	5

Простая и достаточно точная оценка активного сопротивления аккумулятора возможна при измерении модуля полного сопротивления:

$$Z = \frac{U}{I},$$

где  $U$  и  $I$  – действующие значения напряжения и тока соответственно.

Модуль полного сопротивления  $|Z|$  содержит в себе активную и реактивную составляющие:

$$|Z| = \sqrt{R_a^2 + \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}, \quad (1.3)$$

где  $\omega$  – циклическая частота тестового сигнала;  $L$  и  $C$  – эквивалентная индуктивность и емкость аккумулятора соответственно.

Частотная зависимость полного сопротивления представляет собой кривую, имеющую минимум  $Z_{min}$  (рис. 1.7). Эта точка обусловлена равенством реактивных составляющих, при котором согласно уравнению (1.3) значение  $Z$  становится равно значению  $Z_{min} = R_a$ . На низких частотах сопротивление  $Z$  принимает значения больше  $Z_{min}$  благодаря емкостному сопротивлению источника тока. На высоких частотах проявляется индуктивное сопротивление, которое характерно для

аккумуляторов большой емкости с большой эффективной площадью электродов (рис. 1.7).

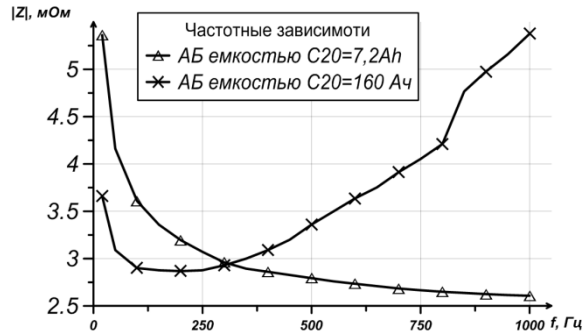


Рис. 1.7. Частотные зависимости модуля полного сопротивления  $|Z|$  аккумуляторов малой и большой емкости

Как диагностический параметр интерес представляет и значение частоты, при которой значение модуля сопротивления  $Z$  достигает минимума  $Z_{min}$ . Например, для заряженных никель-кадмиевых аккумуляторов это значение находится в диапазоне 10-50 Гц. При этом более низкой частоте соответствуют показания, полученные на аккумуляторах большей емкости. В свою очередь, для разряженных Ni-Cd аккумуляторов значение этого параметра смещается к более высоким частотам (30÷100) Гц [24]. Для свинцово-кислотных батарей, разряженных на 50 % и 100 %, значения частоты минимума приближаются к 800 и 1500 Гц соответственно [76].

### 1.3 Характеристики аккумуляторных батарей

Чаще всего мерой для оценки состояния аккумуляторной батареи выступает значение ее емкости при разряде в номинальном режиме. Соответственно, процесс деградации батареи характеризуется уменьшением ее емкости. Однако, не менее полезной может быть такая информация как

- изменение внутреннего сопротивления аккумулятора в процессе эксплуатации;
- характеристики заряда аккумулятора;
- изменения величины саморазряда аккумулятора.

При длительной эксплуатации аккумулятора поровое пространство сепаратора постепенно осушается, в результате чего снижается эффективная площадь электродов. Чрезмерное увеличение давления в герметичных аккумуляторах при перезарядах вызывает необратимые деформации их корпуса и электродов. Кроме того, изменяется структура активных масс. В результате внутреннее сопротивление аккумулятора заметно увеличивается. Соответственно, значение изменения этого параметра позволяет оценить степень деградации источника тока.

Разумеется, что для оценки степени деградации таким методом необходимо иметь данные о значениях внутреннего сопротивления каждого из источников тока, полученные в начале эксплуатации. Только при этом условии становится возможной оценка степени их деградации.

Анализ индивидуальных характеристик заряда аккумуляторов целесообразен для решения задачи подбора отдельных элементов батарей по параметрам заряда, а также для оценки их деградации в процессе эксплуатации. Например, при комплектации батарей следует исключать аккумуляторы, у которых максимальное зарядное напряжение достигается раньше, чем у основной массы аккумуляторов в батарее (рис. 1.8). Из рис. 1.8 видно, что аккумулятор № 1 достиг максимального напряжения заряда на 9-м часу, в то время как два других аккумулятора (№ 2 и 3) достигли этого напряжения лишь на 12-м часу. Следовательно, в батарее собранной из указанных аккумуляторов, при ее зарядке аккумулятор № 1 будет подвергаться перезаряду в течение 3-4 часов, либо аккумуляторы №№ 2 и 3 не будут получать 100% заряда.

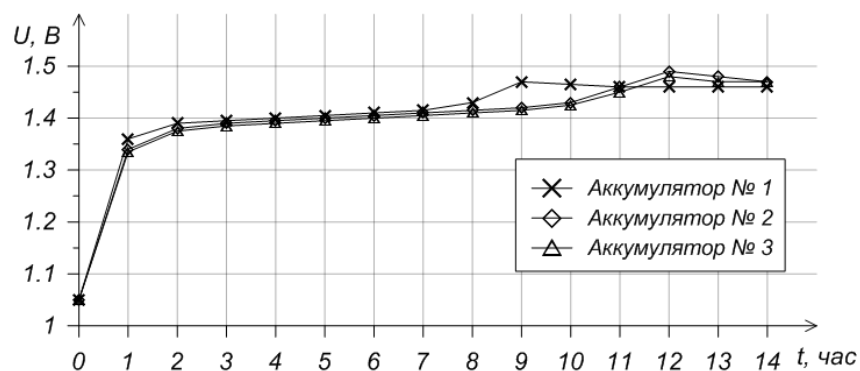


Рис. 1.8. Характеристики заряда никель-кадмиевых аккумуляторов GP100AAS при заряде током 100 мА ( $0,1C_5$  А)

Оба эти явления приводят к сокращению срока службы отличающихся элементов и как следствие всей батареи, в целом.

Увеличение зарядного напряжения  $U_{зар}$  и уменьшение времени  $t_{зар}$  для достижения максимальной его величины свидетельствует об ухудшении состояния аккумуляторов.

При сборке батарей также важной информацией является величина саморазряда  $C_{ном}$  каждого аккумулятора. Наиболее важно это при подборе элементов батареи ответственного применения, которые должны гарантированно отдавать регламентированную емкость не обязательно сразу после заряда. Чем больше пауза перед началом эксплуатации, тем более важной становится информация об этой характеристике [76].

## **1.4 Методы диагностики щелочных аккумуляторных батарей**

### **1.4.1 Оценка качества новых аккумуляторных батарей**

Первой задачей, возникающей при выборе источников тока является задача оценки качества новых аккумуляторов того или иного производителя. Как упоминалось выше значения  $U_{НРЦ}$  или рабочего напряжения  $U_{раб}$  щелочного аккумулятора с неизвестной предысторией не являются надежными диагностическими параметрами. В связи с этим в качестве параметра оперативной диагностики аккумуляторов этого типа следует использовать внутреннее сопротивление источника тока.

Для исследования возможностей оценки качества продукции проводились измерения внутреннего сопротивления цилиндрических никель-кадмиевых и никель-металлгидридных аккумуляторов [77, 80]. В исследовании участвовали аккумуляторы типоразмера АА ( $d = 15$  мм,  $h = 50$  мм). На рис. 1.9 и 1.10 приведены зависимости активного и поляризационного сопротивлений от значения остаточной емкости, полученные в результате измерений [77].

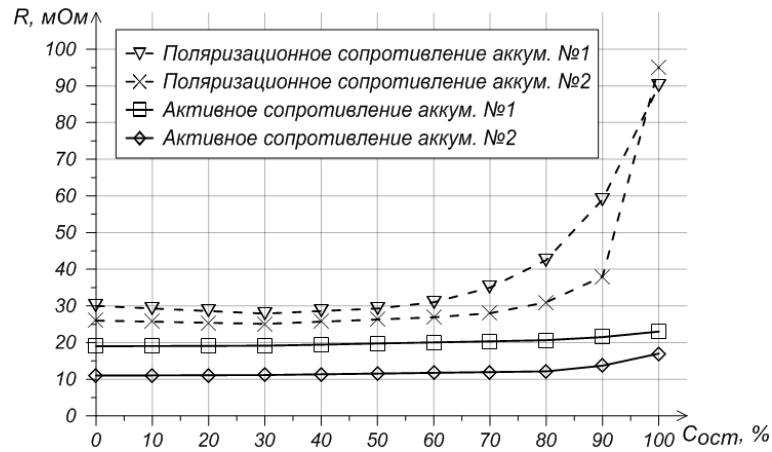


Рис. 1.9. Зависимости активного и поляризационного сопротивления от значения остаточной емкости Ni-Cd аккумуляторов

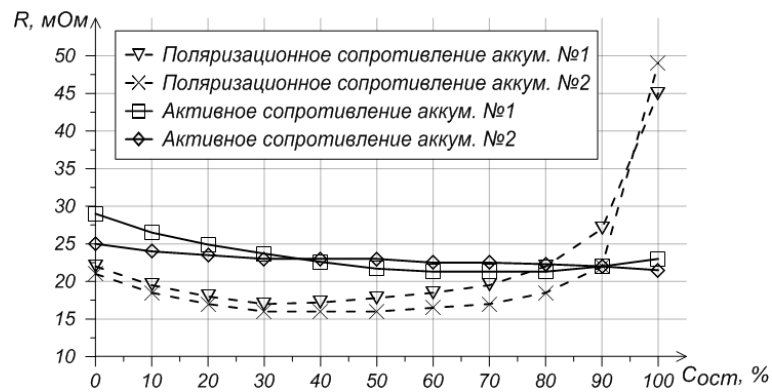


Рис. 1.10. Зависимости активного и поляризационного сопротивления от значения остаточной емкости Ni-MH аккумуляторов

Измерения [77] производились с помощью специализированного тестера по методике постоянного тока. Токи первой и второй ступени анализатора выбраны в соответствии с методикой регламентированной государственными стандартами [2-8] и составляли  $I_1 = 35$  мА и  $I_2 = 350$  мА, продолжительность испытаний на каждом из токов разряда составляла  $\tau_1 = 10$  и  $\tau_2 = 3$  с соответственно [77].

Как можно видеть на рис. 1.9 в зависимости от величины остаточной емкости  $C_{ост}$  активное сопротивление  $R_a$  никель-кадмиевых аккумуляторов с уменьшением остаточной емкости не значительно возрастает. Чуть больше чувствительность сопротивления к изменению  $C_{ост}$  наблюдается лишь по исчерпанию 80 % емкости. Согласно рис. 1.10 никель-металлгидридные аккумуляторы в заряженном состоянии

имеют более высокое активное сопротивление  $R_a$ , что связано с некоторым испарением электролита и выделением в виде газа при заряде. Зависимости активного сопротивления  $R_a$  от остаточной емкости для аккумуляторов этого типа также слабо прослеживаются. Вследствие чего оценка остаточной емкости по активному сопротивлению  $R_a$  щелочных аккумуляторов не представляется возможной. Согласно рис. 1.9 и 1.10, поляризационное сопротивление  $R_{пол}$  Ni-Cd и Ni-MH аккумуляторов является более чувствительным параметром, но его зависимость от величины остаточной емкости четко наблюдается лишь по исчерпанию 50-90 % емкости аккумулятора [77].

Кроме значения остаточной емкости на величину активного сопротивления оказывают влияние плотность сборки электродов и количество электролита. Особенно большой разброс параметра  $R_a$  наблюдается у призматических аккумуляторов ручной сборки. На рис. 1.11 представлена зависимость напряжения 10-ти однотипных никель-кадмиевых аккумуляторов ручной сборки от их активного сопротивления при больших токах разряда [76].

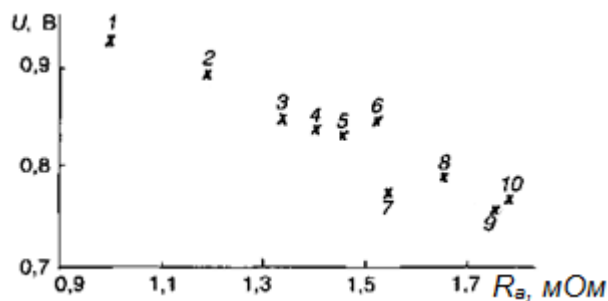


Рис. 1.11. Зависимость напряжения никель-кадмиевых аккумуляторов от активного сопротивления  $R_a$  при больших токах разряда

В испытании [76] приняли участие 10 батарей типа НКГ-30С номинальной емкостью 30 Ач предварительно разряженные на 50 %. Значения напряжения измерялись во момент нагрузки аккумулятора током 150 А ( $5I_5$ ). Из рис. 1.11 следует, что разброс активного сопротивления  $R_a$  однотипных аккумуляторов при больших токах разряда приводит к разбросу напряжений аккумуляторов. При сборке таких аккумуляторов в батарею отдельные аккумуляторы будут подвержены

повышенному износу, т.к. при больших токах разряда их напряжение будет опускаться ниже минимально допустимого для них.

Влияние дозировки электролита на сопротивление герметичных аккумуляторов иллюстрируют [83] зависимости активного сопротивления  $R_a$  от остаточной емкости двух партий (штатных и модифицированных) аккумуляторов типа НКГК-90С НИАИ (рис. 1.12).

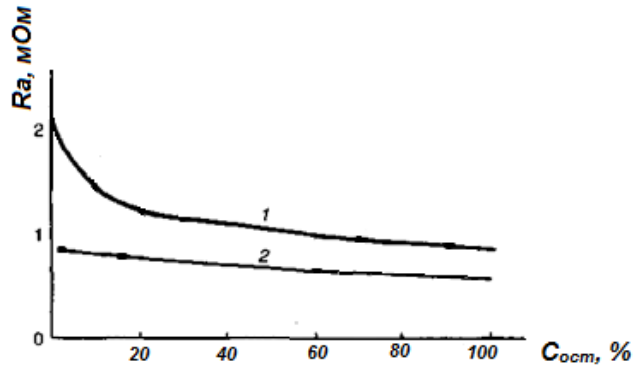


Рис. 1.12. Зависимость внутреннего активного сопротивления аккумуляторов НКСК-90С от остаточной емкости  $C_{ост}$

На рис. 1.12 видно, что активное сопротивление штатных батарей (1) выше, чем у модифицированных (2). Более того зависимость активного сопротивления  $R_a$  модифицированных аккумуляторов от остаточной емкости имеет линейный характер в отличие от зависимости, полученной на штатных (1) аккумуляторах. Модифицированная партия имела отрицательный электрод с улучшенным газопоглощением, что позволило увеличить количество заливаемого электролита на 10 %. Это, в свою очередь, обеспечило снижение сопротивления  $R_a$ , меньший разброс этого параметра [83] и большую однородность продукции [77].

#### 1.4.2 Оценка остаточной емкости аккумуляторной батареи

В связи с различием характеров зависимостей сопротивления  $R_a$  Ni-Cd и Ni-MH аккумуляторов от остаточной емкости  $C_{ост}$  не удастся выявить универсальный метод оценки  $C_{ост}$  для всех щелочных источников тока по параметру внутреннего

сопротивления. Некоторые перспективы для решения этой задачи появляются при анализе импедансных характеристик аккумуляторов в широком диапазоне частот.

На рис. 1.13 приведены диаграммы импеданса, полученные на отечественных аккумуляторах емкостью 30 Ач с различными значениями остаточной емкости. Измерения характеристик проводились на частотах тестового сигнала в диапазоне от 1000 до 0,1 Гц [78].

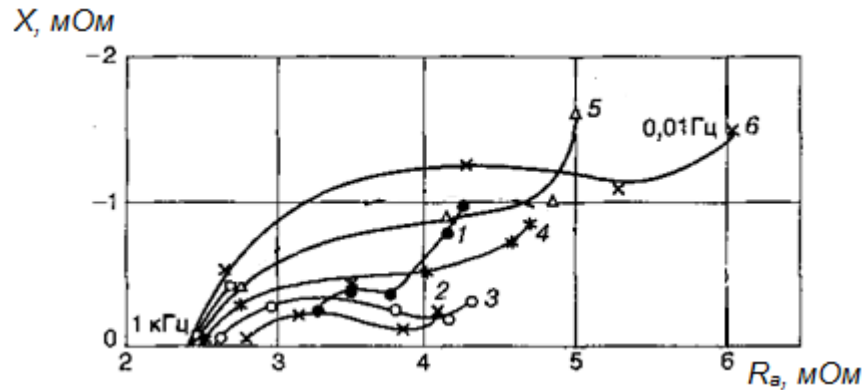


Рис. 1.13. Диаграммы импеданса Ni-Cd аккумулятора емкостью 30 Ач при разной остаточной емкости

На рис. 1.13 номерами обозначены диаграммы импеданса соответствующие разным остаточным емкостям. Таким образом, на рис. 1.13 цифрой 1 обозначена зависимость батареи с остаточной емкостью  $C_{ост} = 7\%$ ; под цифрой 2 -  $C_{ост} = 30\%$ ; 3 -  $C_{ост} = 70\%$ ; 4 -  $C_{ост} = 80\%$ ; 5 -  $C_{ост} = 95\%$ ; 6 -  $C_{ост} = 100\%$  [78].

Из рис. 1.13 видно, что в пределах заряженности от  $\sim 15$  до 95 % активное сопротивление  $R_a$  (точка пересечения оси ординат диаграммой импеданса) меняется мало. Однако сопротивление переносу заряда  $R_0$  (диаметр «полукруга») заметно увеличивается. Следовательно, параметр сопротивления  $R_0$  имеет прямую зависимость от значения остаточной емкости и может быть использован для оценки этой характеристики. Аналогичные результаты [12, 20, 30, 34, 38, 40, 55] наблюдаются при испытании никель-кадмиевых герметичных и вентилируемых аккумуляторов. Характерные изменения импедансных диаграмм у всех одинаковы, различаются только диаметры высокочастотной полуокружности.



Импедансные диаграммы никель-металлгидридных аккумуляторов исследовались меньше. Они схожи с диаграммами никель-кадмиевого аккумулятора, но стабильная зависимость параметра  $R_0$  от остаточной емкости устанавливается лишь после 3-5 циклов разряд/заряд, при которых параметр  $R_0$  уменьшается [13, 14, 28]. Сходство диаграмм импеданса аккумуляторов этих электрохимических систем связано с тем, что они имеют одинаковый оксидно-никелевый электрод. Щелочные аккумуляторы проектируются так, что емкость положительного электрода несколько меньше чем отрицательного ( $C_-/C_+ > 1$ ). Поэтому емкость источника тока в целом ограничивается емкостью положительного оксидно-никелевого электрода, что и определяет вид его диаграммы импеданса. Импеданс отрицательного же электрода аккумуляторов обеих электрохимических систем одинаков во всем диапазоне (от 0 до 100 %) остаточной емкости [40].

Поскольку продолжительность процедуры измерения внутреннего сопротивления на переменном токе увеличивается с уменьшением частоты (для регистрации 2-3 синусоид тестового сигнала при частоте 0,01 Гц занимает ~5 минут) исследователи предпочитали измерять этот параметр на фиксированной частоте. В [34] описаны исследования параметров Ni-Cd аккумулятора емкостью 4 Ач, осуществляемые с помощью моста переменного тока, который позволял производить измерения на частотах от 10 до 30 Гц. На рис. 1.14 показаны зависимости значений угла разности фаз  $\varphi$  между тестовым сигналом тока и напряжением от степени заряженности. Сдвиг фаз обусловлен наличием емкостной и индуктивной составляющей сопротивления аккумулятора. Зависимости измерялись на трех частотах тестового сигнала: 10 Гц; 20 Гц; 30 Гц [34].

На рис. 1.14 видно, что на каждой из представленных зависимостей угол разности фаз  $\varphi$  возрастает в процессе разряда ( $C_{ост} \rightarrow 0$ ) аккумулятора. В соответствии с рис. 1.14 (а) изменению емкости  $C_{ост}$  от 10 до 90 % соответствует изменение угла разности фаз  $\Delta\varphi$ , измеренного на частоте 10 Гц, только на 0,015 рад. В тоже время, согласно рис. 1.14 (б), при измерении угла разности фаз на частоте 30 Гц, чувствительность зависимости увеличивается.

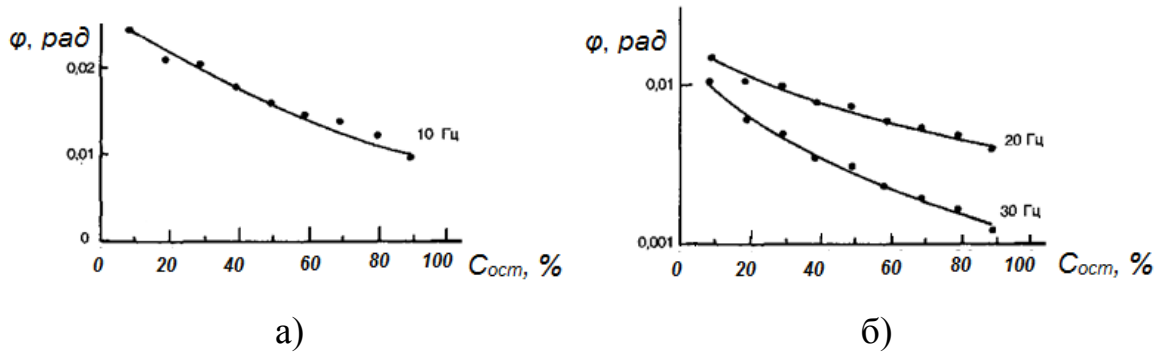


Рис. 1.14. Зависимости угла разности фаз  $\varphi$  тока и напряжения тестового сигнала от остаточной емкости  $C_{ост}$

Тому же изменению значения остаточной емкости  $C_{ост}$  от 10 до 90 % соответствует почти 10 кратное изменение угла сдвига фаз  $\varphi$ . Это может говорить о хороших диагностических свойствах параметра, полученного на частоте 30 Гц [34].

Угол разности фаз в качестве диагностического параметра для никель-кадмиевых аккумуляторов емкостью 1,8-2 Ач рассматривался в [40]. Однако там было показано, что угол разности фаз  $\varphi$  почти линейно меняется на 5 градусов лишь в диапазоне заряженности от 0 до 40 %. В остальном диапазоне от 40 до 100 % значение угла разности фаз  $\varphi$  остается неизменным [40].

Большая часть исследователей сходятся на мнении, что в зависимости от величины остаточной емкости более всего меняются параметры импеданса в области частот ниже 0,01 Гц, поясняя это тем, что на этой частоте тестового сигнала на значение импеданса оказывает влияние процессы диффузии заряженных частиц, отражающие текущее состояние аккумулятора [77].

В [22] значение остаточной емкости аккумуляторов емкостью 23 Ач предлагается определять по изменению реактивной составляющей полного сопротивления, измеренного на частоте 0,4 Гц. Рис. 1.15 иллюстрирует зависимость этого параметра от значения остаточной емкости. Зависимость получена усреднением значений параметров 6 аккумуляторов.

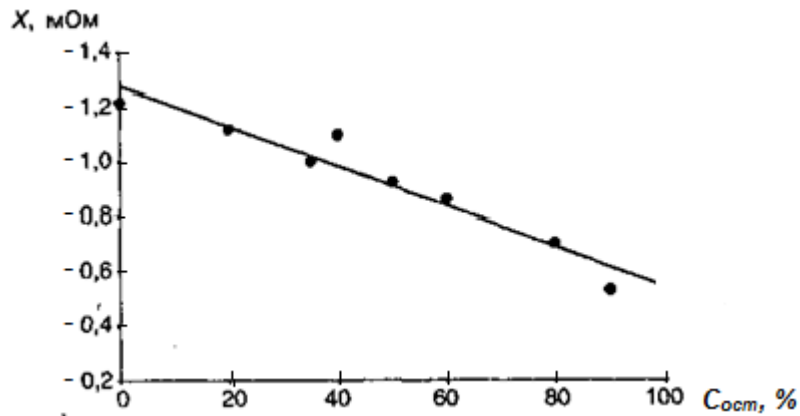


Рис. 1.15. Зависимость реактивного сопротивления от остаточной емкости аккумулятора

Из рис. 1.15 видно, что зависимость может быть достаточно хорошо описана линейным уравнением на всем диапазоне остаточной емкости от 0 до 100 %.

Для аккумуляторов большой емкости при оценке степени заряженности лучшую разрешающую способность обеспечивают измерения модуля импеданса в некотором диапазоне частот. В процессе заряда или разряда при изменении соотношения индуктивной и емкостной составляющих смещается минимум модуля импеданса. На рис. 1.16 приведены зависимости частоты  $f_{\pm}$ , при которой импеданс  $Z$  принимает свое минимальное значение  $Z_{min}$ , от остаточной емкости АБ. Зависимости получены на никель-кадмиевых аккумуляторах FNC-T 204H компании Норреске емкостью 46 Ач [17].

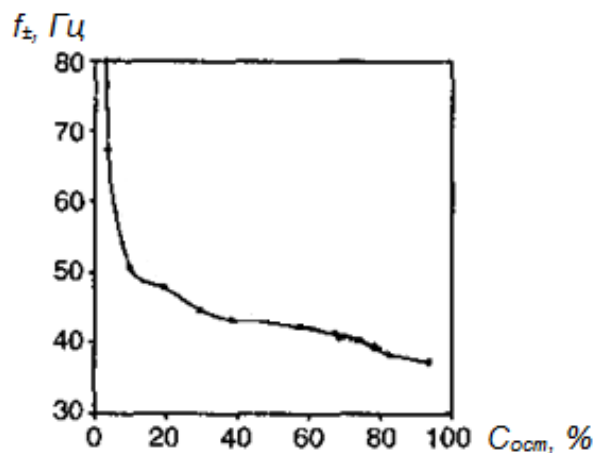


Рис. 1.16. Усредненная зависимость частоты  $f_{\pm}$  Ni-Cd аккумуляторов от величины остаточной емкости  $C_{ост}$

Из рис. 1.16 видно, что зависимость частоты  $f_{\pm}$  от величины остаточной емкости  $C_{ост}$  для никель-кадмиевых аккумуляторов может быть описана гиперболической функцией. Однако, если рассматривать участок зависимости, соответствующий остаточной емкости  $C_{ост}$  от 10 до 90 % он может быть описан линейной функцией, что может говорить о диагностических свойствах параметра  $f_{\pm}$  [77].

В [49, 58] для оценки величины остаточной емкости авторы предлагают производить измерения скачков тока, протекающего через диагностируемый аккумулятор при подаче тестовых импульсов постоянного напряжения. Согласно источникам [49, 58] последовательно подаётся 6 импульсов с интервалом 60 с. Каждый последующий импульс на 50 мВ больше предыдущего. Обработывая временные зависимости токов, полученные при каждом из 6 тестовых импульсов, авторы получают зависимость значений тока от номера тестового импульса. В качестве диагностического параметра этот метод использует значение одного из коэффициентов уравнения, описывающего эту зависимость. По заверениям авторов, значение коэффициента этого уравнения коррелирует с величиной остаточной емкости аккумулятора, коэффициент корреляции при этом принимает значения 0,5-0,8 для различных аккумуляторов [58].

### **1.4.3 Оценка технического состояния аккумуляторной батареи в процессе эксплуатации**

Длительная эксплуатация щелочных аккумуляторов в режиме циклирования (циклирование - режим работы АБ, при котором она часто подвергается полным циклам разряд/заряд) неизбежно ведет к снижению их емкости. Это связано с потерей активных масс электродов, изменением их структуры и уменьшением рабочей поверхности. Уменьшение емкости никель-металлгидридных аккумуляторов определяется, прежде всего, снижением сорбирующей способности отрицательного электрода, что приводит к изменению поляризационного сопротивления аккумуляторов. В результате необратимых процессов, связанных с потреблением кислорода и воды, и срабатываний аварийного клапана

герметизированных аккумуляторов при повышении давления в аккумуляторах уменьшается количество электролита и растет омическое сопротивление.

Поэтому процесс оценки технического состояния щелочных аккумуляторов исследователи обычно связывают с измерением их внутреннего сопротивления. Но технологический разброс активного сопротивления свежих щелочных аккумуляторов зависит от уровня автоматизированности и контроля технологического процесса их производства. Разброс  $R_a$  призматических аккумуляторов большой емкости с ручной сборкой может достигать 30-40 %. Разумеется, в этом случае определить стадию деградации аккумулятора с наработкой достаточно трудно, если отсутствует индивидуальная характеристика каждого аккумулятора. Все усугубляется тем, что диапазон сопротивления  $R_a$  заряженных аккумуляторов с увеличением наработки меняется не значительно. Только по исчерпанию остаточной емкости на 70-80% изменения активного сопротивления становятся заметными.

Важной задачей при эксплуатации щелочных аккумуляторов является определение наличия дендритных замыканий между электродами, возникающих при длительной работе в режиме циклирования. Дендриты, прорастающие от кадмиевого электрода сквозь сепаратор, соединяют противоположные электроды аккумулятора, образуя практически короткое замыкание, что приводит к увеличению саморазряда аккумулятора.

Для обнаружения в аккумуляторе замыканий чаще всего заряженные аккумуляторы ставят на хранение в течение месяца, при котором оценивается скорость их саморазряда. Также используется методика измерения сопротивления аккумуляторов в состоянии замороженного электролита. Например, у качественных призматических аккумуляторов НКГ-50СА сопротивление, измеренное при температуре жидкого азота, должно превышать 135 кОм. После 4500 циклов при возникновении дендритных замыканий оно может упасть до (0,19÷130) Ом [88]. В [27] описывается еще одна методика, состоящая в регистрации изменения напряжения аккумулятора при заряде в режиме постоянного напряжения, а впоследствии определяется сопротивление дендритных замыканий. По заверению

авторов [27] при напряжении (1÷1,1) В ошибка оценки шунтирующего сопротивления не превышает 5 % [27, 77].

## **1.5 Методы диагностики свинцово-кислотных аккумуляторных батарей**

### **1.5.1 Оценка качества новых свинцово-кислотных аккумуляторных батарей**

Одна из основных электрических характеристик свинцово-кислотных источников тока - их напряжение разомкнутой цепи. Значение этого параметра зависит от концентрации (плотности) электролита. НРЦ этих источников тока заметно меняется в процессе разряда в результате разбавления электролита. А малое количество электролита, как, например, в герметизированных аккумуляторах, приводит к усилению влияния его характеристик на степень изменения НРЦ. На производстве обеспечить контроль всего процесса изготовления достаточно сложно. Поэтому измерение  $U_{НРЦ}$  готовых полностью заряженных источников тока или регистрация его изменения в процессе разряда может помочь в оценке качества продукции.

При сборке батарей большого напряжения, например, для источников бесперебойного питания, из стандартных батарей или отдельных аккумуляторов возникает проблема их сортировки по качеству. В процессе производства электрические характеристики источников тока имеют значительный разброс. Поскольку такие батареи обычно работают в буферном режиме и приспособлены к длительному перезаряду [11], то предполагается, что за время заряда батареи с разной степенью заряженности зарядятся до одинакового уровня.

Однако в стационарном состоянии напряжение источников тока составляющих высоковольтную батарею может значительно различаться. При обследовании батареи из двух параллельных цепочек по 180 аккумуляторов после эксплуатации в буферном режиме (напряжение заряда 2,38 В / аккумулятор) реальный разброс напряжения в группе из произвольно выбранных 230 аккумуляторов составил 170 мВ (при среднеквадратичном отклонении в группе  $\pm 33$  мВ) [18]. Разброс

характеристик батарей приводит к ускоренному старению всей системы: постепенной коррозией решеток положительного электрода, перезаряд отрицательного электрода.

В [31, 32] исследовался саморазряд батарей в течение 2 месяцев хранения после полного заряда. Результаты исследования показали, что 10 % потери емкости соответствует изменению параметра  $U_{НРЦ}$  батареи на 20 мВ. То есть, при периодическом контроле напряжения  $U_{НРЦ}$  АБ начиная с момента, в котором АБ полностью заряжена, можно оценить величину ее остаточной емкости.

Другая важная характеристика источников тока - их внутреннее сопротивление, которое определяет уровень рабочего напряжения при нагрузке. В соответствии с государственными стандартами Российской Федерации [2-8] сопротивление свинцово-кислотных источников тока выражается формулой:

$$R_i = \frac{U_1 - U_2}{I_2 - I_1},$$

где  $I_1$  и  $I_2$  для свинцово-кислотных источников тока принимают значения  $(4 \div 6)I_{10}$  и  $(20 \div 40)I_{10}$  соответственно ( $I_{10}$  – ток десятичасового разряда). Напряжение  $U_1$  регистрируется через 20 с после начала протекания  $I_1$ , а  $U_2$  - через 5 с протекания тока  $I_2$ .

Разброс сопротивления новых батарей обычно небольшой и не дает реальной возможности их сортировки. Более точное представление о состоянии свинцово-кислотных источников тока может дать анализ их импедансных диаграмм в диапазоне частот от нескольких сот до единиц герц.

В [29] представлены серии диаграмм импеданса отдельных аккумуляторов емкостью 7,5 Ач, которые были выбраны из батарей напряжением 12 В, предварительно признанных качественными (А) (рис. 1.17) и некачественными (В и С) (рис. 1.18, 1.19).

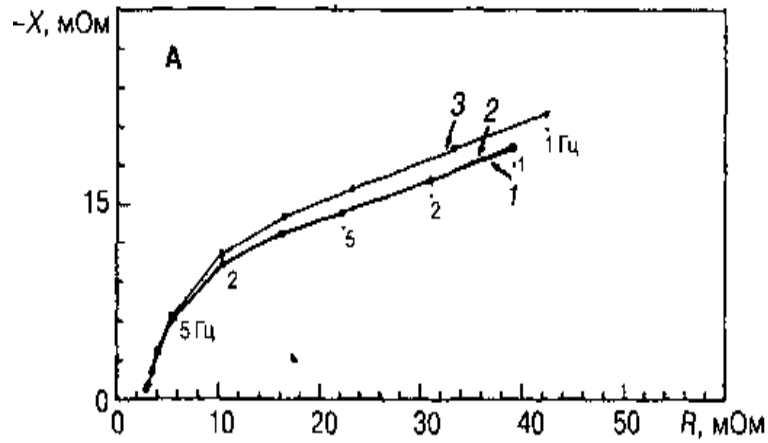


Рис. 1.17. Диаграммы импеданса заряженного аккумулятора из качественной батареи (А) после хранения в течение: 1 – 1, 2 – 5 и 3 – 20 дней

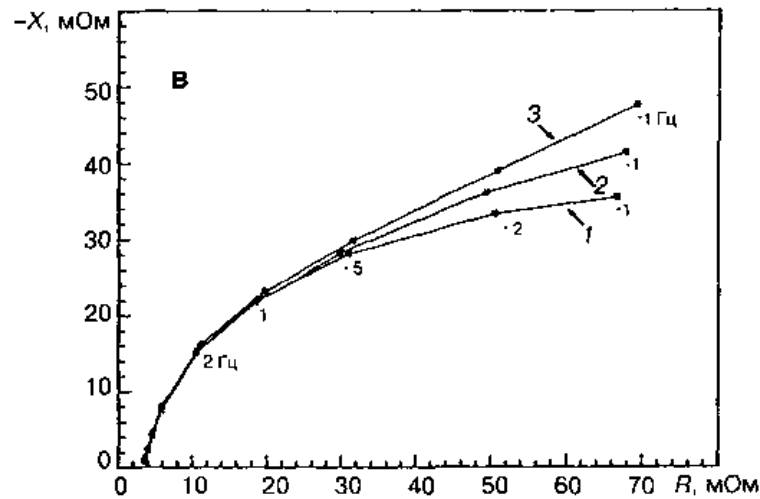


Рис. 1.18. Диаграммы импеданса заряженного аккумулятора из некачественной батареи (В) после хранения в течение: 1 – 1, 2 – 5 и 3 – 20 дней

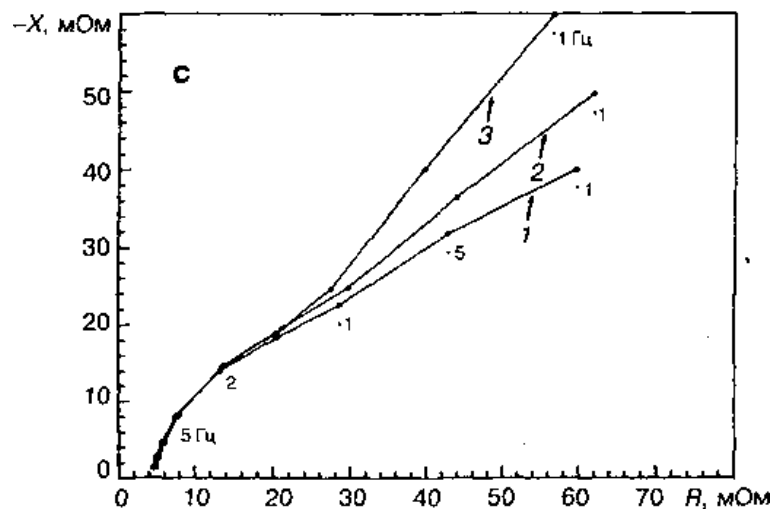


Рис. 1.19. Диаграммы импеданса заряженного аккумулятора из некачественной батареи (С) после хранения в течение: 1 – 1, 2 – 5 и 3 – 20 дней



В табл. 1.2 приведены усредненные параметры этих аккумуляторов качественной (А) и некачественных (В и С).

Таблица 1.2

Состояние батареи	$U_{НРЦ}$ , В	Импеданс при 1 кГц, МОм	Емкость при токе разряда $1 \cdot I_5$ , Ач
Качественная (А)	$2,17 \pm 0,02$	$2,3 \pm 0,2$	$9 \pm 0,5$
Некачественная (В)	$2,19 \pm 0,03$	$3,1 \pm 0,5$	$7 \pm 1,0$
Некачественная (С)	$2,19 \pm 0,03$	$4,3 \pm 0,7$	$3 \pm 1,4$

Из рис. 1.17 видно, что хранение аккумулятора качественной батареи (А) не приводит к изменению диаграммы на всем диапазоне частот. В свою очередь, диаграммы аккумулятора В (рис. 1.18), емкость которого лишь на 7 % ниже номинальной (7,5 Ач) (табл. 1.2), при частотах ниже 5 Гц расходятся при увеличении сроков хранения. Диаграммы импеданса аккумулятора С (рис. 1.19), емкость которого составляет лишь 40 % от номинальной, имеют еще большее расхождение. Следовательно, для оценки качества свинцово-кислотных источников тока может быть использован анализ изменений импеданса на частоте 1 Гц в процессе 2-3-недельного хранения после заряда [77].

### 1.5.2 Оценка остаточной емкости аккумуляторных батарей

Как было сказано ранее, значение  $U_{НРЦ}$  свинцово-кислотных батарей уменьшается в процессе разряда. Это изменение довольно значительно для каждой батареи, но возможность оценки степени заряженности даже батарей одного типа затрудняется большим разбросом этого параметра в партии новых источников тока. А при эксплуатации разброс  $U_{НРЦ}$  батарей в одинаковом состоянии становится еще больше.

В [15] приведены результаты измерений импеданса аккумуляторов емкостью 7 Ач с помощью моста переменного тока. Измерения показали, что уже при частоте 200 Гц становится заметным влияние индуктивной составляющей на полное сопротивление. Однако она постоянна на протяжении всего разряда и не несет информации о степени заряженности. Изменение характеристик импеданса, наблюдаемое в процессе разряда АБ, имеет место при частотах ниже 100 Гц. Однако

различные параметры импеданса меняются в процессе разряда по-разному. Активное и полное сопротивления заметно увеличиваются лишь к концу разряда, а в диапазоне степеней заряженности (20÷100) % имеют малую величину. Емкостное же сопротивление имеет экстремум при 50 % заряженности.

В [37] при исследовании свинцово-кислотных батарей с напряжением 4 и 6 В и емкостью от 3 до 9 Ач в диапазоне частот от 0,01 до 630 Гц было показано, что при степени заряженности от 20 до 100 % угол разности фаз монотонно изменяется с 10 до 20 градусов при частотах порядка (1÷6) Гц.

В [23] описаны исследования диаграмм импеданса вентилируемых стационарных свинцово-кислотных батарей емкостью 100 Ач. Изменение диаграмм импеданса батареи при разной остаточной емкости показано на рис. 1.20.

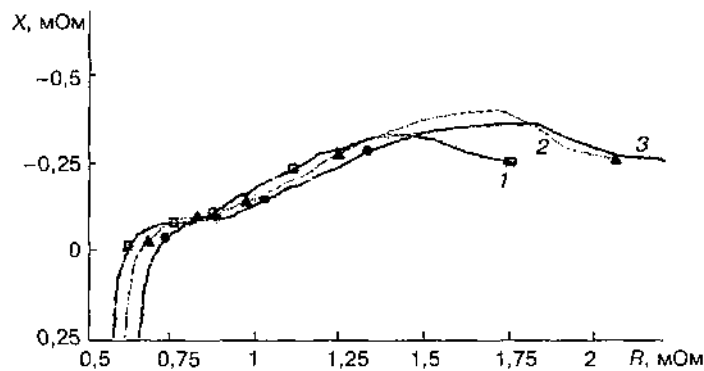


Рис. 1.20. Диаграммы импеданса свинцово-кислотной батареи при остаточной емкости  $C_{ост}$ : 1 – 30%, 2 – 60% и 3 – 90%

На рис. 1.20 последовательно отмечены частоты: 92; 9,2; 0,92; 0,092 и 0,009 Гц. Согласно рис. 1.20 при изменении остаточной емкости заметно изменяются параметры АБ измеренные на частотах выше 100 Гц и ниже 0,1 Гц. На частоте ~100 Гц значение импеданса (рис. 1.20) равно активному сопротивлению  $R_a$ , которое может быть использовано в качестве диагностического параметра для оценки остаточной емкости  $C_{ост}$ .

Как было сказано выше в процессе разряда свинцово-кислотного аккумулятора меняется концентрация его электролита. Вместе с концентрацией меняется его электропроводность. Поэтому, активное сопротивление  $R_a$  является хорошим диагностическим параметром при оценке остаточной емкости свинцово-кислотных

источников тока. Как видно из рис. 1.21, для батарей большой емкости, изменения  $R_a$  в процессе разряда невелики (от 0,075 до 0,145 Ом) [19]. Но они могут быть более заметны в источниках тока меньшей емкости и в герметизированных аккумуляторах с небольшим количеством электролита.

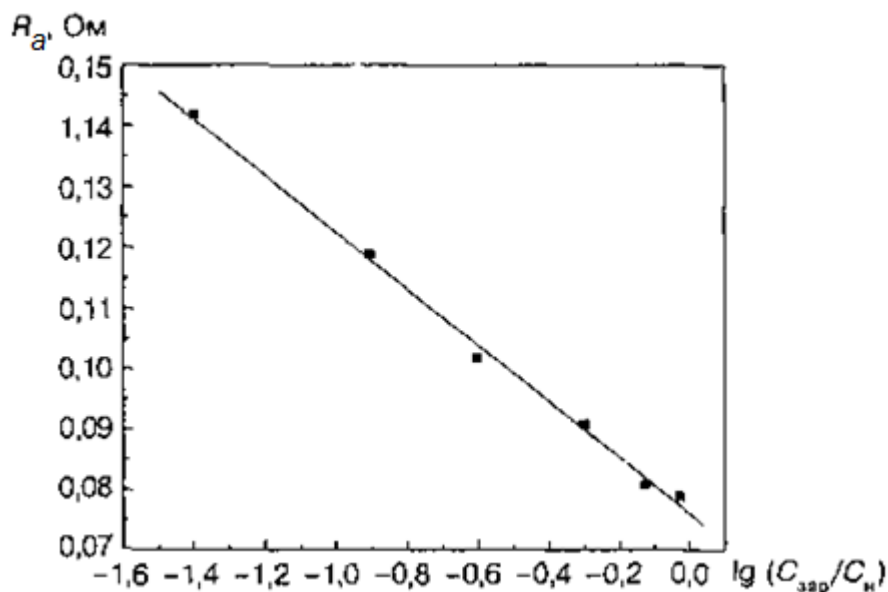


Рис. 1.21. Изменение омического сопротивления в процессе заряда свинцово-кислотной батареи

В [19] импедансные характеристики герметизированных батарей напряжением 6 В емкостью 4 Ач оценивались на основании данных, полученных при использовании методики измерений сопротивления  $R_a$  на постоянном токе (при наложении в течение 50 с импульса тока не более  $0,007I_{20}$ ). Там было предложено оценивать остаточную емкость по изменению сопротивления  $R_a$ , которое меняется линейно в зависимости от  $\lg(C_{\text{зар}}/C_n)$  (десятичный логарифм отношения емкости заряда к номинальной емкости источника тока) [76].

В [42] оценка доступной емкости аккумулятора проводится на основе математической модели процесса разряда свинцово-кислотного аккумулятора. В первую очередь производятся измерения разноименных параметров. К ним относятся напряжение разомкнутой цепи, температура отрицательного вывода аккумулятора и отклик на тестовый сигнал переменного тока. Амплитуда тестового сигнала составляет  $\sim 20$  мВ. Частота сигнала равна резонансной частоте  $f_{\pm}$ , при

которой полное внутреннее сопротивление  $Z(f_{\pm})$  становится равно активному  $R_a$ . При измерении отклика вычисляются среднеквадратичные значения его тока и напряжения.

На основе измеренных параметров производятся вычисления характеристик модели реального источника тока, одной из которых является значение доступной емкости аккумулятора [42].

### **1.5.3 Особенности контроля параметров в процессе эксплуатации аккумуляторных батарей**

В связи с разработкой батарей высокого напряжения для электро- и гибридных автомобилей и в других приложениях появилась потребность в оценке состояния единичных аккумуляторов или блоков аккумуляторов в процессе их работы. Как правило, для этого используются параметрические модели описания их поведения, опирающиеся на измерения напряжения и параметров внутреннего сопротивления. В этих условиях импедансометрия оказывается мощным инструментом для проверки диагностируемого источника тока на соответствие какой-либо параметрической модели. Малый тестовый сигнал при импедансометрии и возможность быстрого анализа отклика позволяет оценить состояние аккумулятора при выполнении системой практически любой функции.

В первую очередь необходимо оценить возможность использования параметров сопротивления для описания поведения источников тока, эксплуатируемых при постоянно меняющейся нагрузке (токах заряда и разряда). При измерениях импедансных спектров вентилируемой батареи емкостью 100 Ач, которые производились через 0,5 ч после снятия емкости, а также непосредственно в процессе заряда и разряда, было показано, что спектры, соответствующие одинаковой степени разряженности батареи в этих трех режимах, сильно различаются только при низких частотах (рис. 1.22). Наблюдаемое различие спектров при заряде и разряде одинаковым по величине током определяется асимметрией электродных и масстранспортных процессов. Представленные импедансные спектры регистрировались при температуре 20 °С. При температуре

60 °С спектры имеют аналогичную форму, но полное сопротивление  $Z$  уменьшается на 1/3. Минимальная частота 0,001 Гц при токах от 0 до 3 А и 0,007 Гц для тока 10 А [23].

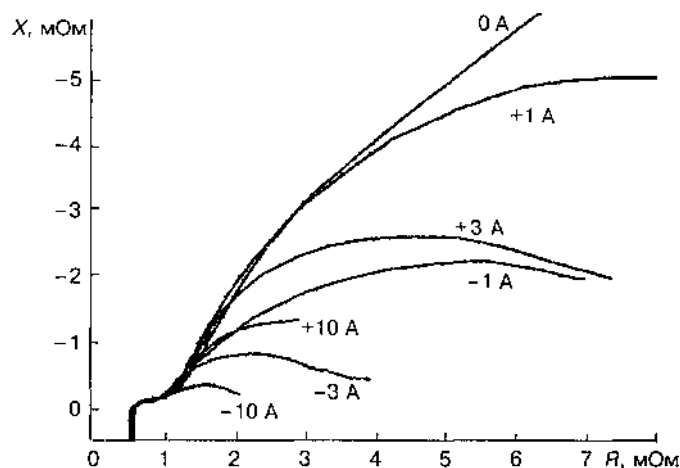


Рис. 1.22. Диаграммы импеданса свинцово-кислотной батареи при разных токах разряда/заряда

По результатам исследований [23] можно сделать вывод, что при мониторинге состояния источника тока удобно использовать в качестве диагностического параметра импедансные характеристики из высокочастотной области. Такие характеристики оказываются устойчивыми в широком диапазоне зарядно-разрядных токов и измерения параметров проводятся очень быстро.

В [21] описаны исследования характеристик импеданса вентилируемого аккумулятора емкостью 45 Ач при токах заряда и разряда  $0,01I_{20}$ ,  $0,05I_{20}$  и  $0,1I_{20}$ . При этом изучалась возможность диагностики состояния его заряженности по величине активного сопротивления  $R_a$ . Сопротивление  $R_a$  при разных токах разряда несколько различается по величине, но во всех случаях оно стабильно при остаточной емкости в диапазоне (0÷70) %, а затем увеличивается примерно в 2 раза. Объясняется это нарастающим экранированием поверхности электродов сульфатом свинца.

В [19] предложена оценка состояния заряженности герметизированных батарей емкостью 4 Ач. Оценка проводится путем анализа отклика на периодические

импульсы тока величиной  $0,007I_{20}$  в течение 50 с. Исследование проводили на ненагруженных батареях и батареях в процессе разряда током  $0,2I_{20}$ . Авторы отмечают, что чувствительность параметра для мониторинга состояния батареи достаточна и при токе разряда  $0,2I_{20}$  параметр остается неизменным. Однако следует помнить, что время теста составляет 50 с и при больших токах заряда или разряда за это время в аккумуляторе могут произойти значительные изменения, а следовательно измениться может и параметр диагностирования.

Оценка степени заряженности при измерении отклика на импульс постоянного тока исследовалась и для батарей большей емкости (для электромобиля). Исследования проводились на герметизированном аккумуляторе 2 В 20 Ач и вентилируемой батарее 12 В 52 Ач [25]. В качестве диагностического параметра использовался отклик на тестовый импульс величиной 500 А в течение 1 с, связанный со степенью заряженности некоторой нелинейной зависимостью. Эта зависимость сохраняет свой характер при степени деградации батареи в диапазоне (0÷50) %. Зависимость, полученная на герметизированной батарее 2 В 20 Ач приведена на рис. 1.23.

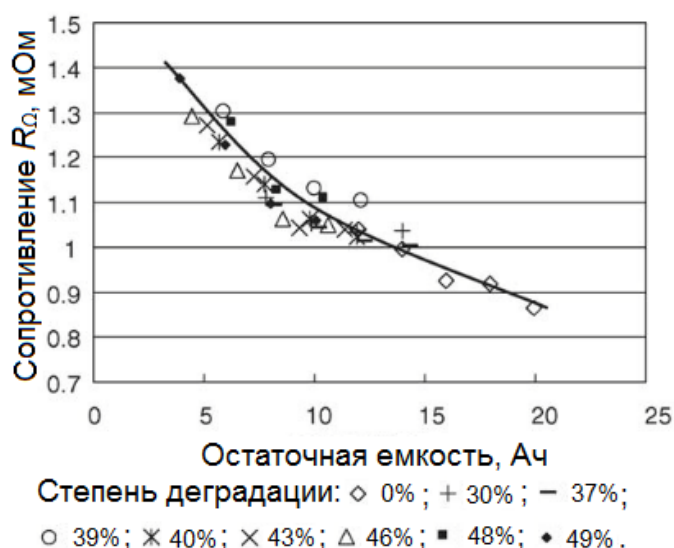


Рис. 1.23. Зависимость остаточной емкости от сопротивления свинцово-кислотной батареи при различных степенях деградации

Для батареи 2 В 20 Ач значение ее остаточной емкости по величине сопротивления может быть определена с максимальной чувствительностью в диапазоне степени заряженности (0÷50) %, для батареи 12 В 52 Ач – (0÷20) %. При большой степени заряженности сопротивление стабильно и не позволяет производить ее оценку. Высокая точность оценки степени заряженности по предложенной методике достигается через (2÷3) мин измерений [76].

#### **1.5.4 Оценка технического состояния аккумуляторных батарей**

Срок службы свинцово-кислотных аккумуляторов открытого типа и герметизированных ограничивается постепенным снижением емкости. В большинстве случаев это связано с деградацией положительного электрода - коррозией его решеток при работе в буферном режиме. При эксплуатации в режиме циклирования деградация связана с изменением структуры активных масс. Деградация герметизированных аккумуляторов также связана с потерями воды при сбросе излишнего давления газа, в результате чего происходит осушение сепаратора и увеличение внутреннего сопротивления источников тока.

Учитывая разнообразие режимов работы свинцово-кислотных источников тока в разных приложениях, в общем виде качественное представление о взаимодействии факторов воздействия и механизмов деградации может быть представлено в виде табл. 1.3 [39].

Оценить техническое состояние свинцово-кислотных источников тока также можно, регистрируя изменение со временем их омического сопротивления. В стационарных герметизированных батареях, работающих в буферном режиме (режим постоянного заряда), вследствие коррозии решеток и потерь воды из сепаратора. Трудности в оценке технического состояния при использовании этого диагностического параметра возникают только с измерением очень малых величин сопротивления и необходимостью знания величины параметра в начале эксплуатации конкретного источника тока.

Таблица 1.3

Механизмы деградации Факторы воздействия	Коррозия положительного электрода	Необратимая сульфатация	Потери активных масс	Потери воды	Уменьшение поверхности активных масс	Расслоение электролита
Длительная работа при малой степени заряженности	Косвенный эффект (из-за низких концентраций электролита и потенциала)	Высокая корреляция	Нет прямого влияния	Нет влияния	Нет влияния	Косвенный эффект (при больших сроках повышается сульфатация, расслаивается электролит)
Наработка в ампер-часах	Нет влияния	Нет прямого влияния	Влияние через механические напряжения	Нет прямого влияния	Образование кристаллов большого размера	Высокая корреляция
Заряд	Сильное влияние (из-за высокого зарядного напряжения)	Отрицательная корреляция (быстрый заряд уменьшает сульфатацию)	Сильное влияние (из-за газо-выделения)	Сильное влияние	Нет прямого влияния	Высокая корреляция
Время между полными зарядами	Высокая отрицательная корреляция	Высокая корреляция	Отрицательная корреляция	Отрицательная корреляция	Нет прямого влияния	Высокая корреляция
Температура	Высокая корреляция	При высокой температуре более полный заряд, но и более сильная сульфатация при низкой степени заряженности	Нет прямого влияния	Высокая корреляция	Малое влияние (деградация расширителя отрицательного электрода)	Нет прямого влияния



В [23], например, было показано, что изменения омического сопротивления герметизированных батарей 6 В 4 Ач коррелирует с изменением степени заряженности. С увеличением наработки батарей наблюдается смещение этой зависимости по оси омического сопротивления, но в целом ее характер сохраняется (рис. 1.24)

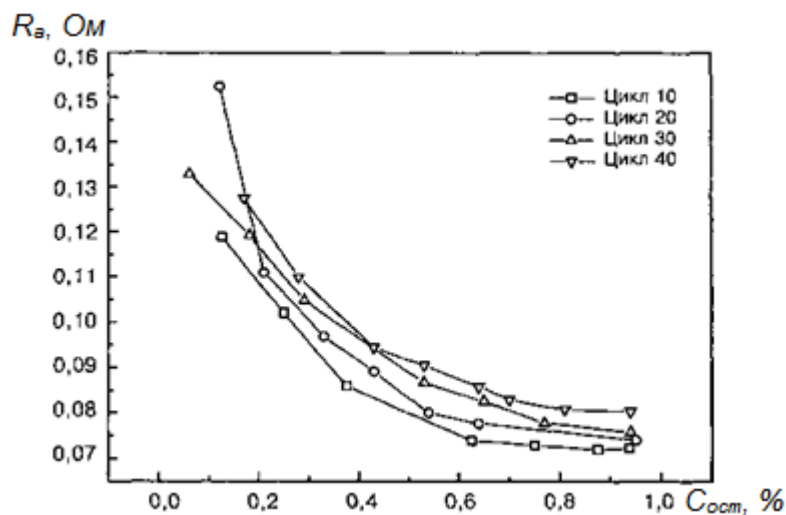


Рис. 1.24. Зависимости активного сопротивления свинцово-кислотной батареи после разных сроков эксплуатации

При оценке изменения сопротивления переноса заряда  $R_0$  в процессе разряда может быть обнаружен эффект сульфатации электродов. Из-за наличия в электродах сульфата свинца значение  $R_0$  в разряженном состоянии в несколько раз больше чем при степени заряженности (20÷100) %. Поэтому, резкое увеличение значения  $R_0$  в начале разряда следует рассматривать как результат сульфатации электродов.

Следует заметить, что при мониторинге характеристик батарей непосредственно в процессе длительной эксплуатации решение задачи оценки готовности свинцово-кислотной батареи выполнять необходимые функции в настоящее время нельзя считать найденным. Задача эта еще более сложная, чем оценка текущего состояния заряженности. Препятствует решению этой задачи большое разнообразие предъявляемых к ним требований, невозможность построения обобщенной модели поведения свинцово-кислотных источников тока [76].

## 1.6 Методы восстановления аккумуляторных батарей

При эксплуатации аккумуляторов нередко выявляются дефекты или возникают неисправности, которые с легкостью могут быть устранены.

В процессе эксплуатации иногда имеет место повышенный саморазряд аккумуляторной батареи (более 1 % в сутки). Его причинами являются наличие вредных примесей в электролите, загрязнение поверхности батареи, хранение батареи при повышенной температуре электролита, а также наличие коротких замыканий через сепараторы или по боковым кромкам пластин.

Проливы электролита на корпусе АБ необходимо смыть водой. Для свинцово-кислотных батарей электролит в виде серной кислоты желательно нейтрализовать кальцинированной содой или 10 % раствором аммиака. Для удаления вредных примесей из электролита его заменяют после глубокого разряда АБ. Поскольку значительная часть электролита находится в порах активной массы и сепараторов нередко производится многократная промывка блоков электродов дистиллированной водой. Короткие замыкания могут быть устранены только заменой сепаратора, удалением шлама и механическим удалением свинцовой губки с кромок пластин свинцово-кислотных АБ.

В процессе эксплуатации свинцово-кислотных АБ уровень их электролита непрерывно изменяется. Он снижается при разрядах (особенно глубоких), при снижении температуры и при длительных перезарядах в результате электролитического разложения воды. В результате верхние кромки пластин могут оголяться, что приводит к ускорению процесса сульфатации. В целях предотвращения этого явления необходимо регулярно проводить доливку дистиллированной воды.

При последовательном соединении аккумуляторов в АБ иногда наблюдаются случаи переплюсовки отдельных аккумуляторов. Это связано с ускоренным саморазрядом отдельных аккумуляторов. При разряде батареи конечное напряжение у этих аккумуляторов достигается быстрее, а дальнейший разряд приводит к изменению их полярности и последующему выходу из строя. Для предупреждения переплюсовки проводят дополнительный заряд отстающих элементов. Иначе следует заменить неисправные элементы.

Однако большинство приведенных выше приемов ремонта АБ пригодны лишь для обслуживаемых, негерметизированных батарей. Необслуживаемые батареи при таких неисправностях становятся непригодными для ремонта [47, 56].

Одним из основных факторов, ограничивающих эксплуатационный срок службы свинцово-кислотных аккумуляторов, является необратимая сульфатация отрицательных электродов. К настоящему времени накоплен достаточный опыт восстановления АБ после их длительного бездействия.

*Заряд реверсивным током* является одним из способов профилактики сульфатации и восстановления работоспособности сульфатированных электродов. Реверсивный ток - это переменный ток с различными амплитудами и длительностями импульсов обеих полярностей за каждый период их следования. Соответственно за каждый период следования импульсов аккумулятор заряжается и частично разряжается.

В соответствии с теорией электрохимических процессов заряд аккумулятора реверсивным током дает возможность управлять восстановительными реакциями и структурными изменениями активного материала электродов. Меняя соотношения между зарядными и разрядными импульсами, а также изменяя их амплитуду, можно получать кристаллы сульфата свинца различных размеров и форм. Это позволяет увеличить пористость и суммарную площадь соприкосновения электролита с активным материалом электродов, облегчить условия диффузии и выравнивания концентрации электролита в приэлектродном слое. Увеличение пористости в свою очередь способствует повышению величины максимального тока заряда и разряда. При заряде реверсивным током выделяется меньше тепла и газовыделение в конце заряда начинается позже.

При малой или средней степени сульфатации электродов десульфатацию проводят реверсивным током величиной  $(0,5 \div 2)$  А. Процесс десульфатации может занимать  $(20 \div 50)$  ч без перерыва. При этом плотность электролита возрастает. Признаком окончания десульфатации является неизменность напряжения и плотности электролита в течение 2 ч.

При запущенной форме сульфатации применяют заряд малым реверсивным током. Предварительно аккумулятор разряжают до 1,8 В на аккумулятор, сливают весь электролит и заливают дистиллированную воду. Ток устанавливают настолько малым, чтобы напряжение заряда не превышало 2,3 В. В процессе заряда плотность электролита будет возрастать. Когда плотность во всех аккумуляторах батареи достигнет величины  $1,11 \text{ г/см}^3$  необходимо снова слить электролит, залить дистиллированную воду и продолжить десульфатацию малым реверсивным током при том же напряжении. Когда плотность электролита достигнет значения  $1,12 \text{ г/см}^3$  устанавливают величину реверсивного тока равную 1 А. Заряд продолжают до тех пор, пока плотность электролита не перестанет возрастать и не начнется равномерное газовыделение. После этого аккумулятор разряжают в течение 2 часов током, составляющим 20 % от максимального разрядного тока, а затем заряжают в том же режиме до получения постоянства напряжения и плотности электролита.

Такие циклы разряда-заряда повторяют 2-5 раз, пока напряжение и плотность электролита не примут установившиеся значения. После этого добавляют аккумуляторную кислоту до плотности  $(1,21 \div 1,22) \text{ г/см}^3$  и полностью заряжают аккумулятор. Через 3 часа после заряда снова корректируют плотность электролита до значения  $(1,21 \div 1,22) \text{ г/см}^3$ .

Заряд аккумулятора реверсивным током может проводиться и в качестве профилактики. При систематическом подзаряде аккумуляторов сульфатации электродов практически не наблюдается. Однако сульфатация электродов отсутствует и в АБ, которые интенсивно эксплуатировались и быстро выработали свой ресурс.

*Контрольно-тренировочные циклы (КТЦ)* заряда-разряда проводится как для предотвращения сульфатации свинцово-кислотных АБ так и для восстановления емкости щелочных аккумуляторов (в основном никель-кадмиевых), потерянной по причине проявления эффекта памяти. Кроме того КТЦ применяются для определения емкости аккумулятора. Контрольно-тренировочные циклы обычно проводятся не реже одного раза в год. Перед выполнением КТЦ аккумуляторную батарею полностью заряжают и выдерживают 3 ч после прекращения заряда. Для

свинцово кислотных батарей корректируют плотность электролита до величины  $(1,21 \div 1,22) \text{ г/см}^3$ ; снова заряжают в течение  $(20 \div 30)$  минут для перемешивания электролита. После этого проводят контрольную разрядку постоянным током и контролируют время полного разряда до конечного напряжения 1,7 В на аккумулятор для свинцово-кислотных батарей и 1 В для щелочных АБ. Значение тока разряда выбирается из ряда  $0,2I_n$ ;  $0,1I_n$  или  $0,05I_n$  для измерения емкости 5-ти, 10-ти или 20-ти часового разряда соответственно (где  $n$  – время разряда). Емкость батареи определяют как произведение величины разрядного тока и времени разряда. После контрольного разряда батарею сразу же ставят на зарядку и полностью заряжают. Для восстановления емкости и снижения степени сульфатации проводят несколько контрольно-тренировочных циклов [59].

Сульфатированные аккумуляторы могут быть также восстановлены с помощью поверхностно-активных веществ или так называемых *десульфатирующих добавок* в электролит. В зависимости от степени сульфатации эффективное действие таких добавок (повышение плотности электролита) становится заметным через 5-10 дней после их введения в электролит. Введение добавок может осуществляться при любом состоянии аккумулятора (заряд, разряд, состояние покоя), но целесообразно вводить добавки в конце заряда, когда начинается перемешивание электролита выделяющимися газами. В этом случае добавка быстрее проникает внутрь электродов, а не остается на поверхности электролита вследствие низкой растворимости в серной кислоте. Эффективное действие десульфатирующих добавок сохраняется примерно в течение 1 года, после чего они могут быть введены вновь [87].

## 1.7 Выводы по главе

1. Проведен анализ параметров аккумуляторных батарей различных электрохимических систем. По его результатам можно выделить несколько параметров, величина которых, в той или иной степени, несет информацию о текущем состоянии АБ.

2. По результатам анализа, среди известных параметров АБ не было обнаружено параметра, позволяющего построить алгоритм оценки текущего состояния АБ универсальный для электрохимических систем всех типов.

3. Из известных быстро измеримых параметров АБ наиболее информативным является параметр внутреннего сопротивления АБ, так как он содержит в себе информацию обо всех основных компонентах АБ (электролит, активная масса, электроды, токоведущие проводники).

4. Общей недостаток методов оценки текущего состояния АБ, основанных на анализе ее быстро измеримых параметров, связан с существованием множества факторов, оказывающих влияние на величину диагностического параметра.

## **Глава 2 МЕТОД КОНТРОЛЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ**

Диагностика – это определение состояния объекта, предмета, явления или процесса управления посредством реализации комплекса исследовательских процедур [48].

В диагностике аккумуляторных батарей (АБ) таким комплексом исследовательских процедур, является измерение электрических и физических параметров батареи (напряжение на ее выводах, внутреннее сопротивление, максимальный ток, ток стартерного разряда, плотность электролита, длительность разряда или резервная емкость и прочее) и сопоставление значений этих параметров со значениями основных эксплуатационных характеристик.

Выходит, чтобы оценить состояние батареи необходимо знать как и на что оказывает влияние изменение того или иного параметра. Для обретения этого знания необходимы исследования, охватывающие большое число параметров АБ и соответствующих им значений основных эксплуатационных характеристик.

### **2.1 Исследование параметров аккумуляторных батарей**

При решении задач оперативной диагностики АБ используются специальные приборы, которые называются анализаторами. Принцип действия большинства современных анализаторов основан на измерении внутреннего сопротивления АБ на переменном токе. Считается, что внутреннее сопротивление является таким диагностическим параметром, который хорошо коррелируется с основным эксплуатационным показателем качества АБ – ее резервной емкостью, и который может быть быстро измерен (всего за 10 - 20 с) [85, 90, 46].

#### **2.1.1 Выбор эквивалентной схемы аккумуляторной батареи.**

В любом химическом источнике тока (ХИТ) электрическая энергия вырабатывается в результате прямого преобразования химической энергии окислительно-восстановительной реакцией. Различают гальванические элементы

одноразового использования (первичные элементы), многоразового действия (электрические аккумуляторы) и с непрерывной подачей реагентов (топливные элементы) [47].

Аккумулятор состоит из двух разнородных электродов (один - содержит окислитель, другой - восстановитель), контактирующие с электролитом. Между электродами устанавливается разность потенциалов – электродвижущая сила (ЭДС)  $E_0$ , соответствующая свободной энергии окислительно-восстановительной реакции [47, 67, 72] (рис. 2.1).

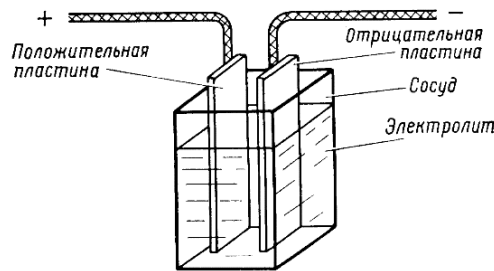


Рис. 2.1. Простейший химический источник тока

Для правильной оценки эксплуатационных аккумуляторной батареи необходимо знание электрической эквивалентной схемы АБ. Согласно основам электротехники [45] любой источник питания электрических схем, в том числе и аккумуляторная батарея, может быть представлен в виде источника постоянной ЭДС  $E_0$  включенного параллельно с сопротивлением  $R_0$  (рис. 2.2).

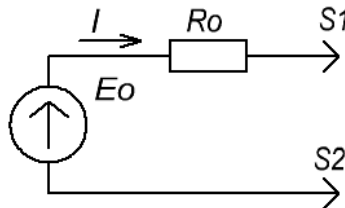


Рис. 2.2. Эквивалентная схема источника питания ( $S1$  и  $S2$  – выводы источника тока)

Такая схема аккумуляторной батареи (источника питания) в достаточной мере описывает электрические процессы, протекающие в батарее на постоянном токе. Вольтамперная характеристика такой модели выражается как:



$$U_{S1,S2} = E_0 - IR_0, \quad (2.1)$$

где  $U_{S1,S2}$  – напряжение на выводах  $S1$  и  $S2$ ,  $R_0$  – внутреннее сопротивление АБ,  $I$  – ток нагрузки, протекающий в цепи источника.

*Электродвижущая сила*  $E_0$  или напряжение электрохимической системы характеризует электрохимическую систему, лежащую в основе источника тока. Величина  $E_0$  представляет собой разность стандартных потенциалов электродных реакций, протекающих при разряде. Следует различать ЭДС и *напряжение разомкнутой цепи* (НРЦ)  $U_{НРЦ}$  представляет собой разность электродных потенциалов источника тока, измеренную при разомкнутой внешней цепи. Величина НРЦ кроме напряжения электрохимической системы включает алгебраическую сумму гальвани-потенциалов на границах разнородных металлов цепи. В результате чего ЭДС и НРЦ лишь в отдельных случаях численно равны, но чаще всего значение  $U_{НРЦ}$  превышает  $E_0$  [50].

*Сопротивление*  $R_0$  определяется сопротивлением активных масс, электродов и электролита [85].

При тестировании АБ на переменном тестовом сигнале согласно схеме на рис. 2.2 ее полное комплексное сопротивление  $Z(j\omega)$  будет равно значению внутреннего сопротивления  $R_0$ . Так как сопротивление  $R_0$  является активным, его значение остается неизменным при изменении частоты тестового сигнала, то есть:

$$Z(j\omega) = R_0 = const., \quad (2.3)$$

где  $j$  – мнимая единица,  $\omega$  – циклическая частота, в нашем случае  $\omega = 2\pi f$ , где  $f$  – частота в Герцах.

Сравним частотные зависимости модулей полного сопротивления  $|Z|$  (рис. 2.3) полученных на реальной АБ и эквивалентной схеме по передаточной функции (2.3). В качестве реальной батареи была выбрана свинцово-кислотная батарея типа FIAMM 12UMTB160, номинальным напряжением 12 В, номинальной емкостью 160 Ач. Частотная зависимость получена при измерении параметров АБ на переменном тестовом сигнале в диапазоне частот 20-1000 Гц методом, который описан в разделе 2.1.4. Внутреннее сопротивление  $R_0$  реальной батареи принимает значение 2,9 мОм.

В качестве сопротивления эквивалентной схемы примем то же значение  $R_0 = 2,9$  мОм.

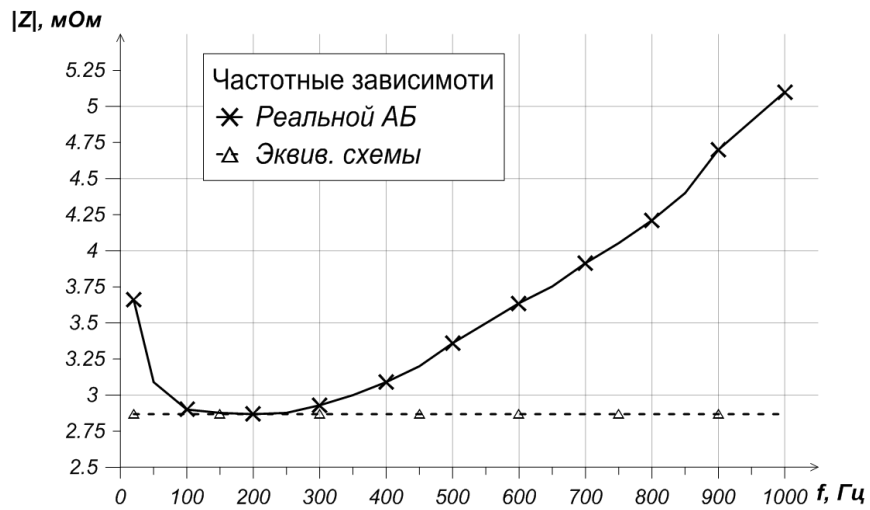


Рис. 2.3. Частотные зависимости модулей полного сопротивления реальной батареи и эквивалентной схемы на рис. 2.2

Зависимость, полученная на реальной АБ, имеет сложный, нелинейный характер, что может говорить о наличии реактивной составляющей в значениях полного сопротивления  $Z$ . Зависимость модуля полного сопротивления схемы (рис. 2.2) на всех частотах диапазона принимает одно и то же значение, равное сопротивлению  $R_0$ , что говорит о ее чисто активном характере. Очевидно, что частотные зависимости модуля полного сопротивления реальной АБ и эквивалентной схемы источника питания отличаются, а значит, классическая модель источника питания (рис. 2.2) не является моделью реальной АБ при тестировании на переменном токе.

В различных источниках [44, 73, 77, 86] эквивалентная схема АБ представляется в виде электрической цепи последовательно соединенных сопротивления  $R_0$  и емкости  $C_0$  (рис. 2.4).

Емкость  $C_0$  характеризует двойной электрический слой (ДЭС) находящийся на границе между электродом и раствором электролита.

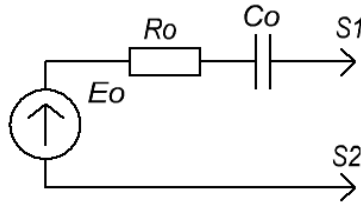


Рис. 2.4. Эквивалентная схема АБ в виде последовательной  $RC$ -цепи ( $S_1$  и  $S_2$  – выводы АБ)

Уравнение полного комплексного сопротивления такой модели выражается как:

$$Z(j\omega) = R_0 + \frac{1}{j\omega C_0}. \quad (2.4)$$

Из выражения видно, что при бесконечном увеличении циклической частоты тестового сигнала  $\omega \rightarrow \infty$  значение полного сопротивления будет уменьшаться, стремясь к значению внутреннего сопротивления  $Z(j\omega) \rightarrow R_0$ .

Построим частотную зависимость модуля полного сопротивления схемы на рис. 2.5. Значения внутреннего сопротивления модели  $R_0 = 2,9$  мОм и емкости  $C_0 = 4,3$  Ф, что соответствует значениям этих параметров, полученным на реальной АБ типа FIAMM 12UMTB160, номинальным напряжением 12 В, номинальной емкостью 160 Ач. Значение  $C_0$  было вычислено методом, описанным в разделе 2.1.3.

Модуль полного комплексного сопротивления выражается как:

$$|Z| = \sqrt{R_a^2 + X^2}, \quad (2.5)$$

где  $R_a$  – активная составляющая полного сопротивления, в нашем случае  $R_a = R_0$ ;  $X$  – реактивная составляющая полного сопротивления, согласно уравнению (2.4)  $X =$

$-\frac{1}{\omega C_0}$ . Очевидно, что зависимости модуля полного сопротивления реальной

батареи и эквивалентной схемы (рис 2.4) различаются. Однако, участки зависимостей, соответствующие диапазону частот от 20 до 250 Гц, имеют схожий характер. Это подтверждает наличие емкостной составляющей в значениях полного сопротивления реальной АБ.

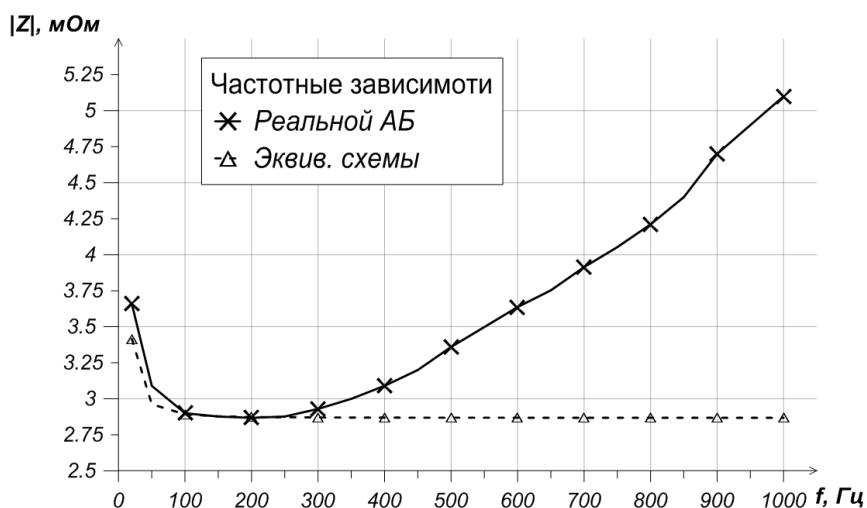


Рис. 2.5. Частотные зависимости модулей полного сопротивления реальной АБ и эквивалентной схемы (рис. 2.4)

Монотонное возрастание зависимости реальной батареи на частотах выше 300 Гц может говорить о наличии индуктивной составляющей полного сопротивления АБ. Участки, соответствующие диапазону частот от 300 до 1000 Гц существенно различаются, поэтому эквивалентная схема на рис. 2.4 не может адекватно описать параметры реальной АБ при их измерении на переменном токе и, как следствие, не может считаться моделью реальной АБ.

В литературе [61,71, 73, 77] упоминается о наличии индуктивной составляющей в параметре полного сопротивления АБ, рассмотрим эквивалентную схему замещения АБ в виде последовательной  $RLC$ -цепи (рис. 2.6).

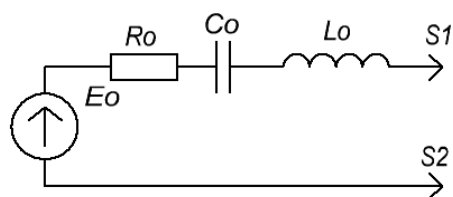


Рис. 2.6. Эквивалентная схема АБ в виде последовательной  $RLC$ -цепи ( $S1$  и  $S2$  – выводы АБ)

Индуктивность  $L_0$  связана с инерционными свойствами движения гидратированных ионов, обеспечивающих протекание переменного электрического тока и индуктивность соединительных проводников и выводов АБ [61].

Выражение полного комплексного сопротивления такой модели имеет вид:

$$Z(j\omega) = R_0 + j\left(\omega L_0 - \frac{1}{\omega C_0}\right). \quad (2.6)$$

Модуль полного сопротивления, учитывая выражения (2.5) и (2.6) будет равен:

$$|Z| = \sqrt{R_0^2 + \left(\omega L_0 - \frac{1}{\omega C_0}\right)^2}. \quad (2.7)$$

Частотные зависимости модуля полного сопротивления реальной АБ и ее модели в виде последовательной  $RLC$ -цепи приведены на рис. 2.7. Частотная зависимость реальной АБ снималась с батареи типа FIAMM 12UMTB160, номинальным напряжением 12 В, номинальной емкостью 160 Ач. Значения внутреннего сопротивления  $R_0 = 2,9$  мОм, индуктивности  $L_0 = 0,6$  мкГн и емкости  $C_0 = 4,3$  Ф модели АБ в виде последовательной  $RLC$ -цепи равны значениям соответствующих параметров реальной батареи. Значения  $C_0$  и  $L_0$  были вычислены методом, описанным в разделе 2.1.3.

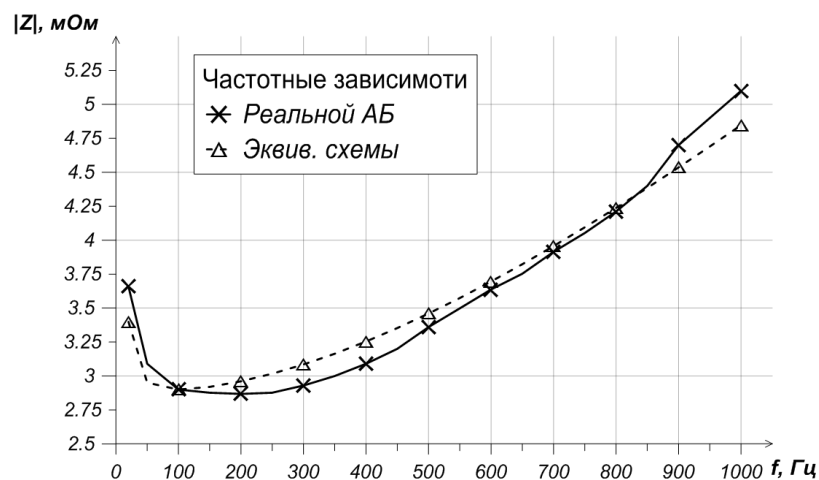


Рис. 2.7. Частотные зависимости модулей полного сопротивления реальной АБ и эквивалентной схемы на рис. 2.6

Из рис. 2.7 видно, что зависимости имеют общий характер. На низких частотах от 20 до 100 Гц обе зависимости убывают, приближаясь к значению  $\sim 2,9$  мОм. На частотах выше 100 Гц зависимости реальной АБ и эквивалентной схемы монотонно возрастают. Обе зависимости имеют глобальный минимум в области частот

(100÷300) Гц. Высокую степень сходства этих зависимостей подтверждает коэффициент корреляции  $\rho = 0,99$ .

Не менее близкими по форме и значениям оказываются зависимость реактивного сопротивления реальной АБ и эквивалентной схемы последовательной  $RLC$ -цепи (рис. 2.8). Реактивным сопротивлением последовательной  $RLC$ -цепи является мнимая часть ее полного комплексного сопротивления [71]:

$$X(\omega) = \omega L_0 - \frac{1}{\omega C_0}. \quad (2.8)$$

На рис. 2.8 видно сходство зависимостей полученных на реальной АБ и модели в виде последовательной  $RLC$ -цепи. Высокую степень сходства зависимостей на рис. 2.8 подтверждает коэффициент корреляции  $\rho = 0,99$ .

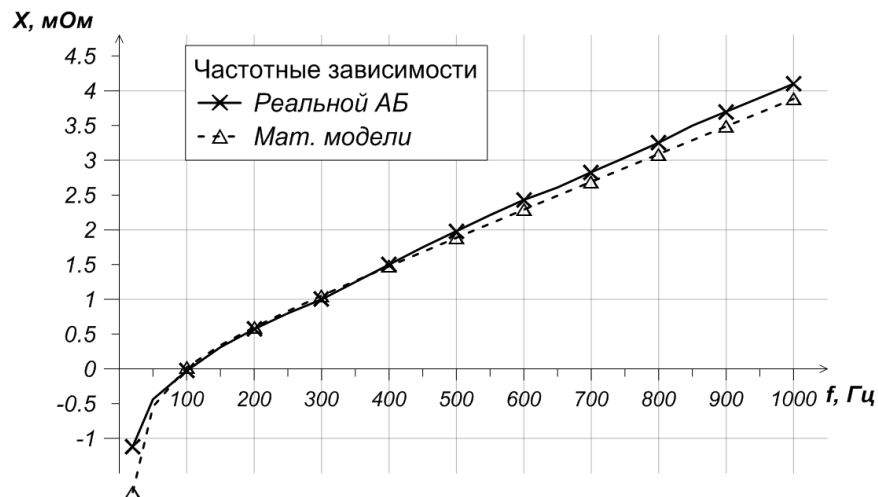


Рис. 2.8. Частотные зависимости реактивного сопротивления реальной АБ и эквивалентной схемы последовательной  $RLC$ -цепи

Значения модуля полного и реактивного сопротивления реальной АБ и ее модели в виде последовательной  $RLC$ -цепи приведены в табл. 2.1.

Согласно приведенным зависимостям (рис. 2.6 и 2.7) и данным в табл. 2.1 модель АБ в виде последовательной  $RLC$ -цепи позволяет с высокой степенью точности описывать параметры реальной АБ при их измерении на переменном токе.

Таблица 2.1

Частота тестового сигнала $f$ , Гц	Модуль полного сопротивления реальной АБ $Z_p$ , мОм	Модуль полного сопротивления модели АБ $Z_M$ , мОм	Абсолютные разности модулей реальной АБ и ее модели $\Delta Z$ , мОм	Реактивное сопротивление реальной АБ $X_p$ , мОм	Реактивное сопротивление модели АБ $X_M$ , мОм	Абсолютные разности реактивных сопротивлений реальной АБ и ее модели $\Delta X$ , мОм
20	3,6	3,4	0,2	-1,1	-1,8	0,7
50	3,1	3,0	0,1	-0,4	-0,5	0,1
100	2,9	2,9	0,0	0,0	0,0	0,1
150	2,9	2,9	0,0	0,3	0,3	0,0
200	2,9	3,0	0,1	0,6	0,6	0,0
500	2,9	3,0	0,1	0,8	0,8	0,0
550	2,9	3,1	0,2	1,0	1,1	0,1
600	3,0	3,2	0,2	1,3	1,3	0,0
650	3,1	3,3	0,2	1,5	1,5	0,0
700	3,2	3,4	0,2	1,8	1,7	0,1
750	3,4	3,5	0,1	2,0	1,9	0,1
800	3,5	3,6	0,1	2,2	2,1	0,1
850	3,6	3,7	0,1	2,4	2,3	0,1
900	3,8	3,8	0,0	2,6	2,5	0,1
950	3,9	4,0	0,1	2,8	2,7	0,1
1000	4,1	4,1	0,0	3,0	2,9	0,2
Усредненная абсолютная погрешность $\Delta Z_{ср}$ , мОм			0,10	Усредненная абсолютная погрешность $\Delta X_{ср}$ , мОм		0,1
Среднеквадратичное отклонение $\sigma_{\Delta Z}$ , мОм			0,07	Среднеквадратичное отклонение $\sigma_{\Delta X}$ , мОм		0,13
Коэффициент корреляции $\rho$			0,99	Коэффициент корреляции $\rho$		0,99

Таким образом, из рассмотренных моделей двухполюсников с наибольшей точностью параметры АБ при анализе на переменном токе описывает модель батареи в виде последовательной  $RLC$ -цепи. На это указывает сходство частотных зависимостей реальной АБ и эквивалентной схемы  $RLC$ -цепи, а также высокие значения коэффициентов корреляции ( $\rho = 0,99$  для зависимостей обоих параметров). Это позволяет признать то, что в качестве выражения полного комплексного сопротивления аккумуляторной батареи допустимо использовать выражение полного комплексного сопротивления последовательной  $RLC$ -цепи (2.6), а в качестве эквивалентной электрической схемы АБ – использовать схему последовательной  $RLC$ -цепи (рис. 2.6).

### 2.1.2 Физическая модель колебательных процессов в растворе электролита

С точки зрения теории электрохимии каждый из элементов модели АБ в виде последовательной  $RLC$ -цепи имеет свой физический смысл.

Сопротивление  $R_0$  – омическое сопротивление, определяемое сопротивлением активных масс электродов и электролита [85]. Сопротивление электролита проявляется, при ускоренном движении ионов электролита под действием электрического поля (внешнего или собственной ЭДС). Вследствие этого движения возникают тормозящие силы – трение и электростатическое взаимодействие движущихся зарядов. Скорость движущихся частиц пропорциональна значению этих тормозящих сил, что подтверждает справедливость закона Ома для электролитов. В результате действия электрического поля и тормозящих сил возникает движение носителей заряда с постоянной относительной скоростью, пропорциональной напряженности электрического поля [85].

Сопротивление активных масс отрицательного электрода АБ обычно пренебрежимо мало, так как чаще всего выполняется из таких металлов как свинец, цинк, железо, кадмий, магний, литий. В качестве активного вещества положительного электрода чаще используют оксиды или гидроксиды металлов ( $PbO_2$ ,  $MnO_2$ ,  $NiOOH$ ,  $AgO$ ,  $HgO$ ). При этом лишь немногие оксиды обладают, достаточно высокой электронной проводимостью. Удельная электрическая проводимость неполного гидрата окиси никеля ( $NiOOH$ ), применяемого в никель-кадмиевых и никель-металлгидридных АБ, равна примерно  $10^{-6}$  См/м, тогда как проводимость двуокиси свинца  $PbO_2$ , применяемой в свинцово-кислотных АБ, составляет 8 См/м. Для снижения электрического сопротивления активной массы используют тонкодисперсный графит, металлические порошки никеля, серебра, меди. Эти материалы образуют своеобразный электропроводящий скелет, обеспечивающий подвод (отвод при реакции окисления) электронов к реакционной зоне активного вещества [50].

На границе между электродом и раствором электролита находится двойной электрический слой (ДЭС). Он образован электрическими зарядами, находящимися на поверхности металла, и ионами противоположного знака, расположенными в



растворе у поверхности металла. ДЭС возникает при соприкосновении металла с раствором, в результате взаимного обмена заряженными частицами двух сред (ионы раствора отдают свои электроны металлу, а металл отдает ионы в раствор). В простейшем случае, можно представить себе, что поверхность металла притягивает из раствора эквивалентное по числу зарядов количество ионов с зарядами, противоположными по знаку заряду поверхности. Эти ионы располагаются вдоль поверхности, приближаясь вплотную к ней, в результате чего образующийся двойной слой можно уподобить плоскому конденсатору с емкостью  $C_0$  [88].

Индуктивность  $L_0$  проявляет себя при воздействии на электрохимическую систему АБ переменным электрическим током (при измерениях параметров АБ на переменном токе). В физическом смысле элемент  $L_0$  отражает взаимосвязь энергии магнитного поля с соответствующим электрическим током. Он учитывает как самоиндукцию соединяющих проводников и выводов, так и собственную индуктивность электрохимической системы АБ [73].

В переменном электрическом поле двойного электрического слоя ионы испытывают воздействие способное заставить их колебаться. Возможная в этих условиях схема перемещения гидратированных ионов представлена на рис. 2.8.

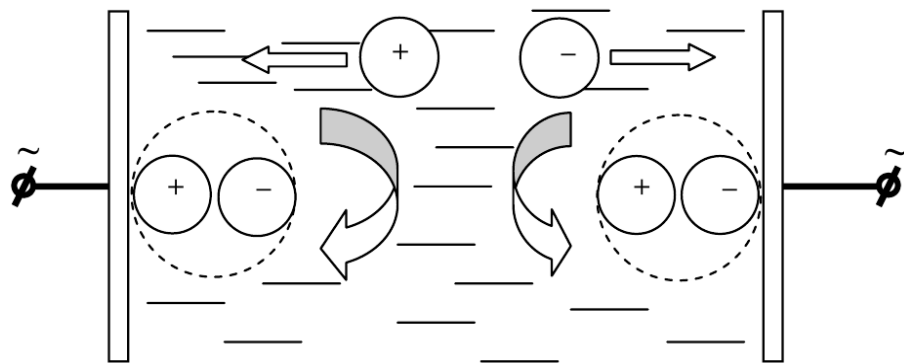


Рис. 2.8. Схема перемещения ионов в двойном электрическом слое и в растворе электролита

В такт с изменением заряда поверхности электрода ионная обкладка двойного электрического слоя перестраивается: гидратированные катионы заменяются гидратированными анионами. При этом гидратированные ионы перемещаются у

поверхности электродов в первом приближении по криволинейным траекториям близким к круговым. В случае ионов с примерно одинаковым радиусом это допущение должно выполняться наиболее точно.

При совпадении частоты налагаемого на электроды переменного тока с собственной частотой колебаний гидратированных ионов наступает резонанс. Так как гидратированные ионы имеют различную массу, то им должны соответствовать индивидуальные резонансные частоты колебаний в двойном электрическом слое.

Растворы электролитов, как известно, представляют собой проводники электрического тока второго рода. Носители тока – катионы и анионы в растворах окружены ионной атмосферой и при своём движении под действием электрического поля тормозят взаимное перемещение. При движении гидратированных ионов в электрическом поле через условно выбранную границу часть тока переносится анионами, а часть – катионами. На скорость движения гидратированных ионов оказывает влияние и вязкость раствора электролита, увеличение которой должно понижать резонансную частоту колебаний системы. Кроме того, значение резонансной частоты рассматриваемых взаимосвязанных колебаний гидратированных ионов может определяться соотношением подвижностей анионов и катионов.

Кроме того в двойном электрическом слое наблюдается резкое уменьшение диэлектрической проницаемости воды от 81 до 2. Это обуславливает увеличение сил взаимного притяжения противоположно заряженных ионов в двойном электрическом слое по сравнению с силами, действующими между ионами, находящимися в отдалении от него.

Колебательный процесс в двойном электрическом слое возбуждается внешним источником переменного тока. При этом ионы испытывают то тормозящее, то ускоряющее их движение действие электрического поля электродов, перезаряжаемых в такт с частотой переменного тока. Такая физическая картина позволяет уподобить электрохимическую систему двум колебательным контурам, соединённым между собой раствором электролита с собственным сопротивлением  $R_0$ . Эти «колебательные контуры» имеют «конденсаторы»  $C_{дв1}$  и  $C_{дв2}$  – двойной электрический слой и «индуктивности»  $L1$  и  $L2$  (рис. 2.9), появление которых связано с инерционными

свойствами движения гидратированных ионов, обеспечивающих протекание переменного электрического тока, аналогично электронам в проводниках электрического тока первого рода.

Схеме перемещения гидратированных ионов (рис. 2.8) соответствует эквивалентная электрическая схема (рис. 2.9).

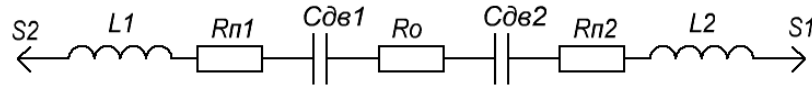


Рис. 2.9. Эквивалентная электрическая схема электрохимической системы

Очевидно, что исходя из правил расчета последовательных электрических цепей полное комплексное сопротивление эквивалентной схемы на рис. 2.9 сводится к выражению полного комплексного сопротивления последовательной  $RLC$ -цепи (2.6). Правомерность использования такой схемы замещения кондуктометрической ячейки была показана в разделе 2.1.

### 2.1.3 Добротность эквивалентной схемы аккумуляторной батареи

В разделе 2.1.1 нами было принято, что в качестве эквивалентной электрической схемы АБ можно использовать схему последовательной  $RLC$ -цепи (колебательного контура) (см. рис. 2.6). Следовательно, на АБ должны переноситься и характеристики последовательной  $RLC$ -цепи. К таким характеристикам относятся значение резонансной частоты и добротности. Согласно теории электротехники [45] резонансной для последовательной  $RLC$ -цепи называют такое значение частоты, на которой индуктивное и емкостное сопротивления оказываются равными и компенсируют друг друга [45]. Резонансная частота может быть определена по графику частотной зависимости реактивного сопротивления и соответствует нулевому значению реактивного сопротивления.

Другая характеристика последовательной  $RLC$ -цепи – добротность. С точки зрения физики она равна отношению энергии, запасённой в колебательной системе, к энергии, теряемой системой за один период колебания. Добротность характеризует качество колебательной системы. Чем она больше, тем меньше

потери энергии в системе за одно колебание. В последовательном колебательном контуре с индуктивностью  $L_0$ , ёмкостью  $C_0$  и сопротивлением  $R_0$  добротность выражается как:

$$Q = \frac{1}{R_0} \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}. \quad (2.9)$$

Значение добротности в некотором смысле определяет существование резонансных свойств рассматриваемой  $RLC$ -цепи.

Таким образом, для оценки резонансных свойств реальной АБ необходимо определить параметры ее эквивалентной  $RLC$ -цепи. То есть измерить значения индуктивности  $L_0$ , емкости  $C_0$  и активного сопротивления  $R_0$ . Значение активного сопротивления измеряется как реальная часть полного комплексного сопротивления методом, описанным в разделе 2.1.4. Значения индуктивности и емкости измерить путем измерения сопротивления несколько сложнее, так как оба эти параметра на переменном токе обладают реактивными сопротивлениями, и измерить можно только значение их алгебраической суммы (2.8). Очевидно, для вычисления параметров  $L_0$  и  $C_0$  необходимо составить систему уравнений. Поскольку в качестве неизвестных фигурируют два параметра, то система должна содержать как минимум два уравнения. В качестве уравнений возьмем выражение реактивного сопротивления (2.8) с двумя известными значениями реактивного сопротивления  $X_1$  и  $X_2$  измеренными на двух различных частотах  $f_1$  и  $f_2$ :

$$\begin{cases} X_1 = 2\pi f_1 L_0 - \frac{1}{2\pi f_1 C_0} \\ X_2 = 2\pi f_2 L_0 - \frac{1}{2\pi f_2 C_0} \end{cases}. \quad (2.10)$$

Выразим из первого уравнения системы (2.10) значение индуктивности:

$$L_0 = \frac{1}{2\pi f_1} \left( X_1 + \frac{1}{2\pi f_1 C_0} \right). \quad (2.11)$$

Подставив в систему (2.10) выражение (2.11) получим выражение емкости:

$$C_0 = \frac{(f_2^2 - f_1^2)f_1}{2\pi f_1^2 f_2 (X_2 f_1 - X_1 f_2)} \quad (2.12)$$

Таким образом, используя выражения (2.11) и (2.12) можно вычислять индуктивность и емкость эквивалентной схемы АБ. А значит можно вычислить и значение добротности по выражению (2.9) для исследуемой батареи. Результаты обработки значений реактивного сопротивления АБ различных типов приведены в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Тип АБ	№ АБ	Емкость $C_0$ , Ф	Индуктивность $L_0$ , мкГн	Сопротивление $R_0$ , мОм	Добротность Q
20720	12	0,20	0,8	26	0,08
20720	13	0,23	0,6	24	0,07
20720	14	0,22	0,7	26	0,07
20720	15	0,23	0,7	25	0,07
20720	16	0,24	0,6	23	0,07
3819	16	1,3	0,6	6,8	0,11
3819	17	1,2	0,7	7,1	0,11
3819	19	1,5	0,6	7,2	0,09
3819	21	1,6	0,7	6,5	0,10
3819	22	1,6	0,6	6,9	0,09
5524	41	1,5	0,8	5,6	0,13
5524	44	1,5	0,9	5,7	0,14
5524	53	1,8	0,8	5,7	0,12
5524	62	1,7	0,8	5,5	0,12
5524	82	1,8	0,6	5,6	0,10
7523	12	2,0	0,7	4,8	0,13
7523	18	1,9	0,8	4,9	0,14
7523	21	1,9	0,7	4,7	0,13
7523	25	2,2	0,6	4,7	0,11
7523	27	2,1	0,8	4,7	0,13
10530	9	2,5	0,8	3,8	0,15
10530	12	2,4	0,8	3,9	0,15
10530	14	2,4	0,8	3,8	0,16
10530	20	2,3	0,8	3,6	0,16
10530	21	2,3	0,8	3,5	0,16
12160	98	5,6	0,6	3,3	0,10
12160	99	7,3	0,6	3,1	0,09

Значения реактивного сопротивления получены на батареях напряжением 12 В типа FIAMM 20720  $C_{20} = 7,2$  Ач, Panasonic 38B19  $C_{20} = 35$  Ач, Panasonic 55B24  $C_{20} =$

45 Ач, Panasonic 75D23  $C_{20} = 65$  Ач, Panasonic 105D30  $C_{20} = 90$  Ач и FIAMM 12UMTB160  $C_{20} = 160$  Ач.

Как можно видеть добротности исследованных АБ принимают значения меньше единицы. В среднем для всех представленных АБ добротность равна  $\sim 0,1$ . Это означает, что в таком контуре запасается энергии в 10 раз меньше, чем расходуется. То есть, колебательный контур в виде АБ обладает минимальными резонансными свойствами.

Правомерность вычисления параметров индуктивности и емкости при помощи выражений (2.11) и (2.12) была подтверждена экспериментально. Для этого проводились измерения емкости  $C_0$  нескольких АБ методом сравнения с эталонным конденсатором. Измерительная схема имеет вид рис. 2.10.

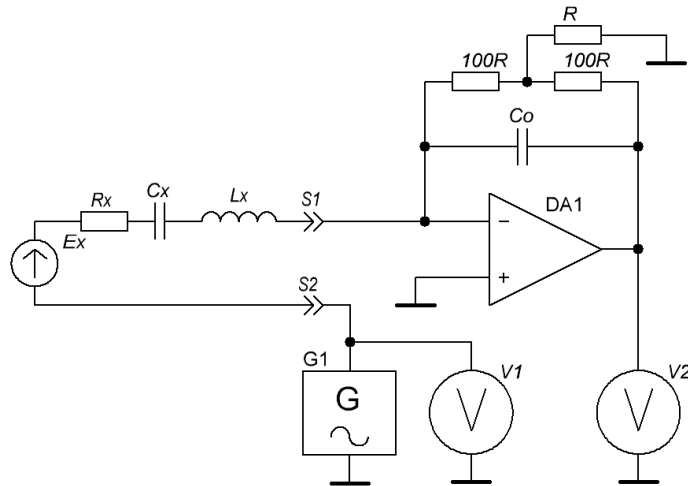


Рис. 2.10. Схема измерения емкости  $C_0$  эквивалентной  $RLC$ -цепи

Измерение емкости эквивалентной схемы АБ с помощью схемы на рис. 2.10 основано на оценке коэффициента усиления измерительной схемы. Напряжение на выходе операционного усилителя DA1 можно выразить как:

$$U_2 = U_1 \frac{X_{C0}}{X_{AB}} = U_1 \frac{\left( 2\pi f L_x - \frac{1}{2\pi f C_x} \right)}{\frac{1}{2\pi f C_0}}, \quad (2.13)$$

где  $X_{C0}$  и  $X_{AB}$  – реактивные сопротивления эталонного конденсатора и АБ соответственно;  $U_1$  и  $U_2$  – напряжения на выводах вольтметров V1 и V2

соответственно;  $f$  – частота генератора  $G1$ ;  $L_X$  и  $C_X$  – индуктивность и емкость соответственно эквивалентной схемы АБ;  $C_0$  – емкость эталонного конденсатора. Предположим, что индуктивность  $L_X = 2,4$  мкГн и емкости  $C_X = 0,35$  Ф (значения вычислены описанным выше методом по реактивному сопротивлению измеренному на никель-металлгидридных аккумуляторах напряжением 1,2 В типа Eneloop HR-4UTGB номинальной емкостью 750 мАч). Согласно выражению (2.13) при уменьшении частоты генератора  $G1$  индуктивная составляющая реактивного сопротивления аккумулятора стремится к нулю. Емкостная составляющая сопротивления аккумулятора, напротив, будет возрастать, так же как и сопротивление эталонного конденсатора. Тогда, учитывая предположительные значения  $L_X$  и  $C_X$  на низкой частоте генератора ( $\sim 0,1$  Гц) индуктивное сопротивление становится пренебрежимо мало ( $\sim 1,5$  мкОм) в сравнении с емкостным ( $\sim 4,6$  Ом). Следовательно, на низких частотах генератора выражение (2.13) можно упростить до выражения:

$$U_2 = U_1 \frac{C_0}{C_X}.$$

Тогда емкость АБ выражается как:

$$C_X = C_0 \frac{U_1}{U_2}. \quad (2.14)$$

Таким образом, зная емкость эталонного конденсатора и измерив напряжения  $U_1$  и  $U_2$  можно вычислить емкость эквивалентной схемы аккумулятора. Значения емкостей эквивалентной схемы аккумулятора полученных описанными выше способами приведены в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Тип АБ	№ АБ	Вычисленная емкость $C_{об}$ , Ф	Измеренная емкость $C_{из}$ , Ф	Абсолютная погрешность $\Delta C$ , Ф	Усредненная абсолютная погрешность $\Delta C_{сред}$ , Ф	Среднеквадратичное отклонение $\sigma_{\Delta C_{сред}}$ , Ф
HR-4UTGB	1	0,27	0,41	0,14	0,06	0,04
HR-4UTGB	2	0,35	0,39	0,04		
HR-4UTGB	3	0,33	0,39	0,06		
HR-4UTGB	4	0,36	0,38	0,02		
HR-4UTGB	5	0,34	0,39	0,05		
HR-4UTGB	6	0,34	0,39	0,05		
HR-4UTGB	7	0,33	0,39	0,07		

Как можно видеть значения, полученные способами, описанными выше, различаются незначительно. Усредненная абсолютная погрешность емкости  $\Delta C_{\text{сред}}$  составила 0,06 Ф при среднеквадратичном отклонении  $\sigma_C = 0,04$  Ф. Таким образом, можно считать, что метод вычисления параметров эквивалентной схемы аккумулятора позволяет оценить их значения с относительной погрешностью вычисления емкости не более 15 %.

#### 2.1.4 Принципы измерения параметров аккумуляторной батареи

Для измерения параметров АБ использовался анализатор электрохимических источников питания АЕА30V [43, 95] (рис. 2.11), разработанный ООО «Фирма «Алекто-Электроникс». Это устройство позволяет за одну операцию измерения получить значения активного  $R_0$ , реактивного  $X$ , комплексного  $Z$  сопротивлений, а также разности фаз  $A$  напряжения тестового сигнала и тока протекающего через исследуемый элемент.



Рис. 2.11. Анализатор электрохимических источников питания АЕА30V

Измерения производятся по четырехпроводной схеме измерения сопротивления (рис. 2.13), на переменном токе возбуждения. Принцип измерения в целом можно описать так. Напряжение тестового сигнала  $U_1$ , поступающего с генератора  $G$ , измеряется вольтметром  $V_1$ . Вольтметр  $V_2$  измеряет падение напряжения  $U_2$  на опорном резисторе  $R_{on}$  [96].



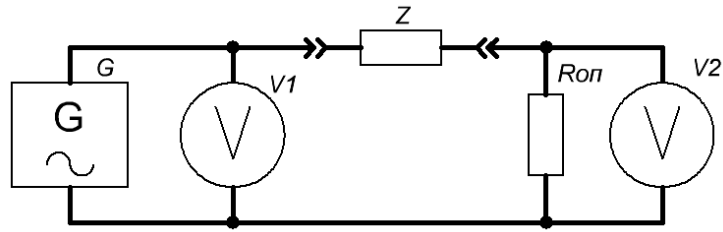


Рис. 2.13. Функциональная схема измерения сопротивления;  $Z$  – исследуемый элемент (аккумуляторная батарея);  $R_{on}$  – опорное сопротивление;  $G$  – генератор тестового сигнала;  $V_1$  и  $V_2$  – вольтметры.

Согласно второму закону Кирхгофа, алгебраическая сумма падений напряжений по замкнутому контуру цепи равна алгебраической сумме ЭДС, действующих вдоль этого же контура. В данном случае ЭДС, действующая вдоль контура  $GZR_{on}$ , создается генератором  $G$  и ее значение  $U_G$  можно выразить:

$$U_G = U_Z + U_{Ron}, \quad (2.15)$$

где  $U_G$  – напряжение тестового сигнала,  $U_G = U_1$ ;  $U_Z$  – падение напряжения на исследуемом элементе;  $U_{Ron}$  – падение напряжения на опорном резисторе,  $U_{Ron} = U_2$ .

По закону Ома, сила тока в цепи обратно пропорциональна её сопротивлению:

$$I = \frac{U_G}{Z + R_{on}}, \quad (2.16)$$

где  $I$  – ток в цепи;  $Z$  – полное сопротивление исследуемого элемента;  $R_{on}$  – сопротивление опорного резистора.

Падение напряжения на исследуемом элементе:

$$U_Z = Z \cdot I. \quad (2.17),$$

Подставим выражения (2.16) и (2.17) в (2.15) и выразим полное сопротивление исследуемого элемента:

$$Z = \frac{R_{on}(U_G - U_{Ron})}{U_{Ron}}. \quad (2.18),$$

То есть для определения полного сопротивления исследуемого элемента  $Z$  достаточно знания текущих показаний вольтметров  $V_1$  и  $V_2$  и номинала опорного резистора  $R_{on}$ .

Для вычисления активной и реактивной составляющих комплексного сопротивления анализатор измеряет разность фаз  $A$  напряжений  $U_1$  и  $U_2$ .

Из известных соотношений полного сопротивления и его реальной и мнимой составляющих можно составить систему уравнений:

$$\begin{cases} \operatorname{tg} A = \frac{X}{R}; \\ Z = \sqrt{X^2 + R^2}, \end{cases} \quad (2.19)$$

где,  $A$  – разность фаз напряжений  $U_1$  и  $U_2$ , в градусах;  $X$  – реактивное сопротивление, Ом;  $R$  – активное сопротивление, Ом.

Решив систему (2.19) получим выражения активной  $R$  и реактивной  $X$  составляющих полного сопротивления  $Z$ :

$$X = Z \sqrt{1 - \frac{1}{\operatorname{tg}^2 A + 1}}; R = \frac{Z}{\sqrt{\operatorname{tg}^2 A + 1}}. \quad (2.20)$$

Согласно основным тригонометрическим тождествам выражения (2.20) можно упростить до выражений:

$$\begin{cases} X = Z \cdot \sin A; \\ R = Z \cdot \cos A \end{cases} \quad (2.21)$$

Выражения (2.21) полностью соответствуют правилам перевода из координат точки полярной системы, каковыми являются значения полного сопротивления  $Z$  и фазы  $A$ , в координаты декартовой системы координат – активная и реактивная составляющие сопротивления  $Z$  [96].

Анализатор позволяет получить значения  $R$ ,  $X$ ,  $Z$  и  $A$  на 4х различных частотах за одно измерение. Частота тестового сигнала варьируется от 20 до 1000 Гц с дискретностью 1Гц.

Диапазон измерения активного  $R$ , реактивного  $X$  и полного  $Z$  сопротивлений находится в пределах от 0,006 до 6 Ом. Погрешность измерения сопротивления  $\pm 5\%$  от измеряемой величины. Диапазон измерения угла  $A$  разности фаз лежит в пределах от  $-90^\circ$  до  $+90^\circ$  с дискретностью  $0,01^\circ$ .

Также анализатор позволяет измерять напряжение разомкнутой цепи. Диапазон измерений лежит в пределах от 0,3 до 30 В. Погрешность измерения напряжения составляет  $\pm 0,5\%$  от измеряемой величины [43].

В анализаторе существует функция сохранения полученных измерений. Данные сохраняются в txt-файле в виде таблицы. Читать файл с данными можно через USB порт, подключив анализатор к персональному компьютеру.

Все вышеупомянутые характеристики подтверждены декларацией о соответствии № РОСС RU.МЕ72.Д00137 и сертификатом соответствия № РОСС RU.МЕ72.Н01021.

### **2.1.5 Исследование активного сопротивления аккумуляторной батареи**

Активное сопротивление  $R$  аккумуляторной батареи определяется омическим сопротивлением активных масс электродов, электролита и соединительных проводников. Именно этот параметр определяет падение напряжения на клеммах батареи при больших токах нагрузки. Кроме того, как уже упоминалось, внутреннее сопротивление АБ имеет зависимость от ее основных характеристик – резервной емкости и емкости 20-часового разряда.

Активное сопротивление по своему определению не зависит от частоты. Изменять свои значения в зависимости от протекающего через них тока – удел реактивных элементов. Однако сопротивление  $R$ , измеренное способом, представленным в разделе 2.1.4, изменяется с ростом частоты. При рассмотрении частотной характеристики активного сопротивления  $R$  видна гиперболическая закономерность (рис. 2.13). На рис. 2.13 приведены значения сопротивления  $R$  батареи Panasonic 55B24 напряжением 12 В, номинальной емкостью  $C_{20} = 45$  Ач. Вероятно, на измеряемое значение  $R$  оказывают влияние реактивные параметры измерительной схемы. В связи с этим предположением и опираясь на свойства модели АБ в виде последовательной  $RLC$ -цепи, для исключения влияния паразитных параметров было решено измерять значение активного сопротивления  $R$  на частоте тестового сигнала равной частоте, при которой значение реактивного сопротивления АБ становится равным нулю. На этой частоте индуктивные и

емкостные составляющие реактивного сопротивления становятся численно равны и принимают противоположные знаки, в результате чего компенсируют друг друга.

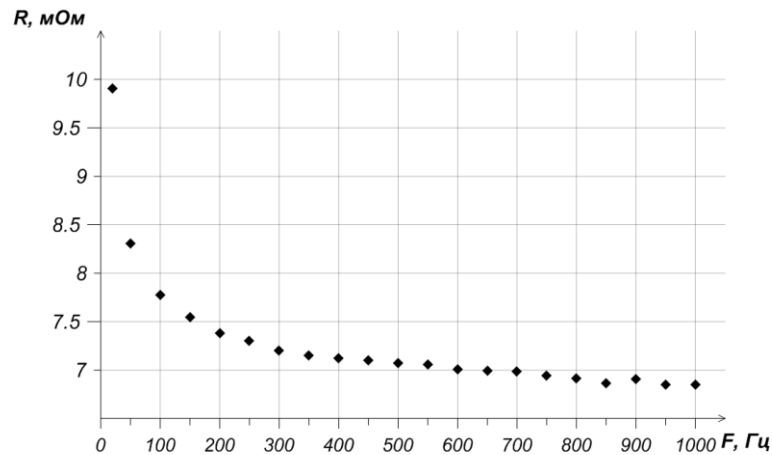


Рис. 2.13. Частотная характеристика активного сопротивления  $R$

Следовательно, на этой частоте тестового сигнала нам удастся измерить чисто активное сопротивление. Значение частоты тестового сигнала на которой реактивное сопротивление становится равным нулю определяется методом описанным в разделе 2.2.4. В дальнейшем за значение активного сопротивления аккумуляторной батареи будем принимать, значение, полученное на частоте соответствующей нулевому значению реактивного сопротивления.

Значение активного сопротивления  $R$  зависит от многих характеристик АБ. К ним относятся степень заряженности или резервная емкость, номинальная емкость 20-тичасового разряда, пусковой ток или ток холодной прокрутки и конструктивные особенности АБ.

Зависимость частотных характеристик активного сопротивления АБ от степени заряженности можно видеть на рис. 2.14. Характеристики получены на батарее Panasonic 55B24 напряжением 12 В, номинальной емкостью  $C_{20} = 45$  Ач, номинальной резервной емкостью  $C_R = 80$  минут.

Минимальное сопротивление  $R = 5,5$  мОм соответствует заряженной батарее. Процесс разряда проходил в режиме измерения резервной емкости согласно ГОСТ Р 53165-2008 [1]. Резервная емкость  $C_R$  – фактическое время разряда (мин.), в течение которого батарея может иметь разрядный ток 25 А до конечного напряжения 1,75 В

на аккумулятор (10,5 В для АБ из 6-ти аккумуляторов). Нужно заметить, что дальнейший разряд, до более низкого напряжения, не рекомендован, так как может привести к необратимым изменениям в АБ (потеря емкости, деформация пластин электродов). Условно такое состояние можно считать минимальной степенью заряженности (0%).

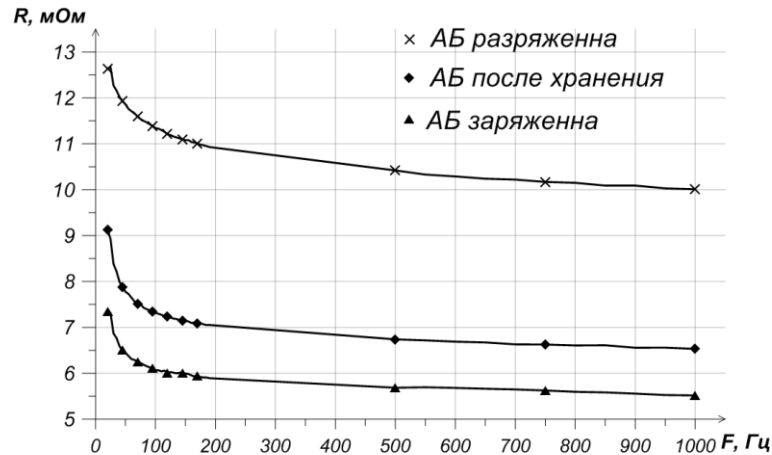


Рис. 2.14. Частотные характеристики активного сопротивления АБ в разных состояниях

Максимальное сопротивление  $R = 10$  мОм (верхняя характеристика) соответствует разряженной аккумуляторной батарее. Заряд проводился реверсивным методом на оборудовании разработанном ООО «Фирма «Алекто-Электроникс». Стабилизированный ток заряда, ступенчато изменялся по достижению предельного напряжения. Напряжение подбирается по типу батареи, таким образом, чтобы не допустить «кипение» электролита (образование водорода и кислорода). Время заряда составляло 16-20 часов до переключения на последнюю ступень подзарядки минимальным током (порядка  $(0,2 \div 0,3)$  А). Батарея Panasonic 55B24 получила заряд  $Q = 55$  Ач при ее номинальной емкости 45 Ач. Такое состояние условно можно считать максимальной степенью заряженности (100%).

Средняя характеристика со значением  $R = 6,5$  мОм соответствует батарее после длительного срока хранения. Батарея Panasonic 55B24 с момента ее выпуска до момента измерения параметров провела на складе 465 суток (1 год 3 месяца и 7 дней). В течение этого времени протекали процессы саморазряда и соответственно

привели к пассивации электродов, изменению химического состава и концентрации веществ электролита. Это отразилось на значении активного сопротивления  $R$ , и оно возросло. Будем называть такие батареи частично разряженными.

Очевидно, что наблюдается обратная зависимость активного сопротивления со степенью заряженности батареи. Резервная емкость  $C_R$  батареи Panasonic 55B24 после хранения составила 43 минут. Учитывая, что номинальная резервная емкость этой батареи  $C_R = 80$  мин. выходит, что через 465 суток хранения в батарее сохранилось 53 % заряда (примерно половина). Из рис. 2.14 видно, что разница сопротивлений заряженной и частично разряженной АБ ( $\sim 1,0$  мОм) меньше разницы сопротивлений частично разряженной и разряженной АБ ( $\sim 4,5$  мОм), что говорит о нелинейной зависимости резервной емкости АБ от ее активного сопротивления. Для сопоставления этих параметров выразим их в процентах относительно значений соответствующих заряженной батареи. Каждое значение сопротивления умножим на -1 и вычтем значение  $R$  разряженной батареи равное 10 мОм. Тем самым мы нормируем значения сопротивлений. Нормированное сопротивление  $R_N$  разряженной батареи стало равным нулю, сопротивление частично разряженной батареи  $R_N = 3,5$  мОм, а сопротивление заряженной батареи  $R_N = 4,5$  мОм. Выразим нормированные сопротивления в процентах, для чего примем сопротивление  $R_N$  заряженной АБ за 100%. Тогда сопротивление частично разряженной батареи составит 77 % (табл. 2.4).

Таблица 2.4

Состояние АБ	Разряженная	Частично разряженная	Заряженная
Резервная емкость $C_R$ , мин.	0	43	80
Относительная резервная емкость $C_R$ (степень заряженности), %.	0	53	100
Активное сопротивление $R$ , мОм	10	6,5	5,5
Нормированное сопротивление $R_N$ , мОм	0	3,5	4,5
Нормированное сопротивление, %	0	77	100

Изменение степени заряженности на 47 % соответствует изменению сопротивления на 23 %, что подтверждает нелинейность зависимости. Если

рассмотреть данные полученные на батареях одного типа мы увидим, что характер зависимости сохраняется. На рис. 2.15 приведен график зависимости активного сопротивления АБ  $R$  от степени заряженности и резервной емкости  $C_R$ . Все значения получены на свинцово-кислотных батареях Panasonic типа 55B24 напряжением 12 В, номинальной емкостью  $C_{20} = 45$  Ач, номинальной резервной емкостью  $C_R = 80$  мин.

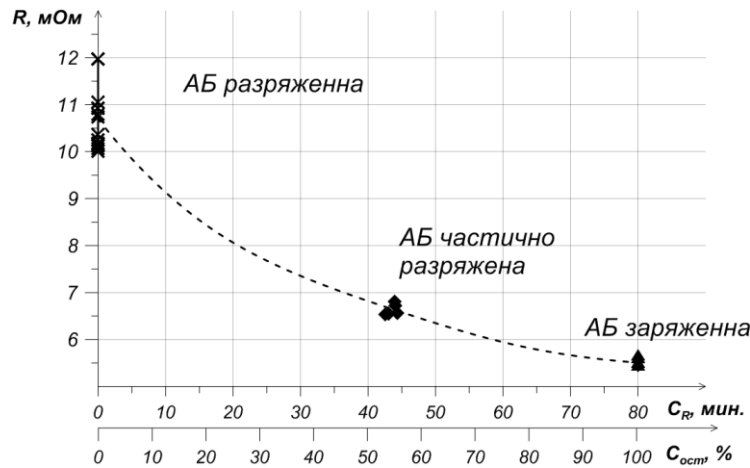


Рис. 2.15. Зависимость сопротивления  $R$  от резервной емкости  $C_R$  (или остаточной емкости  $C_{ост}$ , %)

Как видно из рис. 2.15 АБ в частично разряженном состоянии довольно хорошо сгруппировались. Среднеквадратичное отклонение  $\sigma_R$  для сопротивления составило всего 0,1 мОм, а для значений резервной емкости  $\sigma_{CR} = 0,7$  мин. Такая плотность значений позволяет предположить, что используя значения активного сопротивления можно с высокой степенью точности прогнозировать остаточную  $C_{ост}$  (резервную  $C_R$ ) емкость АБ. Необходимо только определить корреляционную функцию этих двух параметров.

## 2.2 Разработка методов контроля характеристик аккумуляторных батарей

### 2.2.1 Метод контроля по активному сопротивлению

Чтобы полностью охарактеризовать зависимость сопротивления от резервной емкости рассмотрим значения этих параметров, полученные на батареях различных типов. На рис. 2.16 представлен график распределения свинцово-кислотных батарей

напряжением 12 В типа FIAMM 20720 номинальной емкостью  $C_{20} = 7,2$  Ач, типа Panasonic 38B19  $C_{20} = 35$  Ач, Panasonic 55B24  $C_{20} = 45$  Ач, Panasonic 75D23  $C_{20} = 65$  Ач, Panasonic 105D30  $C_{20} = 90$  Ач, FIAMM 12UMTB160  $C_{20} = 160$  Ач.

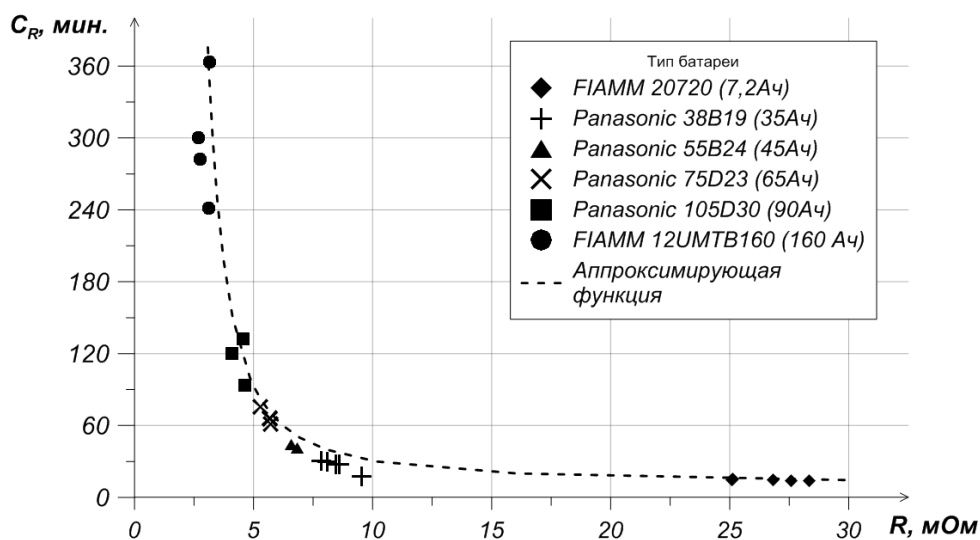


Рис. 2.16. Зависимость резервной емкости  $C_R$  от активного сопротивления  $R$  для АБ различного типа

Согласно рис. 2.16, распределение батарей по этим параметрам явно подчиняется гиперболической функции. Методом наименьших квадратов были подобраны коэффициенты функции, достаточно точно описывающей это распределение. Аппроксимация зависимости проводилась при помощи программы TabCurve 2D v.5.01 разработки © SYSTAT Software Inc. Уравнение функции имеет вид:

$$C_R = \exp\left(\frac{1 - a_1 R}{b_1 R}\right), \quad (2.22)$$

где  $R$  – активное сопротивление АБ;  $C_R$  – резервная емкость;  $a_1 = -0,2$  и  $b_1 = 0,1$  – коэффициенты алгебраического уравнения (2.22).

График функции (2.22) приведен на рис. 2.16 (аппроксимирующая функция). Среднее квадратичное отклонение аппроксимации  $\sigma_{CR} = 9,7$  мин.

Как можно видеть из графика на рис. 2.16 для батарей с внутренним сопротивлением выше  $\sim 10$  МОм кривая функции практически параллельна оси абсцисс ( $R$ , МОм). Для сопротивлений меньше  $\sim 4$  МОм функция практически параллельна оси



ординат ( $C_R$ , мин.). Такие особенности функции затрудняют определение резервной емкости АБ, превышающей 120 мин., по ее активному сопротивлению. Обусловлено это высокой «чувствительностью» функции к изменениям значений сопротивления  $R$  при  $C_R$  больше 120 мин. То есть сравнительно небольшие изменения сопротивления  $R$  сопровождаются довольно большими изменениями резервной емкости  $C_R$ . Это повышает требовательность к точности измерения активного сопротивления. При вычислении значений емкости в диапазоне 120-150 мин. для ошибки  $\Delta C_R = 30$  мин. достаточно ошибки  $\Delta R = 0,37$  мОм, а в диапазоне 240-300 мин. для той же ошибки  $\Delta C_R$  достаточно ошибки  $\Delta R = 0,13$  мОм. Наименее критичным к точности измерения сопротивления  $R$  можно считать диапазон емкостей до 25 минут. В этом диапазоне «чувствительность» функции минимальна и ошибка, допущенная при измерении сопротивления, не приводит к значительным отклонениям значения резервной емкости. Диапазон емкостей 25-100 мин. соответствует относительно равномерному изменению сопротивления и емкости.

Точность вычисления резервной емкости по выражению (2.22) можно оценить по данным в табл. 2.4. Минимальная абсолютная погрешность вычисления  $\Delta C_{Rcped} = 0,5$  мин. ( $\Delta C_{Rcped} = C_{Rизм} - C_{Rвыч}$ ) соответствует батареям малой емкости типа FIAMM 20720 ( $C_{20} = 7,2$  Ач) при СКО  $\sigma_{\Delta Cr} = 0,3$  мин.

Для батарей типа Panasonic 105D30 ( $C_{20} = 90$  Ач) погрешность  $\Delta C_{Rcped}$  составила 15 мин. Значения резервной емкости этого типа батарей приближается к 100 мин. Максимальная абсолютная погрешность, полученная на батареях большой емкости типа FIAMM 12UMTB160 ( $C_{20} = 160$  Ач), составила -75 мин, что подтверждает выше сказанное. СКО резервной емкости для этих батарей  $\sigma_{\Delta Cr} = 102$  мин (табл. 2.5). Промежуточные типы батарей имеют ошибки от 1,4 до 7 минут, что можно считать вполне допустимым.

Нужно заметить, что резервная емкость как характеристика АБ часто вызывает недоумение в связи с ее размерностью в минутах. Такая размерность кажется несвойственной для параметра, называемого емкостью АБ. В связи с этим возникает потребность в переводе значений резервной емкости из размерности (мин.) в

размерность (Ач). Государственный стандарт [1] допускает определение резервной емкости в (Ач). Для этого применяется формула пересчета:

$$\tilde{N}_{RAh} = 0,9 \cdot (C_{Rmin})^{0,9} \quad (2.23)$$

где  $C_{RAh}$  – резервная емкость, выраженная в ампер-часах;  $C_{Rmin}$  – резервная емкость, выраженная в минутах.

Таблица 2.5

Тип АВ	№ АВ	Измеренная резервная емкость $C_{Rизм}$ , мин.	Вычисленная резервная емкость $C_{Rвыч}$ , мин.	Абсолютная погрешность $\Delta C_R$ , мин.	Усредненная абсолютная погрешность $\Delta C_{Rсред}$ , мин.	СКО $\sigma_{\Delta Cr}$ , мин.
20720	12	13,8	13,7	0,1	0,5	0,3
20720	13	15,0	14,1	0,8		
20720	14	14,2	13,7	0,5		
20720	15	14,7	13,9	0,8		
20720	16	14,5	14,2	0,3		
3819	16	30,2	36,1	-5,9	-6,8	2,6
3819	19	27,3	32,5	-5,2		
3819	20	27,3	32,0	-4,7		
3819	21	28,2	35,1	-6,9		
3819	22	17,1	28,4	-11		
5524	52	42,5	43,6	-1,2	-1,4	0,8
5524	53	43,1	44,6	-1,5		
5524	54	43,1	45,7	-2,7		
5524	60	43,4	43,9	-0,5		
5524	62	43,4	44,4	-1,0		
7523	13	67,0	59,1	8,0	6,4	1,8
7523	15	65,2	59,0	6,2		
7523	17	65,4	58,1	7,4		
7523	19	64,0	57,0	7,0		
7523	21	64,2	60,7	3,5		
10530	12	94,4	80,8	14	15	15
10530	13	132	90,8	41		
10530	14	117	112	5,3		
10530	15	78,4	70,8	7,6		
10530	20	120	112	8,7		
12160	1	300	465	-164	-75	102
12160	2	282	416	-134		
12160	98	363	298	65		
12160	99	241	309	-68		

В таком случае, все результаты оценки резервной емкости можно выразить в ампер-часах. Усредненная абсолютная погрешность АБ типа FIAMM 12UMTB160 ( $C_{20} = 160$  Ач)  $\Delta C_{R_{пред}} = 44$  Ач. Для батарей типа Panasonic 105D30 ( $C_{20} = 90$  Ач) погрешность составила 10 Ач. Для батарей типа Panasonic 38B19 ( $C_{20} = 35$  Ач) погрешности оценки составила 5 Ач.

Таким образом, зависимость активного внутреннего сопротивления АБ от ее резервной емкости подтверждена. Уравнение (2.22) позволяет оценивать резервную емкость батарей различных типов по значению их активного сопротивления. Однако на применение этого выражения необходимо наложить ограничения, поскольку погрешность оценки емкости  $C_R$  более 100 мин. значительно возрастает, и степень влияния погрешности измерения активного сопротивления на результат вычисления резервной емкости увеличивается. Согласно табл. 2.5 уравнение (2.22) позволяет вычислять значения резервной емкости через значение активного сопротивления с точностью до 7 мин. (5 Ач) для батарей номинальной емкостью менее 80 Ач. Для батарей емкостью от 80 до 100 Ач значение погрешности возрастает до 15 мин. (10 Ач). Для батарей большей емкости погрешность оценки достигает 75 мин. (44 Ач), что эквивалентно относительной погрешности  $\sim 25\%$ .

Проанализируем зависимость активного сопротивления АБ от номинальной емкости. Согласно [1] номинальная емкость  $C_{20}$  представляет собой электрический заряд в ампер-часах, который способна отдать батарея при разряде током:

$$I_n = \frac{C_{20}}{t_{20}},$$

где  $I_{20}$  – номинальный ток 20-часового разряда;  $t_{20} = 20$  – длительность разряда до конечного напряжения 1,75 В на аккумулятор (10,5 В для АБ из 6-ти аккумуляторов), ч. Однако, в нашем случае номинальная емкость не результат измерения. *Номинальная 20-часовая емкость  $C_{20}$*  – расчетное количество электричества (Ач), которое может отдать полностью заряженная батарея в течение 20 часов разряда номинальным током  $I_n$  до конечного напряжения 1,75 В на аккумулятор. То есть, считается, что новая, качественная, полностью заряженная батарея способна отдать заряд  $C_{20}$  при разряде током  $I_n$ . Часто значение

номинальной емкости тесно связано с конструктивными особенностями батареи. Поэтому в нашем случае номинальная емкость определяет принадлежность к тому или иному типу батарей.

Построим график распределения свинцово-кислотных батарей напряжением 12 В (рис. 2.17).

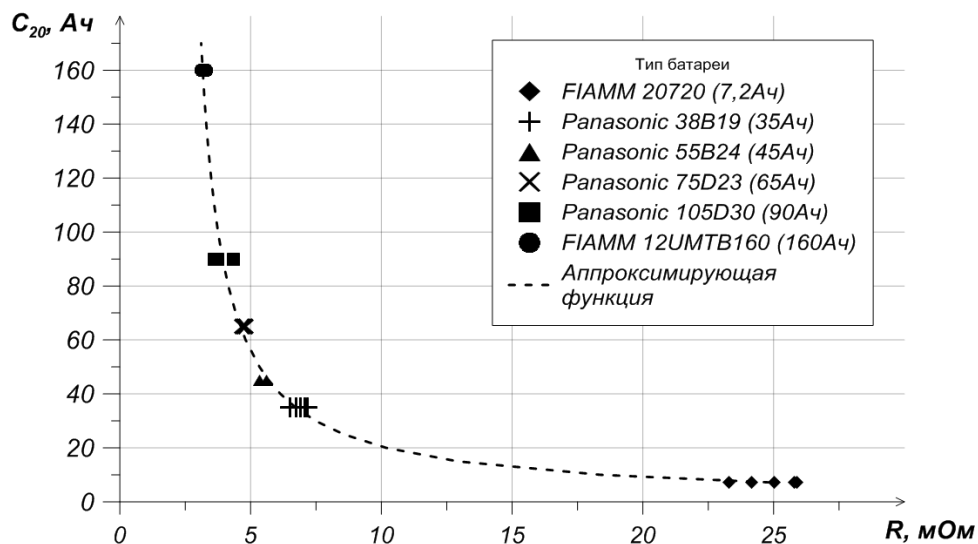


Рис. 2.17. Зависимость номинальной емкости  $C_{20}$  от активного сопротивления  $R$  для АБ разного типа

Значения сопротивления измерены на батареях типа FIAMM 20720 номинальной емкостью  $C_{20} = 7,2$  Ач, типа Panasonic 38B19  $C_{20} = 35$  Ач, Panasonic 55B24  $C_{20} = 45$  Ач, Panasonic 75D23  $C_{20} = 65$  Ач, Panasonic 105D30  $C_{20} = 90$  Ач и FIAMM 12UMTB160  $C_{20} = 160$  Ач в заряженном состоянии. Именно в этом состоянии батарея содержит заряд величиной  $C_{20}$ .

Как можно видеть на рис. 2.17 зависимость номинальной емкости от активного сопротивления имеет гиперболическую зависимость. Методом наименьших квадратов было подобраны коэффициенты уравнения функции достаточно точно описывающего зависимость на рис. 2.17:

$$C_{20} = \frac{b_2}{R - a_2}, \quad (2.24)$$

где  $a_2 = 2,2$ ,  $b_2 = 170$  – коэффициенты алгебраического уравнения (2.24).

График функции (2.24) приведен на рис. 2.17 (аппроксимирующая функция). СКО аппроксимации  $\sigma_{C_{20}} = 8,2$  Ач.

Графики на рис. 2.16 и 2.17 схожи по своему характеру. В диапазоне сопротивлений  $\sim 15-30$  мОм аппроксимирующая функция на рис. 2.17 изменяется медленно. Сравнительно небольшому изменению емкости  $\Delta C_{20} = 10$  Ач (от 5 до 15 Ач) соответствует довольно большое изменение активного сопротивления  $\Delta R = 22,1$  мОм. В диапазоне сопротивлений 2-5 мОм аппроксимирующая функция быстро убывает. Здесь такому же изменению емкости  $\Delta C_{20} = 10$  Ач (от 60 до 70 Ач) соответствует небольшое изменение сопротивления  $\Delta R = 0,4$  мОм. Для емкостей более 100 Ач изменение  $\Delta C_{20} = 10$  Ач (от 100 до 110 Ач) соответствует изменению  $\Delta R = 0,1$  мОм. Таким образом, при вычислении номинальной емкости  $C_{20}$ , превышающей 60 Ач, погрешности, допущенные при измерении сопротивления  $R$ , усиливаются в несколько раз и отражаются на результатах вычисления  $C_{20}$ . Для АБ типа FIAMM 12UMTB160 ( $C_{20} = 160$  Ач) абсолютная погрешность  $\Delta C_{20\text{сред}}$  составило 10 Ач при СКО  $\sigma_{\Delta C_{20}} = 28$  Ач (табл. 2.6). При вычислении емкости  $C_{20}$ , попадающей в диапазон до 15 Ач, погрешности измерения сопротивления  $R$  ослабляются и вносят минимальные ошибки в результат вычисления. Для АБ типа FIAMM 20720 ( $C_{20} = 7,2$  Ач) погрешность  $\Delta C_{20\text{сред}} = 0,01$  Ач, а СКО  $\sigma_{\Delta C_{20}} = 0,3$  Ач (табл. 2.6). В промежуточном диапазоне емкостей 15-60 Ач функция (2.24) изменяется сравнительно равномерно. Результаты вычисления  $C_{20}$  для батарей в этом диапазоне емкостей имеют небольшие значения ошибок. Это подтверждают данные табл. 2.6 для АБ типов Panasonic 38B19 ( $C_{20} = 35$  Ач) и Panasonic 5524 ( $C_{20} = 45$  Ач). Погрешность  $\Delta C_{20\text{сред}}$  для них составляет 1,1 и 0,7 Ач соответственно. А для батарей типа Panasonic 75D23, значение номинальной емкости которых превышает 60 Ач ( $C_{20\_7523} = 65$  Ач), эта погрешность принимает несколько большее значение.  $\Delta C_{20\text{сред}}$  для них составляет 4,341 Ач (табл. 2.6).

Таблица 2.6

Тип АБ	№ АБ	Заявленная номинальная емкость $C_{20}$ , Ач	Вычисленная номинальная емкость $C_{20_{выч}}$ , Ач	Абсолютная погрешность $\Delta C_{20}$ , Ач	Усредненная абсолютная погрешность $\Delta C_{20_{сред}}$ , Ач	СКО $\sigma_{\Delta C_{20}}$ , Ач
20720	12	7,2	6,9	0,3	-0,01	0,3
20720	13	7,2	7,4	-0,2		
20720	14	7,2	6,9	0,3		
20720	15	7,2	7,2	0,01		
20720	16	7,2	7,7	-0,5		
3819	16	35	35	-0,3	1,1	1,7
3819	17	35	33	2,1		
3819	19	35	32	3,0		
3819	21	35	36	-1,0		
3819	22	35	33	1,6		
5524	41	45	47	-2,0	-0,7	1,1
5524	43	45	46	-0,9		
5524	45	45	44	1,0		
5524	53	45	46	-0,6		
5524	60	45	46	-1,2		
7523	12	65	61	3,7	4,3	2,1
7523	17	65	58	7,1		
7523	19	65	59	5,9		
7523	21	65	63	2,2		
7523	24	65	62	2,8		
10530	9	90	98	-7,9	-9,2	9,3
10530	12	90	86	3,9		
10530	14	90	96	-6,4		
10530	20	90	105	-15		
10530	21	90	111	-21		
12160	98	160	150	10	-9,6	28
12160	99	160	189	-29		

Таким образом, подтверждена зависимость номинальной емкости от активного сопротивления батареи. Уравнение (2.24) позволяет прогнозировать номинальную емкость батарей различных типов по значению их активного сопротивления. Однако необходимо учитывать тот факт, что при использовании этого выражения для диагностирования батарей с емкостью превышающей 100 Ач точность определения  $C_{20}$  снижается.

### 2.2.2 Метод контроля по характеристической частоте

В разделе 2.1.3 было упомянуто о характеристиках последовательной  $RLC$ -цепи, в частности о существовании частоты, на которой эта цепь входит в режим резонанса. Как было показано в том же разделе, реальные АБ обладают низкой добротностью, и как следствие их резонансные свойства минимальны. В связи с этим термин «резонансная частота» правильнее будет заменить термином «характеристическая частота». В таком случае, *характеристической частотой* называется значение частоты тестового сигнала, при котором величина реактивного сопротивления становится равной нулю или частота, при которой график частотной зависимости реактивного сопротивления (см. рис. 2.8) пересекает ось абсцисс ( $f$ , Гц).

Согласно теории электротехники резонансом называется такой режим, при котором индуктивное и емкостное сопротивления оказываются равными и компенсируют друг друга [45]. Согласно выше сказанному характеристическая частота характеризует соотношение эквивалентной индуктивности  $L_0$  и емкости  $C_0$  аккумуляторной батареи. Из выражения (2.8) видно, что при равенстве индуктивной и емкостной составляющей реактивного сопротивления, оно становится равным нулю.

Свинцово-кислотная батарея FIAMM 12UMTB160 ( $C_{20} = 160$  Ач) имеет характеристическую частоту  $\sim 100$  Гц (см. рис. 2.8). Батарея типа FIAMM 20720 ( $C_{20} = 7,2$  Ач) № 12 в свою очередь имеет характеристическую частоту  $\sim 700$  Гц (рис. 2.18).

Как можно видеть батареи с разными емкостями имеют разные значения характеристических частот. Типы батарей FIAMM 12UMTB160 и FIAMM 20720 упомянутые выше, являются «крайними» (максимальной и минимальной емкости соответственно) во всей выборке исследуемых батарей. Можно предположить, что батареи с емкостями промежуточных значений (между 7,2 и 160 Ач) обладают промежуточными значениями характеристических частот (между  $\sim 100$  и 700 Гц).

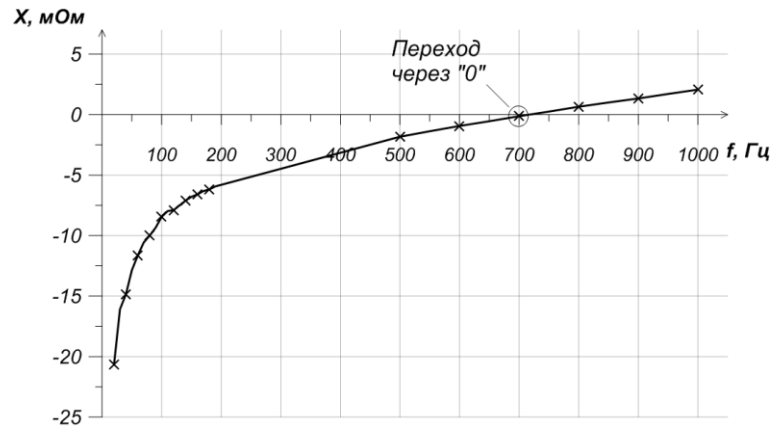


Рис. 2.18. Частотная характеристика реактивного сопротивления АБ типа FIAMM 20720

Рассмотрим график зависимости номинальной емкости  $C_{20}$  от характеристической частоты  $F_C$  свинцово-кислотных АБ напряжением 12 В типа FIAMM 20720  $C_{20} = 7,2$  Ач, Panasonic 38B19  $C_{20} = 35$  Ач, Panasonic 55B24  $C_{20} = 45$  Ач, Panasonic 75D23  $C_{20} = 65$  Ач, Panasonic 105D30  $C_{20} = 90$  Ач и FIAMM 12UMTB160  $C_{20} = 160$  Ач (рис. 2.19).

Значения характеристической частоты измерены на батареях в заряженном состоянии. Именно в этом состоянии батарея содержит заряд максимально близкий к величине  $C_{20}$ . Характеристическая частота вычислялась способом, описанным в разделе 2.2.4. Зависимость на рис. 2.19 подчиняется гиперболической функции.

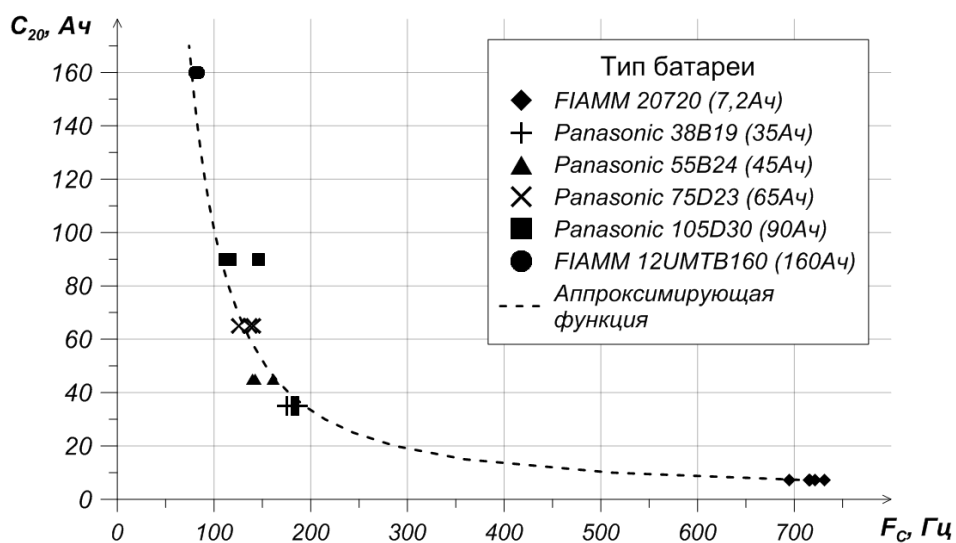


Рис. 2.19. Зависимость номинальной емкости  $C_{20}$  от характеристической частоты  $F_C$  для АБ разного типа



Методом наименьших квадратов получены коэффициенты уравнения достаточно точно описывающего эту зависимость:

$$C_{20} = \left( \frac{1 - a_3 F_C}{b_3 F_C} \right)^2, \quad (2.25)$$

где  $a_3 = -0,002$ ,  $b_3 = 0,001$ . График функции (2.25) приведен на рис. 2.19 (аппроксимирующая функция). СКО аппроксимации  $\sigma_{C_{20}} = 8,3$  Ач.

В диапазоне характеристических частот  $\sim 300-750$  мОм функция (2.25) на рис. 2.19 изменяется медленно. Сравнительно небольшому изменению емкости  $\Delta C_{20} = 10$  Ач (от 10 до 20 Ач) соответствует довольно большое изменение характеристической частоты  $\Delta F_C = 224$  Гц. В диапазоне характеристических частот 50-100 Гц аппроксимирующая функция довольно быстро убывает. Такому же изменению емкости  $\Delta C_{20} = 10$  Ач (от 100 до 110 Ач) соответствует небольшое изменение частоты  $\Delta F_C = 5$  Гц. При вычислении номинальной емкости  $C_{20}$ , превышающей 100 Ач, погрешности, допущенные при вычислении характеристической частоты  $F_C$ , усиливаются в несколько раз и отражаются на результатах вычисления  $C_{20}$ . Для АБ типа FIAMM 12UMTB160 ( $C_{20} = 160$  Ач) абсолютная погрешность  $\Delta C_{20\text{сред}}$  составила 18 Ач при СКО  $\sigma_{\Delta C_{20}} = 7,5$  Ач (табл. 2.7). При вычислении емкости  $C_{20}$ , попадающей в диапазон до 20 Ач, погрешности вычисления частоты  $F_C$  ослабляются и вносят минимальные ошибки в результат вычисления. Для АБ типа FIAMM 20720 ( $C_{20} = 7,2$  Ач) погрешность  $\Delta C_{20\text{сред}} = 0$ , а СКО  $\sigma_{\Delta C_{20}} = 0,1$  Ач (табл. 2.7). В промежуточном диапазоне емкостей 20-100 Ач функция (2.25) изменяется сравнительно равномерно. Однако результаты вычисления  $C_{20}$  для батарей в этом диапазоне емкостей имеют неравномерный характер. Так абсолютная погрешность для АБ типа Panasonic 55B24 ( $C_{20} = 45$  Ач)  $\Delta C_{20\text{сред}} = 7$  Ач при СКО  $\sigma_{\Delta C_{20}} = 7,9$  Ач. В свою очередь погрешность  $\Delta C_{20\text{сред}}$  для батареи типа Panasonic 75D23  $C_{20} = 65$  Ач составила 1 Ач при СКО  $\sigma_{\Delta C_{20}} = 6,1$  Ач (табл. 2.7).

Таблица 2.7

Тип АБ	№ АБ	Заявленная номинальная емкость $C_{20изм}$ , Ач	Вычисленная номинальная емкость $C_{20выч}$ , Ач	Абсолютная погрешность $\Delta C_{20}$ , Ач	Усредненная абсолютная погрешность $\Delta C_{20сред}$ , Ач	СКО $\sigma_{\Delta C_{20}}$ , Ач
20720	12	7,2	7,1	0,1	0,0	0,1
20720	13	7,2	7,4	-0,2		
20720	14	7,2	7,2	0,0		
20720	15	7,2	7,2	0,0		
20720	16	7,2	7,2	0,1		
3819	16	35	37	-2,4	-3,4	1,5
3819	17	35	39	-3,8		
3819	19	35	37	-1,9		
3819	21	35	41	-5,7		
3819	22	35	38	-3,2		
5524	41	45	56	-11	-7,1	7,9
5524	43	45	55	-9,7		
5524	45	45	53	-8,2		
5524	53	45	58	-13		
5524	60	45	38	6,7		
7523	12	65	60	4,9	0,6	6,1
7523	17	65	74	-8,7		
7523	19	65	67	-2,1		
7523	21	65	58	6,7		
7523	24	65	63	2,1		
10530	9	90	85	5,2	9,2	3,4
10530	12	90	77	13		
10530	14	90	83	7,0		
10530	15	90	81	8,9		
10530	20	90	78	12		
12160	98	160	137	23	18	7,5
12160	99	160	147	13		

Погрешность для АБ типа Panasonic 105D30 ( $C_{20} = 90$  Ач)  $\Delta C_{20сред} = 9$  Ач несколько больше, что объясняется близостью к границе емкостей в 100 Ач. СКО  $\sigma_{\Delta C_{20}}$  для этого типа батарей составило 3,4 Ач (табл. 2.7).

Таким образом, уравнение (2.25) позволяет прогнозировать номинальную емкость батарей различных типов по значению их характеристической частоты. Однако необходимо учитывать, что при использовании этого выражения для диагностирования батарей с емкостью превышающей 100 Ач точность определения  $C_{20}$  снижается.

Рассмотрим график зависимости резервной емкости  $C_R$  от характеристической частоты (рис. 2.20). На графике приведены значения свинцово-кислотных АБ напряжением 12 В типа FIAMM 20720  $C_{20} = 7,2$  Ач, Panasonic 38B19  $C_{20} = 35$  Ач, Panasonic 55B24  $C_{20} = 45$  Ач, Panasonic 75D23  $C_{20} = 65$  Ач, Panasonic 105D30  $C_{20} = 90$  Ач и FIAMM 12UMTB160  $C_{20} = 160$  Ач. Характеристическая частота вычислялась способом, описанным в разделе 2.2.4 из данных измеренных на батареях в частично разряженном состоянии.

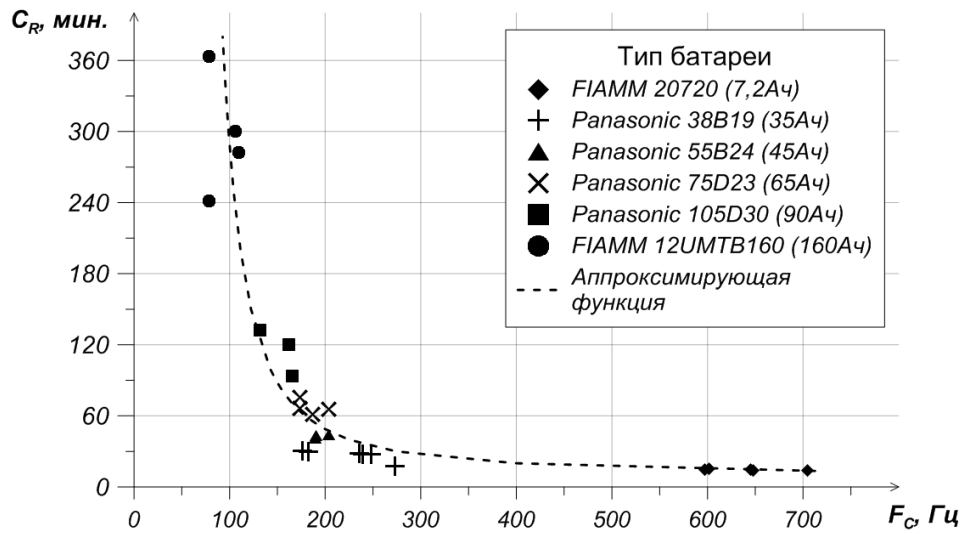


Рис. 2.20. Зависимость резервной емкости  $C_R$  от характеристической частоты  $F_C$  для АБ разного типа

Методом наименьших квадратов получены коэффициенты уравнения, достаточно точно описывающего зависимость:

$$C_R = \exp\left(\frac{1 + a_4 \cdot F_C}{b_4 \cdot F_C}\right), \quad (2.26)$$

где  $a_4 = -0,01$  и  $b_4 = 0,003$  – коэффициенты алгебраического уравнения (2.26).

График функции (2.26) приведен на рис. 2.20. СКО аппроксимации  $\sigma_{C_R} = 27$  мин.

Для АБ с высокой характеристической частотой в диапазоне 300-750 Гц функция (2.26) изменяется медленно с ростом частоты. Изменению емкости  $\Delta C_R = 20$  мин. (от 13 до 33 мин.) соответствует достаточно большое изменение характеристической частоты  $\Delta F_C = 515$  Гц. В диапазоне частот  $F_C$  50-120 Гц аппроксимирующая функция изменяется медленно и такому же изменению емкости

$\Delta C_R = 30$  Ач (от 120 до 150 мин.) соответствует небольшое изменение частоты  $\Delta F_C = 10$  Гц. А значит, при вычислении номинальной емкости  $C_R$ , превышающей 120 мин., погрешность, допущенная при вычислении характеристической частоты  $F_C$ , усилится в несколько раз и отразится на результатах вычисления  $C_R$ .

Так для АБ типа FIAMM 12UMTB160 ( $C_{20} = 160$  Ач,  $C_R \approx 300$  мин.) погрешность вычисления резервной емкости  $\Delta C_{R_{сред}}$  составила -159 мин., (согласно выражению (2.23), соответствует 86 Ач), СКО  $\sigma_{\Delta C_R} = 282$  мин. (табл. 2.8).

Таблица 2.8

Тип АБ	№ АБ	Заявленная номинальная емкость $C_R$ , мин.	Вычисленная номинальная емкость $C_{R_{выч}}$ , мин.	Абсолютная погрешность $\Delta C_R$ , мин.	Усредненная абсолютная погрешность $\Delta C_{R_{сред}}$ , мин.	СКО $\sigma_{\Delta C_R}$ , мин.
20720	12	13,8	13,2	0,6	0,5	0,3
20720	13	15,0	14,4	0,6		
20720	14	14,2	13,8	0,4		
20720	15	14,7	13,8	0,9		
20720	16	14,5	14,5	0,1		
3819	16	30,2	59,2	-29	-12	9,6
3819	19	27,3	34,9	-7,7		
3819	20	27,3	33,1	-5,7		
3819	21	28,2	35,8	-7,6		
3819	22	17,1	29,0	-12		
5524	41	41,4	51,2	-9,8	-12	6,4
5524	43	44,1	57,9	-14		
5524	45	44,1	50,3	-6,2		
5524	53	43,1	50,8	-7,7		
5524	60	43,4	65,5	-22		
7523	12	66,0	60,9	5,2	3,0	13
7523	14	59,0	65,9	-6,9		
7523	16	48,1	62,2	-14		
7523	18	61,2	46,1	15		
7523	20	67,2	51,6	16		
10530	9	93,2	67,1	26	34	11
10530	12	94,4	69,9	24		
10530	14	117	77,9	39		
10530	20	120	70,3	50		
10530	21	111	80,2	31		
12160	1	300	222	79	-159	282
12160	2	282	196	86		
12160	98	363	712	-348		
12160	99	241	695	-453		

Для батарей типов Panasonic 38B19 ( $C_{20} = 35$  Ач) и Panasonic 55B24 ( $C_{20} = 45$  Ач) усредненные абсолютные погрешности оценки резервной емкости составляют 12 мин. или 8 Ач. Столь высокие погрешности для этих типов объясняются довольно высоким среднеквадратическим отклонением аппроксимации зависимости на рис. 2.20  $\sigma_{CR} = 27$  мин.

Таким образом, уравнение (2.26) позволяет прогнозировать номинальную емкость батарей различных типов по значению их характеристической частоты. Однако необходимо учитывать, что при использовании этого выражения для диагностирования батарей с емкостью превышающей 100 мин. погрешность значительно возрастает (относительная погрешность может достигать 50 %).

### **2.2.3 Совместное применение активного сопротивления и характеристической частоты**

Любой метод измерения/вычисления привносит в результат некоторую погрешность. При проведении экспериментальных исследований для повышения достоверности результатов измерения, один и тот же параметр измеряют несколько раз. Это позволяет усреднить погрешности каждого из измерений и получить результат наиболее близкий к реальному значению параметра. Каждый из способов вычисления номинальной и резервной емкостей АБ, описанных выше, основан на использовании только одного параметра измеренного единожды, что может вносить в результат значительную погрешность. Поэтому немаловажным оказывается применение дублирующего (проверочного) вычисления, основанного на параметре, имеющем иное происхождение и иные принципы измерения.

При сопоставлении графиков рис. 2.17 и 2.19 заметно их сходство. При наложении их друг на друга они возможно совпадут. Это говорит о пропорциональной зависимости активного сопротивления от характеристической частоты (или наоборот).

Построим график зависимости активного сопротивления от характеристической частоты свинцово-кислотных АБ (рис. 2.21).

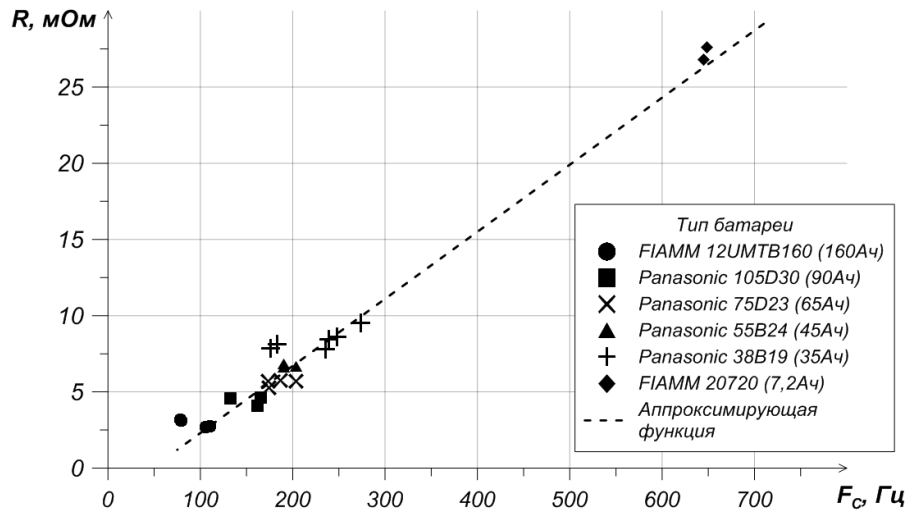


Рис. 2.21. Зависимость активного сопротивления  $R$  от характеристической частоты  $F_C$  частично разряженных батарей

Значения параметров  $R$  и  $F_C$  получены на батареях напряжением 12 В типа FIAMM 20720  $C_{20} = 7,2$  Ач, Panasonic 38B19  $C_{20} = 35$  Ач, Panasonic 55B24  $C_{20} = 45$  Ач, Panasonic 75D23  $C_{20} = 65$  Ач, Panasonic 105D30  $C_{20} = 90$  Ач и FIAMM 12UMTB160  $C_{20} = 160$  Ач.

Во время измерения параметров батареи находились в частично разряженном состоянии (после хранения). Характеристическая частота вычислялась способом, описанным в разделе 2.2.4.

Зависимость на рис. 2.21 может быть описана линейной функцией. Методом наименьших квадратов подберем коэффициенты уравнения:

$$R = a_4 + b_4 F_C, \quad (2.27)$$

где  $a_4 = -2,1$  и  $b_4 = 0,04$  – коэффициенты уравнения (2.27).

График функции (2.27) приведен на рис. 2.21 (аппроксимирующая функция). СКО аппроксимации  $\sigma_R = 1$  мОм.

Полученная зависимость характеризует распределение батарей по прямой в зависимости от их емкости  $C_{20}$ . В левом нижнем углу графика располагаются батареи с наибольшей емкостью (160 Ач), в правом верхнем – батареи с наименьшей емкостью (7,2 Ач). Между крайними значениями расположились батареи с

промежуточными емкостями по убыванию слева на право. График распределения батарей в заряженном состоянии приведен на рис. 2.22.

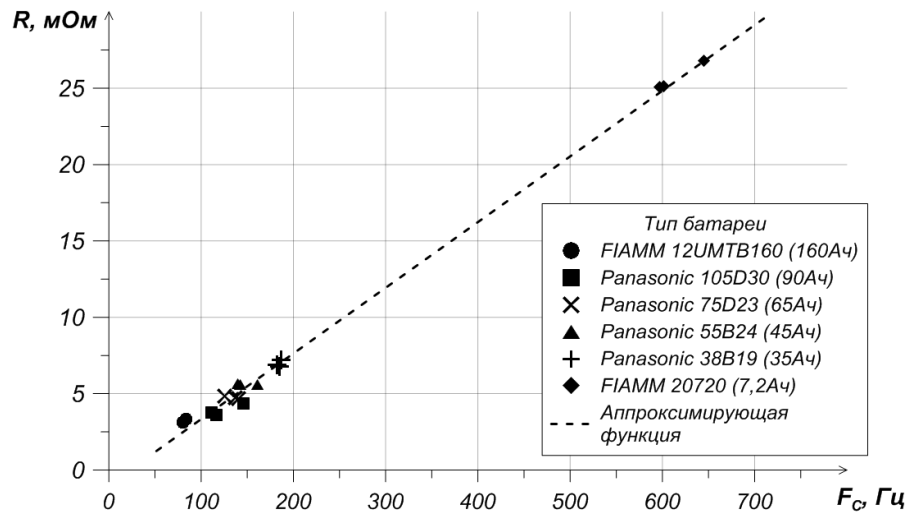


Рис. 2.22. Зависимость активного сопротивления  $R$  от характеристической частоты  $F_C$  заряженных батарей

Методом наименьших квадратов получим значения коэффициентов для линейного уравнения (2.26)  $a_5 = -1$ ,  $b_5 = 0,04$ .

Функция аппроксимирующая это распределение построена пунктирной линией на рис. 2.22. СКО аппроксимации  $\sigma_R = 0,5$  мОм.

Зависимости на рис. 2.21 и 2.22 достаточно точно описываются линейным уравнением (2.27). Графики на обоих рисунках имеют одинаковые по значению углы наклона к оси абсцисс ( $b_4 = b_5 = \operatorname{tg}\alpha = 0,04$ ,  $\alpha = 2,5$  градуса). Однако распределение точек по этим зависимостям различно. На рис. 2.21 (батареи после хранения) основная группа АБ (область слева внизу) находится в диапазоне характеристических частот 75-280 Гц и реактивных сопротивлений 2,5-10 мОм. На (рис. 2.22) (АБ после заряда) та же группа батарей занимает диапазон частот 75-190 Гц и сопротивлений – 2,5-7,5 мОм. В процессе заряда параметры (активное сопротивление и характеристическая частота) батарей типа Panasonic 38B19, 55B24, 75D23 и 105D30 пропорционально уменьшились и области распределения этих типов батарей уплотнились (рис. 2.22). Таким образом, в результате зарядки параметры батарей, вероятно, приняли свои исходные значения, соответствующие новой, исправной и полностью заряженной батарее, а потому однотипные батареи

собрались максимально плотно. На рис. 2.21 мы наблюдаем те же батареи в состоянии различной степени заряженности и с различными значениями параметров  $R$  и  $F_C$ . Это обуславливает несколько большие области распределения каждого из типов и несколько меньшую плотность распределения батарей в этих областях. Таким образом, можно предположить, что батареи в полностью разряженном состоянии либо плотно сгруппируются, подобно заряженным, но в области выше и правее по прямой функции (2.27). Либо с уменьшением степени заряженности разброс батарей будет возрастать с одновременным ростом значений их параметров.

Рассмотрим график распределения батарей в разряженном состоянии (рис. 2.23).

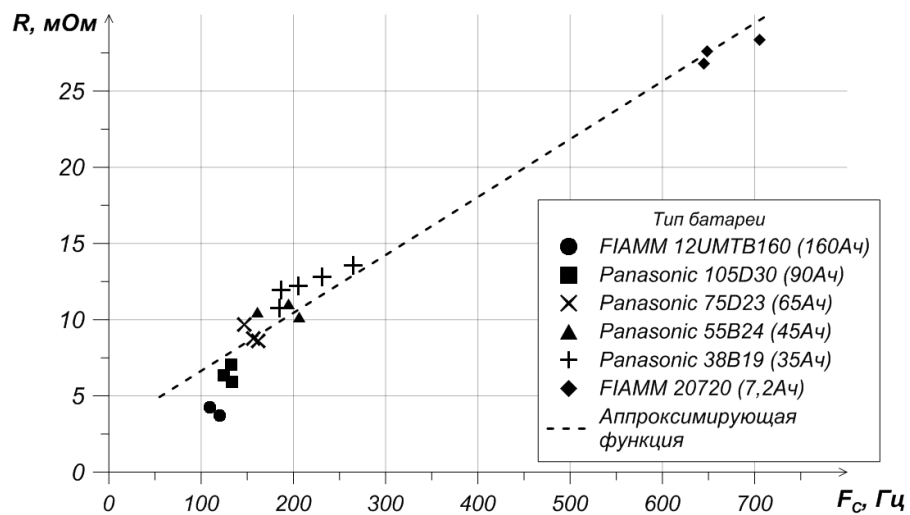


Рис. 2.23. Зависимость активного сопротивления  $R$  от характеристической частоты  $F_C$  разряженных батарей

Методом наименьших квадратов получим значения коэффициентов для линейного уравнения (2.27)  $a_6 = 2,8$ ,  $b_6 = 0,04$ .

Функция аппроксимирующая это распределение построена пунктирной линией на рис. 2.25. СКО аппроксимации  $\sigma_R = 1,3$  мОм.

Угол наклона к оси абсцисс ( $b_6 = \operatorname{tg} \alpha = 0,04$ ,  $\alpha = 2,5$  градуса) также равен по значению углам наклона графиков на рис. 2.21 и 2.22. Отклонение батарей от графика аппроксимирующей функции возросло, о чем свидетельствует относительно высокая статистическая ошибка подбора коэффициентов. Батареи



типов FIAMM 20720 и Panasonic 38B19, 55B24, 75D23, 105D30 сравнительно хорошо описываются прямой функции (2.27). Но батареи типа 12UMTB160 имеют большое отклонение от прямой. Это говорит о том, что параметры батарей в разряженном состоянии (рис. 2.26) изменяются не пропорционально и зависимость должна описываться нелинейной функцией. Вероятно, в процессе разряда протекают нелинейные процессы, начальные их участки (от 100 до ~40% заряда АБ) могут быть аппроксимированы линейной функцией. Это видно на рис. 2.21 и 2.22, где распределения батарей в заряженном и частично разряженном состоянии описываются прямой уравнения (2.27). То есть их параметры  $R$  и  $F_C$  изменяются пропорционально друг другу. Различие заряженных и частично разряженных батарей состоит лишь в разных расстояниях от начала координат до их расположения. Нелинейность этих процессов проявляется при минимальной степени заряженности, особенно сильно для батарей большой емкости. Здесь изменение параметров  $R$  и  $F_C$  уже не пропорционально.

На приведенных выше рис. 2.21 - 2.23 видно, что батареи не ложатся ровно на прямой они занимают области близ нее. Проекция этих областей на оси координат могут перекрывать друг друга. Так, например, на рис. 2.21 проекция области распределения батарей типа Panasonic 3819 на ось характеристической частоты полностью перекрывает проекции батарей типа Panasonic 55B24 и 75D23. В таком случае, при попытке определения номинальной емкости АБ через характеристическую частоту для части батарей типа Panasonic 38B19 будут вычислены завышенные значения, свойственные батареям типа Panasonic 55B24 и 75D23. Здесь оказывается очень важным наличие активного сопротивления в качестве диагностического параметра. Как можно видеть проекции областей на ось сопротивления практически не перекрываются. Это значит, что номинальная емкость для батареи типа Panasonic 38B19 через значение сопротивления будет вычислена однозначно.

В свою очередь на рис. 2.22 область распределения батарей типа Panasonic 105D30 «обнимает» область батарей типа 75D23. В этом случае вычисление номинальной емкости батарей типа Panasonic 105D30 через сопротивление  $R$  ее

значение может принимать заниженные значения свойственные батареям типа 75D23.

Поэтому для достоверного вычисления номинальной емкости батарей необходимо использовать оба описанных выше параметра (активное сопротивление и характеристическую частоту). Один из параметров в результате вычисления может давать неоднозначное значение. Это происходит в силу погрешностей вносимых при измерении и вследствие несовершенства функций, описывающих зависимость номинальной емкости от этого параметра. Вычисление емкости через второй параметр и усреднение двух вычисленных значений емкости приводит к «оттягиванию» результирующего значения от ошибочного в некоторой степени значения, полученного при использовании первого параметра.

Рассмотрим средние ошибки вычисления номинальной емкости всех исследуемых батарей. Усредненная абсолютная погрешность вычисления через значения резонансной частоты  $\Delta C_{20\text{сред}F} = 0,9$  Ач (табл. 2.9).

Для значений  $C_{20}$  вычисленных через значения активного сопротивления погрешность  $\Delta C_{20\text{сред}R}$  составила -0,8 Ач. Так как одно из значений погрешности принимает отрицательное значение при вычислении среднего значения емкости из двух предварительно вычисленных, эти погрешности компенсируют друг друга. Это заметно в табл. 2.10.

Вычисление номинальной емкости через два параметра и вычисление среднего арифметического из двух вычисленных емкостей:

$$C_{20\text{ср.ар}} = \frac{C_{20\text{выч}F} + C_{20\text{выч}R}}{2}, \quad (2.28)$$

позволяет оценить значение номинальной емкости со абсолютной погрешностью  $\Delta C_{20\text{сред.ар}} = 0,1$  Ач (табл. 2.10). Это значение меньше значений абсолютных погрешностей полученных при вычислении номинальной емкости по одному параметру почти в 10 раз. СКО  $\sigma_{\Delta C_{20\text{ср.ар}}} = 5,8$  Ач.

Таблица 2.9

Тип АБ	Заявленная номинальная емкость $C_{20}$ , Ач	Вычисленная через $F_C$ номинальная емкость $C_{20вычF}$ , Ач	Абсолютная погрешность $\Delta C_{20вычF}$ , Ач	Относительная погрешность $\Delta C_{20ср}$ , %	Вычисленная через R номинальная емкость $C_{20вычR}$ , Ач	Абсолютная погрешность $\Delta C_{20вычR}$ , Ач	Относительная погрешность $\Delta C_{20ср}$ , %
20720	7,2	7,1	0,1	1%	6,9	0,3	4%
20720	7,2	7,4	-0,2	3%	7,4	-0,2	3%
20720	7,2	7,2	0,0	0%	6,9	0,3	4%
20720	7,2	7,2	0,0	0%	7,2	0,0	0%
20720	7,2	7,2	0,4	6%	7,7	-0,5	7%
3819	35	37	-2	7%	35	0	1%
3819	35	39	-4	11%	33	2	6%
3819	35	39	-2	5%	33	3	9%
3819	35	41	-6	16%	36	-1	3%
3819	35	38	-3	9%	33	2	5%
5524	45	56	-11	24%	47	-2	4%
5524	45	55	-10	22%	46	-1	2%
5524	45	53	-8	18%	44	1	2%
5524	45	58	-13	29%	46	-1	1%
5524	45	38	7	15%	46	-1	3%
7523	65	60	5	8%	61	4	6%
7523	65	74	-9	13%	58	7	11%
7523	65	67	-2	3%	59	6	9%
7523	65	58	7	10%	63	2	3%
7523	65	63	2	3%	62	3	4%
10530	90	85	5	6%	98	-8	9%
10530	90	77	13	14%	86	4	4%
10530	90	83	7	8%	96	-6	7%
10530	90	78	12	13%	105	-15	17%
10530	90	73	16	18%	111	-21	23%
12160	160	136	23	14%	150	10	6%
12160	160	147	13	8%	189	-29	18%
Усредненная абсолютная погрешность $\Delta C_{20\text{Сред}}$ , Ач			1		$\Delta C_{20R\text{Сред}}$ , Ач	-1	
СКО $\sigma_{\Delta C_{20F}}$ , Ач			10		$\sigma_{\Delta C_{20R}}$ , Ач	6,8	

Таблица 2.10

Тип АБ	№ АБ	Заявленная номинальная емкость $C_{20}$ , Ач	Значение емкостей вычисленных по формуле (2.27) $C_{20cp}$ , Ач	Абсолютная погрешность $\Delta C_{20cp}$ , Ач	Относительная погрешность $\Delta C_{20cp}$ , %
20720	12	7,2	7,0	0,2	3%
20720	13	7,2	7,4	-0,2	3%
20720	14	7,2	7,1	0,1	1%
20720	15	7,2	7,2	0,0	0%
20720	16	7,2	7,4	-0,2	3%
3819	16	35	36	-1	4%
3819	17	35	36	-1	2%
3819	19	35	34	1	2%
3819	21	35	38	-3	9%
3819	22	35	36	-1	2%
5524	41	45	50	-5	12%
5524	43	45	50	-5	12%
5524	45	45	49	-4	8%
5524	53	45	50	-5	12%
5524	60	45	42	3	6%
7523	12	65	61	4,	7%
7523	17	65	66	-1	1%
7523	19	65	63	2	3%
7523	21	65	61	4	7%
7523	24	65	63	3	4%
10530	9	90	91	-1	1%
10530	12	90	81	9	10%
10530	14	90	90	0	0%
10530	20	90	91	-1	2%
10530	21	90	92	-2	3%
12160	98	160	143	17	11%
12160	99	160	168	-8	5%
Усредненная абсолютная погрешность $\Delta C_{20cp,ap}$ , Ач				0,1	
СКО $\sigma_{\Delta C_{20cp,ap}}$ , Ач				5,8	

На основании данных приведенных в табл. 2.9 и 2.10 можно говорить о снижении относительной погрешности оценки емкости при совместном использовании двух параметров (до 12 %) (активного сопротивления и характеристической частоты) в сравнении с относительной погрешностью (до 29 %) вычисление емкости по одному параметру.

Таким образом, согласно всему вышесказанному, распределение батарей по двум параметрам (активному сопротивлению и характеристической частоте) с высокой степенью точности описывается линейной функцией (2.28). С изменением степени заряженности батарей их параметры изменяются пропорционально. Это отражают рис. 2.21 и 2.22, где видно как области распределения батарей разных типов «перемещаются» по прямой функции (2.27). Однако пропорциональное изменение параметров наблюдается не на всем диапазоне степеней заряженности, а лишь в пределах от 100 до ~40%. При степени заряженности ниже ~40% параметры АБ изменяются не пропорционально.

Поскольку проекции областей распределения некоторых типов батарей на оси координат перекрывают друг друга, для достоверного вычисления номинальной емкости АБ желательно использовать дополнительные параметры. Такими параметрами являются активное сопротивление и характеристическая частота. Наиболее точный результат дает вычисление среднего арифметического номинальных емкостей (2.28), полученных через каждый из параметров по отдельности.

#### **2.2.4 Метод вычисления характеристической частоты**

Согласно разделу 2.1.1 аккумуляторная батарея с высокой степенью точности может быть описана эквивалентной схемой последовательной *RLC*-цепи (см. рис. 2.6) и соответствующее ей уравнение операторного сопротивления (2.6). Там же была показана высокая степень корреляции ( $\rho = 0,99$ ) частотных характеристик реактивного сопротивления реальной АБ и ее модели в виде последовательной *RLC*-цепи.

Для измерения характеристической частоты АБ желательно провести множество измерений реактивного сопротивления на полосе частот, где вероятно находится его переход через ноль, и выбрать частоту, на которой сопротивление принимает значение максимально близко к нулю.

Другой способ – проводить измерения на нескольких частотах равномерно распределенных в диапазоне частот, с последующей интерполяцией участка

частотной характеристики реактивного сопротивления, на котором произошла смена его знака на противоположный. Интерполяционной функцией при этом может выступать выражение реактивного сопротивления (2.8). Выполним в выражение (2.8) замену  $\omega = 2\pi f$  :

$$X(f) = 2\pi f L_0 - \frac{1}{2\pi f C_0}. \quad (2.29)$$

Выражение (2.29) можно представить в виде:

$$X(f) = bf + c \frac{1}{f}, \quad (2.30)$$

где  $b = 2\pi L_0$ ;  $c = -\frac{1}{2\pi C_0}$  – коэффициенты уравнения (2.30).

Теперь имея значения реактивного сопротивления  $X$  и частоты  $f$ , на которой оно измерено, методом наименьших квадратов можно подобрать значения коэффициентов  $b$  и  $c$  [93, 94].

Попытки аппроксимировать частотные зависимости реактивного сопротивления батарей методом наименьших квадратов привели к неоднозначным результатам. В результате подбора коэффициентов уравнения (2.30) имеющиеся частотные характеристики не вполне описывались полученной функцией. Например, частотная характеристика реактивного сопротивления (сплошная линия) свинцово-кислотной батареи типа Panasonic 75D23 с порядковым номером 12 и график аппроксимирующей ее функции (2.32) (пунктирная линия) приведены на рис. 2.24. СКО аппроксимации функции на рис. 2.24  $\sigma_R = 0,3$  мОм. Несмотря на столь малое СКО аппроксимации, аппроксимирующая функция заметно расходится с реальной характеристикой. Это заметно на участке пересечения графиков с осью частоты. Если при определении по графику реальной функции характеристическая частота батареи составляет  $\sim 170$  Гц, то при определении по аппроксимирующей функции этот параметр составит  $\sim 140$  Гц. Погрешность в вычислении характеристической частоты АБ на 30 Гц может привести к куда более значительным погрешностям при вычислении номинальной емкости.

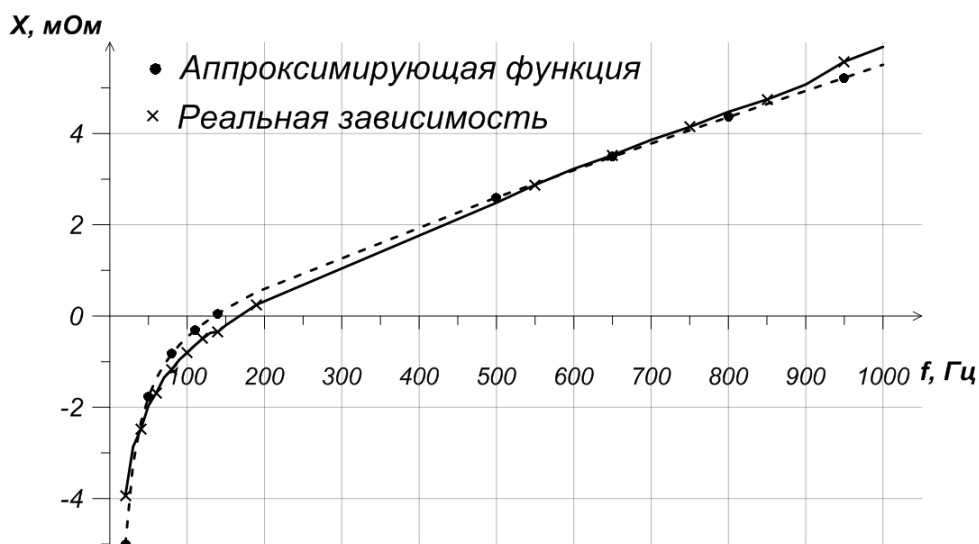


Рис. 2.24. Частотная характеристика реактивного сопротивления и график аппроксимирующей ее функции (2.30)

Аппроксимирующая функция на рис. 2.24 все же близка по форме к реальной характеристике. Увеличим «степень свободы» функции (2.30) добавив еще один коэффициент  $a$ :

$$X(f) = a + bf + c \frac{1}{f}, \quad (2.31)$$

при подборе коэффициентов должно описать реальную характеристику реактивного сопротивления более достоверно. Введение коэффициента  $a$  в уравнение (2.30) при аппроксимации позволяет перемещать график ее функции вдоль оси реактивного сопротивления  $X$ . Рассмотрим графики реальной зависимости той же батареи типа Panasonic 7523 и аппроксимирующей ее функции (2.31) (рис. 2.25).

СКО аппроксимации  $\sigma_R = 0,1$  мОм. Это в 3 раза меньшее значение СКО аппроксимации, чем в случае с функцией (2.31). При рассмотрении графиков на рис. 2.25, найти отличия практически не удастся. Оба графика пересекают ось частоты практически в одной точке.

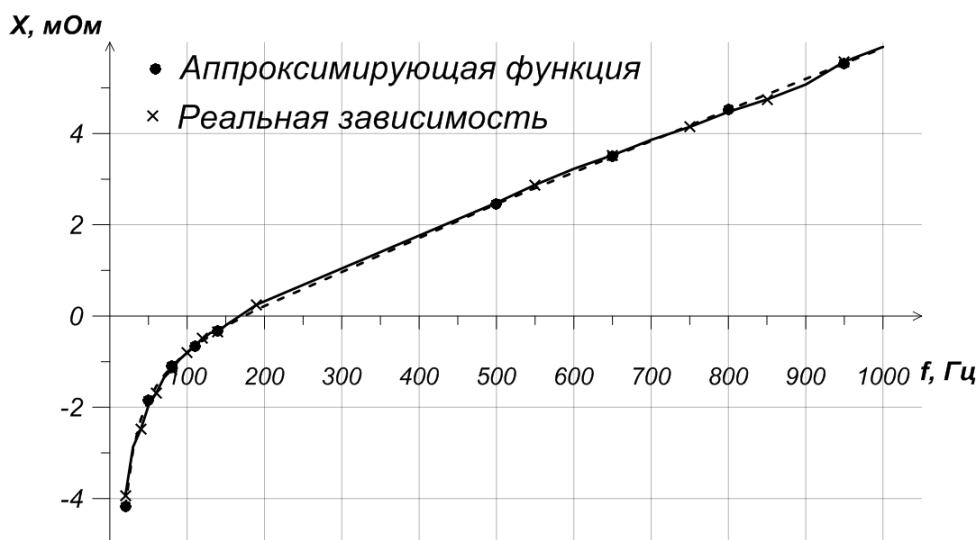


Рис. 2.25. Частотная характеристика реактивного сопротивления (сплошная) и график аппроксимирующей (пунктирная линия) функции (2.31)

С точки зрения математики корень уравнения (2.31) – есть значение аргумента  $f$ , которое удовлетворяет уравнению:

$$0 = a + bf + c \frac{1}{f}, \quad (2.32)$$

где  $a$ ,  $b$  и  $c$  – коэффициенты уравнения (2.31).

В нашем случае аргумент  $f$  – значение характеристической частоты АБ. То есть вычисление значения характеристической частоты сводится к вычислению корня уравнения (2.32).

Умножив обе части уравнения (2.32) на  $f$  получим квадратное уравнение

$$0 = bf^2 + af + c,$$

которое может иметь два корня:

$$f_{1,2} = \frac{-a \pm \sqrt{a^2 + 4bc}}{2b}, \quad (2.33)$$

где  $a$ ,  $b$  и  $c$  – коэффициенты, подобранные при аппроксимации реальной частотной характеристики реактивного сопротивления  $X$  уравнением (2.31).

Значение характеристической частоты содержит только один из возможных корней (2.33). Так корни, вычисленные для частотной характеристики



сопротивления  $X$  батареи типа Panasonic 75D23 (рис. 2.25) принимают значения  $f_1 = 173$  и  $f_2 = 0,003$ . Очевидно, что характеристическая частота указанной батареи не может принимать значение корня  $f_2$ . А вот корень  $f_1$  наглядно подтверждается рис. 2.25. Именно в районе частоты  $\sim 170$  Гц значение реактивного сопротивления принимает нулевое значение.

Очевидно, что значения коэффициентов уравнения (2.31) зависит от количества значений сопротивления  $X$  и соответствующих частот тестового сигнала. Указанные коэффициенты были подобраны по 46 точкам частотной зависимости реактивного сопротивления. В связи с этим СКО аппроксимации составило всего 0,1 мОм. Соответственно значение характеристической частоты  $F_C = 173$  Гц можно считать достаточно точным. Но не каждый анализатор батарей позволяет в короткие сроки и с минимальными трудозатратами получать такое количество измерений. Так, например, анализатор электрохимических источников питания АЕА30V позволяет за одну операцию измерения получить значения параметров АБ соответствующие четырем частотам тестового сигнала.

Оценим отклонение значения характеристической частоты при сокращении числа опорных точек аппроксимации до 10 и 4. В табл. 2.12 приведены данные, полученные при обработке параметров батарей типа Panasonic 75D23.

Таблица 2.12

№ АБ	Частота $F_C$ , вычисленная по 46 точкам $F_{C_{46}}$ , Гц	Частота $F_C$ , вычисленная по 10 точкам $F_{C_{10}}$ , Гц	Частота $F_C$ , вычисленная по 4 точкам $F_{C_4}$ , Гц	Абсолютная погрешность $\Delta F_{C_{10}} = F_{C_{46}} - F_{C_{10}}$ , Гц	Абсолютная погрешность $\Delta F_{C_4} = F_{C_{46}} - F_{C_4}$ , Гц
13	169	169	170	0	2
14	167	166	167	1	1
15	167	169	172	1	4
16	172	170	168	2	4
17	204	203	201	1	3
18	201	200	203	1	2
19	188	184	184	4	0
20	189	189	187	0	3
Усредненная абсолютная погрешность $\Delta F_C$ , Гц				1	2
СКО $\sigma_{\Delta F_C}$ , Гц				1	1

Согласно табл. 2.12 максимальное отклонение значения характеристической частоты при аппроксимации по 10 и 4 точкам не превышает 4 Гц в обоих случаях. Усредненные погрешности несколько меньше и составляют  $\Delta F_{C_{10}} = 1$  Гц и  $\Delta F_{C_4} = 2$  Гц при вычислении частоты по 10 и 4 точкам соответственно. Здесь просматривается тенденция на увеличение погрешности при уменьшении числа измерений. СКО  $\sigma_{\Delta F_{C_{10}}} = 1$  Гц и  $\sigma_{\Delta F_{C_4}} = 1$  Гц для 10 и 4 точек соответственно (табл. 2.12).

Приведенный метод вычисления параметра характеристической частоты позволяет получить его значение с высокой точностью. Метод позволяет производить вычисление частоты, имея всего несколько значений реактивного сопротивления, полученных на частотах тестового сигнала равномерно распределенных по диапазону 20-1000 Гц. Минимальное количество значений сопротивления  $X$  равно 4 и обусловлено числом подбираемых коэффициентов. Погрешность вычисления характеристической частоты при сокращении числа измерений до минимального числа не превышает 4 Гц.

Коэффициент  $a$  уравнения (2.31), как упоминалось выше, позволяет аппроксимирующей функции перемещаться вдоль оси сопротивления  $X$ . Если в каноническом уравнении реактивного сопротивления (2.30) этот коэффициент отсутствует (то есть  $a = 0$ ), то в уравнение (2.31) его значение должно говорить о некотором отклонении от канонической функции вдоль оси сопротивления  $X$ . Иными словами коэффициент  $a$  – это ошибка  $\Delta X_{err}$  измерения реактивного сопротивления аккумуляторной батареи. Поскольку эта ошибка сохраняет свое значение в измерениях на всех частотах диапазона 20-1000 Гц, то она имеет аддитивный характер.

Дальнейшие исследования показали, что ошибка измерения реактивного сопротивления  $\Delta X_{err}$  принимает различные значения при измерениях на разных батареях (табл. 2.13).

Так максимальные значения ошибки  $\Delta X_{err}$  получены на батареях малой емкости типа FIAMM 20720 ( $C_{20} = 7,2$  Ач). Среднее ее значение составило -5,7 мОм, стандартное отклонение  $S_{\Delta X_{err}_{cp}} = 0,5$  мОм.

Таблица 2.13

Тип АБ	№ АБ	Абсолютная погрешность измерения реактивного сопротивления $\Delta X_{err}$ , мОм	Усредненная абсолютная погрешность измерения реактивного сопротивления $\Delta X_{err\_cp}$ , мОм	СКО $\sigma_{\Delta X_{err\_cp}}$ , мОм
20720	12	6,4	5,7	0,5
20720	13	5,7		
20720	14	6,0		
20720	15	5,5		
20720	16	5,0		
3819	16	0,7	0,9	0,1
3819	17	0,8		
3819	19	1,0		
3819	20	0,9		
3819	21	0,9		
5524	41	0,9	0,8	0,1
5524	43	0,7		
5524	45	0,7		
5524	53	0,8		
5524	60	0,8		
7523	12	0,8	0,7	0
7523	14	0,7		
7523	16	0,7		
7523	18	0,7		
7523	20	0,7		
10530	9	0,7	0,6	0,1
10530	12	0,7		
10530	14	0,5		
10530	20	0,6		
10530	21	0,5		
12160	1	0,4	0,3	0,1
12160	2	0,4		
12160	98	0,2		
12160	99	0,2		

Минимальные погрешности измерения получены на батареях максимальной емкости типа FIAMM 12UMTB160 ( $C_{20} = 160$  Ач). Усредненные погрешности для этого типа АБ составили 0,3 мОм, СКО  $\sigma_{\Delta X_{err\_cp}} = 0,1$  мОм. При измерении реактивного сопротивления промежуточных типов батарей усредненные погрешности  $\Delta X_{err}$  принимают значения от  $\sim 0,9$  до  $\sim 0,6$  мОм с шагом примерно 0,1

мОм. Выходит погрешность  $\Delta X_{err}$  от исходного нулевого значения коэффициента  $a$  уравнения (2.31) тем выше, чем ниже значение номинальной емкости  $C_{20}$ . Вероятно, эта зависимость величины  $\Delta X_{err}$  от типа (емкости  $C_{20}$ ) батарей связана с влиянием некоторых паразитных реактивных параметров обусловленных конструкцией батареи, поскольку каждый тип АБ имеет собственные массогабаритные характеристики, размеры и эффективные площади электродов и свойства электрохимической системы.

### **2.2.5 Сравнение существующих методов оценки эксплуатационных характеристик аккумуляторных батарей с предложенным методом**

В настоящее время, с ростом числа устройств и систем, использующих в качестве источника питания АБ, возрастает потребность оперативной и достоверной оценки остаточной емкости АБ. На сегодня известны и описаны несколько методов:

1. Измерение времени разряда АБ;
2. Измерение напряжения АБ под нагрузкой;
3. Регистрация отклика АБ на импульсы тока;
4. Измерение импеданса;

Все перечисленные методы можно разделить на расходующие и не расходующие (или расходующие незначительно) измеряемую величину. К первым относятся методы № 1 и 2, а ко вторым – методы 3 и 4.

Нужно заметить, что метод №1 определен государственным стандартом (для каждого типа АБ конкретный, например, ГОСТ Р 53165-2008 «Батареи аккумуляторные свинцовые стартерные для автотракторной техники. Общие технические условия» [1]) и является образцовым способом измерения данной физической величины. Это подтверждается наличием всех атрибутов метода измерения (введены термины, определения и единицы измерения физической величины «емкость») [64].

*Измерение времени разряда АБ* производится при номинальной постоянной нагрузке. Такой метод измерения емкости является косвенным, так как реализуется он путем измерения двух других физических величин – тока разряда и времени, за

которое АБ разрядится до минимально-допустимого напряжения. Путем умножения величины разрядного тока на время разряда получают значение емкости в ампер-часах (Ач).

Устройства, реализующие данный способ приведены на рис. 2.26.



Рис. 2.26. а) Устройство измерения емкости АБ (согласно ГОСТ Р 53165-2008) (производство компании «АВАК» (Украина)); б) устройство для разряда и измерения параметров свинцово-кислотных АБ (производство ООО «Мегарон» (Россия))

Положительными качествами этого метода являются то, что получаемые таким способом значения емкости отражают физический смысл емкости АБ; этот метод реализует рекомендации государственных стандартов и являются образцовыми; вне зависимости от текущего состояния АБ, параметров окружающей среды, конечного напряжения и тока разряда, данным способом можно определить емкость любой АБ.

В качестве отрицательных качеств этого способа можно назвать большое время измерения (для некоторых типов аккумуляторов – до нескольких суток); при массовом производстве возможен только выборочный контроль из-за длительности процесса измерения; при таком методе измерения емкости АБ практически полностью разряжается, что не благоприятно сказывается на ресурсе работы АБ. По той же причине предлагаемый метод не пригоден для гальванических элементов [64].

*Измерение напряжения под нагрузкой* позволяет оценить емкость АБ косвенным образом, а именно с помощью тестовой нагрузки измеряется напряжение

разомкнутой цепи (без нагрузки)  $E$  и напряжение под нагрузкой  $U_n$ . Кроме того необходимо знать максимальное значение ЭДС  $E_{max}$  и минимальное допустимое напряжение для АБ этого типа [41]. По этим параметрам вычисляется коэффициент степени заряженности по формуле:

$$K = \frac{E_{max} - E}{U_n - U_{min}}$$

Значение емкости АБ  $Q$  вычисляется как значение функции  $Q = f(K)$ , где функция  $f(K)$  определяет тип электрохимической системы.

Устройства, реализующие данный способ приведены на рис. 2.27.



Рис. 2.27. а) Вилка нагрузочная ВНА 200-12 (производство Группы «Пауэр Интернешнл» (Россия)); б) батарейный тестер ES-700 (производство Фирмы «Electronic Specialties» (США))

Основные положительные качества метода заключаются в простоте реализации (требуется только вольтметр и нагрузочное сопротивление). Для оценки характеристик АБ требуется малое время. Оборудование для реализации такого метода обладает низкими массогабаритными показателями.

К отрицательным качествам метода можно отнести большие энергетические затраты, так как АБ нагружается на очень малое нагрузочное сопротивление. Этот метод применим для оценки только полностью заряженных АБ, так как проверка частично разряженной АБ может привести к разряду до недопустимо низкого напряжения и, как следствие, выводу АБ из строя [64]. Время измерения напряжения под нагрузкой не регламентировано и определяется оператором

измерительного оборудования, в результате чего параметр  $U_n$  может принимать различные значения на одной и той же АБ, находящейся в том же состоянии. Показания измерительного оборудования зависят от технического состояния элементов коммутации (проводов, зажимов). Кроме того, этот метод сложно использовать для тестирования АБ большой емкости и большого напряжения, поскольку габариты и мощность рассеивания такого измерительного оборудования будут внушительных размеров [64].

Метод, основанный на *регистрации отклика на импульсы тока*, защищен и описан в патенте [68]. Согласно авторскому свидетельству на АБ подают импульсы напряжения  $U_i$  длительностью  $t_i$  от  $10^{-3}$  до  $10^3$  с. Амплитудное значение напряжения  $U_i$  равно 1-1,5 от номинального напряжения АБ. При этом измеряется ток  $I_i$ , и, по измеренным значениям и заранее известной зависимости, которая определяет тип электрохимической системы, вычисляется остаточная емкость АБ. Метод пока не нашел широкого применения и устройства, реализующие его неизвестны.

К положительным качествам такого метода можно отнести малое время оценки состояния АБ (существенно меньше, чем требуемое для измерения емкости методом № 1).

В качестве отрицательных качеств такого метода можно отметить сравнительно большое время измерения (длительность импульса  $t_i = 10^3$  с составляет ~17 мин.). При измерениях ток  $I_i$  может достигать (15÷20) А, что в сочетании с большой длительностью требует больших энергетических затрат. Этот факт обуславливает значительные массогабаритные показатели устройств, которые могли бы реализовать этот способ. Более того, токи такой величины могут отрицательно сказаться на состоянии АБ [64].

*Измерение импеданса АБ.* Этот метод заключается в измерении внутреннего сопротивления АБ (модуля комплексного  $|Z|$  или его активной  $R$  и реактивной  $X$  составляющих) на одной или нескольких частотах тестового сигнала. Измерения проводят перед вводом АБ в эксплуатацию, а затем контролируют параметр внутреннего сопротивления в процессе эксплуатации. По изменениям значения сопротивления можно оценить остаточную емкость АБ. Кроме того, так как

внутреннее сопротивление АБ включает сопротивление электролита, активной массы и токоведущих проводников этот способ позволяет выявлять дефекты, обусловленные коррозией электродов или межэлектродные замыкания в отдельных элементах АБ.

К основным положительным качествам указанного способа относится малое время оценки характеристик АБ. При измерении практически не расходуются измеряемые величины. Быстрота и сравнительная простота процесса измерения параметров АБ делает этот метод пригодным для выходного контроля характеристик АБ при их серийном производстве. Процесс измерения не требует больших энергетических затрат и может питаться даже от проверяемой АБ. Это также обуславливает низкие массогабаритные показатели измерительного оборудования (рис. 2.28).

К отрицательным качествам данного метода можно отнести тот факт, что для измерения модуля полного сопротивления и его активной и реактивной составляющих требуется математическая обработка данных. Кроме того, индивидуальные параметры для электрохимической системы каждого типа не позволяют получить универсальное устройство для вычисления емкости АБ всех типов электрохимических систем [64].

Устройства, реализующие такой метод приведены на рис. 2.28.



а)

б)

2.28. а) Измеритель внутреннего сопротивления ХИТ (производство ООО «Мегарон» (Россия)); б) Spectro CA-12 Automotive Battery Tester (производство Фирмы «Cadex» (Канада))



Предлагаемый в диссертационной работе метод оценки эксплуатационных характеристик АБ во многом схож со способом №4 поскольку предлагаемый метод также основан на измерении активного и реактивного сопротивлений АБ. В сравнении с описанными выше способами предлагаемый метод позволяет оценивать значение емкости АБ за короткое время (от 10 до 20 с), не требует больших энергетических затрат, измерительное оборудование обладает низкими массогабаритными показателями, во время измерения измеримая величина не расходуется. Кроме того в сравнении со способом № 4 предлагаемый метод обладает большей достоверностью за счет применения двух параметров (активного сопротивления и характеристической частоты) при оценке емкости. К недостаткам предлагаемого метода относятся несколько большее, в сравнении со способом №4, время оценки значения емкости АБ, что связано с необходимостью измерения и обработки дополнительного параметра характеристической частоты. Также недостатком метода является сравнительно высокая сложность измерительного оборудования, обеспечивающего математическую обработку тестового сигнала и измеренных данных. Так же к недостаткам можно отнести необходимость создания аналитических функций для электрохимической системы каждого типа.

Таблица 2.14

Метод	Соответствие государственным стандартам	Расход измеримой величины	Время измерения	Массогабарит -ные показатели оборудования	Количество измеряемых параметров
№1 - измерение времени разряда АБ	Да	Расходуется полностью	От 0,5 до 20 ч	Низкие	1
№2 - измерение напряжения АБ под нагрузкой	Нет	Расходуется частично	От 40 до 50 с	Средние	1
№3 – регист- рация отклика на импульсы напряжения	Нет	Не расходуется	До 20 мин.	Низкие	1
№4 - измерение импеданса	Нет	Не расходуется	От 20 до 30 с	Высокие	1
№5 – парамет- рический	Нет	Не расходуется	От 20 до 30 с	Высокие	2

Нужно заметить, что количество параметров, используемых для оценки емкости АБ, имеет значение при оценке ошибки вычисления среднего арифметического по формуле (2.28) – стандартной ошибки среднего. Согласно [66] эта величина характеризует среднеквадратическое отклонение выборочного среднего, рассчитанное по выборке размера  $n$  из генеральной совокупности, и зависит от СКО  $\sigma$  и объема выборки  $n$ :

$$\sigma_{cp} = \sqrt{\frac{\sigma^2}{n}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (2.34)$$

где  $\sigma_{cp}$  – стандартная ошибка среднего;  $\sigma$  – среднеквадратическое отклонение выборки;  $n$  – число наблюдений в выборке.

В нашем случае  $n = 2$  – число параметров, по которым производится вычисление емкости. Соответственно при сравнении предлагаемого метода контроля характеристик АБ с прочими, использующими только 1 параметр, ошибка вычисления емкости предлагаемым методом будет в  $\sqrt{2} \approx 1,4$  раза меньше, чем ошибки вычисления емкости прочими методами.

### 2.3 Выводы по главе

1. Частотные зависимости параметров АБ при их измерении на переменном токе наиболее адекватно описывает модель последовательной  $RLC$ -цепи, что указывает на возможность применения ее в качестве модели реальной АБ.

2. Значения номинальной и фактической резервной емкостей АБ имеют зависимости от величины внутреннего сопротивления. Эти зависимости описываются уравнениями, которые позволяют оценить значение фактической резервной емкости АБ с точностью до  $\sim 5$  Ач, значение номинальной емкости с точностью до  $\sim 4,5$  Ач для батарей, номинальная емкость которых не превышает  $\sim 80$  Ач. Для батарей обладающих большей емкостью эти показатели возрастают до  $\sim 10$  Ач и 9 Ач соответственно.

3. Значения номинальной и фактической резервной емкостей АБ имеют зависимости от величины характеристической частоты. Эти зависимости

описываются уравнениями, которые позволяют оценить значение фактической резервной емкости АБ с точностью  $\sim 8$  Ач, значение номинальной емкости с точностью  $\sim 7$  Ач для батарей, номинальная емкость которых не превышает  $\sim 80$  Ач. Для батарей обладающих большей емкостью значение номинальной емкости может быть оценено с точностью  $\sim 9$  Ач.

4. Совместное использование двух параметров АБ (внутреннего сопротивления и характеристической частоты) при оценке их эксплуатационных характеристик (номинальной и фактической резервной емкостей) позволяет повысить достоверность оценки путем уменьшения стандартной ошибки среднего в 1,4 раза.

5. Высокая степень корреляции (0,99) частотных зависимостей параметров реальной АБ и ее модели в виде последовательной *RLC*-цепи позволяет проводить интерполяцию частотных зависимостей реактивного сопротивления реальной АБ через выражение реактивного сопротивления модели, что позволяет вычислять характеристическую частоту (частоты при которой реактивное сопротивление АБ становится равным нулю) как корень функции интерполяции. Это позволяет вычислять параметр характеристической частоты по 4 точкам частотной зависимости реактивного сопротивления с абсолютной погрешностью не более 4 Гц.

## Глава 3 КЛАССИФИКАЦИЯ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ

Задача классификации аккумуляторных батарей заключается в разделении множества объектов диагностики (аккумуляторных батарей) на группы по определенному критерию. Таким критерием может быть типоразмер батареи, ее номинальное напряжение или тип электрохимической системы. Эти критерии, безусловно, важны при выборе аккумуляторной батареи. Они гарантированы производителем, что указывается в технической документации на батарею и являются достоверными для новой батареи, а некоторые остаются неизменными и в конце срока эксплуатации.

Гораздо более важными критериями являются те, которые изменяются в процессе эксплуатации. Например, значение внутреннего сопротивления, ток холодной прокрутки, номинальная емкость, текущая степень заряженности или резервная емкость. Эти параметры характеризуют не только и не столько тип (класс) аккумуляторной батареи, сколько позволяют оценить ее работоспособность в заданных климатических и эксплуатационных условиях. Значения этих параметров не подкрепленные заключением (результатом их анализом) могут быть информативны лишь для опытного диагноста. Колоссальные объемы производства и использования батарей во всех сферах жизнедеятельности человека диктуют необходимость автоматизации процессов измерения их параметров и последующего анализа полученных результатов. Решение задачи автоматического анализа видится нам в реализации алгоритмов автоматической классификации. В простейшем случае, по измеренным параметрам батарей они будут классифицироваться на два класса: «ХОРОШИЕ» и «ПЛОХИЕ».

### 3.1 Классификация по критерию активного сопротивления

В качестве алгоритма автоматической классификации был выбран метод, построенный на вычислении степени отклонения измеряемой величины от реперных точек шкалы измерения [51, 52, 63].

Принцип работы алгоритма заключается в том, что каждой реперной точке (метке) шкалы присваивается условный порядковый номер – *ранг*. Затем для каждого значения измеренной величины формируется список рангов реперных точек, с упорядоченностью свойственной только этому значению. Впоследствии определяется степень упорядоченности этого списка, которая выражается в числе  $M_K$  принадлежащем отрезку  $[-1;1]$ .

Рассмотрим этапы автоматической классификации на примере классификации 16-ти батарей типа Panasonic 5524 ( $C_{20} = 45$  Ач). За критерий классификации примем значения резервных емкостей  $C_R$  АБ (табл. 3.1).

Таблица 3.1

№ АБ	Резервная емкость $C_R$ , мин.	№ АБ	Резервная емкость $C_R$ , мин.	№ АБ	Резервная емкость $C_R$ , мин.	№ АБ	Резервная емкость $C_R$ , мин.
41	41,4	45	44,1	60	43,4	82	44,1
42	42,6	52	42,5	62	43,4	83	44,1
43	44,1	53	43,1	63	44,0	84	44,3
44	42,6	54	43,1	81	44,1	85	44,4

Значения емкости  $C_R$  всех шестнадцати батарей сосредоточены в пределах от 41,4 до 44,4 минут. Выберем 4 реперные точки, так чтобы они были равномерно распределены в диапазоне выборки резервных емкостей. Пусть это будут значения множества  $\{41,4; 42,3; 43,4; 44,3\}$ . Они упорядочены по возрастанию и имеют соответствующие порядковые номера. Список  $\{1;2;3;4\}$  называется «прямым» списком рангов реперных точек. Список  $\{4;3;2;1\}$  – соответственно «обратным».

В соответствии с алгоритмом в первую очередь вычисляются разности  $\Delta C_{RN}$  между резервной емкостью  $K$ -той батареи и каждой из  $N$  реперных точек:

$$\Delta C_{RN} = |R_N - C_{RK}|, \quad (3.1)$$

где  $N$  – порядковый номер реперной точки,  $N=1,2,\dots,4$ ;  $R_N$  – значение  $N$ -ной реперной точки;  $C_{RK}$  – значение резервной емкости  $K$ -той АБ.

Для батареи № 54, например,  $C_{R54} = 43,1$  мин. тогда:

$$\Delta C_{R1} = |41,4 - 43,1| = 1,7$$

$$\Delta C_{R2} = |42,3 - 43,1| = 0,8$$

$$\Delta C_{R3} = |43,4 - 43,1| = 0,3$$

$$\Delta C_{R4} = |44,3 - 43,1| = 1,2$$

Далее необходимо упорядочить значения  $\Delta C_{RN}$  по возрастанию:

$$\Delta R_{c_3} = 0,3$$

$$\Delta R_{c_2} = 0,8$$

$$\Delta R_{c_4} = 1,2$$

$$\Delta R_{c_1} = 1,7$$

Из индексов  $\Delta C_{RN}$  получаем список  $\{3;2;4;1\}$ . Это тот самый, свойственный именно для этого значения резервной емкости, список рангов реперных точек.

Следующий шаг алгоритма заключается в сравнении полученного списка с эталонными «прямым» и «обратным» списками рангов реперных точек. Для этого вычисляются абсолютные разности элементов с одинаковыми индексами в полученном и эталонном («прямом» или «обратном») списках. Это наглядно представлено в виде разности матриц взятой по модулю:

$$\begin{Bmatrix} \Delta Nd_1 \\ \Delta Nd_2 \\ \Delta Nd_3 \\ \Delta Nd_4 \end{Bmatrix} = \left| \begin{Bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} 3 \\ 2 \\ 4 \\ 1 \end{Bmatrix} \right| = \begin{Bmatrix} 2 \\ 0 \\ 1 \\ 3 \end{Bmatrix}, \quad (3.2)$$

$$\begin{Bmatrix} \Delta Nr_1 \\ \Delta Nr_2 \\ \Delta Nr_3 \\ \Delta Nr_4 \end{Bmatrix} = \left| \begin{Bmatrix} 4 \\ 3 \\ 2 \\ 1 \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} 3 \\ 2 \\ 4 \\ 1 \end{Bmatrix} \right| = \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 2 \\ 0 \end{Bmatrix}, \quad (3.3)$$

где  $\Delta Nd_i$  и  $\Delta Nr_i$  – абсолютные разности элементов с одинаковыми индексами в полученном и эталонных «прямом» и «обратном» списках соответственно.

Физический смысл выражений (3.2) и (3.4) состоит в определении числа переходов  $\Delta Nd_i$ , необходимых для каждого из  $i = 4$  элементов списка рангов измеренного значения  $C_R$ , для того чтобы два сравниваемых списка стали идентичны друг другу. Так, чтобы список измеренного значения  $\{3;2;4;1\}$  стал идентичен, например, «обратному» списку реперных точек  $\{4;3;2;1\}$  необходимо

первый  $N_1 = 3$  и второй  $N_2 = 2$  его элементы переместить на один ранг ниже, третий элемент  $N_3 = 4$  переместить на 2 ранга выше, а элемент  $N_4 = 1$  оставить на своем месте (переместить на 0 рангов) (рис. 3.1).

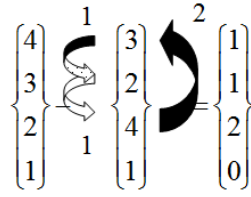


Рис. 3.1. Физический смысл выражений (3.2) и (3.3)

В следующем шаге вычисляется суммы элементов матриц полученных в выражениях (3.2) и (3.3):

$$\begin{aligned} \Delta Nd &= 2 + 0 + 1 + 3 = 6 \\ \Delta Nr &= 1 + 1 + 2 + 0 = 4 \end{aligned} \quad (3.4)$$

где  $\Delta Nd$  и  $\Delta Nr$  – суммарные числа переходов необходимых для того, чтобы список рангов измеренного значения стал идентичен «прямому» или «обратному» спискам рангов реперных точек соответственно. Эти значения также называют расстояниями между списком рангов измеренного значения и «прямым» или «обратным» спискам рангов реперных точек соответственно.

В общем случае предыдущие выражения (3.2), (3.3) и (3.4) полностью заменимы выражениями:

$$\begin{aligned} \Delta Nd &= \sum_{i=1}^4 (|Nd_i - N_i|) \\ \Delta Nr &= \sum_{i=1}^4 (|Nr_i - N_i|) \end{aligned} \quad (3.5)$$

где  $Nd_i$  и  $Nr_i$  – значения  $i$ -того элемента «прямого» и «обратного» списка рангов реперных точек соответственно;  $N_i$  – значение  $i$ -того элемента списка рангов измеренного значения  $C_R$ .

Следующим шагом вычисляется разница  $\Delta N$  расстояний между списком рангов измеренного значения и «прямым» и «обратным» списками рангов реперных точек:

$$\Delta N = \Delta Nd - \Delta Nr = 6 - 4 = 2. \quad (3.6)$$

Значение разницы  $\Delta N$  характеризует степень отклонения списка рангов измеренного значения к «прямому» или «обратному» спискам реперных точек. А знак разницы определяет, направление этого отклонения. То есть определяет, к какому из списков реперных точек список измеренного значения отклоняется больше. Положительные значения  $\Delta N$  говорят об отклонении в сторону «прямого» списка, а отрицательные соответственно в сторону «обратного».

В следующем шаге алгоритма вычисляется количество переходов необходимых для того, чтобы «прямой» список рангов реперных точек стал «обратным» или наоборот. Другими словами вычисляется расстояние  $\Delta N_R$  между «прямым» и «обратным» списками рангов реперных точек:

$$\left| \begin{array}{c} 4 \\ 3 \\ 2 \\ 1 \end{array} \right| - \left| \begin{array}{c} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{array} \right| = \left| \begin{array}{c} 3 \\ 1 \\ 1 \\ 3 \end{array} \right| \quad (3.7)$$

$$\Delta N_R = 3 + 1 + 1 + 3 = 8$$

В общем случае выражения (3.7) описываются суммой абсолютных разностей:

$$\Delta N_R = \sum_{i=1}^4 (|Nd_i - Nr_i|). \quad (3.8)$$

В системе автоматической классификации с постоянным набором реперных точек этот шаг может исключаться. При этом результат вычислений (3.7) или (3.8) сохраняется в программном коде алгоритма как константа. Это значение используется для вычисления относительного отклонения  $M_K$  списка рангов измеренного значения к эталонным спискам реперных точек:

$$M_K = \frac{\Delta N}{\Delta N_R}. \quad (3.9)$$

Относительное отклонение  $M_K$ , как и значение  $\Delta N$ , отражает степень отклонения списка измеренного значения от эталонных списков. Вместе с тем значение  $M_K$  говорит и о степени отклонения самого измеренного значения от значений крайних реперных точек шкалы. С точки зрения теории нечетких множеств [65] значение  $M_K$  может представляться как степень принадлежности к



одной из крайних реперных точек шкалы. Так в нашем примере для батареи № 54 значение  $M_K$  составляет:

$$M_{54} = 2/8 = 0,25.$$

Тогда можно сказать, что значение  $C_R = 43,06$  мин. на 25% принадлежит множеству «прямого» списка реперных точек. На принадлежность именно к «прямому» списку указывает положительный знак параметра  $M_K$  [63].

Проведем все выше описанные вычисления для всех АБ из табл. 3.1. В результате получим множество из шестнадцати значений  $M_K$  соответствующих шестнадцати батареям. Упорядочив список батарей по значения  $M_K$  увидим, что таких значений всего 5. То есть исследуемые батареи можно распределить по пяти классам на основании критерия  $M_K$  (табл. 3.2).

В класс с критерием  $M_K = 1$  попали батареи с наивысшим значением резервной емкости. Этому классу присвоим порядковый номер 1. В класс с критерием  $M_K = -1$ , напротив, попала батарея № 41, с наименьшим значением резервной емкости  $C_R$ . Прочие классы содержат батареи с промежуточными значениями  $C_R$  (табл. 3.2).

Таблица 3.2

№ класса / $M_K$	1 / 1.00							
№ АБ	43	45	63	81	82	83	84	85
$R_c$ , мин	44,1	44,1	44,0	44,1	44,1	44,1	44,3	44,4
№ класса / $M_K$	2 / 0,75		3 / 0,25		4 / -0,25			5 / -1.00
№ АБ	60	62	53	54	42	44	52	41
$R_c$ , мин	43,4	43,4	43,1	43,1	42,6	42,6	42,5	41,4

Согласно описанию метода классификации [81] характеристика степени неопределенности описывается сигмодалной функцией

$$M_K = a_8 + \frac{b_8}{1 + \exp\left(-\frac{Rc - c_8}{d_8}\right)} \quad (3.10)$$

где  $a_8, b_8, c_8, d_8$  – коэффициенты уравнения.

Построим зависимость значений  $M_K$  от резервной емкости  $C_R$  (рис. 3.2).

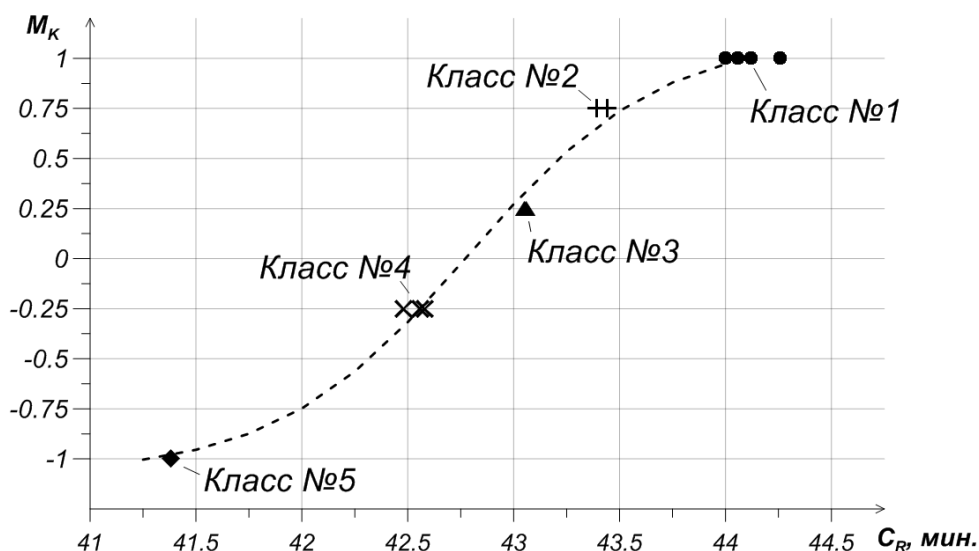


Рис. 3.2. Зависимость  $M_K$  от резервной емкости  $C_R$

Методом наименьших квадратов подобраны коэффициенты уравнения (3.10)  $a = -1,07$ ,  $b = 2,18$ ,  $c = 42,8$  и  $d = 0,45$ .

Приведенный выше пример классификации аккумуляторных батарей не практичен, поскольку процедура измерения резервной емкости занимает много времени (от 30 до 300 мин. в зависимости от емкости АБ). Как уже упоминалось, современные анализаторы позволяют измерить несколько параметров АБ всего за 10-20 секунд. В разделах 2.2.1 и 2.2.2 было показано, что основные эксплуатационные характеристики батарей хорошо коррелируют с параметрами активного внутреннего сопротивления  $R$  и характеристической частоты  $F_C$ . Это позволяет предположить, что критерием классификации аккумуляторных батарей может стать внутреннее сопротивление или характеристическая частота.

Проведем описанным выше методом классификацию свинцово-кислотных батарей напряжением 12 В типа FIAMM 20720 номинальной емкостью  $C_{20} = 7,2$  Ач, типа Panasonic 3819  $C_{20} = 35$  Ач, Panasonic 5524  $C_{20} = 45$  Ач, Panasonic 7523  $C_{20} = 65$  Ач, Panasonic 10530  $C_{20} = 90$  Ач и FIAMM 12UMTB160  $C_{20} = 160$  Ач. Во время измерения параметров батареи находились в заряженном состоянии. В качестве критерия классификации выберем значение активного сопротивления  $R$  АБ. Шкалой реперных точек станет множество  $\{24,8; 6,9; 5,6; 4,8; 3,8; 3,2\}$ . Количество реперных

точек соответствует количеству типов классифицируемых батарей. Значения реперных точек равны средним значениям активного сопротивления батарей в пределах одного типа.

Такой способ подбора значений реперных точек обусловлен аналогией параметра относительного отклонения  $M_K$  с параметром степени принадлежности элемента нечеткого множества. Таким образом, среднее значение нечеткого множества, коим является множество значений активных сопротивлений конкретного типа батарей, есть центр этого нечеткого множества. И относительное отклонение  $M_K$  определяется степенью принадлежности элементов множества к его центру (реперной точке).

Результаты вычисления относительного отклонения приведены в табл. 3.3. Согласно полученным данным, батареи типов FIAMM 20720  $C_{20} = 7,2$  Ач, Panasonic 3819  $C_{20} = 35$  Ач и FIAMM 12UMTB160  $C_{20} = 160$  Ач сгруппировались в классы соответствующие их типам. То есть всем без исключения классифицируемым батареям типа FIAMM 20720 соответствует одно значение относительного отклонения  $M_K = -1,0$ . Батареям типа Panasonic 3819 соответствует значение  $M_K = -0,1$ , а батареям типа FIAMM 12UMTB160 –  $M_K = 1,0$  (табл. 3.3).

Значения относительного отклонения прочих типов не так однозначны. Так типам батарей Panasonic 5524, 7523 и 10530 соответствует по два значения  $M_K$ . Всем кроме одной батареи типа 5524 соответствует значение  $M_K = 0,0$ . И только для одной батареи № 63 значение  $M_K = 0,2$  (табл. 3.3).

Несмотря на неоднозначность значений относительного отклонения внутри некоторых типов, все приведенные в табл. 3.3 батареи могут быть сгруппированы в классы соответствующие их типам. Это выполнимо если принять такое условие, что, например, типу батарей Panasonic 10530 соответствуют значения относительного отклонения  $M_K$  0,78 и 0,9.

Таблица 3.3

Тип АБ	№ АБ	Номинальная емкость $C_{20}$ , Ач	Активное сопротивление $R$ , мОм	Диапазон относительного отклонения $\Delta M_K$	Диагностический класс
20720	14	7,2	25,9	$-1,0 \leq M_K < -0,5$	АБ FIAMM 20720 ( $C_{20} = 7,2$ Ач)
	12	7,2	25,8		
	15	7,2	25,0		
	13	7,2	24,2		
	16	7,2	23,3		
3819	19	35	7,2	$-0,5 \leq M_K \leq -0,1$	АБ Panasonic 38B19 ( $C_{20} = 35$ Ач)
	17	35	7,1		
	22	35	6,9		
	16	35	6,8		
	21	35	6,5		
5524	43	45	5,7	$-0,1 < M_K \leq 0,2$	АБ Panasonic 55B24 ( $C_{20} = 45$ Ач)
	45	45	5,7		
	41	45	5,6		
	84	45	5,4		
	63	45	5,3		
7523	18	65	4,9	$0,2 < M_K \leq 0,7$	АБ Panasonic 75D23 ( $C_{20} = 65$ Ач)
	12	65	4,8		
	24	65	4,7		
	16	65	4,7		
	20	65	4,7		
10530	13	90	4,4	$0,7 < M_K \leq 0,9$	АБ Panasonic 105D30 ( $C_{20} = 90$ Ач)
	12	90	3,9		
	10	90	3,8		
	15	90	3,8		
	21	90	3,5		
12160	98	160	3,3	$0,9 < M_K \leq 1,$	АБ FIAMM 12UMTB160 ( $C_{20} = 160$ Ач)
	99	160	3,1		

Активное сопротивление, как упоминалось выше, коррелирует не только с номинальной емкостью батареи  $C_{20}$ , но зависит и от степени ее заряженности. Согласно рис. 2.16 в заряженном состоянии батареи имеют минимальное значение сопротивления. Оно увеличивается в процессе разряда и принимает максимальное значение при полном разряде батареи. Соответственно шкала реперных точек используемая при классификации батарей в заряженном состоянии оказывается непригодна для классификации частично или полностью разряженных АБ. В таком

случае для каждой степени заряженности следует использовать свою шкалу реперных точек.

Для классификации батарей в частично заряженном состоянии реперные точки принимают значения множества  $\{26,6; 8,4; 6,7; 5,6; 4,5; 3,3\}$ . Количество реперных точек соответствует количеству типов классифицируемых батарей. Значения реперных точек равны средним значениям активного сопротивления батарей в пределах одного типа. Однако последняя реперная точка была изменена. Это сделано в целях подстройки значений относительного отклонения  $M_K$  батареи № 15 типа Panasonic 10530. Изначально реперная точка  $R_6$  принимала значение 2,9. При вычислении относительного отклонения значение  $M_K$  для батареи 10530 № 15 составляло 0,6. Такое же значение принимают батареи типа 7523 №№ 20 и 27 (табл. 3.4). Смешение батарей разных типов в одном классе снижает достоверность классификации. Подбором было установлено, что при значении  $R_6 = 3,3$  значение относительного отклонения батареи № 15 становится равным 0,8, которое соответствует еще двум батареям №№ 9 и 13 того же типа (табл. 3.4).

Значения относительного отклонения  $M_K$  для типов батарей FIAMM 20720, Panasonic 3819 и FIAMM 12UMTB160 определяются однозначно. Прочим типам батарей соответствует два и даже три (для типа 7523) значения  $M_K$ . Для достоверного определения типа батареи по значению активного сопротивления эти значения следует считать значениями, характеризующими подгруппы батарей входящих в этот тип.

Параметр активного сопротивления аккумуляторных батарей в разряженном состоянии приобретает несколько большую степень разброса. Так минимальное и максимальное значения активного сопротивления среди батарей типа Panasonic 3819 равны  $R_{3819min} = 10,7$  мОм и  $R_{3819max} = 13,6$  мОм.

Таблица 3.4

Тип АБ	№ АБ	Номинальная емкость $C_{20}$ , Ач	Активное сопротивление $R$ , мОм	Диапазон относительного отклонения $\Delta M_K$	Диагностический класс
20720	12	7,2	28	$-1,0 \leq M_K < -0,5$	АБ FIAMM 20720 ( $C_{20} = 7,2$ Ач)
	14	7,2	28		
	15	7,2	27		
	13	7,2	25		
	16	7,2	25		
3819	22	35	9,5	$-0,5 \leq M_K \leq -0,1$	АБ Panasonic 38B19 ( $C_{20} = 35$ Ач)
	20	35	8,6		
	19	35	8,5		
	17	35	8,1		
	16	35	7,8		
	21	35	7,8		
5524	41	45	6,8	$-0,1 < M_K < 0,2$	АБ Panasonic 55B24 ( $C_{20} = 45$ Ач)
	45	45	6,7		
	60	45	6,7		
	53	45	6,6		
	43	45	6,5		
7523	26	65	6,0	$0,2 \leq M_K < 0,7$	АБ Panasonic 75D23 ( $C_{20} = 65$ Ач)
	18	65	5,9		
	14	65	5,9		
	13	65	5,6		
	20	65	5,5		
	27	65	5,1		
10530	15	90	5,0	$0,7 \leq M_K \leq 0,9$	АБ Panasonic 105D30 ( $C_{20} = 90$ Ач)
	13	90	4,6		
	9	90	4,6		
	20	90	4,1		
	21	90	4,0		
12160	98	160	3,1	$0,9 < M_K \leq 1,0$	АБ FIAMM 12UMTB160 ( $C_{20} = 160$ Ач)
	99	160	3,1		
	2	160	2,8		
	1	160	2,7		

Параметр активного сопротивления аккумуляторных батарей в разряженном состоянии приобретает несколько большую степень разброса. Так минимальное и максимальное значения активного сопротивления среди батарей типа Panasonic 3819 равны  $R_{3819min} = 11$  мОм и  $R_{3819max} = 14$  мОм. Минимальное значение  $R_{3819min}$  попадает в область распределения батарей типа 5524, крайние (минимальное и максимальное) значения которого равны  $R_{5524min} = 10$  мОм и  $R_{5524max} = 12$  мОм (рис. 3.3). В свою

очередь область распределения батарей типа 5524 перекрывает область батарей типа 7523 (рис. 3.3).

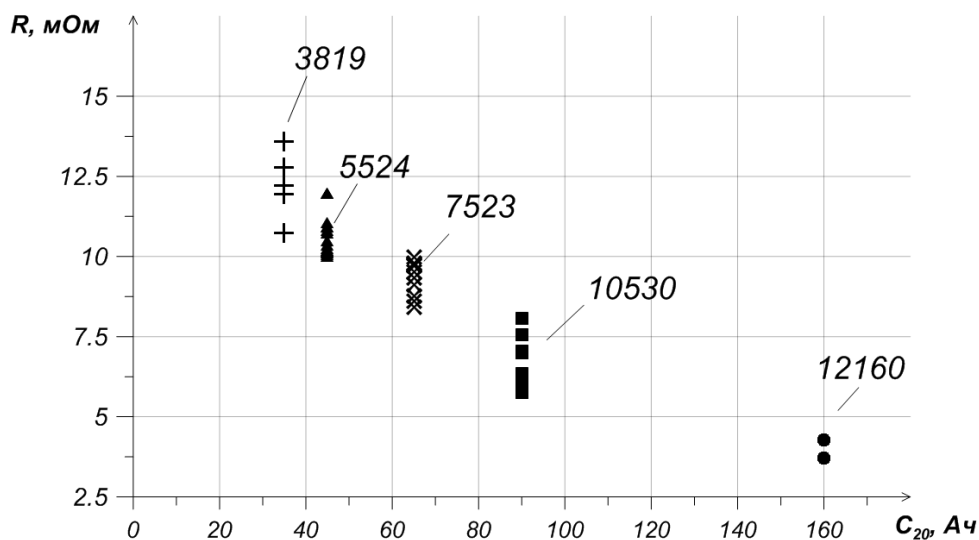


Рис. 3.3. Зависимость активного сопротивления АБ различных типов от номинальной емкости

Высокая степень разброса обуславливает сложность классификации батарей в разряженном состоянии. При применении шкалы состоящей из 5 реперных точек (по числу определяемых типов) батареи классифицируются с многочисленными смешениями типов. Например, значение относительного отклонения  $M_K = 0,7$  соответствует батареям трех различных типов (Panasonic 3819, 5524 и 7523). Причем для типов 5524 и 7523 такое значение  $M_K$  соответствует ~44% и ~55% батарей соответственно (от общего числа исследуемых батарей в типе). Это говорит о серьезной степени смешения батарей разных типов в классе  $M_K = 0,7$ .

Решением проблемы смешения батарей может стать увеличение числа реперных точек в шкале. Так, для классификации батарей в разряженном состоянии используем шкалу со значениями реперных точек {12,3; 11,4; 10,6; 10,0; 9,3; 8,0; 6,7; 4,0}. Результаты классификации с использованием этой шкалы приведены в табл. 3.5.

За основу выбранной шкалы реперных точек взято множество средних значений активного сопротивления для каждого из типов, между которыми добавлены промежуточные значения.

Таблица 3.5

Тип АБ	№ АБ	Номинальная емкость $C_{20}$ , Ач	Активное сопротивление $R$ , мОм	Диапазон относительного отклонения $\Delta M_K$	Диагностический класс
3819	22	35	13,6	$-1,0 \leq M_K < -0,8$	АБ Panasonic 38B19 ( $C_{20} = 35$ Ач)
	19	35	12,8		
	17	35	12,2		
5524	84	45	12,0		
	85	45	12,0		
3819	16	35	11,9		
5524	82	45	11,1		
	62	45	10,8		
3819	21	35	10,7		
5524	63	45	10,7		
	41	45	10,5		
	54	45	10,4		
	53	45	10,2		
	43	45	10,1		
7523	42	45	10,0		
	18	65	10,0		
7523	19	65	9,8	$-0,3 \leq M_K < 0,3$	АБ Panasonic 75D23 ( $C_{20} = 65$ Ач)
	16	65	9,7		
	17	65	9,5		
	24	65	9,1		
	20	65	8,8		
	27	65	8,6		
10530	25	65	8,4	$0,3 \leq M_K \leq 0,9$	АБ Panasonic 105D30 ( $C_{20} = 90$ Ач)
	15	90	8,1		
	12	90	7,6		
	9	90	7,1		
	10	90	7,0		
	13	90	6,4		
12160	21	90	5,7	$0,9 < M_K \leq 1,0$	АБ FIAMM 12UMTB160 ( $C_{20} = 160$ Ач)
	98	160	4,3		
	99	160	3,7		

Согласно табл. 3.5 батареи № 18 и 19 типа Panasonic 7523 (для обоих значение  $M_K = -0,4$ ) попадают в диагностический класс «АБ Panasonic 55B24 ( $C_{20} = 45$  Ач)», который соответствует типу батарей Panasonic 5524. Нужно заметить, что батареи типов 5524 и 7523, которым соответствует значение  $M_K = -0,4$  имеют очень близкие значения активного сопротивления. Активное сопротивление батарей № 43 и 42



типа 5524 находятся в диапазоне (10,0÷10,1) мОм. В свою очередь значения параметров батарей № 18 и 19 типа 7523, попавших в этот класс, располагаются в диапазоне (9,8÷10,0) мОм.

Предлагаемый алгоритм не позволяет четко классифицировать батареи в разряженном состоянии по их типам. Вызвано это достаточно большой степенью разброса параметров активного сопротивления батарей одного типа, и как следствие, перекрытие областей распределения батарей соседних типов.

### **3.2 Классификация по параметру характеристической частоты**

Увеличить достоверность определения типа батарей могло бы проведение параллельной классификации по другим критериям, кроме активного сопротивления. Таким критерием могла бы выступить характеристическая частота батареи. Согласно разделам 2.1.5 и 2.1.6 параметр характеристической частоты хорошо коррелирует с номинальной емкостью АБ и позволяет повысить точность прогнозирования значения этой эксплуатационной характеристики при совместном применении с параметром активного сопротивления. Однако, применение характеристической частоты в качестве критерия классификации батарей показало совершенно противоположные результаты. При использовании шкалы реперных точек, полученных вычислением средних значений частоты  $F_C$  для каждого типа, наблюдается смешение батарей различных типов в одном классе. Причем один класс может содержать 40% батарей одного типа и 60% - другого. Высокие степени смешения проявляются при классификации батарей во всех состояниях (заряженные, частично разряженные и разряженные). Разумеется, такие степени смешения не позволяют даже приближенно проводить классификацию батарей по типу.

Это вызвано тем, что параметр характеристической частоты АБ обладает большой степенью разброса и как следствие области распределения батарей соседних типов относительно этого параметра перекрывают друг друга. Так, например, заряженные батареи типа Panasonic 3819 обладают характеристическими частотами в пределах от 175 до 187 Гц (рис. 3.4). Батареи типа Panasonic 5524 в свою

очередь имеют значения  $F_C$  от 140 до 182 Гц. Соответственно четкой границы между этими типами нет.

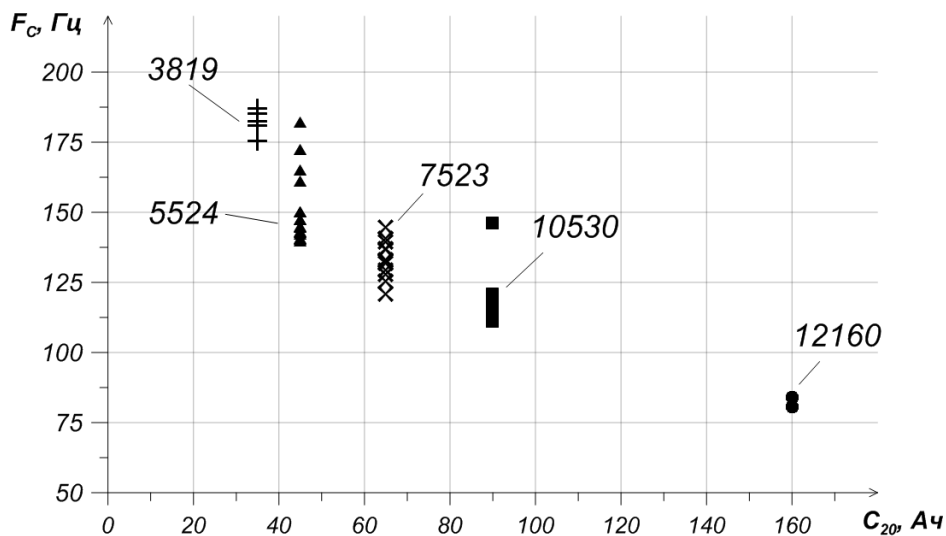


Рис. 3.4. Зависимость АБ различных типов в заряженном состоянии относительно характеристической частоты  $F_C$

Батареи типа Panasonic 5524 в свою очередь имеют значения  $F_C$  от 140 до 182 Гц (рис. 3.4). Соответственно четкой границы между этими типами нет, и классы образованные алгоритмом не соответствуют типам батарей.

### 3.3 Классификация по напряжению разомкнутой цепи

Согласно разделу 3.1 для классификации батарей в различной степени заряженности необходимо использовать различные шкалы реперных точек (как по значению точек, так и по их количеству). В связи с этим возникает потребность в предварительном определении степени заряженности для выбора подходящей шкалы реперных точек. Известно, что от степени заряженности батареи зависит напряжение разомкнутой цепи ( $U_{НРЦ}$ ).

Результаты проведенных исследований показали, что батареи номинальным напряжением 12В, в полностью разряженном состоянии имеют напряжение разомкнутой цепи лежит в пределах (11,70÷12,19) В. Батареям в частично разряженном состоянии (степень заряженности  $\sim(40\div 50)\%$ ) соответствует  $U_{НРЦ}$  в

пределах (12,24÷12,47) В. Полностью заряженным батареям соответствует  $U_{НРЦ}$  (12,75÷13,87) В (рис. 3.5).

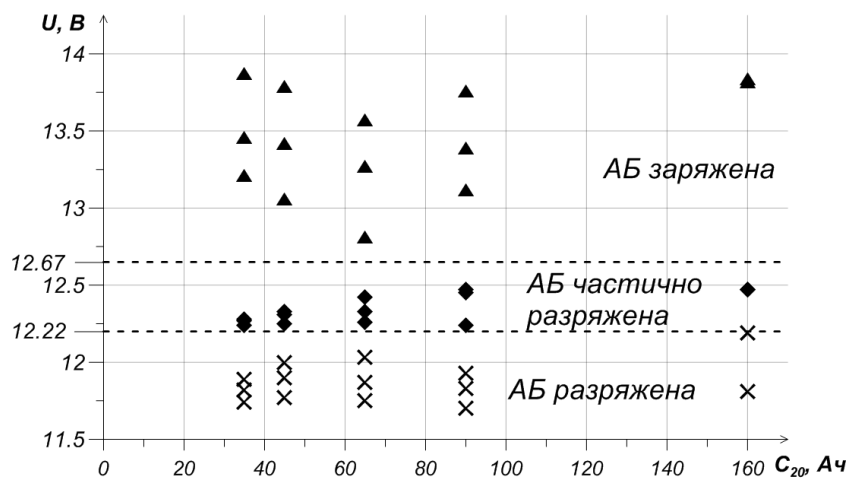


Рис. 3.5. Зависимость НРЦ АБ различного типа от номинальной емкости

Согласно рис. 3.5 можно установить значения граничных напряжений, относительно которых можно разделять батареи на 3 класса: «заряженные», «частично разряженные» и «разряженные». Границы между этими классами можно провести на уровнях напряжений 12,67 В (между «заряженными» и «частично разряженными») и 12,22 В (между «частично разряженными» и «разряженными»).

Поскольку между областями распределения батарей по  $U_{НРЦ}$  существуют различимые границы, то, вероятно, предлагаемый алгоритм позволит определять состояние батареи по критерию напряжения разомкнутой цепи. Шкалой реперных точек станет множество  $\{12, 12,5; 13,3\}$ . Количество точек соответствует количеству различных состояний батареи. Значения получены путем вычисления среднего значения  $U_{НРЦ}$  для каждого из состояний. Результаты классификации батарей относительно параметра  $U_{НРЦ}$  приведены в табл. 3.5.

В результате классификации относительно выбранной шкалы реперных точек исследуемое множество батарей было распределено по четырем классам. В классы со значениями относительного отклонения  $M_K = -1,0$  и  $M_K = -0,5$  попали батареи в разряженном и частично разряженном состоянии. В класс со значением  $M_K = 0,5$  попало всего три батареи со значениями  $U_{НРЦ}$  12,87, 12,81 и 12,75 (табл. 3.5).

Таблица 3.5

Диагностический класс		Разряжена		Частично разряжена		Заряжена	
Тип АБ	№ АБ	НРЦ U, В	Относительное отклонение МК	НРЦ U, В	Относительное отклонение МК	НРЦ U, В	Относительное отклонение МК
20720	12	11,88	-1,0	12,24	-0,5	12,87	0,5
20720	13	11,74		12,28		12,81	
20720	14	11,87		12,27		12,75	
3819	16	11,95		12,25		13,46	1,0
3819	17	11,97		12,30		13,87	
3819	19	11,77		12,32		13,34	
5524	41	11,83		12,31		13,57	
5524	42	11,89		12,33		13,42	
5524	43	11,86		12,31		13,38	
7523	12	11,90		12,35		13,43	
7523	13	11,87		12,30		13,23	
7523	14	11,75		12,33		13,27	
1053	9	11,76		12,26		13,41	
1053	10	11,80		12,39		13,12	
1053	12	11,70		12,31		13,66	
1216	1	11,86		12,33		13,39	
1216	2	11,81		12,24		13,35	
1216	98	12,19		12,47		13,84	

Согласно рис. 3.5 эти значения НРЦ соответствуют состоянию заряженных батарей. В последний класс  $M_K = 1,0$  так же вошли батареи в заряженном состоянии.

Так при условии, что значения  $M_K = 1,0$  и  $M_K = 0,5$  будут приняты как значения, характеризующие один класс, описываемый метод классификации позволяет определять состояние аккумуляторной батареи. Наличие этой информации позволит правильно подобрать шкалу реперных точек для определения типа батареи. В свою очередь, определив тип батареи можно провести классификацию батарей внутри типа.

### 3.4 Классификация внутри типа

Классификация батарей внутри типа позволит выделить группы батарей и оценить, диагностируемую батарею, относительно батарей находящихся в соседних группах. Пример такой классификации приведен в разделе 3.1 (табл. 3.2, рис. 3.2).

Но для такой классификации требует подбора шкалы реперных точек, характерной для конкретного типа АБ и для конкретного состояния. Учитывая, что только исследуется 6 типов батарей, каждая из них может находиться в трех различных состояниях (заряжена, частично разряжена или разряжена) количество шкал составляет 18. Это не считая четырех шкал для определения типа батареи и ее состояния. Такое число шкал может значительно усложнить реализацию комплексной системы диагностики батарей на основе методов классификации.

Неоднозначность определения типов АБ через относительное отклонение  $M_K$  (одному типу могут соответствовать 2, 3 и более значений  $M_K$ ) наталкивает на мысль о возможности проведения более глубокой классификации, с использованием одной шкалы. Подгруппы внутри типов будут выделяться параллельно выделению классов, соответствующих типам батарей. Достигнуть этого можно подобрав каждому типу АБ шкалу, содержащую не 6 реперных точек (по числу типов), а несколько больше.

Проведем классификацию частично разряженных батарей, используя для этого шкалы реперных точек {28,3; 26,7; 25,1; 9,5; 8,7; 7,8; 6,5; 6,7; 6,8; 5,1; 5,6; 6,0; 5,0; 4,5; 4,0; 3,1; 2,9; 2,7}. В этой шкале в качестве значений выступают минимальное, среднее и максимальное значения активного сопротивления для каждого типа. Среднее значение вычислялось как среднее арифметическое крайних значений.

В качестве критерия классификации был выбран параметр активного сопротивления батарей в частично разряженном состоянии. Это сделано с целью сопоставления значений относительного отклонения  $M_K$  и резервной емкости  $C_R$ , измеренной у батарей, находящихся именно в этом состоянии.

В результате классификации исследуемые батареи распределены по 26 классам (табл. 3.6). Путем объединения нескольких классов в один можно выделить тип батареи. Внутри типов выделены подгруппы. Их число различно и варьируется от 2 (для типа FIAMM 20720) до 8 (для типа Panasonic 7523) (табл. 3.6). Сопоставляя значения резервной емкости  $C_R$  батареи с соответствующим ей относительным отклонением  $M_K$  можно заметить, что эти параметры в целом коррелируют пределах

одного типа, но присутствуют данные выпадающие из корреляционной зависимости.

Таблица 3.6

Тип АБ	№ АБ	Резервная емкость $C_R$ , мин	Активное сопротивление $R$ , мОм	Относительное отклонение $M_K$	Диапазон относительного отклонения $\Delta M_K$
20720	12	13,8	28	-0,95	$-1,0 \leq M_K < -0,5$
	14	14,2	28		
	15	14,7	27	-0,94	
	13	15,0	25	-0,93	
	16	14,5	25		
3819	17	29,3	8,1	-0,11	$-0,5 \leq M_K < 0$
	20	27,3	8,6		
	16	30,2	7,8	-0,09	
	21	28,2	7,8		
5524	41	41,4	6,9	0,04	$0 \leq M_K < 0,2$
	83	44,1	6,8	0,06	
	44	42,6	6,8	0,09	
	84	44,3	6,7		
	42	42,6	6,5	0,11	
	43	44,1	6,5	0,12	
7523	26	59,2	6,0	0,27	$0,2 \leq M_K \leq 0,6$
	14	59,0	5,9	0,33	
	17	65,4	5,7	0,36	
	13	67,0	5,6	0,40	
	25	44,4	5,5	0,41	
	24	69,1	5,4	0,46	
	30	75,5	5,3	0,50	
	27	79,1	5,1	0,53	
10530	15	78,4	5,0	0,57	$0,6 \leq M_K \leq 0,9$
	10	93,6	4,7	0,68	
	9	93,2	4,6	0,73	
	20	120	4,1	0,82	
	21	111	4,0	0,84	
12160	98	363	3,1	0,93	$0,9 < M_K \leq 1,0$
	99	241	3,1		
	2	282	2,8	0,95	
	1	301	2,7		

Так, например, тип Panasonic 7523 содержит 8 подгрупп, в которые попали батареи со значениями резервной емкости от ~44 до ~79 мин. С возрастанием

значения  $M_K$  значения резервной емкости входящих в подгруппу батарей также возрастает. Это прослеживается со всеми подгруппами типа 7523 кроме подгруппы со значением  $M_K = 0,41$ . Указанная подгруппа находится в середине ранжированного списка подгрупп (пятая по порядку). Однако именно она содержит батарею с минимальным значением емкости  $C_R = 44,4$  мин (табл. 3.6).

Надо заметить, что критерием классификации выбран параметр активного сопротивления. А результат классификации – вычисленное значение относительного отклонения  $M_K$  в табл. 3.6 сопоставляется со значениями резервной емкости. При первом рассмотрении содержимого подгрупп типа Panasonic 5524 можно решить, что упомянутая выше корреляция емкости  $C_R$  и отклонения  $M_K$  не прослеживается. Действительно, в ранжированные по возрастанию параметра  $M_K$  подгруппы попали батареи с чередующимися емкостями  $\sim 41/ \sim 44$  мин.,  $\sim 42/ \sim 44$  мин. Однако, если оценить максимальное ( $C_{Rmax} = 44,3$  мин.) и минимальное ( $C_{Rmin} = 41,4$  мин.) значения резервных емкостей внутри типа, то окажется, что разница между ними составляет всего 2 мин. (табл. 3.6). На практике такой разброс значений, вероятно, будет даже не замечен.

Разброс значений активного сопротивления батарей типа 5524 также невелик и составляет всего 0,39 мОм. Это значение находится в пределах погрешности средства измерения, которая для минимального значения сопротивления в типе 5524  $R = 6,46$  мОм составляет  $\pm 0,32$  мОм. А потому все исследуемые батареи типа 5524 можно отнести к одному классу, объединив полученные подгруппы в одну.

По той же причине не удастся достоверно классифицировать по качеству батареи типа FIAMM 12UMTB160. Как можно видеть этот тип содержит 2 подгруппы. Значения активного сопротивления батарей попавших в эти подгруппы однозначно коррелируют со значениями  $M_K$  подгрупп. Однако, сопоставляя значения  $M_K$  с резервной емкостью этих батарей такой корреляции не прослеживается. Разброс значений сопротивления батарей этого типа составляет 0,45 мОм, что также находится на уровне погрешности средства измерения. Недостоверность классификации батарей этого типа усугубляется характером корреляционной функции сопротивления  $R$  и резервной емкости  $C_R$ , который был

показан в разделе 2.1.5. Очевидно, для прогнозирования значений  $C_R$  батарей высокой емкости недостаточно точности измерения параметра активного сопротивления.

Не смотря на возможное уменьшение числа шкал реперных точек и, как следствие, упрощение реализации комплексной системы диагностики приведенный выше вариант классификации не удобен тем, что каждый тип содержит в себе различное количество подгрупп. Принадлежность батареи к той или иной подгруппе можно интерпретировать как ее оценку по  $N$ -балльной шкале, где  $N$  – число подгрупп в типе. Объекты, оцененные по  $N$ -балльным шкалам, где  $N$  – может принимать различные значения, невозможно сравнивать.

В связи с этим необходимо подобрать шкалы реперных точек для каждого типа батарей, находящихся в каждом из трех возможных состояний. Таким шкалами могут стать множества, содержащие всего 3 элемента: максимальное, среднее и минимальное значения активного сопротивления батарей типа. Среднее значение вычисляется как среднее арифметическое от крайних (минимального и максимального) значений сопротивления. Например, для классификации батарей внутри типа Panasonic 7523 подобрана шкала реперных точек {6,0; 5,6; 5,1}. В результате классификации исследуемые АБ были разделены на 4 класса (табл. 3.7).

По сравнению с результатами предыдущей классификации (табл. 3.6) применение отдельных шкал реперных точек для каждого типа АБ разделяет исследуемые батареи на 4 подгруппы (табл. 3.7). При сравнении значений относительного отклонения  $M_K$  и резервной емкости  $C_R$  наблюдается некоторая корреляция. Это позволяет в зависимости от принадлежности к определенному классу оценивать батарею внутри класса относительно других АБ по четырех балльной шкале.



Таблица 3.7

№ АБ	Резервная емкость $C_R$ , мин.	Активное сопротивление $R$ , мОм	Относительное отклонение $M_K$	Диапазон относительного отклонения $\Delta M_K$	Диагностический класс
26	59	6,02	-1,0	$-1,0 \leq M_K < -0,7$	Не удовлетворительные
14	59	5,90			
16	48	5,82			
19	64	5,77	-0,5	$-0,7 \leq M_K < 0$	Удовлетворительные
17	65	5,69			
15	65	5,63			
20	67	5,55	0,5	$0 \leq M_K \leq 0,7$	Хорошие
21	64	5,49			
24	69	5,40			
30	75	5,28	1,0	$0,7 < M_K \leq 1,0$	Отличные
31	75	5,26			
27	79	5,12			

Нужно заметить, что применение шкал реперных точек, подобранных вышеуказанным методом, дает одинаковое количество классов с одинаковыми значениями относительного отклонения  $M_K$  (-1; -0,5; 0,5; 1). Условно, в соответствие этим классам можно поставить диагностические классы АБ, указывающие на их техническое состояние: «Не удовлетворительные», «Удовлетворительные», «Хорошие», «Отличные». Количество классов и значения  $M_K$  остаются неизменны при классификации батарей всех типов и состояний. Встречались, однако, случаи разбиения исследуемых батарей на 3 класса. Но связано это было с отсутствием в выборке батарей соответствующих неопределившемуся классу.

### 3.5 Выводы по главе

1. Способ автоматической классификации принятый за основу для выработки методики классификации АБ позволяет выделить классы батарей при высокой плотности параметра их классификации.

2. Разработана методика классификации АБ по значению внутреннего сопротивления и напряжения разомкнутой цепи, позволяющая выделить диагностические классы батарей соответствующие степени ее заряженности,

номинальной емкости и ее качеству относительно других батарей той же номинальной емкости, что позволяет на его основе создать систему оперативной диагностики АБ.

3. Расширено количество диагностических классов по параметру активного сопротивления до 24 классов (6 классов по номинальной емкости АБ, 4 класса по качеству внутри каждого из 6-ти классов номинальной емкости) и по напряжению разомкнутой цепи до 3 классов.

## Глава 4 ПРОГРАММНО-АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ

Теоретические исследования зачастую проводятся с целью последующей практической реализации их результатов. Поэтому при проведении соответствующих исследований важно описывать явления с точки зрения математики, и делать это в максимально простой форме. Это упростит и удешевит задачу реализации.

Проведенные исследования, описанные в главах 2 и 3, позволяют говорить о возможности построения системы диагностики АБ основанной на вычислении основных эксплуатационных характеристик из ее параметров. Важным преимуществом такой системы диагностики является быстрота анализа по сравнению с традиционными методами оценки качества АБ. За счет введения дополнительного диагностического параметра, увеличится точность диагностирования характеристик АБ. Алгоритм автоматической классификации позволит проводить оценку диагностируемой батареи относительно других однотипных батарей.

Для программной реализации была выбрана среда программирования LabVIEW как наиболее удобная, понятная и функциональная. LabVIEW (англ. Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench) - это среда разработки и платформа для выполнения программ, созданных на графическом языке программирования «G» фирмы National Instruments (США). Он основан на архитектуре потоков данных. Последовательность выполнения операторов в таких языках определяется не порядком их следования (как в императивных языках программирования), а наличием данных на входах этих операторов. Операторы, не связанные по данным, выполняются параллельно в произвольном порядке.

Программа LabVIEW называется и является виртуальным прибором (англ. Virtual Instrument) и состоит из двух частей:

- блочной диаграммы, описывающей логику работы виртуального прибора;
- лицевой панели, описывающей внешний интерфейс виртуального прибора.

LabVIEW поддерживает огромный спектр оборудования различных производителей и имеет в своём составе многочисленные библиотеки компонентов:

- для подключения внешнего оборудования по наиболее распространённым интерфейсам и протоколам;
- для удалённого управления ходом эксперимента;
- для управления роботами и системами машинного зрения;
- для генерации и цифровой обработки сигналов;
- для применения разнообразных математических методов обработки данных;
- для визуализации данных и результатов их обработки (включая 3D-модели);
- для моделирования сложных систем;
- для хранения информации в базах данных и генерации отчетов;
- для взаимодействия с другими приложениями.

Специальный компонент LabVIEW Application Builder позволяет создавать LabVIEW-программы, пригодные для выполнения на тех компьютерах, на которых не установлена полная среда разработки. Для работы таких программ требуется бесплатно распространяемый компонент «LabVIEW Runtime Engine» и, при необходимости, драйверы используемых внешних устройств [84].

#### **4.1 Программно-аппаратная реализация «Измерителя параметров АБ»**

Для построения комплексной системы диагностики в первую очередь необходимы средства измерения входящие в ее состав. Принцип измерения параметров АБ на переменном токе, описанный в разделе 2.1.4 может быть реализован на персональном компьютере с использованием звуковой платы [62]. Однако измерительную схему необходимо доработать, добавив параллельно исследуемому элементу разделительный конденсатор, для возможности измерения параметров батарей с номинальным напряжением более 5 В. Кроме того согласно разделу 3.3, параметр напряжения разомкнутой цепи необходим для корректной классификации АБ. Поэтому, в измерительную систему необходимо добавить

средство измерения НРЦ. Структурная схема такого измерения представлена на рис. 4.1.

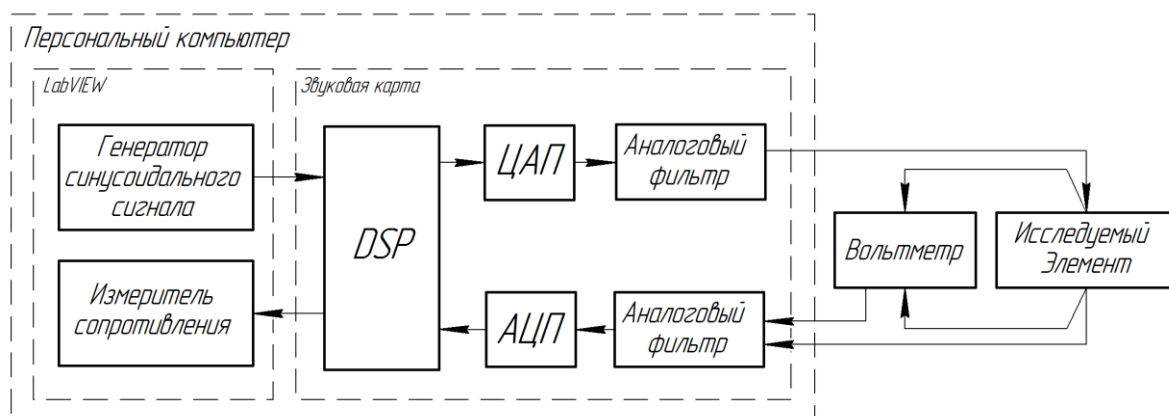


Рис. 4.1. Структурная схема измерения параметров АБ

Согласно схеме на рис. 4.1 часть программы измерителя, называемая «Генератор синусоидального сигнала», которая управляет звуковой картой и, в частности, цифровым сигнальным процессором (DSP). Сгенерированный с заданными параметрами сигнал проходит через процедуру цифро-аналогового преобразования, проходит через фильтры звуковой карты и поступает на исследуемый элемент. Далее полученный сигнал поступает на входные фильтры, происходит процесс аналого-цифрового преобразования, после чего через блок DSP звуковой карты и обрабатывается частью программы «Измеритель сопротивления» [62]. Блок «Вольтметр» представляет собой преобразователь напряжение-частота (ПНЧ). Его измерительные щупы подключаются к выводам исследуемого элемента. Сигнал, генерируемый в диапазоне частот 0 - 20 кГц, проходит через фильтры звуковой карты, преобразуется АЦП и программа «Измеритель сопротивления» вычисляет его текущую частоту. Умножением на коэффициенты пересчета, полученный результат преобразуется в значение напряжения исследуемого элемента.

#### 4.1.1 Программная реализация «Измерителя параметров АБ»

Подпрограмма «Генератор синусоидального сигнала» должна иметь возможность настройки параметров выбранной звуковой карты. В ней должны быть

регулировки параметров генерируемого сигнала. Разрабатываемое приложение может использоваться на слабых персональных компьютерах, поэтому следует добавить возможность выбора количества точек на период в генерируемом сигнале.

Блок-схема алгоритма работы генератора приведена на рис. 4.2. Перед запуском генератора, пользователь вводит параметры звуковой карты и параметры генерируемого сигнала, либо оставляет их по умолчанию. Затем программа сохраняет введенные данные, начинается инициализация звуковой карты. Как только устройство готово, заданные параметры применяются, и происходит генерация сигнала. Полученный сигнал записывается в буфер и направляется на выход звуковой карты. Процесс генерации останавливается, как только нажимается кнопка «Стоп», либо как только происходит ошибка. Затем буфер очищается, устройства переходят в режим «по умолчанию», производится обработка ошибок, если они есть [62].

Часть программы анализатора АБ «Измеритель сопротивления» более сложная. В ее составе должны быть дополнительные подпрограммы. Измеритель должен обрабатывать входной сигнал, управлять оцифровкой с заданными пользователем параметрами. Так как среда разработки LabVIEW является 32-разрядной программой, то имеется возможность интерполяции сигналов, что может увеличить точность. Необходимо создать блок калибровки амплитуды, который позволит избавиться от аддитивной погрешности. Пока программа собирает и обрабатывает данные, желательно выводить накапливаемые значения, для удобства контроля процесса измерения. После остановки сбора данных, программа должна рассчитывать среднее значение за время измерения и выводить результат на экран [62].

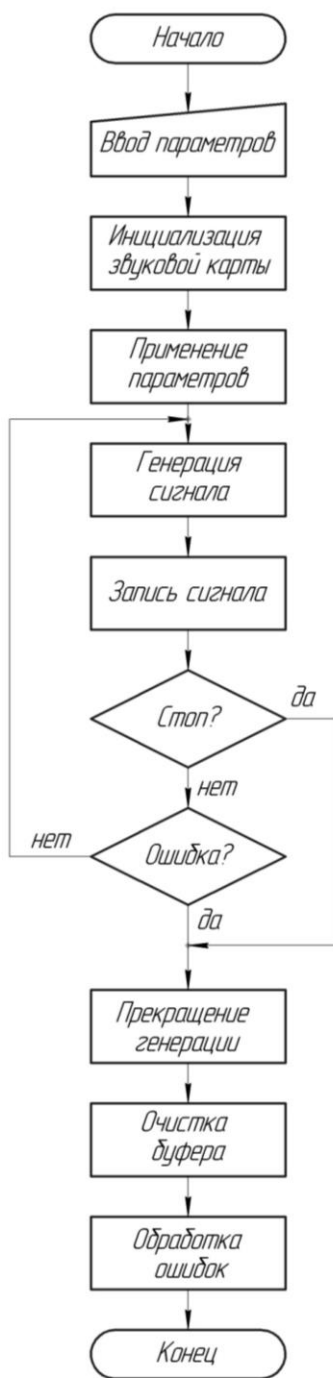


Рис. 4.2. Алгоритм работы генератора синусоидального сигнала

Блок-схема алгоритма измерителя сопротивления приведена на рис. 4.3.

До начала измерения, пользователь вводит параметры звуковой карты, и параметры оцифровки, либо оставляет их по умолчанию. Затем программа сохраняет введённые данные, начинается инициализация звуковой карты. Как только устройство готово, заданные параметры применяются, и начинается сбор

данных. Сигналы считываются с входов звуковой карты, и происходит процесс интерполяции – увеличение частоты дискретизации путем вычисления промежуточных отсчётов по уже имеющимся.

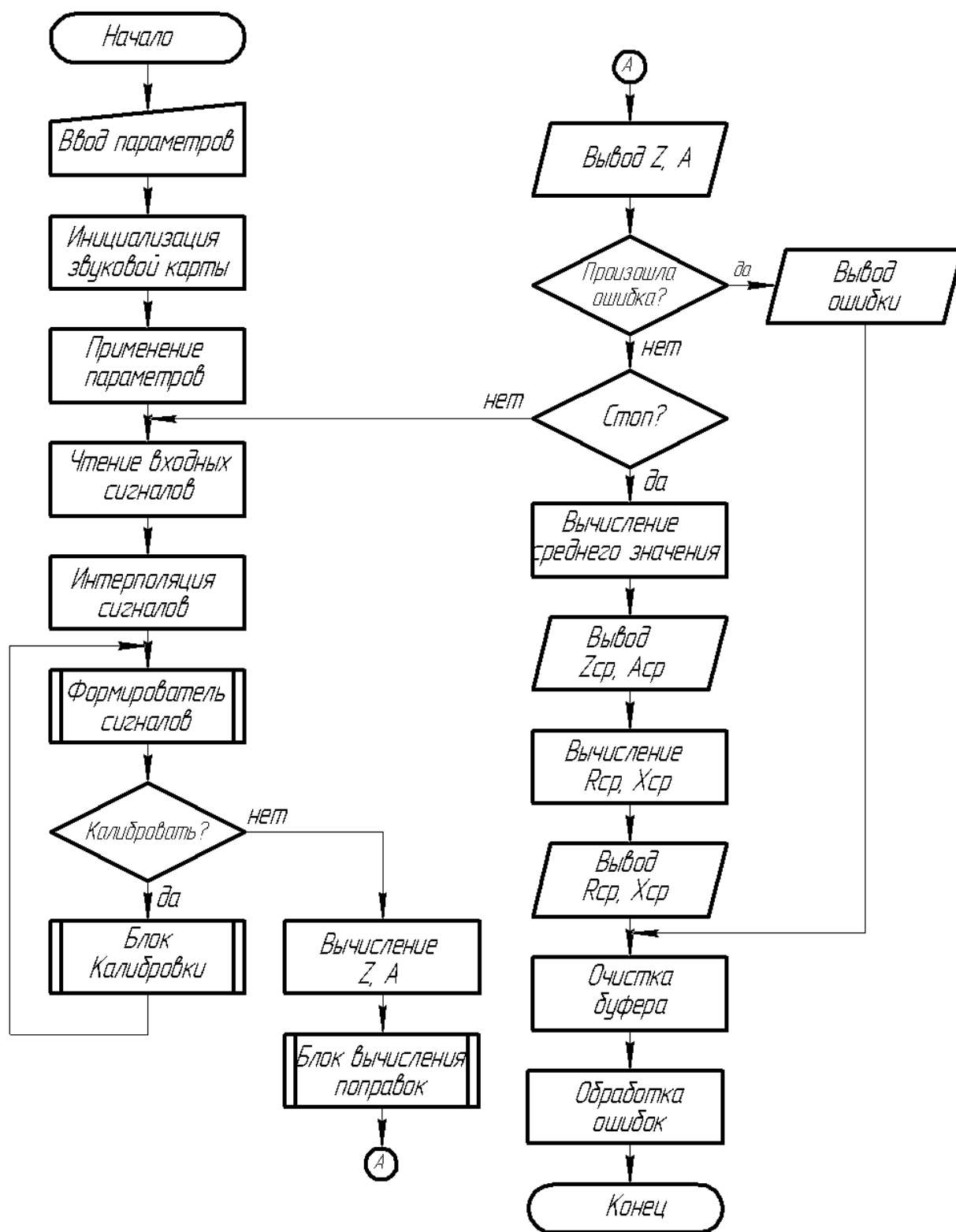


Рис. 4.3. Алгоритм работы измерителя сопротивления



Затем в работу включается подпрограмма «Формирователь сигналов». Эта программа вычисляет постоянную составляющую, и вычитает полученное значение из массива данных. Также в этом блоке происходит изменение сигнала с учётом коэффициентов калибровки и вычисление среднеквадратичного значения напряжения. Блок калибровки осуществляет пересчёт и хранение коэффициентов калибровки с учётом заданного в генераторе значения амплитуды. Далее по полученным данным программа рассчитывает полное сопротивление, проводимость и угол сдвига фаз между сигналами с левого и правого входов звуковой карты. Блок вычисления поправок вычисляет значение ошибки, вносимой разделительным конденсатором, установленным на входе системы. Ошибка имеет частотную зависимость и вычисляется для каждой частоты тестового сигнала отдельно. После остановки сбора данных, вычисляется среднее значение полного сопротивления, проводимости и угла сдвига фаз, и затем рассчитывается активная и реактивная составляющие полного сопротивления. После вывода всех значений, программа очищает буфер и обрабатывает ошибки, если они есть.

Подпрограмма «Формирователь сигналов» выделяет из входного массива данных сигналы с левого и правого канала. Затем каждый из них калибруется с учётом рассчитанных коэффициентов пересчёта. Также в этом блоке устраняется постоянная составляющая и вычисляется действующее значение для обоих сигналов. «Формирователь сигналов» имеет пять различных выводов. Выводы «RMS (L)» и «RMS (R)» в результате выполнения подпрограммы будут содержать действующие значения напряжения на левом и правом входах звуковой платы соответственно (рис. 4.4). Выводы «Левый канал» и «Правый канал» в результате выполнения подпрограммы содержат массивы данных полученных при оцифровке сигналов на левом и правом каналах соответственно. Эти данные предназначены для дальнейшей обработки и вычисления значений сопротивления и фазы. Вывод «Экран» содержит массив данных, составленный из массивов «Левый канал» и «Правый канал». Он предназначен для вывода осциллограмм сигналов на экран (рис. 4.4).

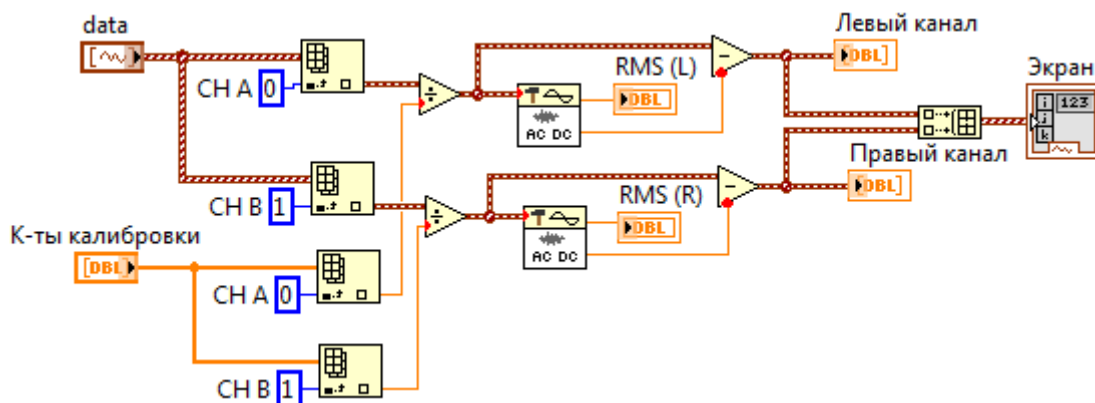


Рис. 4.4. Программный код «Формирователя сигналов»

Программа калибровки предназначена для вычисления и хранения коэффициентов преобразования. Необходимость такого блока вызвана тем, что АЦП звуковой платы изначально не предназначался для измерения амплитуды сигналов, а потому не имеет определенных и нормированных коэффициентов пересчета. Поэтому каждый раз при запуске программы анализатора необходимо сначала вычислить этот коэффициент, а затем, учитывая его значение, преобразовать получаемые от АЦП данные.

Программный код блока калибровки представлен на рис. 4.5.

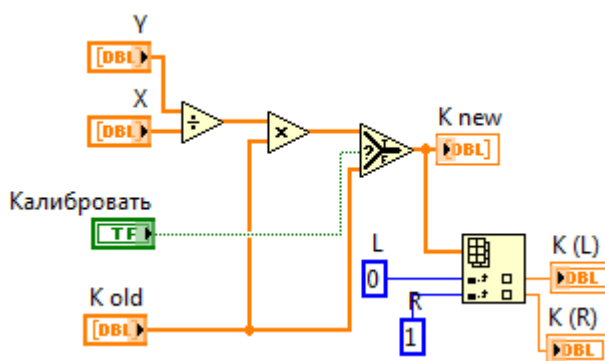


Рис. 4.5. Программный код блока «Калибровка»

Перед калибровкой щупы анализатора соединяются накоротко (исключается исследуемый элемент). В генераторе устанавливается амплитуда сигнала (обычно 1 В). На вход «Y» подается величина действующего значения генерируемого сигнала. Если в блоке генератора задана амплитуда сигнала  $U_A = 1$  В, то на вход «Y»

подаётся действующее значение  $U_D = \sqrt{2}$ . На вход «X», в свою очередь, подаётся действующее значение измеренного сигнала [62].

По нажатию кнопки «Калибровать» происходит перерасчёт коэффициентов преобразования, которые отправляются в «Формирователь сигналов». Выводы «К (L)» и «К (R)» – коэффициенты калибровки сигнала левого и правого каналов соответственно. При помощи этих выводов можно отображать значения коэффициентов на индикаторы [62].

Блок вычисления поправок отсутствовал в программном коде, представленном авторами в [62]. Но необходимость включения в цепь измерения разделительного конденсатора потребовала доработки исходного кода. Блок вычисления поправок предназначен для вычисления значения ошибки вносимой в результаты измерения полного сопротивления  $Z$  и угла сдвига фаз  $A$ . Значения этих ошибок равны полному сопротивлению разделительного конденсатора, включенного последовательно исследуемому элементу, и углу сдвига фаз, вызванного этим конденсатором, соответственно.

Сопротивление идеальной емкости переменному току определяется формулой [45]

$$X_C = \frac{1}{2\pi f \cdot C_K}$$

где  $f$  – частота переменного тока, Гц;  $C_K$  – емкость конденсатора, Ф.

То есть, ошибка, вносимая в значение полного сопротивления, будет тем меньше чем выше емкость  $C_K$  разделительного конденсатора. Электролитические конденсаторы - наиболее доступны из типов, обладающих большой емкостью. Поэтому в качестве разделительного конденсатора был выбран электролитический конденсатор емкостью  $C_K = 4700$  мкФ.

Частотная зависимость полного сопротивления разделительного конденсатора приведена на рис. 4.6. Методом наименьших квадратов была подобрана функция, максимально точно описывающая эту зависимость. Аппроксимация зависимости проводилась при помощи программы TabeCurve 2D v.5.01 разработки © SYSTAT Software Inc. Уравнение подобранной функции имеет вид

$$Z = \frac{1}{a_9 + \frac{b_9}{\ln f}} \quad (4.1)$$

где  $Z$  – полное сопротивление АБ;  $f$  – частота тестового сигнала;  $a_9 = -64,2$  и  $b_9 = -174$  – коэффициенты алгебраического уравнения (4.1).

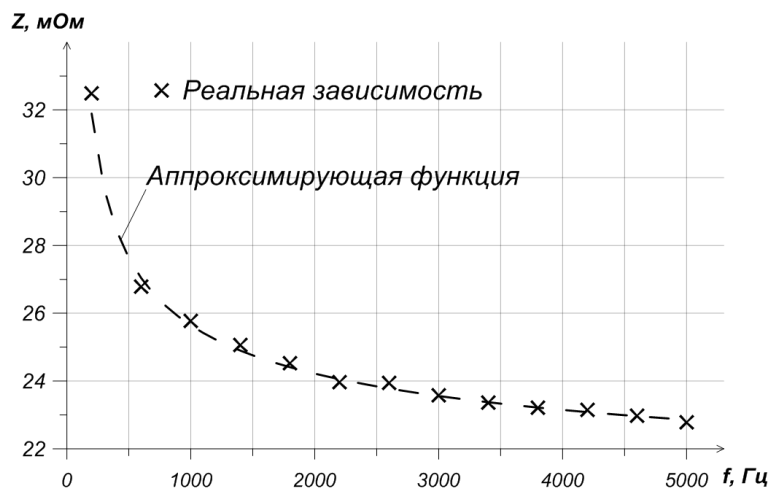


Рис. 4.6. Частотная зависимость полного сопротивления  $Z$  разделительного конденсатора

График функции (4.1) приведен на рис. 4.6 (аппроксимирующая функция). Статистическая ошибка подбора составила 0,16 мОм. Разность сдвига фаз тока и напряжения на разделительном конденсаторе так же зависит от частоты. График этой зависимости приведен на рис. 4.7.

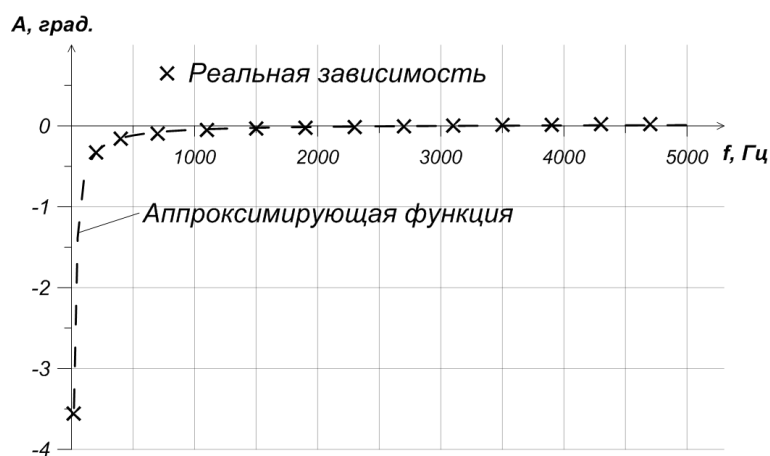


Рис. 4.7. Частотная зависимость разности фаз  $A$  разделительного конденсатора  
Методом наименьших квадратов была подобрана функция, максимально точно описывающая эту зависимость. Уравнение подобранной функции имеет вид

$$A = a_{10} + \frac{b_{10}}{f} \quad (4.2)$$

где  $A$  – разность сдвигов фаз тока и напряжения на разделительном конденсаторе;  $f$  – частота тестового сигнала;  $a_{10} = 0,02$  и  $b_{10} = -70,2$  – коэффициенты алгебраического уравнения (4.2).

График функции (4.2) приведен на рис. 4.7 (аппроксимирующая функция). Статистическая ошибка подбора составила 0,01 градус.

Очевидно, что аппроксимирующие функции (4.1) и (4.2) с высокой степенью точности описывает частотные зависимости полного сопротивления  $Z$  и разности фаз  $A$  разделительного конденсатора. Это позволяет использовать выражения (4.1) и (4.2) для вычисления значений ошибок, вносимых разделительным конденсатором.

Программный код блока вычисления поправок представлен на рис. 4.8. Блок имеет вход «Частота, Гц» на который подается текущее значение частоты тестового сигнала. По значениям частоты и коэффициентов уравнений (4.1) и (4.2) (на рис. 4.8  $a_1$ ,  $b_1$ ,  $a_2$  и  $b_2$ ) вычисляются значения полного сопротивления ( $ErrZ$ ) и разности фаз ( $ErrA$ ) разделительного конденсатора. Эти значения выводятся на выходы «Поправка Z, Ом» и «Поправка A, Ом».

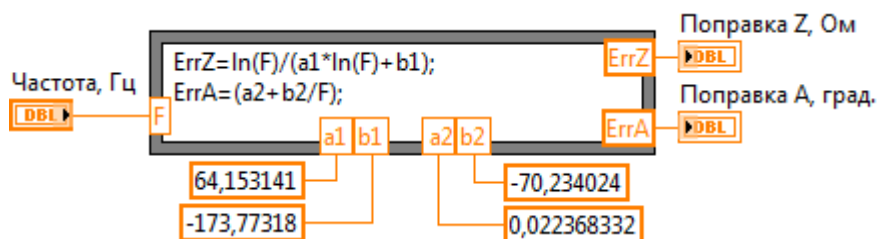


Рис. 4.8. Программный код блока внесения поправок

Нужно заметить, что коэффициенты уравнения (4.1) подобраны для описания зависимости полного сопротивления  $Z$  в омах. Для получения значений ошибки  $ErrZ$  в миллиомах коэффициенты  $a_9$  и  $b_9$  должны быть уменьшены в 1000 раз.

Программа, описанная в [62] позволяет за одну операцию измерения получить значения параметров исследуемого элемента лишь на одной частоте тестового сигнала. Для получения частотных зависимостей параметров необходимо вручную задавать значения частоты. Кроме того, в авторском варианте программы значения

параметров выводятся только на лицевую панель программы, и для, дальнейшей их обработки, необходимо вручную переносить данные в таблицу.

Для автоматического измерения параметров на нескольких частотах в программу измерителя сопротивления был добавлен блок перебора частот. Его программный код приведен на рис. 4.9.

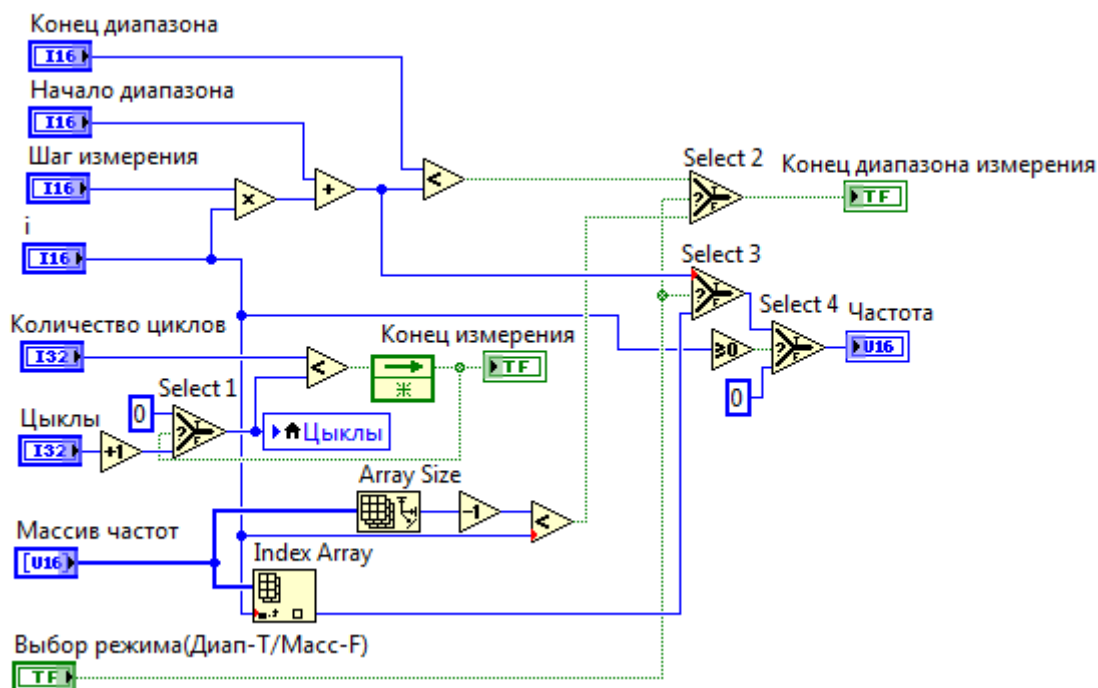


Рис. 4.9. Программный код блока перебора частот

Блок перебора частот позволяет задавать значения частоты тестового сигнала из выбранного диапазона частот с определенным шагом или из массива, заранее записанных значений. Для выбора источника значений частот служит логический вход «Выбор режима». Соответственно, для перебора частот из диапазона на этот вход устанавливается истинное значение (TRUE), а для перебора из массива – ложное (FALSE). Смена режима осуществляется переключением коммутаторов «Select 2» и «Select 3», подключенных к выходам «Конец диапазона измерения» и «Частота» (через коммутатор «Select 4»).

Диапазон частот задается значениями его границ, которые указываются на входах «Начало диапазона» и «Конец диапазона». Шаг сканирования заданного диапазона определяется значением на входе «Шаг измерения». Значение на входе «Количество циклов» определяет количество измерений выполняемых на одной

частоте тестового сигнала. Впоследствии, на основе результатов нескольких измерений вычисляется среднее значение. На элементах вход «Циклы», одноименная глобальная переменная и «Select 1» построен счетчик циклов измерения, который отсчитывает количество проведенных измерений на текущей частоте. Когда глобальная переменная «Циклы» примет значение превышающее значение на входе «Количество циклов», счетчик циклов обнуляется и на выход «Конец измерения» будет выведено истинное значение (TRUE).

На вход «i» подаются значения внешнего счетчика. Этот счетчик инкрементируется при завершении всех циклов измерения на текущей частоте, то есть при появлении истинного значения на выходе «Конец измерения». В режиме перебора частот из диапазона значение на входе «i» равно количеству шагов «Шаг частоты», которое необходимо отступить от начала диапазона для выбора следующего значения частоты. Когда на выходе «Частота» установится значение превышающее значение на входе «Конец диапазона», счетчик шагов «i» принимает значение -2. Это происходит при установке истинного значения на выходе «Конец диапазона измерения».

При появлении на входе «i» отрицательного значения коммутатор «Select 4» переключается и на выход «Частота» подается значение 0. Иначе, при положительных значениях «i», коммутатор «Select 4» на выход «Частота» выводит значения задаваемых частот. Таким образом, первые два значения частоты будут равны нулю. Поскольку напряжение исследуемого элемента измеряется посредством ПНЧ, то для получения значений напряжения необходимо измерить частоту сигнала ПНЧ. Установка частоты генератора в нулевое значение останавливает генерацию тестового сигнала и позволяет в течение этих двух тактов произвести измерение частоты сигнала ПНЧ. Измерение производится стандартным инструментом LabVIEW «Extract Single Tone Information VI», которым производится контрольное вычисление частоты тестового сигнала.

В режиме перебора частот из заданного массива значение на входе «i» определяет индекс элемента этого массива. Последовательное инкрементирование внешнего счетчика шагов обеспечивает последовательный перебор всех элементов

массива частот. Массив вводится в блок перебора частот через вход «Массив частот». Выделение из массива элемента с указанным индексом производит инструмент «Index Array». Внесение во внешний счетчик значения -2 происходит при достижении им значения превышающего число элементов массива, которое вычисляется элементом «Array Size».

Истинное значение (TRUE) на выходе «Конец диапазона измерения» в любом из режимов так же инициирует запись усредненных значений параметров исследуемого элемента в текстовый файл с расширением .txt.

Надо заметить, что в режиме перебора частот из диапазона значения частоты возрастают строго в арифметической прогрессии. Учитывая то, что частотные зависимости параметров АБ не линейны, на некоторых поддиапазонах возникает потребность увеличить плотность измерений (уменьшить шаг перебора частот), а в некоторых – уменьшить (увеличить шаг перебора частот). Простейшим решением такой задачи является режим перебора из массива. Он позволяет однажды подобрать наиболее оптимальный набор частот и проводить на нем все необходимые измерения.

В авторском исполнении [62] измеритель параметров состоит из двух независимых программ: «Генератора синусоидального сигнала» и «Измерителя сопротивления». Однако такое разделение не позволяет производить автоматическую перестройку частоты для снятия частотных зависимостей параметров исследуемого элемента. Поэтому программные коды этих программ были объединены, а указанные выше алгоритмы (рис. 4.2 и 4.3) остались без изменения.

Рассмотрим интерфейс программы «Измеритель параметров АБ». Лицевая панель виртуального прибора приведена на рис. 4.10.



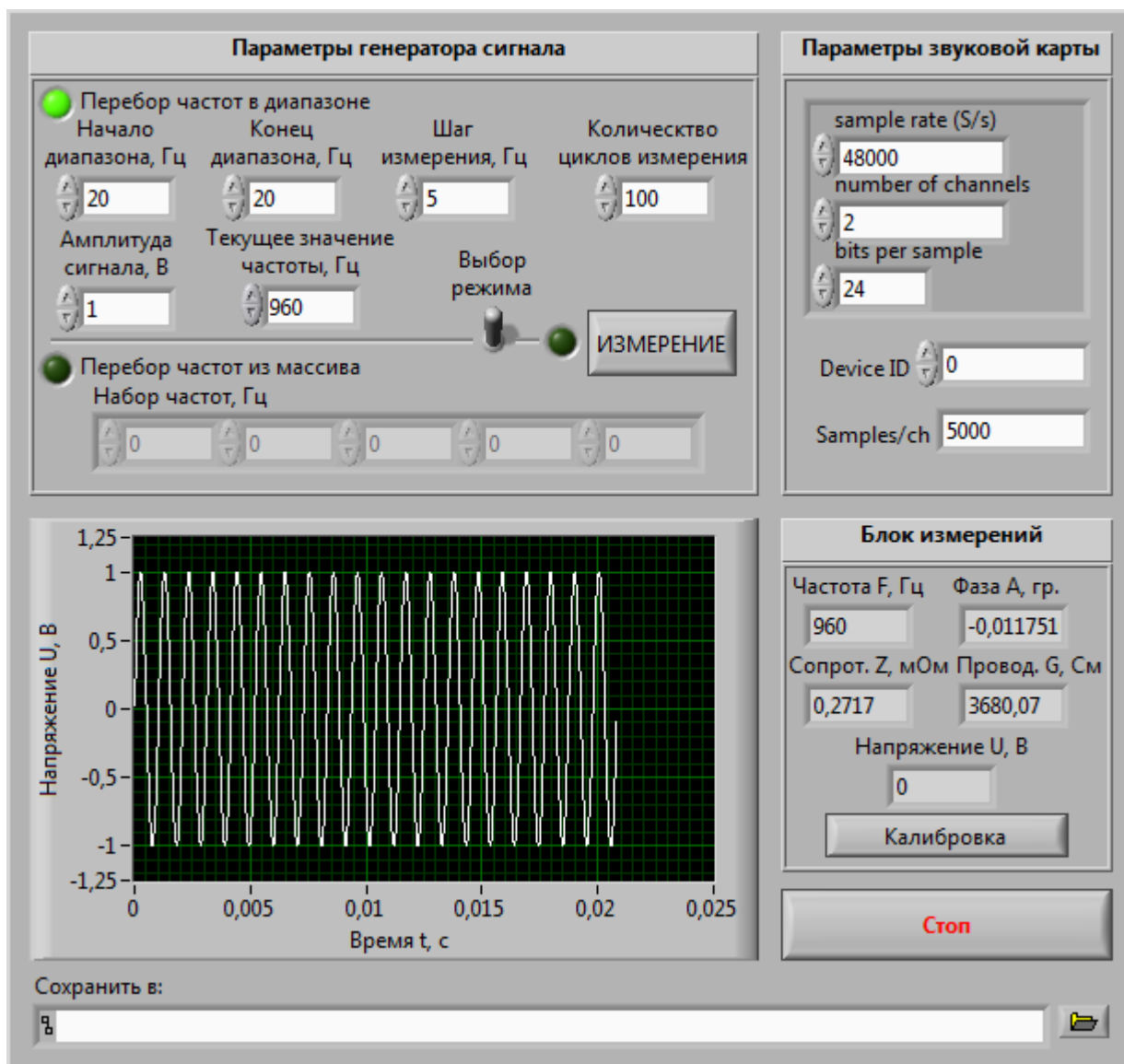


Рис. 4.10. Интерфейс программы «Измеритель параметров АБ»

В верхней левой части окна находятся поле «Параметры генератора сигнала». В этом поле расположены элементы настройки параметров генерируемого сигнала такие как «Текущее значение частоты, Гц» и «Амплитуда сигнала, В». Кроме того в поле «Параметры генератора сигнала» находятся переключатель режимов перебора «Выбор режима», настройки диапазона и шага частот тестового сигнала, настройки количества циклов измерений для каждого из значений частоты и поля для заполнения в массив значений частот. В том же поле находится кнопка «Измерение», при нажатии которой запускается автоматический перебор частот и сбор усредненных значений параметров исследуемого элемента. Такими

параметрами стали Напряжение  $U$ , полное  $Z$ , активное  $R$  и реактивное  $X$  сопротивления и значение угла сдвига фазы  $A$ .

В верхней правой части интерфейса располагается поле «Параметры звуковой карты». В нем находятся элементы настройки частоты дискретизации ЦАП и АЦП в герцах «Sample rate (S/s)», количество измерительных каналов и каналов «Number of channels» и разрядность ЦАП и АЦП в битах «Bits per sample». Кроме того, в этом поле выбирается порядковый номер звуковой платы, используемой для измерения «Device ID» и количество точек на канал в исследуемом сигнале «Samples/ch».

Справа по центру интерфейса «Измерителя параметров АБ» выделено поле «Блок измерения». В нем расположены индикаторы измеряемых значений, такие как «Частота  $F$ , Гц», «Фаза  $A$ , гр.», «Сопротивление  $Z$ , Ом», «Проводимость  $G$ , См», «Напряжение  $U$ , В». Также в этом поле находится кнопка «Калибровка», по нажатию которой производится вычисление коэффициентов преобразования амплитуд входных сигналов. Принцип вычисления коэффициентов пересчета раскрыт выше при описании блока калибровки. Ниже поля «Блок измерения» расположена кнопка «Стоп», по нажатию которой останавливается генерация сигналов и измерение параметров.

Внизу окна интерфейса расположена строка «Сохранить в:», где указывается адрес и имя файла для сохранения измеренных параметров. Данные сохраняются в виде текста в файл с расширением .txt.

В центре интерфейса расположен экран виртуального осциллографа, на котором можно наглядно увидеть разность амплитуд и сдвиг по фазе сигналов регистрируемых правым и левым каналами звуковой карты.

#### **4.1.2 Аппаратная реализация измерителя параметров АБ**

Как упоминалось в разделе 4.1 в качестве измерительной схемы «Измерителя параметров АБ» для измерения сопротивлений АБ выбрана схема, представленная в разделе 2.1.4 (рис. 2.13). Несколько измененная она приведена на рис. 4.11.

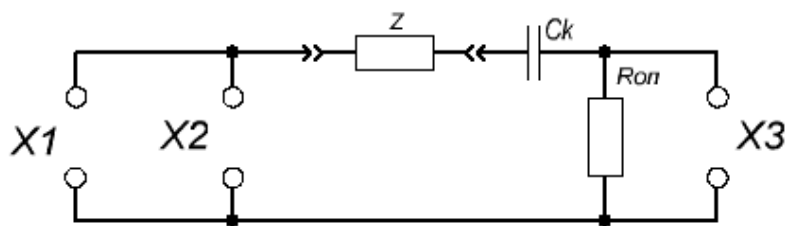


Рис. 4.11. Измерительная схема «Измерителя параметров АБ»

К разъему  $X1$  подключается генератор тестового сигнала. В нашем случае это один из каналов линейного выхода звуковой карты. К разъемам  $X2$  и  $X3$ , согласно схеме на рис. 2.13, подключаются вольтметры, регистрирующие напряжение генератора и падение напряжения на опорном резисторе  $R_{оп}$  (ток через исследуемый элемент  $Z$ ). В нашем случае эти разъемы подключатся левому ( $X2$ ) и правому ( $X3$ ) каналам линейного входа звуковой карты. Смена каналов на противоположные не допустима, так как это приводит к ошибочному вычислению полного сопротивления  $Z$  и неверному определению знака угла сдвига фаз  $A$ . Номинал сопротивления  $R_{оп}$  подбирается так из соображений минимальной нагрузки на выходной каскад линейного выхода звуковой карты. Как правило, это сопротивление выбирается в пределах 30-34 Ом. Разделительный конденсатор  $C_K$  позволяет производить измерения параметров батарей с номинальным напряжением выше 5 В. Его тип номинал (электролитический конденсатор емкостью  $C_K = 4700$  мкФ с допустимым напряжением 50 В) выбран с учетом минимальных размеров и максимальной емкости.

Для измерения напряжения разомкнутой цепи используется преобразователь напряжение-частота типа AD654 производства фирмы Analog Devices. Согласно техническому описанию [9] напряжение питания этой интегральной микросхемы (ИМС) варьируется в пределах от 5 до 36 В. ИМС обладает высоким входным сопротивлением - 250 Мом, имеет малый температурный дрейф нуля - 4 мкВ/°С и малый температурный дрейф коэффициента преобразования -  $50 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  [86]. Типовая схема включения AD654 приведена на рис. 4.12.

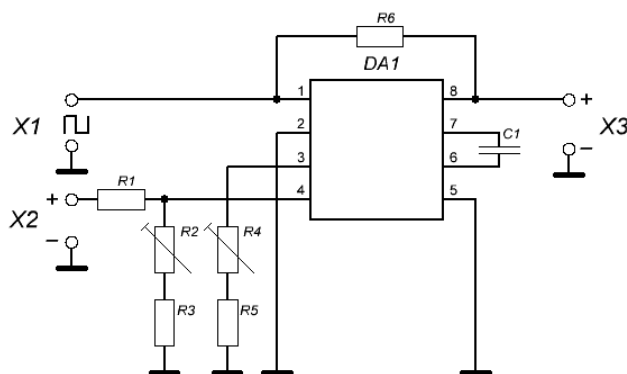


Рис. 4.12. Типовая схема включения AD654

На рис. 4.12  $DA1$  – ИМС AD654, на разъем  $X1$  выводится генерируемый сигнал, на разъем  $X2$  – поступает измеряемый сигнал, к разъему  $X3$  подключается источник питания.

На разъем  $X1$  выводится генерируемый сигнал частотой  $f$ . Эта частота может достигать значения 500 кГц [9]. Ее значение определяется формулой

$$f_{\max} = \frac{U_{IN \max}}{10 \cdot (R4 + R5) \cdot C1} \quad (4.3)$$

где  $f_{\max}$  – максимальная частота выходного сигнала, Гц;  $U_{IN \max}$  – максимальное напряжение входного сигнала на выводе 4 ИМС  $DA1$  (рис. 4.12), В;  $R4$  и  $R5$  – номиналы резисторов, Ом;  $C1$  – номинал конденсатора, Ф. Напряжение входного сигнала  $U_{IN}$  может принимать значения в диапазоне от 3 мВ до 30 В [9]. Однако верхний предел  $U_{IN \max}$  этого диапазона ограничивается напряжением питания

$$U_{IN \max} = U_{\Pi} - 4$$

Задачей схемы на рис. 4.12 должно стать измерение напряжения аккумуляторных батарей в сопряжении со звуковой картой. В качестве источника питания ПНЧ удобно использовать шину питания USB устройств компьютера. Напряжение питания шины USB согласно спецификации [36] лежит в пределах 4,75–5,25 В (в среднем 5 В). Таким образом, максимальное напряжение входного сигнала на выводе 4 ИМС  $DA1$  должно быть ограничено значением 1 В. Однако, большинство химических источников тока имеют значение НРЦ превышающее 1 В. В основном значение НРЦ ХИТ и АБ не превышает 20 В. Примем это значение как

максимальное входное напряжение схемы ПНЧ (рис. 4.12) и рассчитаем номиналы резисторов делителя напряжения  $R1R2R3$ . Для этого воспользуемся формулой

$$U_{IN\ max} = \frac{U_{max} \cdot (R2 + R3)}{R1 + (R2 + R3)} \quad (4.4)$$

где  $U_{max}$  – максимальное входное напряжение на разъеме  $X2$ ;  $R1$ ,  $R2$ ,  $R3$  – номиналы резисторов.

Примем, что суммарное значение сопротивлений  $R2$  и  $R3$  равно 1 кОм. Рассчитаем значение резистора  $R1$  исходя условий, что  $U_{max} = 20$  В,  $U_{IN\ max} = 1$  В,  $R2+R3 = 1$  кОм

$$1 = \frac{20 \cdot 1000}{R1 + 1000}$$

Выразив  $R1$ , получим его значение равное 19 кОм.

Частота выходного сигнала ПНЧ должна принимать значения в пределах полосы пропускания звуковой карты. Обычно она укладывается в диапазон 100-20000 Гц. То есть максимальная частота выходного сигнала не должна превышать 20 кГц.

Для стабильной работы ИМС  $DA1$  резисторы  $R4$  и  $R5$  должны ограничивать ток в своей цепи на уровне 1 мА. Увеличение этого параметра приведет к уменьшению линейности преобразования напряжение-частота [9]. При максимальном входном напряжении на выводе 4 ИМС  $DA1$   $U_{IN\ max} = 1$  В суммарное сопротивление  $R4$  и  $R5$  должно быть на уровне 1 кОм. Поэтому для получения частоты выходного сигнала  $f_{max} = 20$  кГц необходимо рассчитать лишь значение конденсатора  $C1$ . Подставив в выражение (4.3) значения  $f_{max} = 20$  кГц,  $U_{IN\ max} = 1$  В,  $R4+R5 = 1$  кОм получим

$$20000 = \frac{1}{10 \cdot 1000 \cdot C1}$$

Выразим значение  $C1$

$$C1 = \frac{1}{20000 \cdot 10 \cdot 1000} = 5 \cdot 10^{-9} \Phi$$

Вывод 1 ИМС  $DA1$  является открытым коллектором интегрированного транзистора. Соответственно для правильной работы ПНЧ вывод 1 необходимо

«подтянуть» к шине питания резистором  $R_6$ . Его номинал может варьироваться в пределах 4 - 10 кОм.

#### 4.2 Программная реализация «Анализатора АБ»

Зная только значения параметров аккумуляторной батареи (активного сопротивления и характеристической частоты) без дополнительной их обработки крайне сложно оценить состояние исследуемой батареи. Приведенные в главах 2 и 3 результаты исследований позволяют прогнозировать некоторые эксплуатационные характеристики АБ и подразделять множество батарей одного типа на несколько классов, оперируя значениями параметров АБ. Таким образом, в состав комплексной системы диагностики АБ можно ввести программное обеспечение, способное проводить обработку параметров АБ, результатом которой станут значения эксплуатационных характеристик и номер класса анализируемой батареи.

Вычисление эксплуатационных характеристик и классификация выполняются параллельно, независимо друг от друга на основе одних и тех же значений параметров АБ. Поэтому для наглядности разделим эти задачи на два независимых алгоритма.

Для вычисления резервной  $C_R$  и номинальной  $C_{20}$  емкостей необходимо массив параметров активного, реактивного сопротивлений и значения частот на которых они измерялись прочитать из файла. Этот файл с расширением .txt формируется и записывается программой «Измеритель параметров АБ». Данные в файле содержатся в виде таблицы. После чтения файла из общего массива данных необходимо выделить значения частот тестового сигнала  $f$  и соответствующие им значения реактивного сопротивления  $X$ . Эти значения образуют частотную зависимость реактивного сопротивления  $X(f)$ , по которой методом наименьших квадратов подбираются коэффициенты уравнения (2.32) (см. раздел 2.2.4). Из полученных значений коэффициентов, используя уравнение (2.34) (см. раздел 2.2.4) вычисляется корень этого уравнения. Как было показано в разделе 2.2.4 именно корень № 1, который выражается уравнением

$$f_1 = \frac{-a + \sqrt{a^2 + 4bc}}{2b}$$

где  $a$ ,  $b$  и  $c$  – коэффициенты, подобранные при аппроксимации реальной частотной характеристики реактивного сопротивления  $X$  уравнением (2.26), принимает значение характеристической частоты исследуемой батареи. В следующем шаге программа по значениям активного сопротивления и характеристической частоты должна вычислить значения эксплуатационных характеристик. Операция вычисления номинальной емкости  $C_{20}$  выполняется по уравнениям (2.16) и (2.18) (см. раздел 2.1.5), с последующим вычислением среднего значения. Вычисление резервной емкости  $C_R$  выполняется по выражению (2.14) (см. раздел 2.1.6). После вычисления результаты выводятся на экран в чистовом виде. Алгоритм описанной выше программы приведен на рис. 4.13.

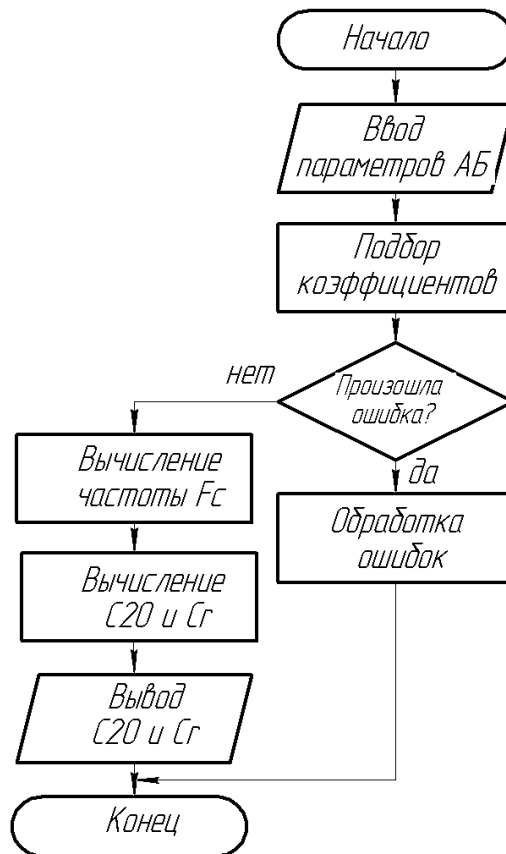


Рис. 4.13. Алгоритм программы для вычисления значений  $C_{20}$  и  $C_R$

Ввод параметров АБ в программу выполняется из файла штатным инструментом среды разработки LabVIEW «Read From Spreadsheet File VI». Данные





Array2», «Delete From Array3» выделяют из столбцов, содержащих значения реактивного сопротивления, частоты тестового сигнала и активного сопротивления, то самое количество ненулевых ячеек полученных при подсчете циклом «While Loop», начиная с элемента с индексом «0». Выделенные значения реактивного сопротивления, частоты тестового сигнала и активного сопротивления подаются в виде одномерных массивов на выходы «X», «F» и «R» соответственно.

На выход «R\_max» подается значение активного сопротивления  $R$  измеренного на максимальной частоте тестового сигнала. Для этого из одномерного массива активного сопротивления инструментом «Index Array2» выделяется последний элемент. Порядковый номер этого элемента имеет значение на единицу меньше чем количество значащих ячеек в столбцах обрабатываемого массива. Согласно разделу 2.1.5 с повышением частоты тестового сигнала влияние реактивных параметров сводится к нулю, и установившееся значение сопротивления АБ будет максимально приближено к реальному значению.

Значение напряжения разомкнутой цепи в массиве представлено только одним значением, которое записывается в первой строке столбца с порядковым номером, заданным на входе «U\_index». Значение напряжения разомкнутой цепи выделяется инструментом «Index Array» и подается на выход «U».

После выделения из общего массива и отделения нулевых (незначащих) элементов можно начать обработку параметров АБ. Согласно алгоритму на рис 4.13 первым шагом обработки должна стать подборка коэффициентов уравнения (2.31)  $X(f)$ . Следующий шаг – на основе значений коэффициентов вычисление характеристической частоты диагностируемой АБ. Эти операции выполняются блоком вычисления частоты  $F_C$ , программный код которого представлен на рис. 4.15.



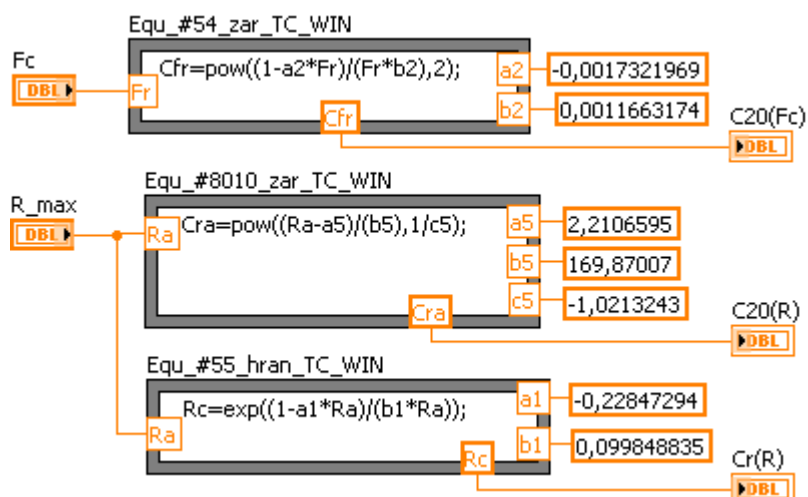


Рис. 4.16. Программный код блока вычисления характеристик  $C_R$  и  $C_{20}$

На входы « $F_c$ » и « $R_{max}$ » подаются значения ранее вычисленной характеристической частоты  $F_C$  и активного сопротивления  $R$ . Инструмент «Formula Node1» вычисляет значение номинальной емкости  $C_{20}$  по формуле (2.25) (см. раздел 2.2.2) опираясь на значение характеристической частоты. Инструменты «Formula Node2» и «Formula Node3» вычисляют значения номинальной  $C_{20}$  и резервной  $C_R$  емкостей соответственно. Вычисления выполняются по формулам (2.22) и (2.24) опираясь на значения активного сопротивления  $R$ . Результаты вычисления инструментов «Formula Node1», «Formula Node2» и «Formula Node3» выводятся на выходы « $C_{20}(F_c)$ », « $C_{20}(R)$ » и « $Cr(R)$ » (рис. 4.16). После чего из значений номинальной емкости  $C_{20}$  вне этого блока вычисляется среднее арифметическое и выводится на экран.

Алгоритм программы классификации батарей по своей структуре несколько проще. Он состоит из трех последовательных процедур классификации. Каждая последующая процедура зависит от результатов предыдущей. Алгоритм программы приведен на рис. 4.17.

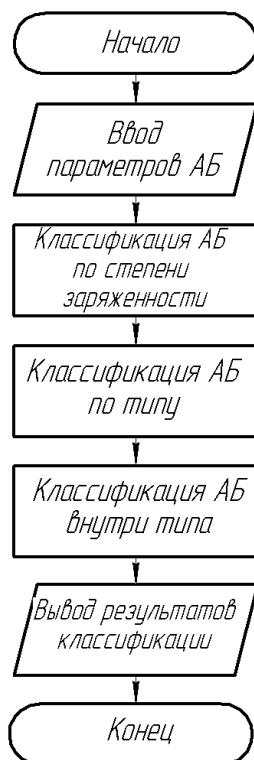


Рис. 4.17. Алгоритм программы классификации АБ

Так в первой процедуре определяется, какой из трех степеней заряженности обладает диагностируемая батарея. В зависимости от степени заряженности батареи подбирается шкала реперных точек и относительно ее выполняется классификация батареи по типу. И в завершении, в зависимости от типа батареи, выбирается необходимая шкала реперных точек для классификации батареи внутри типа. Результаты трех процедур классификации выводятся на экран.

Процедура классификации выполняется путем определения степени отклонения активного сопротивления от крайних значений шкалы реперных точек. Согласно разделу 3.1 был разработан алгоритм вычисления относительного отклонения  $M_K$ . Формирование списка реперных точек измеренного значения выполняется блоком ранжирования. Программный код этого блока представлен на рис. 4.18.

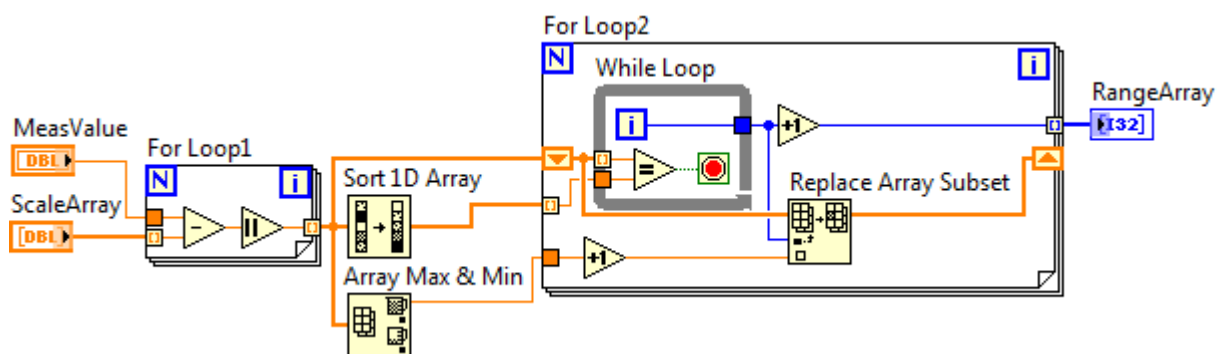


Рис. 4.18. Программный код блока ранжирования

На вход «MeasValue» подается измеренное значение, для которого необходимо сформировать список реперных точек. На вход «ScaleArray» подается множество значений шкалы реперных точек, относительно которой будет вычисляться относительное отклонение. В цикле «For Loop1» последовательно вычисляется разница между измеренным значением, заданным на входе «MeasValue» и каждым из значений шкалы реперных точек заданных на входе «ScaleArray». Далее каждое из значений разности, взятое по модулю, индексируется в массив. Полученный массив сортируется по возрастанию инструментом «Sort 1D Array».

Сортированный и несортированный массивы поступают в цикл «For Loop2». Там в цикле «While Loop» определяются индексы значений разности в неотсортированном массиве. С каждым повтором цикла «For Loop2» в него заносится очередной элемент сортированного массива разностей. Цикл «While Loop» производит перебор значений несортированного массива разностей и сравнивает каждое из них с текущим значением разности из сортированного массива. При равенстве этих двух значений цикл «While Loop» останавливается. Число повторов этого цикла, увеличенное на единицу, индексируется в массив на границе цикла «For Loop2». Инструмент «Replace Array Subset» производит замену элемента с порядковым номером, равным количеству повторов цикла «While Loop», на число на единицу больше чем максимальное значение в массиве, которое определяется инструментом «Array Max & Min». Так получается список индексов реперных точек, степень неупорядоченности которых соответствует степени

отклонения измеренного числа «MeasValue» относительно крайних точек шкалы «ScaleArray». Этот список выводится в виде массива на выход «RangeArray».

Процедуру вычисления значения относительного отклонения выполняет блок вычисления  $M_K$ . Его программный код приведен на рис. 4.19.

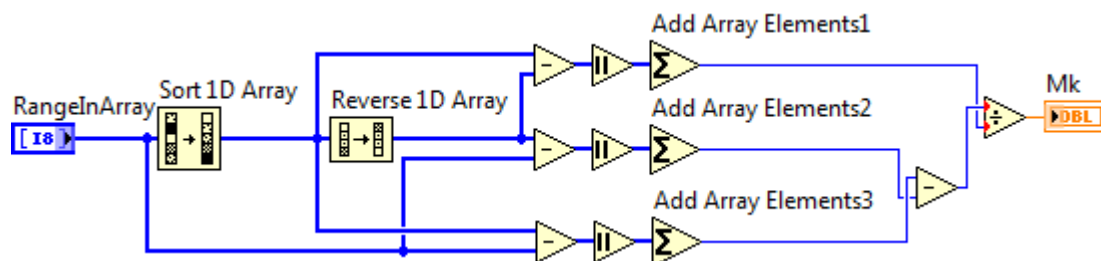


Рис. 4.19. Программный код блока вычисления  $M_K$

На вход «RangeInArray» поступает неупорядоченный список индексов реперных точек, полученный блоком ранжирования. Инструментом «Sort 1D Array» этот список упорядочивается по возрастанию, тем самым восстанавливая «прямой» список индексов шкалы реперных точек. Инструментом «Revers 1D Array» формируется «обратный» список индексов реперных точек. Далее поэлементно вычисляются разности «прямого» и «обратного» списков индексов. Значения разностей берутся по модулю и суммируются инструментом «Add Array Elements1», что соответствует вычислениям по формуле (3.8) (см. раздел 3.1). Так же вычисляются разности между входным списком «RangeInArray» и «прямым» и «обратным» списками индексов реперных точек. Значения разностей берутся по модулю и инструментами «Add Array Elements2» и «Add Array Elements3» вычисляются их суммы. Эти действия эквивалентны вычислениям по формулам (3.5). Согласно формуле (3.6), вычисляется разность сумм между значениями, полученными на инструментах «Add Array Elements2» и «Add Array Elements3». Результат этой разности, согласно формуле (3.9), делится на значение, полученное на инструменте «Add Array Elements1». Результат деления – есть относительное отклонение  $M_K$ , которое выводится на одноименный выход «Mk».

Все три этапа классификации выполняются набором описанных выше блоков ранжирования и вычисления  $M_K$ . Различия в этапах составляют лишь шкалы

реперных точек и параметр, относительно которого проводится классификация. По полученным значениям относительного отклонения  $M_K$  согласно результатам исследований (см. разделы 3.1 (табл. 3.3 - 3.5) и 3.3 (табл. 3.5)) определяется степень заряженности, тип и класс батареи внутри типа.

Программная реализация «Анализатора АБ» подразумевает совместную работу алгоритма вычисления емкостей  $C_R$  и  $C_{20}$  и алгоритма определения принадлежности диагностируемой батареи к тому или иному классу. Интерфейс разработанной программы «Анализатор АБ» содержит блок отображения результатов измерения, блок оценки ошибок подбора частотной зависимости  $X(f)$  и блок отображения результатов диагностики (рис. 4.20). Первый, из перечисленных, располагается в левом верхнем углу интерфейса. Он содержит виртуальный экран для отображения реальной частотной зависимости сопротивления  $X$  и аппроксимирующей ее кривой, построенной по функции (2.26) (см. раздел 2.2.4). Здесь можно увидеть, насколько близко к реальной зависимости была подобрана аппроксимирующая кривая. Так же в поле этого блока расположены индикаторы для отображения диагностических параметров АБ «Напряжение  $U$ , В», «Активное сопротивление  $R$ , мОм» и «Характеристическая частота  $F_C$ , Гц».

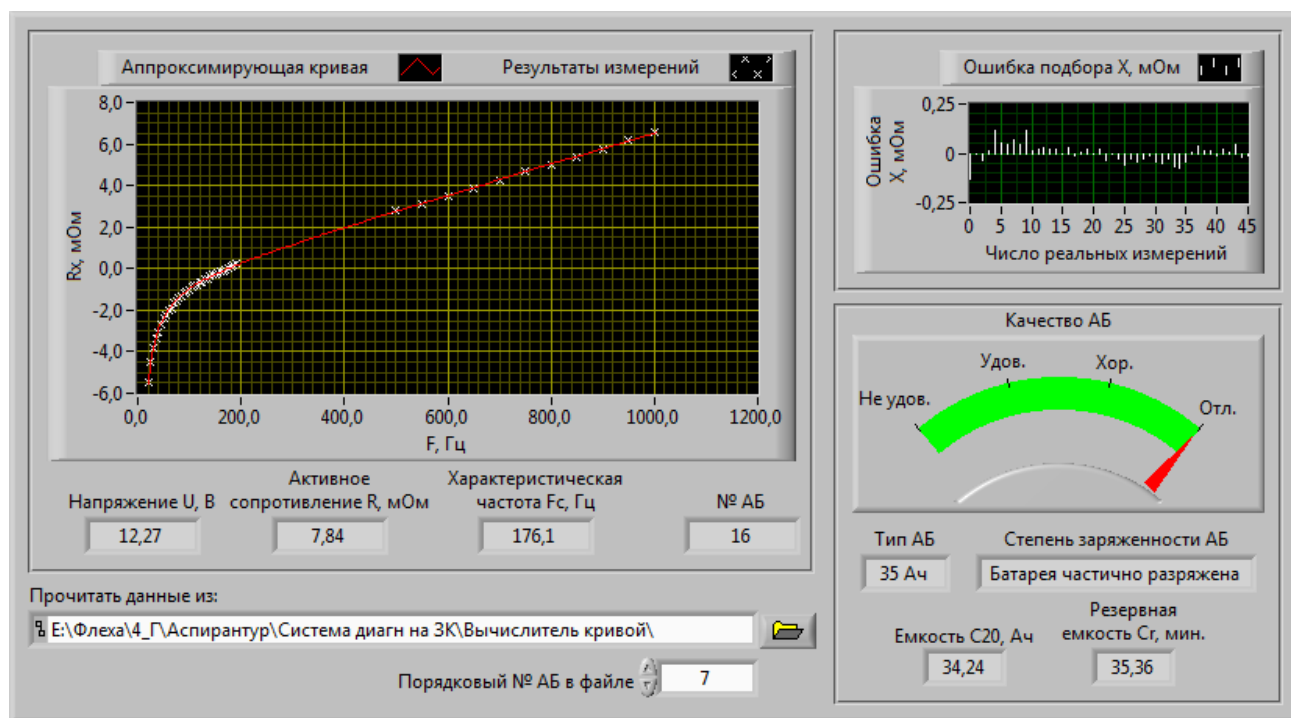


Рис. 4.20. Интерфейс программы «Анализатор АБ»

Блок оценки ошибок подбора частотной зависимости  $X(f)$  находится в правом верхнем углу интерфейса. Он содержит виртуальный экран, на котором отображаются величины отклонения реальной частотной зависимости  $X(f)$  от аппроксимирующей кривой. Этот экран позволяет оценить степень отклонения реальной зависимости от подобранной.

Блок отображения результатов диагностики расположен в правом нижнем углу интерфейса (рис. 4.20). В нем расположены индикаторы «Емкость C20, Ач» и «Резервная емкость Cr, мин.», отображающие значения вычисленных эксплуатационных характеристик. На индикаторах «Тип АБ» и «Степень заряженности АБ» выводятся наименования классов, к которым была отнесена диагностируемая батарея. Так же в этот блок входит виртуальный стрелочный индикатор «Качество АБ». Он имеет четыре отчета на шкале «Не удовлетворительное», «Удовлетворительное», «Хорошее» и «Отличное», каждый из которых соответствует одному из четырех классов, выделенных при классификации АБ внутри типа. Каждый из отчетов характеризует качество диагностируемой батареи, оцененное относительно батарей конкретного типа.

В левом нижнем углу интерфейса расположена строка «Прочитать данные из:» для указания адреса и имени файла, в который были записаны значения параметров АБ. Файл должен иметь расширение .txt. Данные в файле разделяются символом табуляции. Ниже этой строки расположено поле «Порядковый № АБ в файле» для выбора батареи, параметры которой необходимо обработать. В файл можно записать данные нескольких батарей и впоследствии, изменяя значение этого поля, выбирать нужный набор параметров АБ.

Для правильного прочтения файла программой важно соблюдать последовательность столбцов с различными типами данных. Таблица в файле должна формироваться согласно примеру табл. 4.1.

Таблица для записи в файл в первой строке первого столбца содержит значение НРЦ в вольтах. Остальные ячейки первого столбца пустые. Номер проставляется в том же столбце, что и значения частоты тестового сигнала. Во втором столбце расположены значения частоты тестового сигнала  $f$ , (Гц).



Таблица 4.1

$U$ , В	$f$ , Гц	$Z$ , мОм	$R$ , мОм	$X$ , мОм	$A$ , град.	$U$ , В	$f$ , Гц	$Z$ , мОм	...
12,76	20	52,68	48,15	-21,36	-23,91	12,75	20	47,71	...
-/-	100	38,26	34,06	-9,541	-14,43	-/-	100	33,35	...
-/-	500	30,27	30,21	-1,891	-3,581	-/-	500	26,68	...
-/-	1000	28,51	28,33	3,158	6,359	-/-	1000	25,48	...

В третьем - значения полного сопротивления  $Z$ , (мОм); в четвертом - значения активного сопротивления  $R$ , (мОм); в пятом - значения реактивного сопротивления  $X$ , (мОм); в шестом - значения угла сдвига фаз  $A$ , (град.). В седьмом столбце снова указывается только одно значение  $U_{НРЦ}$ , и в следующих столбцах все повторяется.

### 4.3 Выводы по главе

1. Разработано программное обеспечение «Измеритель параметров АБ», которое позволяет производить измерения полного, активного и реактивного сопротивлений, угла разности фаз тока и напряжения тестового сигнала, проходящего через исследуемый объект и напряжения разомкнутой цепи. Генерация тестового сигнала и измерения его амплитуд и фаз выполняются посредством звуковой карты персонального компьютера. Реализован режим измерения на нескольких частотах тестового сигнала для изучения частотных зависимостей параметров АБ. Результаты измерений сохраняются в файл с расширением .txt.

2. Разработано программное обеспечение «Анализатор АБ», которое позволяет оценивать эксплуатационные характеристики АБ (номинальную и фактическую резервную емкости) по двум параметрам (активному сопротивлению и характеристической частоте). С помощью алгоритма классификации, программа определяет степень заряженности, заявленную номинальную емкость АБ и класс, соответствующий качеству АБ, относительно других батарей той же номинальной емкости.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации изложены имеющиеся на сегодняшний день теоретические и практические разработки в области оценки состояния аккумуляторных батарей косвенным образом по значениям оперативно-измеримых параметров АБ. В ходе выполнения диссертационной работы были получены следующие основные результаты:

1. Обосновано использование модели АБ в виде последовательной  $RLC$ -цепи.

2. Разработан метод оценки резервной и номинальной емкостей по активному сопротивлению и характеристической частоте, измеряемым на основе предложенной модели  $RLC$ -цепи, который позволяет вычислять значение резервной емкости батареи с точностью от 5 до 8 Ач, значение номинальной емкости с точностью от 4,5 до 7 Ач для батарей емкостью менее ~80 Ач. Для батарей емкостью более ~80 Ач – от 10 до 83 Ач и 9 Ач соответственно. Использование двух независимых параметров позволяют повысить достоверность оценки эксплуатационных характеристик АБ путем уменьшения стандартной ошибки среднего в 1,4 раза.

3. Разработан метод вычисления характеристической частоты АБ, на основе предложенной модели  $RLC$ -цепи. Метод позволяет вычислять характеристическую частоту всего по 4 точкам частотной зависимости реактивного сопротивления, при этом абсолютная погрешность вычисления параметра характеристической частоты не превышает 4 Гц.

4. Разработана методика классификации АБ, позволяющая выделить диагностические классы батарей соответствующие степени ее заряженности, номинальной емкости и ее качеству относительно других батарей той же номинальной емкости. Количество диагностических классов расширено по параметру активного сопротивления до 24 классов (6 классов по номинальной емкости АБ, 4 класса по качеству внутри каждого из 6-ти классов номинальной емкости) и по параметру напряжения разомкнутой цепи до 3 классов.

5. Разработано программное обеспечение для измерения напряжения разомкнутой цепи и параметров полного, активного и реактивного сопротивлений, а также угла разности фаз тока и напряжения переменного тестового сигнала разных частот, протекающего по АБ.

6. Разработано программное обеспечение для определения эксплуатационных характеристик аккумуляторной батареи по двум параметрам и автоматического определения степени заряженности, номинальной емкости и классификации аккумуляторных батарей одной номинальной емкости по их качеству.

Полученные результаты диссертационной работы позволяют создать систему оперативного контроля эксплуатационных характеристик АБ, которая может быть внедрена в технологический процесс производства АБ, станций технического обслуживания АБ и службы контроля состояния АБ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ Р 53165-2008. Батареи аккумуляторные свинцовые стартерные для автотракторной техники. Общие технические условия. – Москва: Издательство стандартов, 2008. – 30 с.
2. ГОСТ Р МЭК 60285-2002. Аккумуляторы и батареи щелочные. Аккумуляторы никель-кадмиевые герметичные цилиндрические. – Москва: Издательство стандартов, 2003. – 16 с.
3. ГОСТ Р МЭК 60896-2-99. Свинцово-кислотные стационарные батареи. Общие требования и методы испытаний. Часть 2. Закрытые типы. – Москва: Издательство стандартов, 2001. – 20 с.
4. ГОСТ Р МЭК 61436-2004. Аккумуляторы и аккумуляторные батареи, содержащие щелочной и другие неокислотные электролиты. Аккумуляторы никель-металлгидридные герметичные. – Москва: Издательство стандартов, 2004. – 11 с.
5. ГОСТ Р МЭК 61951-1-2004. Аккумуляторы и аккумуляторные батареи, содержащие щелочной и другие неокислотные электролиты. Портативные герметичные аккумуляторы. Часть 1. Никель-кадмий. – Москва: Издательство стандартов, 2004. – 20 с.
6. ГОСТ Р МЭК 61951-2-2007. Аккумуляторы и аккумуляторные батареи, содержащие щелочной и другие неокислотные электролиты. Портативные герметичные аккумуляторы. Часть 2. Никель-металл-гидрид. – Москва: Издательство стандартов, 2007. – 19 с.
7. ГОСТ Р МЭК 61960-2007. Аккумуляторы и аккумуляторные батареи, содержащие щелочной и другие неокислотные электролиты. Аккумуляторы и аккумуляторные батареи литиевые для портативного применения. – Москва: Издательство стандартов, 2007. – 21 с.
8. ГОСТ Р МЭК 896-1-95. Свинцово-кислотные стационарные батареи. Общие требования и методы испытаний. Часть 1. Открытые типы. – Москва: Издательство стандартов, 1997. – 24 с.

9. AD654: Low Cost Monolithic Voltage-to-Frequency Converter Data Sheet (Rev C, 07/2013) [Электронный ресурс]: [Текст] / Analog Devices, Inc. - электрон. текст. дан. – Норвуд: Analog Devices, Inc., 2013. - Режим доступа: [http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/AD654.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD654.pdf) .
10. Advances in Lithium-Ion Batteries [Текст] / ред. W.A. van Schalkwijk, B. Scrosati. N.Y.: Kluwer Academic. Plenum Publishers, - 2002. 607 p.
11. Berndt, D. Maintenance-free Batteries. Lead-Acid, Nickel/Cadmium, Nickel/Metal Hydride: A Handbook of Battery Technology [Текст] / D. Berndt. – 2nd ed. - Research Studies Press, Taunton, Somerset, England, 1997. - 496 p.
12. Blanchard, Ph. // J. Appl. Electrochem. - № 22. – 1992. – P.11-21.
13. Cheng, S., Zhang J, Liu H. // J. Power Sources. - 74. - 1998. - P. 155.
14. Cheng, S., Zhang J., Zhao M., Cao C. L. // J. of Alloys and Compounds - № 293-295. – 1999. – P. 814-820.
15. Gopikanth M. L., Satyanarayana S. II J. Appl. Electrochem. - № 9. - 1979. - P. 369.
16. Haak R. Degradation in nickel-cadmium cells studied by impedance measurements [Текст] / R. Haak, C. Ogden, D. Tench // J. Power Sources. - № 12. – 1984. – P. 289-303.
17. Hammouche, A. Monitoring state-of-charge of Ni-MH and Ni-Cd batteries using impedance spectroscopy [Текст] / A. Hammouche, E. Karden, R.W. De Donker //J. Power Sources. - № 127. – 2004. – P. 105-111.
18. Handbook of Batteries / Ed. David Linden Reddy T. B. - 3rd ed. N.Y.: McCraw-Hill, Inc., 2004. - 207 p.
19. Hariprakash, B. On-line monitoring of lead- acid batteries by galvanostatic non-destructive technique [Текст] / B. Hariprakash, S.K. Martha, A. Jaikumar, A.K. Shukla // J. Power Sources. - № 137.- 2004. – P. 128-133.
20. Huet, F. // J. Power Sources. - № 70. – 1998. – P. 59.
21. Huet, F. Investigation of the high-frequency resistance of a lead-acid battery [Текст] / F. Huet, R.P. Nogueira, P Lailier, L. Torcheux // J. Power Sources. - № 158. – 2005. – P. 1012-1018.

22. Hughes, M. The impedance of 23 Ah cells with sintered electrodes: measurements in the range 10 kHz - 0,001 Hz as an indication of residual capacity [Текст] / M. Hughes, R. T. Sarton, S. A. G. R. Karunathilaka и др. // J. of Electrochemistry. - Vol.15. - № 1. - 1985. P. 129-137.
23. Karden, E. A method for measurement and interpretation of impedance spectra for industrial batteries [Текст] / E. Karden, S. Buller, W. Rik // J. Power Sources. - № 85. - 2000. - P. 72-78.
24. KOBE: Maintenance-free Small Sealed Batteries. Technical Handbook for sealed lead-acid batteries [Текст] / 2000. - 67 p.
25. Okoshi, T. Battery condition monitoring (BCM) technology about lead-acid battery [Текст] / T. Okoshi, K. Yamada, T. Hirasawa, A. Emori // J. Power Sources. - № 156. - 2006. - P. 874-878.
26. Panasonic. Sealed Lead-Acid batteries. Technical Handbook [Текст] / 1999. - 72 p.
27. Prasad, M.D. Electrode kinetics of a nickel/cadmium cell and failure-mode prediction. Estimation of equivalent resistance of an internal short [Текст] / M.D. Prasad, S. Saihyanarayana // J. Power Sources. - № 19. - 1987. - P. 67-74.
28. Reid, M. A. // J. Power Sources. - № 47. - 1994. - P. 277.
29. Roberge, P.R. Non-destructive characterization of sealed lead/acid battery cells with electrochemical impedance spectroscopy [Текст] / P.R. Roberge, E. Hallop, G. Verville, J. Smit // J. Power Sources. - № 32. - 1990. - P. 261-270.
30. Rodrigues, S. A review of state-of-charge indication of batteries by means of a.c. impedance measurements [Текст] / S. Rodrigues, N. Munichandraiah, A.K. Shukla // J. Power Sources. - № 87. - 2000. - P. 12-20.
31. Rossinot, E. A study of the scattering of valve-regulated lead acid battery characteristics [Текст] / E. Rossinot, C. Lefrou, J.P. Cun // J. Power Sources. - № 114. - 2003. - P.160-169.
32. Rossinot, E. A study of the scattering of valve-regulated lead acid batteries in a string [Текст] / E. Rossinot, C. Lefrou, J.P. Cun // J. Power Sources. - № 136. - 2004. - P. 171-179.
33. SAFT. Portable Ni-Cd and Ni-MH cells and battery catalogue [Текст] / 1999. - 53 p.

34. Satyanarayana, S., Venigopalan S., Gopikanth M. L. // J. Appl. Electrochem. - № 9. – 1979. – P. 125.
35. Scrosati, V. C. A. Modern Batteries. An Introduction to Electrochemical Power Sources [Текст] / V. C. A. Scrosati. - 2nd ed. London: Arnold; N. Y.: Willey, 1997. - 351 p.
36. Universal Serial Bus: Power Delivery Specification. Revision 1.0. Including Errata through [Электронный ресурс]. – 2014. - Режим доступа: [http://www.usb.org/developers/docs/usb\\_31\\_031114.zip](http://www.usb.org/developers/docs/usb_31_031114.zip).
37. Viswanathan V. V., Salkind A. J., Kelly J. J., Ockerman J. B. // J. Appl. Electrochem. - № 25. - 1995. - P. 729.
38. Viswanathan, V. V., Salkind A. J., Kelley J. J., Ockerman J. B. // J. Appl. Electrochem. - № 25. – 1995. P.716.
39. Wenzl, H. Life prediction of batteries for selecting the technically most suitable and cost effective battery [Текст] / Wenzl, H. // J. Power Sources. - № 144. - 2005. - P. 373-384.
40. Zhang, W. L., Kumar M. P. S., Srinivasan S. // J. Electrochem. Soc. - № 142. – 1995. P. 29-35.
41. А. с. 1619360 СССР, БИ № 1. Способ определения остаточной емкости кислотной свинцовой аккумуляторной батареи и устройство для его осуществления [Текст] / Петросян В.А., Момджян А.А., Арутюнян А.А., Агабабян Ю.В.(СССР). – 4375136/07; заявлено 10.02.88; опубл. 07.01.91, Бюл. 1 – С 4.
42. Алёшкин, А. А. Метод оперативной диагностики доступной ёмкости свинцовых аккумуляторов (батарей) [Текст] / А.А. Алёшкин, Ю.И. Бубнов, В.Х. Протопопов, В.М. Ягнятинский // Электрохимическая энергетика. / СГУ им. Н.Г. Чернышевского. – Саратов, 2013. - №1(13). С. 46-53.
43. Анализатор электрохимических источников питания АЕА30V: Руководство по эксплуатации 47113964.2.033РЭ [Электронный ресурс]. [Текст] / ОАО «Фирма «АлктоЭлектроникс». - электрон. текст. дан. – Омск: ОАО «Фирма «АлктоЭлектроникс». - Режим доступа:

[http://alektogroup.com/assets/files/analizator\\_aea30v/alekto-analizator\\_aea30v-manual.pdf](http://alektogroup.com/assets/files/analizator_aea30v/alekto-analizator_aea30v-manual.pdf).

44. Антонишен, И. В. Способ измерения внутреннего сопротивления химических источников тока [Текст] / И. В. Антонишен, В. И. Туев, М. В. Южанин // «Доклады ТУСУРа». - № 2 (22) - Ч. 2. - 2010. - С. 183-186.
45. Атабеков, Г. И. Теоретические основы электротехники. Линейные электрические цепи [Текст]. В 2 ч. Ч. 1. / Г. И. Атабеков. – 5-е изд. – Москва: Энергия, 1978. – 522 с.
46. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи [Текст] В 2 ч. Ч. 1. / Л. А. Бессонов. – 9-е изд. – Москва : Высшая школа, 1996. – 638 с.
47. Болотовский, В. И. Эксплуатация, обслуживание и ремонт свинцовых аккумуляторов [Текст] / В.И. Болотовский, З.И. Вайсгант. Ленинград: Энергоатомиздат, 1988. - 196 с.
48. Большой энциклопедический словарь: [А – Я] [Текст] / ред. А. М. Прохоров. - 2-е изд., перераб. и доп. - Москва: Большая Российская энциклопедия; Норинт, 1997. – 1408 с.
49. Бреславец, В. П. Потенциостатический метод диагностики активного материала оксидно-никелевого электрода никель-кадмиевого аккумулятора [Текст] / В.П. Бреславец, В.В. Дворядкин, М.С. Липкин и др // Электрохимическая энергетика.- 2011. - Т. 11. - № 3. - С. 158-164.
50. Варыпаев, В.Н. Химические источники тока [Текст]: учеб. пособие для хим.-технол. спец. вузов / В.Н. Варыпаев, М.А. Дасоян, В.А. Никольский, ред. В.Н. Варыпаев. – Москва: Высш. шк., 1990. – 240 с.
51. Горшенков, А.А. Лингвистическая модель классификационных измерений распределений сигналов [Текст] / Горшенков А.А., Кликушин Ю.Н., Кобенко В.Ю. // Измерительная техника, Москва: Изд-во «Российский научно-технический центр информации по стандартизации, метрологии и оценке соответствия», – 2013. - № 1. – С. 23-27.



52. Губарев, В.В Классификационные измерения: методы и реализация [Текст] / В.В. Губарев, А.А. Горшенков, Ю.Н. Кликушин, В.Ю. Кобенко // Автометрия. – 2013. – Т. 49. – № 2. – С. 76-84.
53. Гусев, Ю. П. Оценка технического состояния аккумуляторных батарей электростанций и подстанций в процессе эксплуатации [Текст] / Ю. П. Гусев, Н. М. Дороватовский, А. М. Поляков // Электро. – 2002. – № 5. – С. 34-38.
54. Дамаскин, Б.Б. Принципы современных методов изучения электрохимических реакций [Текст] / Б.Б. Дамаскин. Москва: Химиздат, 1965. – 304 с.
55. Даниленко, И.Ф. Оценка параметров схемы замещения никель-кадмиевых аккумуляторов по их импедансу [Текст] / И.Ф. Даниленко, И. Индра, И. Мрга и др. // Химические источники тока. СПб., Энергоатомиздат, 1991. - С. 80-84.
56. Дасоян, М. А. Стартерные аккумуляторные батареи: Устройство, эксплуатация и ремонт [Текст] / М. А. Дасоян, Н. И. Куржуков, О. С. Тютрюмов, В. М. Ягнятинский. – Москва: Транспорт, 1991. - 255 с.
57. Дасоян, М.А. Химические источники тока [Текст] / М.А. Дасоян. - 2 изд. – Ленинград: Химиздат, 1969. – 268 с.
58. Дворядкин, В. В. Потенциостатический способ диагностики никель-кадмиевых аккумуляторов / В. В. Дворядкин, М. С. Липкин, В. И. Надтока и др. // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. / Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова. Новочеркасск, 2013. - №1. С. 148-149.
59. Известные методы восстановления емкости аккумуляторных батарей [Электронный ресурс]. [Текст] / ООО «БФ-Сервис». – Электрон. текст. дан. – Тюмень: ООО «БФ-Сервис», – 20.07.2008. – режим доступа: <http://www.megabat.ru/company/press-room/publications/98.html>.
60. Кедринский, И.А. Li-ионные аккумуляторы [Текст] / И.А. Кедринский, В.Г. Яковлев. Красноярск: ИПК «Платина», 2002. - 266 с.
61. Килимник, А.Б. Физическая химия [Текст]: учебное пособие / А.Б. Килимник. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2008. – 108 с.

62. Кликушин, Ю.Н. Анализатор параметров аккумуляторов [Текст] / Ю.Н. Кликушин, В.Ю. Кобенко, А.А. Чепель. Москва: ИНИПИ ОФЭРНиО, 2012. – № 50201250773. Свидетельство о регистрации электронного ресурса № 18370.
63. Кликушин, Ю.Н. Способ лингвистической интерполяции результатов измерений [Текст] / Ю.Н. Кликушин, В.Ю. Кобенко, Д.П. Чупин // Омский научный вестник. Серия приборы, машины и технологии. – 2014. – № 2 (130). – С. 191-194.
64. Краткий аналитический обзор существующих способов оценки емкости ХИТ и приборов, реализующих эти способы [Электронный ресурс]. [Текст] / ООО «Черемшина ЭНЕРГОСТАНДАРТ». - электрон. текст. дан. – Севастополь: ООО «Черемшина ЭНЕРГОСТАНДАРТ». - Режим доступа: [http://chs-energo.com/files/analys\\_10.pdf](http://chs-energo.com/files/analys_10.pdf).
65. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта [Текст] / ред. Д.А. Поспелов. – Москва: Наука, 1986. – 312 с.
66. Новицкий, П.В. Оценка погрешностей результатов измерений [Текст] / П.В. Ноаицкий, И.А. Зограф. – 2-е изд., перераб. и доп. Ленинград: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1991. – 304 с.
67. Орлов, В.А. Малогабаритные источники тока [Текст] / В.А. Орлов. - 2 изд. Москва: Воениздат, 1970. – 224 с.
68. Пат. 1718305 СССР, МПК Н 01 М10/48. Способ измерения остаточной емкости химического источника тока [Текст] / Лежнев П.И. (СССР). - 4841221/07; заявлено 10.04.90; опубл. 07.03.92 Бюл. 9 – С. 5.
69. Пат. 2172044 Российская Федерация, МПК Н01М10/00, G01R31/00, G01R27/00. Способ измерения емкости химических источников тока [Текст] / Косюк В.И. заявл. 24.11.99; опубл. 10.08.01, Бюл. № 24 – С. 4.
70. Пат. 2214025 Российская Федерация, МПК Н01М10/00. Устройство для измерения электрической емкости химических источников тока [Текст] / Косюк В.И. заявл. 20.08.01; опубл. 10.10.03, Бюл. № 10 – С. 3.

71. Родзянов, В. В. Анализ методов определения емкости аккумуляторных батарей гибридных автомобилей [Текст] / В.В. Родзянов // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – 2009. – № 45. С.57-61.
72. Романов, В.В. Химические источники тока [Текст] / В.В. Романов, М.Ю. Хашев. Москва: Химиздат, 1968. – 307 с.
73. Стойнов, З.Б. Электрохимический импеданс [Текст] / З.Б. Стойнов, Б.М. Графов, Б.С. Савова-Стойнова, В. В. Елкин. Москва: «Наука», 1991. - 336 с.
74. Таганова, А.А. Свинцовые аккумуляторные батареи: стационарные, тяговые, для портативной аппаратуры [Текст]: справочник / А.А. Таганова, А.Е. Семенов. - СПб.: Химиздат, 2004. - 117 с.
75. Таганова, А.А. Герметичные химические источники тока: элементы и аккумуляторы, оборудование для испытаний и эксплуатации [Текст]: справочник / А.А. Таганова, Ю.И. Бубнов, С.Б. Орлов. СПб: Химиздат, 2005. – 264 с.
76. Таганова, А.А. Диагностика герметичных никель-кадмиевых аккумуляторов и универсальный алгоритм их отбора в батарею [Текст]: дис.... канд.тех.наук. Ленинград, 1990. - 150 с.
77. Таганова, А.А. Диагностика герметичных химических источников тока / А.А. Таганова. СПб.: Химиздат, 2007. – 128 с.
78. Таганова, А.А. Диагностика качества и состояния герметичных щелочных аккумуляторов для портативной аппаратуры [Текст] / А.А. Таганова, А.Ю. Федоров, С. Саранов // Компоненты и технологии. - 2006. - № 8. - С. 200-203.
79. Таганова, А.А. Изменение импедансных характеристик герметичных никель-кадмиевых аккумуляторов в процессе заряда [Текст] / А.А. Таганова // Исследования в области электрохимической энергетики. Ленинград, Энергоатомиздат, 1989. - С. 70-77.
80. Таганова, А.А. Импедансные характеристики герметичных никель-кадмиевых аккумуляторов [Текст] / А.А. Таганова // Химические источники тока. – Ленинград, Энергоатомиздат, 1987. - С. 109-115.

81. Таганова, А.А. Сравнительные характеристики герметичных щелочных аккумуляторов для электропитания портативной аппаратуры [Текст] / А.А. Таганова // Современная электроника. - 2006. - № 8. - С. 10-13.
82. Таганова, А.А. Экспресс-методика измерения внутреннего сопротивления аккумуляторов средней емкости [Текст] / А.А. Таганова // Электротехн. Производство. Передовой опыт и научно-техн. достижения. - 1989. - № 5(17). - С. 14-15.
83. Теньковцев, В.В. Повышение эксплуатационных характеристик и надежности герметичных никель-кадмиевых аккумуляторов для систем электропитания автономных объектов [Текст] / В.В. Теньковцев, А.А. Таганова, Б.А. Борисов и др. // Химические источники тока. Ленинград, Энергоатомиздат, 1991. - С. 27-35.
84. Тревис, Дж. LabVIEW для всех [Текст] / Дж. Тревис: Пер. с англ. Н.А. Клушин. Москва: ДМК Пресс, 2005. - 544 с.
85. Федоров, А. Внутреннее сопротивление химических источников тока и его измерение [Текст] / А. Федоров, С. Сарапов // Компоненты и технологии. - № 3. - 2005. - С. 13-15.
86. Физическая химия. Теоретическое и практическое руководство [Текст]: учеб. пособие для вузов / ред. Б.П. Никольский. – 2-е изд., перераб. и доп., Ленинград: Химия, 1987. – 880 с.
87. Фрумкин, А.Н. Кинетика электродных процессов [Текст] / А. Н. Фрумкин, В.С. Багоцкий, З.А. Иофа, Б.Н. Кабанов. Москва: Изд-во Московского университета, 1952. - с. 320.
88. Химические источники тока [Текст]: справочник / ред. Н.В. Коровин, А.М. Скундин. - Москва: Изд-во МЭИ, 2003. - 740 с.
89. Хрусталева, Д. А. Аккумуляторы [Текст] / Д.А. Хрусталева. – Москва: Изумруд, 2003. – 224 с.
90. Чупин, Д. П. Резонансный метод измерения внутреннего сопротивления аккумуляторных батарей [Текст] / Д.П. Чупин // Электроэнергетика и приборостроение: современное состояние, перспективы развития и подготовка

кадров : материалы Междунар. науч.-практ. конф. Т. 1. – Петропавловск : СКГУ им. М. Козыбаева, 2011. – С. 61–63.

91. Чупин, Д.П. Влияние измерительных щупов на результаты измерений внутреннего сопротивления аккумуляторных батарей [Текст] / Д.П. Чупин // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность! : материалы V Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием : в 3 кн. / [отв. ред. А.В. Косых]. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2013. – С.247-250.
92. Чупин, Д.П. Исследование методов диагностики аккумуляторных батарей [Текст] / Омский научный вестник. Серия приборы, машины и технологии. – 2013. – № 1 (117). – С. 253-257.
93. Чупин, Д.П. Метод определения емкости аккумуляторных батарей [Текст] / Д.П. Чупин // Динамика систем, механизмов и машин : материалы VIII Междунар. науч.-техн. конф. (Омск, 13-15 ноября 2012 г.) : в 5 кн. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2012: Кн. 1. – С.342-345.
94. Чупин, Д.П. Метод оценки параметров аккумуляторных батарей [Текст]/ Д.П. Чупин // Материалы Всероссийской науч.-практ. конф. ученых, преподавателей, аспирантов, студентов, специалистов промышленности и связи, посвященной 15-летию ИРСИД. – Омск: Изд-во КАН, 2012. – С.205-207.
95. Чупин, Д.П. Проведение экспериментальных исследований с использованием анализатора аккумуляторных батарей АЕА30V [Текст] / Д.П. Чупин // Природные и интеллектуальные ресурсы Омского региона (Омскресурс-3-2013): материалы III Межвузовской научной конференции студентов и аспирантов. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2013. – С. 133-135.
96. Чупин, Д.П. Система диагностики аккумуляторных батарей на базе звуковой карты ПК [Текст] / Д.П. Чупин, А.А. Чепель // Измерение, контроль, информатизация: Материалы XIV Международной науч.-техн. конф. Т. 1./ под ред. Л.И. Сучковой. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2013. – С.128-130.

**Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах*****Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК***

1. Чупин, Д.П. Исследование методов диагностики аккумуляторных батарей / Д.П. Чупин // Омский научный вестник. – № 1 (117) – 2013. – С. 253-257.
2. Чупин, Д.П. Исследование мотора Бедина в качестве зарядного устройства для аккумуляторных батарей / Д.П. Чупин // Омский научный вестник. – № 2 (130) – 2014. – С. 200-203.
3. Чупин, Д.П. Способ лингвистической интерполяции результатов измерения / Ю.Н. Кликушин, В.Ю. Кобенко, Д.П. Чупин // Омский научный вестник. – № 2 (130) – 2014. – С. 191-194.

***Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ***

4. Чупин, Д.П. Метод диагностики аккумуляторных батарей / Ю.Н. Кликушин, В.Ю. Кобенко, Д.П. Чупин. – М.: ИНИПИ ОФЭРНиО, 2012. – рег. № 50201250384.
5. Чупин, Д.П. Параметры аккумуляторных батарей. База данных / Д.П. Чупин. – М.: ИНИПИ ОФЭРНиО, 2014. – рег. № 50201450511.
6. Чупин, Д.П. Алгоритм сегментации изображений подводных объектов / Ю.Н. Кликушин, В.Ю. Кобенко – М : ИНИПИ ОФЭРНиО, 2012. – № 50201450559.

***Материалы конференций***

7. Чупин Д.П. Резонансный метод измерения внутреннего сопротивления аккумуляторных батарей / Д.П. Чупин // Электроэнергетика и приборостроение: современное состояние, перспективы развития и подготовка кадров : материалы международной науч.-практ. конф. Т. 1. – Петропавловск: СКГУ им. М. Козыбаева, 2011. – С. 61-63.

8. Чупин Д.П. Методы диагностики аккумуляторных батарей / Д.П. Чупин // Измерение, контроль, информатизация: Материалы Тринадцатой Международной науч.-техн. конф. Т. 1. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2012. – С.164-168.
9. Чупин Д.П. Метод оперативной оценки емкости аккумуляторных батарей / Ю.Н. Кликушин, Д.П. Чупин // Измерение, контроль, информатизация: Материалы Тринадцатой Международной науч.-техн. конф. Т. 1. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2012. – С.158-161.
10. Чупин Д.П. Метод оценки параметров аккумуляторных батарей / Д.П. Чупин // Материалы Всероссийской науч.-практ. конф. ученых, преподавателей, аспирантов, студентов, специалистов промышленности и связи, посвященной 15-летию ИРСИД. – Омск: Изд-во КАН, 2012. – С.205-207.
11. Чупин Д.П. Метод определения емкости аккумуляторных батарей / Д.П. Чупин // Динамика систем, механизмов и машин : материалы VIII Междунар. науч.-техн. конф. (Омск, 13-15 ноября 2012 г.) : в 5 кн. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2012: Кн. 1. – С.342-345.
12. Чупин Д.П. Система диагностики аккумуляторных батарей на базе звуковой карты ПК / Д.П. Чупин, А.А. Чепель // Измерение, контроль, информатизация: Материалы XIV Международной науч.-техн. конф. Т. 1./ под. ред. Л.И. Сучковой. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2013. – С.128-130.
13. Чупин Д.П. Динамическая компенсация погрешностей в системе оперативной диагностики аккумуляторных батарей / Д.П. Чупин // Материалы Всероссийской науч.-практ. конф. ученых, преподавателей, аспирантов, студентов, специалистов промышленности и связи, посвященной Дню радио. – Омск: Изд-во «Полиграфический центр КАН», 2013. – С.199-202.
14. Чупин Д.П. Влияние измерительных щупов на результаты измерений внутреннего сопротивления аккумуляторных батарей / Д.П. Чупин // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность! : материалы V Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием : в 3 кн. / [отв. ред. А.В. Косых]. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2013. – С.247-250.

15. Чупин Д.П. Система оперативной диагностики аккумуляторных батарей / Д.П. Чупин // Тезисы I Всероссийской конференции "Территория и практика Успеха". – Омск, 2013. – С.151-152.

16. Чупин Д.П. Проведение экспериментальных исследований с использованием анализатора аккумуляторных батарей АЕА30V / Д.П. Чупин // Природные и интеллектуальные ресурсы Омского региона (Омскресурс-3-2013) : Материалы III Межвуз. науч. конф. студ. и аспирантов. (Омск, 11-12 дек. 2013 г.) / ОмГТУ ; [отв. ред. Т.П. Ковтун, А.А. Начвина]. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2013. – С.133-135.

17. Чупин Д.П. Система автоматической диагностики аккумуляторных батарей / Д.П. Чупин // Тезисы II Всероссийской конференции "Территория и практика Успеха". – Омск, 2014. – С.145-146.



## Исследование мотора Бедини в качестве зарядного устройства для аккумуляторных батарей

### Введение.

На просторах глобальной сети можно найти множество статей посвященных устройствам, которые якобы позволяют получить «свободную энергию», «энергию эфира» или так называемую «радиантную энергию». Множество людей заинтересованных этой темой пытаются повторить представленные в них устройства и обсуждают полученные результаты.

Нами было проведено исследование устройства, называемого мотором Бедини (МБ). Это устройство, по заверению автора Джона Бедини (John Bedini), позволяет заряжать свинцово-кислотные аккумуляторные батареи. При этом само устройство питается от аналогичной батареи напряжением 12В. По заверениям изобретателя этого устройства, заряжаемая батарея в процессе заряда «наполняется» некоей энергией полученной из окружающей среды. Как следствие заряжаемая батарея получает 100% заряда за очень короткий промежуток времени (по разным источникам от 10 до 30 минут). При этом устройство работает от аккумуляторной батареи той же емкости и не исчерпает ее в процессе заряда [Bearden, T. Free energy generation. 20 Bedini - Bearden Years. Circuits & Schematics/ T. Bearden. 2-е изд. USA: Cheniere Press – 2006. – 234 с. [Режим доступа - <http://www.slideshare.net/exopolitics/tom-bearden-and-john-bedini-free-energy-generation-circuits-and-schematics-full-book-2011-197p>]].

Для проведения экспериментальных исследований у автора изобретения, была приобретена одна из модификаций МБ.

### Предмет исследования.

Мотор Бедини представляет собой некий аналог бесколлекторного (вентильного) двигателя постоянного тока (рис. П2.1).

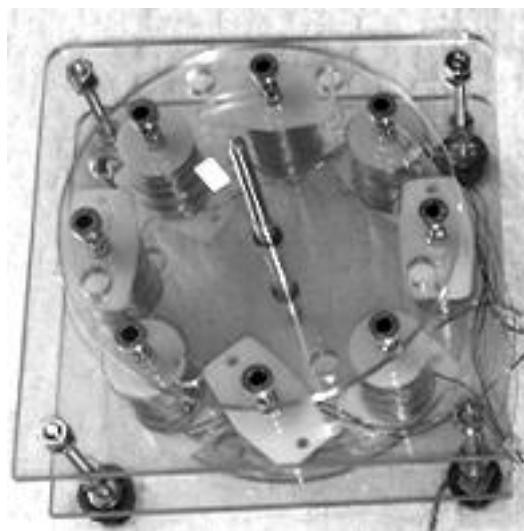


Рис. П2.1. Внешний вид МБ

На его статоре размещены 8 катушек индуктивности. Из них 4 предназначены для приведения в движение ротора, а также участвуют в зарядке батареи (в прилагаемой инструкции они именуются «Motor Coils»), другие 4 – представлены как катушки генератора («Generator Coils») для снятия дополнительной энергии. Ротор состоит из 2х дисков, закрепленных на горизонтальном валу, снизу и сверху статора. На роторе закреплены постоянные магниты (по 1му сверху и снизу напротив сердечников катушек).

Электрическая схема устройства представлена на (рис. П2.2).

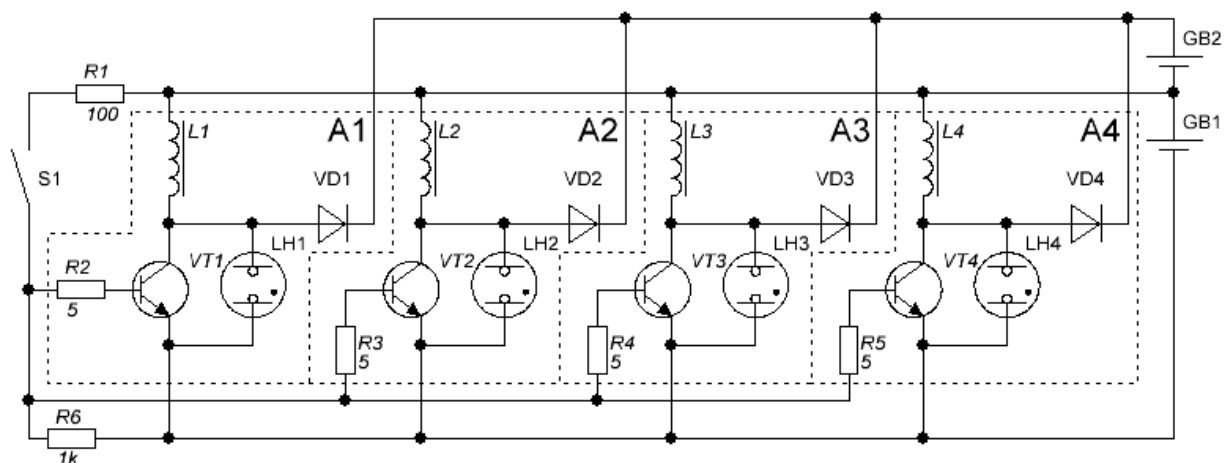


Рис. П2.2. Электрическая принципиальная схема МБ

Состоит устройство из 4 одинаковых блоков A1–4, токоограничивающих резисторов R1, R6, геркона S1 и аккумуляторных батарей GB1 и GB2. Каждый из

блоков включает в себя катушку индуктивности («Motor Coil»), транзистор с токоограничивающим резистором, диод и неоновую лампу.

Геркон S1 размещается рядом с сердечником одной из катушек.

В качестве питающей *GB1* и нагрузочной *GB2* батарей использовались свинцово-кислотные батареи номинальной емкостью 7,2 Ач, напряжением 12 В.

Измерения средних токов и напряжений проводилось на измерительном стенде National Instruments BNC-2120. Осциллограммы напряжений и токов получены на осциллографе.

### **Результаты исследования и их обсуждение.**

Первые испытания устройства в работе показали, что среднее значение потребления тока в режиме холостого хода (XX) (без заряжаемой батареи *GB2*) составляет 1,82 А при напряжении питания 12,03 В.

Так средняя потребляемая мощность в режиме XX составила 21,85 Вт. Под нагрузкой (с заряжаемой батареей) средний ток, потребляемый устройством, составил 3,32 А при напряжении 11,56 В – средняя потребляемая мощность 38,39 Вт. При этом средний ток заряда нагрузочной батареи составил 1,25 А при напряжении 13,54 В – средняя мощность, отдаваемая устройством, составила 16,91 Вт [Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. В 2 ч. Ч. 1. / Л. А. Бессонов. – 9-е изд. – М. : Высшая школа, 1996. – 638 с.].

Так, потребляемая устройством мощность более чем в 2 раза превышает мощность, отдаваемую в нагрузочную батарею. Следовательно, при условии, что батареи *GB1* и *GB2* имеют одинаковую емкость, заряд батареи *GB1* будет исчерпан быстрее, чем зарядится батарея *GB2*.

В ходе дальнейших исследований с помощью осциллографа были получены осциллограммы сигналов в различных точках схемы.

В целях упрощения схема устройства была урезана до одного блока (рис. П2.3).

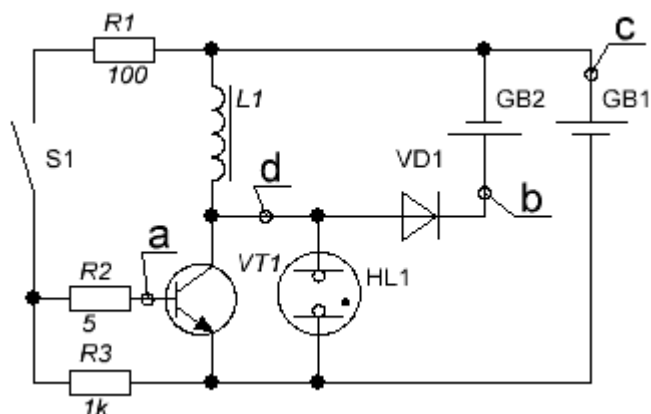


Рис. П2.3. Упрощенная схема МБ

На (рис. П2.4) представлена форма напряжения на базе транзистора  $T1$  (точка «а»).

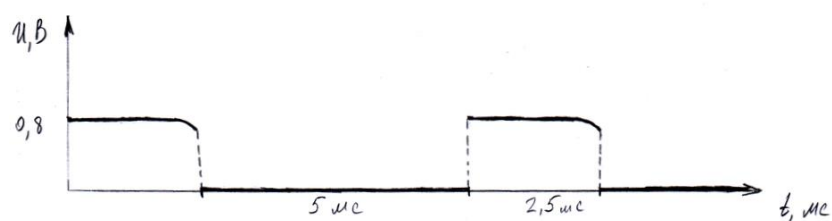


Рис. П2.4. Осциллограмма напряжения в точке «а»

Изменение уровня в этой точке обусловлено замыканием/размыканием контактов геркона. Период сигнала составляет 7,5 мс, частота переключения транзистора  $T1$  равна

$$f_{T1} = \frac{1}{7,5 \cdot 10^{-3} \text{ мс}} = 133,3 \text{ Гц}$$

Коэффициент заполнения  $D$ , в установившемся режиме, равен

$$D = \frac{2,5 \cdot 10^{-3} \text{ мс}}{7,5 \cdot 10^{-3} \text{ мс}} \cdot 100\% = 33,3\%$$

Под действием магнита контакты геркона замыкаются, и по базе транзистора протекает ток – транзистор открыт. Падение напряжения на базе  $T1$  составляет 0,8 В (рис. П2.4). Длительность протекания тока через базу транзистора составляет 2,5 мс. В течение этого времени транзистор  $T1$  открыт и по катушке  $L1$  протекает ток. Следующие 5 мс геркон разомкнут и транзистор закрыт. Мгновенный обрыв цепи  $L1$  вызывает всплеск ЭДС самоиндукции в индуктивности  $L1$ . Это видно на

осциллограмме снятой в точке «b» (рис. П2.5). Осциллограмма снята при отключенной батарее *GB2*.

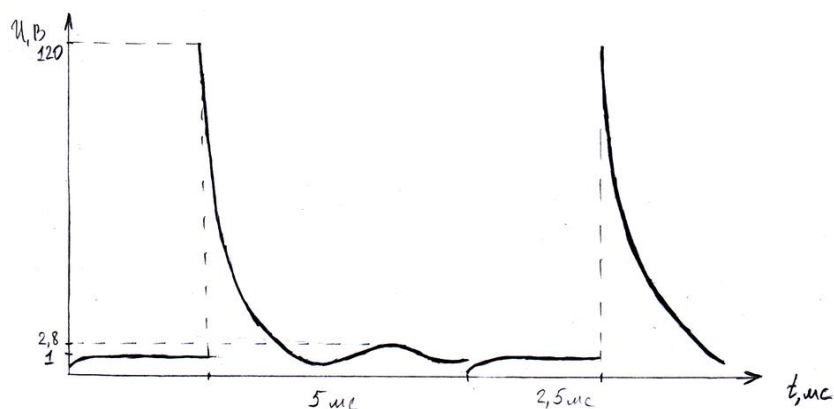


Рис. П2.5. Осциллограмма напряжения в точке «b»

В момент закрытия транзистора ЭДС самоиндукции достигает 120 В. В течение  $\sim 2,5$  мс напряжение снижается до  $\sim 1$  В. После этого в цепи протекает переходной процесс, в виде возрастания напряжения до 2,8 В и снижения до 1 В. Во время «накачки» катушки *L1* (транзистор открыт) напряжение на ее выводах составляет 1 В. Измерения проводились в режиме отсечки постоянной составляющей напряжения.

При подключенной нагрузочной батарее *GB2*, в момент закрытия транзистора *T1* на ее клеммах можно наблюдать всплеск напряжения величиной 0,08 В (рис. П2.6). Напряжение батареи *GB2* во время проведения измерения составляло 11,8 В.

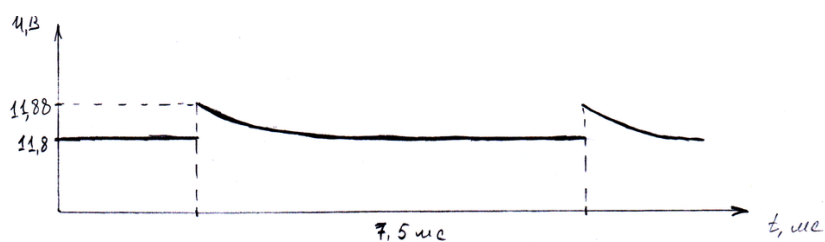


Рис. П2.6. Осциллограмма напряжения на клеммах батареи *GB2*

Осциллограмма напряжения в точке «d» представлена на (рис. П2.7). Измерения проводились при подключенной батарее *GB2*.

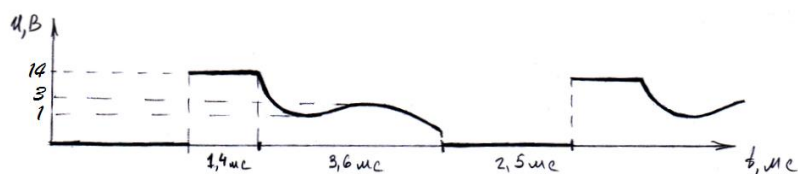


Рис. П2.7. Осциллограмма напряжения в точке «d»

Здесь наблюдается всплеск напряжения вызванный закрытием транзистора  $T1$  до значения 14 В. Спустя 1,4 мс начинается переходной процесс, в результате чего значение напряжения снижается до 1 В, снова возрастает до 3 В и окончательно снижается. Эта осциллограмма напоминает осциллограмму на (рис. П2.5), если ту «обрезать» на уровне 14 В. Измерения проводились в режиме отсечки постоянной составляющей напряжения.

Осциллограмма тока в цепи  $L1VD1GB2$  приведена на (рис. П2.8).

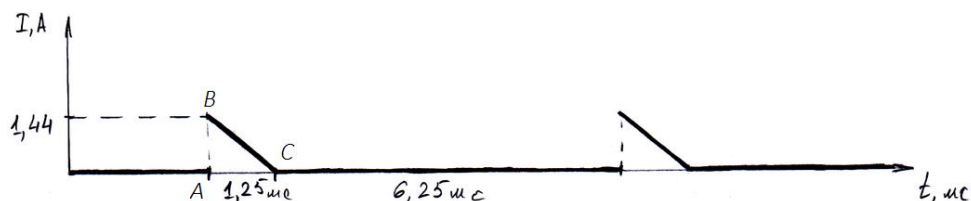


Рис. П2.8. Осциллограмма тока в цепи  $L1VD1GB2$

В момент закрытия транзистора в этой цепи появляется всплеск тока величиной 1,44 А, который затухает в течение 1,25 мс.

Среднее значение тока в цепи  $GB1L1T1$  можно оценить, вычислив площадь треугольника  $ABC$  [Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. В 2 ч. Ч. 1. / Л. А. Бессонов. – 9-е изд. – М. : Высшая школа, 1996. – 638 с.] (рис. П2.8):

$$I_{CP} = \frac{1}{7,5 \cdot 10^{-3}} \cdot S_{ABC} = \frac{1}{7,5 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{1,44 \cdot 1,25 \cdot 10^{-3}}{2} = 0,12 \text{ А}$$

Напряжение на клеммах питающей батареи  $GB1$  (точка «с») представлено на осциллограмме (рис. П2.9).

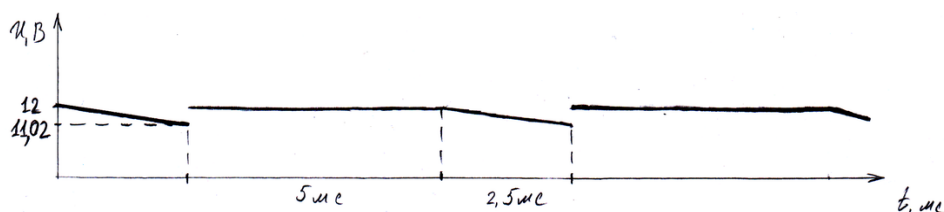
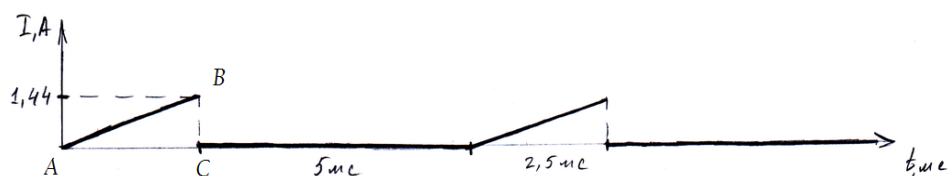


Рис. П2.9. Осциллограмма напряжения на клеммах батареи  $GB1$

Во время «накачки» индуктивности  $L1$  напряжение плавно снижается. При напряжении холостого хода батареи  $GB1$  12 В, за 2,5 мс, пока открыт транзистор  $T1$ , напряжение на клеммах батареи снижается до 11,02 В.

Осциллограмма тока в цепи  $GB1L1T1$  приведена на (рис. П2.10).

Рис. П2.10. Осциллограмма тока в цепи *GB1LIT1*

Ток в цепи *GB1LIT1* плавно возрастает на протяжении всего времени пока открыт транзистор *T1* (2,5 мс). К моменту закрытия транзистора ток достигает значения 1,44 А.

Среднее значение тока в цепи *GB1LIT1* равно:

$$I_{CP} = \frac{1}{7,5 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{1,44 \cdot 2,5 \cdot 10^{-3}}{2} = 0,24 \text{ А}$$

### Выводы.

В результате проведенных исследований получены результаты, опровергающие возможности устройства, заявленные автором. При расчете потребляемой и отдаваемой устройством мощностей было выявлено, что исследуемое устройство в единицу времени потребляет в 2,27 раз больше мощности, чем отдает в нагрузку (батарею *GB2*). Таким образом, коэффициент полезного действия исследуемого устройства равен:

$$\eta_{MB} = \frac{P_{ВЫХ}}{P_{ВХ}} \cdot 100\% = \frac{16,91}{38,39} \cdot 100\% \approx 44\%$$

Средние токи разряда батареи *GB1* (0,24 А) и заряда батареи *GB2* (0,12 А), вычисленные по осциллограммам (рис. П2.8, П2.10), также подтверждают неэффективность мотора Бедина в качестве зарядного устройства.

Автор упоминает о критичности устройства к частоте, на которой оно работает. А именно, он говорит об эффекте резонанса. Возможно, если бы мы добились эффекта резонанса, нам удалось бы получить лучшие результаты. Однако, хочется заметить, что для достижения резонанса, устройство потребует сложной настройки, которую необходимо регулярно повторять с различными батареями.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 3

**Значения модуля полного  $Z$ , активного  $R$ , реактивного  $X$  сопротивления и разности фаз напряжения и тока тестового сигнала  $A$  свинцово-кислотных АБ типа FIAMM 20720, измеренных на разных частотах  $f$**

Таблица ПЗ.1

Свинцово-кислотная АБ №12 типа FIAMM 20720, $C_{20} =$ 7,2 Ач, частично разряжена, $U_{НРЦ} = 12,84$ В, $C_R = 14$ мин.					Свинцово-кислотная АБ №13 типа FIAMM 20720, $C_{20} =$ 7,2 Ач, частично разряжена, $U_{НРЦ} = 12,92$ В, $C_R = 15$ мин.					Свинцово-кислотная АБ №14 типа FIAMM 20720, $C_{20} =$ 7,2 Ач, частично разряжена, $U_{НРЦ} = 12,92$ В, $C_R = 14$ мин.					Свинцово-кислотная АБ №15 типа FIAMM 20720, $C_{20} =$ 7,2 Ач, частично разряжена, $U_{НРЦ} = 12,94$ В, $C_R = 15$ мин.				
$f$ , Гц	$Z$ , мОм	$R$ , мОм	$X$ , мОм	$A$ , град.	$f$ , Гц	$Z$ , мОм	$R$ , мОм	$X$ , мОм	$A$ , град.	$f$ , Гц	$Z$ , мОм	$R$ , мОм	$X$ , мОм	$A$ , град.	$f$ , Гц	$Z$ , мОм	$R$ , мОм	$X$ , мОм	$A$ , град.
20	48,07	43,39	-20,68	-25,48	20	44,37	39,92	-19,37	-25,88	20	46,70	42,15	-20,12	-25,51	20	45,16	40,36	-20,26	-26,66
50	38,39	36,17	-12,86	-19,58	50	35,62	33,62	-11,77	-19,29	50	37,80	35,84	-12,01	-18,53	50	36,27	34,39	-11,53	-18,54
100	33,93	32,87	-8,44	-14,40	100	31,57	30,61	-7,73	-14,16	100	33,50	32,52	-8,08	-13,94	100	32,28	31,31	-7,83	-14,04
150	31,92	31,19	-6,79	-12,28	200	28,62	28,15	-5,20	-10,46	200	30,44	29,95	-5,42	-10,25	160	30,19	29,59	-6,02	-11,49
200	30,60	30,04	-5,83	-10,98	500	25,58	25,54	-1,44	-3,22	500	27,33	27,28	-1,64	-3,44	195	29,38	28,93	-5,15	-10,08
500	27,36	27,29	-1,83	-3,83	550	25,34	25,32	-0,99	-2,23	550	27,10	27,07	-1,17	-2,48	500	26,41	26,37	-1,52	-3,30
550	27,09	27,06	-1,37	-2,91	600	25,15	25,15	-0,57	-1,31	600	26,88	26,87	-0,74	-1,57	550	26,18	26,15	-1,07	-2,35
600	26,88	26,87	-0,94	-2,00	650	24,98	24,98	-0,14	-0,33	650	26,71	26,71	-0,33	-0,71	600	25,96	25,95	-0,66	-1,47
650	26,68	26,68	-0,55	-1,17	700	24,84	24,84	0,22	0,51	700	26,57	26,57	0,06	0,14	650	25,81	25,81	-0,26	-0,58
700	26,48	26,48	-0,13	-0,28	750	24,69	24,68	0,58	1,36	750	26,45	26,45	0,46	0,99	700	25,65	25,65	0,04	0,09
750	26,33	26,33	0,25	0,54	800	24,59	24,57	0,95	2,22	800	26,34	26,33	0,84	1,83	750	25,51	25,51	0,41	0,91
800	26,20	26,20	0,65	1,43	850	24,49	24,45	1,33	3,12	850	26,25	26,22	1,18	2,57	800	25,42	25,41	0,76	1,72
850	26,10	26,08	1,00	2,20	900	24,43	24,37	1,63	3,83	900	26,12	26,08	1,38	3,03	850	25,33	25,30	1,09	2,46
900	26,00	25,97	1,33	2,94	950	24,34	24,26	1,98	4,67	950	26,03	25,97	1,73	3,81	900	25,25	25,22	1,30	2,95
950	25,92	25,87	1,71	3,78	1000	24,28	24,17	2,33	5,51	1000	25,97	25,88	2,06	4,56	950	25,18	25,12	1,67	3,80
1000	25,86	25,78	2,07	4,58											1000	25,11	25,04	1,96	4,47



**Значения модуля полного  $Z$ , активного  $R$ , реактивного  $X$  сопротивления и разности фаз напряжения и тока  
тестового сигнала  $A$  свинцово-кислотных АБ типа Panasonic 38В19 измеренных на разных частотах  $f$**

Таблица П3.2

Свинцово-кислотная АБ №16 типа Panasonic 38В19 $C_{20} =$ 35 Ач, частично разряжена, $U_{НРЦ}$ $= 12,24$ В, $C_R = 30$ мин.					Свинцово-кислотная АБ №17 типа Panasonic 38В19 $C_{20} =$ 35 Ач, частично разряжена, $U_{НРЦ}$ $= 12,27$ В, $C_R = 29$ мин.					Свинцово-кислотная АБ №19 типа Panasonic 38В19 $C_{20} =$ 35 Ач, частично разряжена, $U_{НРЦ}$ $= 12,28$ В, $C_R = 27$ мин.					Свинцово-кислотная АБ №20 типа Panasonic 38В19 $C_{20} =$ 35 Ач, частично разряжена, $U_{НРЦ}$ $= 12,24$ В, $C_R = 27$ мин.				
$f$ , Гц	$Z$ , мОм	$R$ , мОм	$X$ , мОм	$A$ , град.	$f$ , Гц	$Z$ , мОм	$R$ , мОм	$X$ , мОм	$A$ , град.	$f$ , Гц	$Z$ , мОм	$R$ , мОм	$X$ , мОм	$A$ , град.	$f$ , Гц	$Z$ , мОм	$R$ , мОм	$X$ , мОм	$A$ , град.
20	11,87	10,55	-5,44	-27,25	20	12,36	11,00	-5,66	-27,21	20	12,83	11,94	-4,70	-21,47	20	13,40	12,08	-5,80	-25,64
50	9,52	9,21	-2,40	-14,58	50	9,94	9,61	-2,57	-14,96	50	10,50	10,22	-2,42	-13,29	50	10,70	10,32	-2,82	-15,27
100	8,80	8,75	-1,02	-6,62	100	9,14	9,07	-1,07	-6,73	100	9,66	9,58	-1,27	-7,53	100	9,80	9,69	-1,47	-8,64
150	8,54	8,54	-0,26	-1,76	150	8,87	8,87	-0,33	-2,16	150	9,37	9,35	-0,68	-4,17	150	9,47	9,44	-0,78	-4,72
500	8,55	8,08	2,79	19,05	500	8,79	8,36	2,72	17,99	200	9,18	9,18	-0,25	-1,54	200	9,31	9,30	-0,30	-1,86
550	8,62	8,03	3,13	21,26	550	8,88	8,30	3,15	20,79	230	9,16	9,16	-0,03	-0,19	240	9,24	9,24	0,05	0,31
600	8,78	8,06	3,48	23,36	600	9,01	8,28	3,55	23,19	500	8,92	8,77	1,63	10,52	500	9,06	8,91	1,68	10,65
650	8,87	7,98	3,88	25,95	650	9,12	8,24	3,92	25,44	550	8,91	8,70	1,92	12,42	550	9,10	8,89	1,97	12,50
700	9,01	7,94	4,26	28,20	700	9,27	8,22	4,30	27,61	600	8,94	8,68	2,17	14,02	600	9,11	8,83	2,23	14,13
750	9,21	7,95	4,67	30,42	750	9,39	8,21	4,56	29,03	650	8,96	8,62	2,44	15,77	650	9,07	8,78	2,26	14,42
800	9,38	7,93	5,00	32,25	800	9,54	8,17	4,93	31,10	700	9,04	8,61	2,74	17,66	700	9,11	8,76	2,51	15,97
850	9,51	7,84	5,40	34,55	850	9,70	8,13	5,29	33,05	750	9,10	8,57	3,05	19,57	750	9,17	8,73	2,78	17,66
900	9,73	7,86	5,73	36,11	900	9,91	8,13	5,67	34,87	800	9,18	8,56	3,31	21,16	800	9,21	8,70	3,04	19,23
950	9,98	7,85	6,17	38,15	950	10,15	8,10	6,13	37,12	850	9,26	8,53	3,60	22,88	850	9,29	8,69	3,31	20,83
1000	10,20	7,84	6,54	39,81	1000	10,38	8,10	6,51	38,79	900	9,43	8,52	4,05	25,42	900	9,48	8,68	3,81	23,70
										950	9,52	8,50	4,29	26,77	950	9,53	8,62	4,05	25,13
										1000	9,63	8,47	4,58	28,38	1000	9,54	8,61	4,10	25,44

**Значения модуля полного  $Z$ , активного  $R$ , реактивного  $X$  сопротивления и разности фаз напряжения и тока  
тестового сигнала  $A$  свинцово-кислотных АБ типа Panasonic 55B24 измеренных на разных частотах  $f$**

Таблица ПЗ.3

Свинцово-кислотная АБ №41 типа Panasonic 55B24 $C_{20} =$ 45 Ач, частично разряжена, $U_{НРЦ}$ $= 12,27$ В, $C_R = 41$ мин.					Свинцово-кислотная АБ №42 типа Panasonic 55B24 $C_{20} =$ 45 Ач, частично разряжена, $U_{НРЦ}$ $= 12,25$ В, $C_R = 43$ мин.					Свинцово-кислотная АБ №43 типа Panasonic 55B24 $C_{20} =$ 45 Ач, частично разряжена, $U_{НРЦ}$ $= 12,28$ В, $C_R = 44$ мин.					Свинцово-кислотная АБ №44 типа Panasonic 55B24 $C_{20} =$ 45 Ач, частично разряжена, $U_{НРЦ}$ $= 12,30$ В, $C_R = 43$ мин.				
$f$ , Гц	$Z$ , мОм	$R$ , мОм	$X$ , мОм	$A$ , град.	$f$ , Гц	$Z$ , мОм	$R$ , мОм	$X$ , мОм	$A$ , град.	$f$ , Гц	$Z$ , мОм	$R$ , мОм	$X$ , мОм	$A$ , град.	$f$ , Гц	$Z$ , мОм	$R$ , мОм	$X$ , мОм	$A$ , град.
20	11,01	9,91	-4,82	-25,93	20	10,24	9,13	-4,65	-27,00	20	10,35	9,17	-4,82	-27,72	20	10,76	9,60	-4,86	-26,86
50	8,65	8,31	-2,40	-16,11	50	8,08	7,78	-2,19	-15,71	50	8,05	7,72	-2,28	-16,44	50	8,44	8,12	-2,31	-15,86
100	7,85	7,78	-1,10	-8,04	100	7,37	7,32	-0,92	-7,15	100	7,31	7,24	-0,98	-7,72	100	7,66	7,60	-0,98	-7,37
150	7,56	7,55	-0,37	-2,81	150	7,15	7,15	-0,25	-1,96	150	7,09	7,08	-0,26	-2,12	150	7,43	7,42	-0,30	-2,30
190	7,38	7,38	0,10	0,79	190	7,06	7,05	0,25	2,01	190	6,96	6,96	0,20	1,61	190	7,30	7,30	0,17	1,30
500	7,53	7,07	2,57	19,97	500	7,24	6,74	2,66	21,51	500	7,15	6,65	2,62	21,46	500	7,45	6,99	2,58	20,28
550	7,65	7,06	2,94	22,60	550	7,36	6,72	3,01	24,13	550	7,27	6,63	2,97	24,10	550	7,58	6,97	2,96	23,01
600	7,73	7,01	3,27	25,00	600	7,49	6,69	3,37	26,73	600	7,37	6,59	3,29	26,54	600	7,70	6,95	3,32	25,52
650	7,91	7,00	3,69	27,80	650	7,63	6,67	3,70	29,00	650	7,52	6,57	3,65	29,02	650	7,84	6,94	3,65	27,74
700	8,04	6,99	3,97	29,63	700	7,78	6,63	4,06	31,49	700	7,66	6,54	3,99	31,40	700	7,96	6,88	3,99	30,12
750	8,15	6,94	4,28	31,63	750	7,95	6,63	4,39	33,49	750	7,87	6,53	4,40	33,96	750	8,09	6,86	4,29	32,01
800	8,33	6,91	4,65	33,93	800	8,14	6,61	4,75	35,70	800	8,03	6,50	4,72	35,96	800	8,26	6,85	4,61	33,92
850	8,51	6,86	5,03	36,22	850	8,34	6,61	5,08	37,56	850	8,19	6,48	5,01	37,69	850	8,44	6,83	4,95	35,93
900	8,71	6,91	5,30	37,49	900	8,50	6,56	5,41	39,51	900	8,42	6,48	5,38	39,70	900	8,59	6,79	5,26	37,77
950	8,97	6,85	5,79	40,18	950	8,76	6,56	5,80	41,49	950	8,63	6,47	5,70	41,38	950	8,83	6,78	5,65	39,78
1000	9,17	6,85	6,10	41,71	1000	8,97	6,53	6,15	43,27	1000	8,83	6,46	6,02	43,00	1000	9,03	6,75	5,99	41,56

**Значения модуля полного  $Z$ , активного  $R$ , реактивного  $X$  сопротивления и разности фаз напряжения и тока  
тестового сигнала  $A$  свинцово-кислотных АБ типа Panasonic 75D23 измеренных на разных частотах  $f$**

Таблица ПЗ.4

Свинцово-кислотная АБ №12 типа Panasonic 75D23 $C_{20} =$ 65 Ач, частично разряжена, $U_{НРЦ}$ $= 12,31$ В, $C_R = 66$ мин.					Свинцово-кислотная АБ №13 типа Panasonic 75D23 $C_{20} =$ 65 Ач, частично разряжена, $U_{НРЦ}$ $= 12,31$ В, $C_R = 67$ мин.					Свинцово-кислотная АБ №14 типа Panasonic 75D23 $C_{20} =$ 65 Ач, частично разряжена, $U_{НРЦ}$ $= 12,31$ В, $C_R = 59$ мин.					Свинцово-кислотная АБ №15 типа Panasonic 75D23 $C_{20} =$ 65 Ач, частично разряжена, $U_{НРЦ}$ $= 12,35$ В, $C_R = 65$ мин.				
$f$ , Гц	$Z$ , мОм	$R$ , мОм	$X$ , мОм	$A$ , град.	$f$ , Гц	$Z$ , мОм	$R$ , мОм	$X$ , мОм	$A$ , град.	$f$ , Гц	$Z$ , мОм	$R$ , мОм	$X$ , мОм	$A$ , град.	$f$ , Гц	$Z$ , мОм	$R$ , мОм	$X$ , мОм	$A$ , град.
20	9,07	8,17	-3,94	-25,74	20	9,21	8,20	-4,19	-27,07	20	9,2	8,4	-3,8	-24,5	20	8,9	8,1	-3,8	-25,3
50	7,08	6,81	-1,96	-16,06	50	6,99	6,70	-1,97	-16,35	50	7,3	7,0	-1,8	-14,7	50	7,0	6,7	-1,8	-15,2
100	6,42	6,37	-0,80	-7,18	100	6,34	6,29	-0,83	-7,54	100	6,6	6,6	-0,8	-6,6	100	6,3	6,3	-0,7	-6,8
150	6,20	6,20	-0,20	-1,87	150	6,12	6,12	-0,19	-1,76	150	6,4	6,4	-0,2	-1,4	150	6,1	6,1	-0,2	-1,7
190	6,12	6,12	0,25	2,35	190	6,04	6,04	0,30	2,86	190	6,4	6,4	0,3	2,7	190	6,1	6,1	0,3	2,5
500	6,37	5,87	2,48	22,92	500	6,36	5,79	2,64	24,48	500	6,6	6,1	2,6	23,4	500	6,3	5,8	2,5	23,0
550	6,52	5,85	2,88	26,15	550	6,47	5,79	2,88	26,46	550	6,7	6,0	2,9	25,6	550	6,4	5,8	2,9	26,5
600	6,67	5,83	3,23	28,94	600	6,63	5,80	3,22	29,03	600	6,8	6,0	3,3	28,4	600	6,6	5,8	3,2	28,9
650	6,80	5,81	3,52	31,22	650	6,81	5,76	3,64	32,27	650	7,0	6,0	3,6	30,9	650	6,7	5,7	3,5	31,5
700	6,95	5,78	3,86	33,74	700	6,97	5,77	3,91	34,12	700	7,1	6,0	3,9	33,2	700	6,9	5,7	3,8	33,8
750	7,09	5,75	4,14	35,78	750	7,02	5,72	4,08	35,50	750	7,2	6,0	4,1	34,4	750	6,8	5,7	3,6	32,5
800	7,29	5,75	4,48	37,88	800	7,15	5,67	4,37	37,60	800	7,4	5,9	4,4	36,4	800	6,9	5,7	3,9	34,8
850	7,44	5,73	4,75	39,63	850	7,37	5,70	4,67	39,34	850	7,5	6,0	4,6	37,6	850	7,1	5,7	4,2	36,5
900	7,64	5,71	5,07	41,60	900	7,56	5,68	5,00	41,34	900	7,7	5,9	5,0	40,3	900	7,2	5,7	4,5	38,5
950	7,98	5,71	5,58	44,34	950	8,05	5,64	5,74	45,50	950	8,2	5,9	5,7	44,2	950	8,0	5,6	5,6	44,9
1000	8,19	5,69	5,90	46,04	1000	8,28	5,63	6,08	47,19	1000	8,5	5,9	6,1	45,8	1000	8,2	5,6	6,0	46,6

**Значения модуля полного  $Z$ , активного  $R$ , реактивного  $X$  сопротивления и разности фаз напряжения и тока  
тестового сигнала  $A$  свинцово-кислотных АБ типа Panasonic 105D30 измеренных на разных частотах  $f$**

Таблица П3.5

Свинцово-кислотная АБ №09 типа Panasonic 105D30 $C_{20} =$ 90 Ач, частично разряжена, $U_{НРЦ}$ $= 12,31$ В, $C_R = 93$ мин.					Свинцово-кислотная АБ №09 типа Panasonic 105D30 $C_{20} =$ 90 Ач, частично разряжена, $U_{НРЦ}$ $= 12,32$ В, $C_R = 94$ мин.					Свинцово-кислотная АБ №09 типа Panasonic 105D30 $C_{20} =$ 90 Ач, частично разряжена, $U_{НРЦ}$ $= 12,33$ В, $C_R = 94$ мин.					Свинцово-кислотная АБ №09 типа Panasonic 105D30 $C_{20} =$ 90 Ач, частично разряжена, $U_{НРЦ}$ $= 12,75$ В, $C_R = 132$ мин.				
$f$ , Гц	$Z$ , мОм	$R$ , мОм	$X$ , мОм	$A$ , град.	$f$ , Гц	$Z$ , мОм	$R$ , мОм	$X$ , мОм	$A$ , град.	$f$ , Гц	$Z$ , мОм	$R$ , мОм	$X$ , мОм	$A$ , град.	$f$ , Гц	$Z$ , мОм	$R$ , мОм	$X$ , мОм	$A$ , град.
20	8,02	7,06	-3,82	-28,40	20	8,21	7,16	-4,02	-29,31	20	7,87	7,17	-3,24	-24,33	20	6,76	6,28	-2,49	-21,59
50	6,05	5,79	-1,77	-17,03	50	6,13	5,84	-1,86	-17,69	50	6,06	5,85	-1,60	-15,29	50	5,47	5,36	-1,06	-11,22
100	5,35	5,30	-0,75	-8,03	100	5,42	5,37	-0,75	-7,92	100	5,42	5,39	-0,65	-6,83	100	5,08	5,07	-0,33	-3,73
150	5,13	5,13	-0,11	-1,27	150	5,21	5,21	-0,13	-1,45	150	5,17	5,17	-0,09	-0,99	150	4,99	4,98	0,17	1,98
500	5,43	4,80	2,53	27,74	500	5,43	4,87	2,40	26,22	200	5,07	5,06	0,39	4,44	200	4,93	4,89	0,57	6,61
550	5,59	4,77	2,90	31,29	550	5,63	4,86	2,83	30,24	500	5,46	4,84	2,53	27,61	500	5,31	4,69	2,50	28,08
600	5,76	4,77	3,23	34,10	600	5,76	4,84	3,13	32,89	550	5,61	4,84	2,84	30,42	550	5,47	4,70	2,82	30,95
650	5,92	4,75	3,55	36,75	650	5,93	4,82	3,45	35,54	600	5,77	4,81	3,19	33,54	600	5,61	4,66	3,12	33,80
700	6,10	4,72	3,87	39,32	700	6,10	4,80	3,76	38,08	650	5,93	4,77	3,53	36,47	650	5,78	4,66	3,43	36,40
750	6,25	4,72	4,10	41,00	750	6,46	4,77	4,36	42,46	700	6,13	4,77	3,84	38,85	700	5,94	4,64	3,70	38,57
800	6,46	4,70	4,44	43,38	800	6,69	4,77	4,69	44,52	750	6,28	4,73	4,14	41,14	750	6,12	4,63	4,00	40,85
850	6,66	4,69	4,73	45,22	850	6,89	4,73	5,01	46,67	800	6,51	4,72	4,48	43,54	800	6,30	4,62	4,29	42,86
900	6,87	4,66	5,04	47,28	900	7,09	4,72	5,29	48,24	850	6,78	4,74	4,85	45,68	850	6,57	4,61	4,69	45,52
950	7,18	4,66	5,47	49,55	950	7,17	4,72	5,40	48,84	900	6,97	4,70	5,15	47,58	900	6,77	4,59	4,97	47,29
1000	7,43	4,64	5,81	51,36	1000	7,38	4,71	5,67	50,28	950	7,19	4,69	5,45	49,31	950	6,96	4,58	5,24	48,84
										1000	7,44	4,67	5,80	51,14	1000	7,18	4,57	5,54	50,48

**Значения модуля полного  $Z$ , активного  $R$ , реактивного  $X$  сопротивления и разности фаз напряжения и тока  
тестового сигнала  $A$  свинцово-кислотных АБ типа FIAMM 12UMTB160 измеренных на разных частотах  $f$**

Таблица ПЗ.6

Свинцово-кислотная АБ №01 типа FIAMM 12UMTB160 $C_{20} = 160$ Ач, частично разряжена, $U_{НРЦ} = 12,65$ В, $C_R = 300$ мин.					Свинцово-кислотная АБ №02 типа FIAMM 12UMTB160 $C_{20} = 160$ Ач, частично разряжена, $U_{НРЦ} = 12,67$ В, $C_R = 282$ мин.					Свинцово-кислотная АБ №98 типа FIAMM 12UMTB160 $C_{20} = 160$ Ач, частично разряжена, $U_{НРЦ} = 13,12$ В, $C_R = 363$ мин.					Свинцово-кислотная АБ №99 типа FIAMM 12UMTB160 $C_{20} = 160$ Ач, частично разряжена, $U_{НРЦ} = 13,12$ В, $C_R = 241$ мин.				
$f$ , Гц	$Z$ , мОм	$R$ , мОм	$X$ , мОм	$A$ , град.	$f$ , Гц	$Z$ , мОм	$R$ , мОм	$X$ , мОм	$A$ , град.	$f$ , Гц	$Z$ , мОм	$R$ , мОм	$X$ , мОм	$A$ , град.	$f$ , Гц	$Z$ , мОм	$R$ , мОм	$X$ , мОм	$A$ , град.
20	3,66	3,49	-1,12	-17,73	20	3,86	3,66	-1,24	-18,69	20	3,70	3,61	-0,83	-12,93	20	3,64	3,55	-0,80	-12,73
50	3,09	3,06	-0,44	-8,11	50	3,24	3,20	-0,51	-9,00	50	3,40	3,39	-0,24	-4,02	50	3,36	3,35	-0,26	-4,39
100	2,90	2,90	-0,03	-0,51	100	3,02	3,02	-0,09	-1,73	100	3,27	3,27	0,14	2,40	100	3,29	3,29	0,14	2,51
150	2,88	2,86	0,31	6,22	150	2,95	2,94	0,21	3,99	150	3,29	3,26	0,42	7,34	150	3,27	3,24	0,45	7,87
200	2,87	2,81	0,57	11,52	200	2,93	2,87	0,61	11,90	200	3,32	3,24	0,71	12,27	200	3,28	3,20	0,73	12,84
500	3,36	2,71	1,98	36,14	500	3,50	2,79	2,13	37,34	500	3,85	3,15	2,21	35,01	500	3,84	3,13	2,24	35,59
550	3,50	2,71	2,21	39,23	550	3,64	2,76	2,37	40,62	550	3,99	3,14	2,46	38,01	550	3,98	3,12	2,47	38,41
600	3,64	2,71	2,43	41,93	600	3,79	2,76	2,61	43,39	600	4,15	3,15	2,70	40,62	600	4,14	3,12	2,72	41,11
650	3,75	2,70	2,61	44,05	650	3,88	2,76	2,73	44,63	650	4,24	3,15	2,85	42,14	650	4,31	3,11	2,99	43,91
700	3,91	2,70	2,83	46,30	700	4,04	2,75	2,96	47,18	700	4,40	3,15	3,08	44,27	700	4,48	3,11	3,23	46,11
750	4,05	2,68	3,04	48,56	750	4,21	2,77	3,18	48,93	750	4,57	3,16	3,30	46,22	750	4,65	3,09	3,47	48,26
800	4,21	2,68	3,25	50,56	800	4,43	2,75	3,47	51,63	800	4,73	3,14	3,54	48,42	800	4,85	3,11	3,72	50,06
850	4,77	2,69	3,94	55,69	850	4,69	2,73	3,82	54,44	850	4,93	3,15	3,80	50,31	850	5,03	3,10	3,97	51,98
900	4,98	2,70	4,18	57,15	900	4,89	2,72	4,07	56,30	900	5,11	3,13	4,04	52,25	900	5,21	3,09	4,20	53,68
950	5,16	2,68	4,41	58,71	950	5,10	2,71	4,32	57,89	950	5,30	3,12	4,28	53,92	950	5,42	3,10	4,44	55,09
1000	5,38	2,70	4,65	59,91	1000	5,31	2,76	4,53	58,68	1000	5,54	3,14	4,56	55,42	1000	5,64	3,12	4,70	56,38

**Значения модуля полного  $Z$ , активного  $R$ , реактивного  $X$  сопротивления и разности фаз напряжения и тока  
тестового сигнала  $A$  никель-кадмиевого аккумулятора типа Eneloop HR-4UTGB измеренных на разных частотах  $f$**

Таблица П3.7

Никель-кадмиевый аккумулятор №01 типа Eneloop HR-4UTGB $C_5 = 0,75$ Ач, полностью заряжен, $U_{нрц} = 1,3$ В					Никель-кадмиевый аккумулятор №01 типа Eneloop HR-4UTGB $C_5 = 0,75$ Ач, полностью разряжен, $U_{нрц} = 1,1$ В					Никель-кадмиевый аккумулятор №02 типа Eneloop HR-4UTGB $C_5 = 0,75$ Ач, полностью заряжен, $U_{нрц} = 1,3$ В					Никель-кадмиевый аккумулятор №02 типа Eneloop HR-4UTGB $C_5 = 0,75$ Ач, полностью разряжен, $U_{нрц} = 1,1$ В				
$f, \text{Гц}$	$Z,$ мОм	$R,$ мОм	$X,$ мОм	$A,$ град.	$f, \text{Гц}$	$Z,$ мОм	$R,$ мОм	$X,$ мОм	$A,$ град.	$f, \text{Гц}$	$Z,$ мОм	$R,$ мОм	$X,$ мОм	$A,$ град.	$f, \text{Гц}$	$Z,$ мОм	$R,$ мОм	$X,$ мОм	$A,$ град.
20	49,4	49,3	-3,8	-4,4	20	84,6	83,9	-11,1	-7,5	20	47,8	47,7	-3,1	-3,8	20	72,4	72,2	-5,6	-4,5
50	47,3	47,2	-2,9	-3,5	50	78,5	77,4	-12,8	-9,4	50	46,1	46,0	-2,3	-2,9	50	69,7	69,5	-4,7	-3,9
100	46,4	46,4	-2,3	-2,9	100	72,4	70,9	-14,6	-11,6	100	45,1	45,0	-1,7	-2,2	100	67,9	67,7	-5,1	-4,3
200	45,4	45,4	-1,8	-2,2	200	64,6	62,9	-14,6	-13,1	200	44,3	44,3	-1,2	-1,6	200	65,7	65,5	-5,6	-4,9
300	44,9	44,8	-1,5	-1,9	300	59,9	58,1	-14,6	-14,1	300	44,1	44,1	-0,9	-1,2	300	62,7	62,4	-5,8	-5,3
400	44,5	44,5	-1,2	-1,5	400	57,3	55,5	-14,2	-14,3	400	43,8	43,8	-0,6	-0,8	400	61,5	61,2	-6,0	-5,6
500	45,0	45,0	-1,0	-1,3	500	55,3	53,6	-13,4	-14,0	500	43,6	43,6	-0,4	-0,5	500	61,1	60,7	-7,2	-6,8
600	45,1	45,1	-0,8	-1,0	600	54,5	53,0	-12,7	-13,4	600	44,2	44,2	-0,1	-0,2	600	61,3	60,8	-8,3	-7,7
700	45,7	45,7	-0,6	-0,7	700	52,4	51,3	-10,7	-11,7	700	44,5	44,5	0,1	0,1	700	60,1	59,6	-7,8	-7,4
800	45,1	45,1	-0,4	-0,5	800	51,7	50,7	-10,3	-11,5	800	44,3	44,3	0,3	0,4	800	60,0	59,4	-8,4	-8,0
900	45,1	45,1	-0,1	-0,1	900	51,0	50,0	-9,8	-11,1	900	44,2	44,2	0,5	0,7	900	59,7	59,0	-8,9	-8,6
1000	45,0	45,0	0,2	0,2	1000	50,4	49,5	-9,3	-10,6	1000	44,1	44,1	0,7	0,9	1000	59,3	58,6	-9,3	-9,1

**Значения модуля полного  $Z$ , активного  $R$ , реактивного  $X$  сопротивления и разности фаз напряжения и тока тестового сигнала  $A$  никель-кадмиевого аккумулятора типа Eneloop HR-4UTGB измеренных на разных частотах  $f$**

Таблица ПЗ.8

Никель-кадмиевый аккумулятор №03 типа Eneloop HR-4UTGB $C_5 = 0,75$ Ач, полностью заряжен, $U_{нрц} = 1,3$ В					Никель-кадмиевый аккумулятор №03 типа Eneloop HR-4UTGB $C_5 = 0,75$ Ач, полностью разряжен, $U_{нрц} = 1,1$ В					Никель-кадмиевый аккумулятор №04 типа Eneloop HR-4UTGB $C_5 = 0,75$ Ач, полностью заряжен, $U_{нрц} = 1,3$ В					Никель-кадмиевый аккумулятор №04 типа Eneloop HR-4UTGB $C_5 = 0,75$ Ач, полностью разряжен, $U_{нрц} = 1,1$ В				
$f$ , Гц	$Z$ , мОм	$R$ , мОм	$X$ , мОм	$A$ , град.	$f$ , Гц	$Z$ , мОм	$R$ , мОм	$X$ , мОм	$A$ , град.	$f$ , Гц	$Z$ , мОм	$R$ , мОм	$X$ , мОм	$A$ , град.	$f$ , Гц	$Z$ , мОм	$R$ , мОм	$X$ , мОм	$A$ , град.
20	41,1	40,9	-4,6	-6,4	20	46,8	46,7	-4,0	-4,9	20	30,4	30,0	-4,4	-8,4	20	44,7	44,5	-4,5	-5,8
50	38,7	38,6	-3,2	-4,8	50	45,5	45,4	-3,1	-3,9	50	28,1	27,9	-3,0	-6,1	50	42,7	42,6	-3,3	-4,5
100	37,4	37,3	-2,4	-3,7	100	44,8	44,7	-2,7	-3,5	100	26,8	26,7	-2,2	-4,6	100	41,7	41,6	-2,8	-3,8
200	36,5	36,5	-1,7	-2,7	200	44,3	44,2	-2,6	-3,3	200	25,8	25,7	-1,5	-3,3	200	41,2	41,1	-2,5	-3,5
300	36,1	36,1	-1,4	-2,2	300	42,5	42,4	-2,3	-3,1	300	25,4	25,3	-1,1	-2,6	300	38,4	38,4	-2,2	-3,3
400	35,8	35,8	-1,0	-1,6	400	42,6	42,6	-2,3	-3,1	400	25,2	25,2	-0,8	-1,8	400	38,3	38,2	-2,1	-3,2
500	35,6	35,6	-0,7	-1,2	500	42,8	42,7	-2,4	-3,2	500	25,0	25,0	-0,5	-1,3	500	38,3	38,2	-2,0	-3,1
600	35,4	35,4	-0,5	-0,8	600	42,9	42,9	-2,4	-3,2	600	24,9	24,9	-0,3	-0,7	600	38,3	38,2	-2,0	-3,0
700	35,6	35,6	-0,3	-0,5	700	41,8	41,7	-2,1	-2,8	700	24,9	24,9	-0,1	-0,3	700	37,1	37,0	-1,6	-2,5
800	35,4	35,4	-0,1	-0,1	800	42,0	42,0	-2,1	-2,9	800	25,8	25,8	0,1	0,2	800	37,2	37,1	-1,6	-2,4
900	35,3	35,3	0,2	0,3	900	42,3	42,3	-2,2	-3,0	900	25,3	25,3	0,3	0,7	900	37,0	37,0	-1,5	-2,3
1000	35,3	35,3	0,4	0,6	1000	42,6	42,6	-2,3	-3,1	1000	25,4	25,4	0,5	1,2	1000	37,2	37,1	-1,5	-2,3

Согласно табл. ПЗ.7 и ПЗ.8 заряженный никель-металлгидридный аккумулятор обладает меньшим по значению активным сопротивлением и характеристической частотой (частота перехода реактивного сопротивления  $X$  через 0) в отличие от разряженного, параметры которого принимают несколько большие значения. В связи с этим можно говорить о том, что описанный в диссертационной работе метод может быть использован для оценки эксплуатационных характеристик никель-металлгидридных аккумуляторных батарей.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 4

**Значения модуля полного  $Z$ , активного  $R$ , реактивного  $X$  сопротивления и разности фаз напряжения и тока тестового сигнала  $A$  никель-кадмиевый аккумулятор типа Eneloop HR-4UTGB измеренных на разных частотах  $f$  без нагрузки и под нагрузкой  $I_H = 0,075$  А,  $I_H = 0,15$  А,  $I_H = 0,35$  А**

Таблица П4.1

Никель-кадмиевый аккумулятор №01 типа Eneloop HR-4UTGB $C_5 = 0,75$ Ач, полностью заряжен, $U_{НРЦ} = 1,37$ В, без нагрузки					Никель-кадмиевый аккумулятор №01 типа Eneloop HR-4UTGB $C_5 = 0,75$ Ач, полностью заряжен, под нагрузкой ( $I_H = 0,075$ А)					Никель-кадмиевый аккумулятор №01 типа Eneloop HR-4UTGB $C_5 = 0,75$ Ач, полностью заряжен, под нагрузкой ( $I_H = 0,15$ А)					Никель-кадмиевый аккумулятор №01 типа Eneloop HR-4UTGB $C_5 = 0,75$ Ач, полностью заряжен, под нагрузкой ( $I_H = 0,35$ А)				
$f$ , Гц	$Z$ , мОм	$R$ , мОм	$X$ , мОм	$A$ , град.	$f$ , Гц	$Z$ , мОм	$R$ , мОм	$X$ , мОм	$A$ , град.	$f$ , Гц	$Z$ , мОм	$R$ , мОм	$X$ , мОм	$A$ , град.	$f$ , Гц	$Z$ , мОм	$R$ , мОм	$X$ , мОм	$A$ , град.
20	53,3	53,1	-4,4	-4,7	20	53,6	53,4	-4,3	-4,6	20	51,3	51,1	-4,1	-4,6	20	50,8	50,7	-4,1	-4,6
50	51,8	51,7	-3,2	-3,6	50	51,5	51,4	-3,2	-3,6	50	49,0	48,9	-3,1	-3,6	50	48,6	48,5	-3,0	-3,6
100	50,4	50,3	-2,5	-2,8	100	50,0	50,0	-2,5	-2,8	100	47,6	47,6	-2,4	-2,9	100	47,3	47,2	-2,3	-2,8
200	49,4	49,4	-1,8	-2,1	200	49,1	49,1	-1,9	-2,2	200	46,6	46,6	-1,7	-2,1	200	46,2	46,1	-1,7	-2,2
300	48,9	48,9	-1,4	-1,7	300	48,3	48,3	-1,4	-1,7	300	46,9	46,9	-1,4	-1,7	300	45,4	45,3	-1,3	-1,7
400	47,8	47,8	-1,0	-1,2	400	47,6	47,6	-1,1	-1,3	400	46,2	46,2	-1,0	-1,3	400	45,0	45,0	-1,0	-1,3
500	47,5	47,5	-0,7	-0,9	500	47,2	47,2	-0,8	-1,0	500	45,8	45,8	-0,7	-0,9	500	44,7	44,7	-0,7	-1,0
600	47,2	47,2	-0,5	-0,6	600	47,0	47,0	-0,6	-0,7	600	45,6	45,6	-0,4	-0,5	600	44,4	44,4	-0,5	-0,6
700	47,1	47,1	-0,2	-0,2	700	46,8	46,8	-0,2	-0,2	700	46,3	46,3	-0,5	-0,6	700	44,9	44,9	-0,3	-0,4
800	48,0	48,0	0,0	0,0	800	47,3	47,3	0,0	0,0	800	46,9	46,9	-0,2	-0,3	800	44,8	44,8	-0,1	-0,1
900	47,9	47,9	0,2	0,3	900	47,1	47,1	0,3	0,3	900	46,8	46,8	0,0	0,0	900	44,6	44,6	0,1	0,2
1000	47,7	47,7	0,4	0,5	1000	46,9	46,9	0,4	0,5	1000	46,7	46,7	0,1	0,2	1000	44,5	44,5	0,3	0,4



**Значения модуля полного  $Z$ , активного  $R$ , реактивного  $X$  сопротивления и разности фаз напряжения и тока тестового сигнала  $A$  измеренных на разных частотах  $f$  никель-кадмиевый аккумулятор типа Eneloop HR-4UTGB измеренные без нагрузки и под нагрузкой  $I_H = 0,075$  А,  $I_H = 0,15$  А,  $I_H = 0,35$  А**

Таблица П4.2

Никель-кадмиевый аккумулятор №02 типа Eneloop HR-4UTGB $C_5 = 0,75$ Ач, полностью заряжен, $U_{НРЦ} = 1,36$ В, без нагрузки					Никель-кадмиевый аккумулятор №02 типа Eneloop HR-4UTGB $C_5 = 0,75$ Ач, полностью заряжен, под нагрузкой ( $I_H = 0,075$ А)					Никель-кадмиевый аккумулятор №02 типа Eneloop HR-4UTGB $C_5 = 0,75$ Ач, полностью заряжен, под нагрузкой ( $I_H = 0,15$ А)					Никель-кадмиевый аккумулятор №02 типа Eneloop HR-4UTGB $C_5 = 0,75$ Ач, полностью заряжен, под нагрузкой ( $I_H = 0,35$ А)				
$f$ , Гц	$Z$ , мОм	$R$ , мОм	$X$ , мОм	$A$ , град.	$f$ , Гц	$Z$ , мОм	$R$ , мОм	$X$ , мОм	$A$ , град.	$f$ , Гц	$Z$ , мОм	$R$ , мОм	$X$ , мОм	$A$ , град.	$f$ , Гц	$Z$ , мОм	$R$ , мОм	$X$ , мОм	$A$ , град.
20	54,2	54,1	-3,7	-3,9	20	53,9	53,7	-3,7	-3,9	20	51,7	51,6	-3,7	-4,1	20	50,3	50,1	-3,6	-4,1
50	52,2	52,2	-2,6	-2,9	50	51,9	51,9	-2,6	-2,9	50	49,6	49,5	-2,6	-3,0	50	48,2	48,1	-2,6	-3,1
100	51,0	51,0	-1,9	-2,2	100	50,8	50,8	-2,0	-2,2	100	48,7	48,7	-2,0	-2,4	100	47,1	47,1	-2,0	-2,4
200	50,2	50,1	-1,3	-1,5	200	50,0	50,0	-1,4	-1,6	200	47,6	47,6	-1,4	-1,7	200	47,4	47,4	-1,5	-1,8
300	50,1	50,1	-1,0	-1,1	300	49,2	49,2	-1,0	-1,2	300	47,6	47,6	-1,1	-1,4	300	44,5	44,5	-1,1	-1,4
400	49,7	49,7	-0,7	-0,8	400	48,9	48,9	-0,7	-0,9	400	47,2	47,2	-0,8	-1,0	400	44,2	44,2	-0,8	-1,0
500	49,6	49,6	-0,4	-0,5	500	48,7	48,7	-0,5	-0,6	500	47,1	47,1	-0,6	-0,7	500	44,0	44,0	-0,5	-0,7
600	49,3	49,3	-0,1	-0,1	600	48,4	48,4	-0,2	-0,3	600	46,7	46,7	-0,4	-0,5	600	44,5	44,5	-0,3	-0,4
700	49,7	49,7	0,2	0,3	700	47,9	47,9	0,0	0,0	700	47,3	47,3	0,0	0,0	700	44,2	44,2	0,0	0,0
800	49,5	49,5	0,4	0,5	800	48,5	48,5	0,2	0,2	800	48,0	48,0	0,1	0,1	800	44,1	44,1	0,2	0,3
900	50,2	50,2	0,7	0,8	900	48,4	48,4	0,4	0,5	900	47,9	47,9	0,3	0,4	900	44,0	44,0	0,5	0,6
1000	50,1	50,1	0,9	1,1	1000	48,2	48,2	0,6	0,7	1000	47,7	47,7	0,5	0,6	1000	43,8	43,8	0,6	0,8

Согласно табл. П4.1 и П4.2, параметры активного сопротивления и характеристической частоты (частота перехода реактивного сопротивления  $X$  через 0) исследуемых аккумуляторов без нагрузки и под нагрузкой разной величины изменяются незначительно, что может говорить о возможности диагностирования аккумуляторов не отключая их от нагрузки.

УТВЕРЖДАЮ

Директор

ООО «Сфера экономных технологий»

С.Ю. Феоктистов

«10» октября 2014



АКТ

Об использовании результатов диссертационной работы Чупина Дмитрия Павловича выполненной в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Омский государственный технический университет» (ОмГТУ), на тему «Параметрический метод контроля эксплуатационных характеристик аккумуляторных батарей» представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 – «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий»

Комиссия в составе:

Председатель: Долин Сергей Александрович – начальник отдела разработок ООО «Сфера экономных технологий», к.т.н.

Члены комиссии:

Гамов Игорь Григорьевич – начальник отдела программных средств ООО «Сфера экономных технологий»;

Денисов Виталий Михайлович – начальник конструкторского отдела ООО «Сфера экономных технологий»;

составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Д.П. Чупина используются в ООО «Сфера экономных технологий»:

- в части рассмотрения эквивалентной схемы аккумуляторной батареи в виде последовательной *RLC*-цепи;

- в части методики оценки эксплуатационных характеристик аккумуляторных батарей;

При использовании результатов диссертационной работы в ООО «Сфера экономных технологий» были использованы свидетельства о регистрации программ для ЭВМ №50201250384 и №50201450511.

Настоящий акт составлен для представления в Ученый совет по защите кандидатской диссертации Чупина Дмитрия Павловича.

Председатель:

С.А. Долин

Члены комиссии:

И.Г. Гамов

В.М. Денисов



Общество с ограниченной ответственностью  
«Фирма «Алекто-Электроникс»  
644046, РФ, г.Омск-46, а/я 5736.

от 15.09.2014 № 71-АЕА30

УТВЕРЖДАЮ

Директор

ООО «Фирма «Алекто-Электроникс»

А.Ю. Сурков

«15» сеп. 2014



АКТ

Об использовании результатов диссертационной работы Чупина Дмитрия Павловича выполненной в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Омский государственный технический университет» (ОмГТУ), на тему «Параметрический метод контроля эксплуатационных характеристик аккумуляторных батарей» представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 – «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий»

Комиссия в составе:

Председатель: Черкашин Сергей Юрьевич- зам. начальника отдела разработки

Члены комиссии: Литвинов Анатолий Михайлович – ведущий инженер системотехник,

Веретенников Артем Владимирович – инженер – электрик,

Комаров Александр Григорьевич – инженер - калибровщик

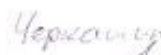
составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Д.П. Чупина используются в ООО «Фирма «Алекто-Электроникс»:

- в части рассмотрения эквивалентной схемы аккумуляторной батареи в виде последовательной  $RLC$ -цепи;
- в части методики оценки параметра характеристической частоты аккумуляторной батареи;
- в части методики оценки эксплуатационных характеристик аккумуляторных батарей.

Настоящий акт составлен для представления в Ученый совет по защите кандидатской диссертации Чупина Дмитрия Павловича.

Председатель:

Члены комиссии:

 С.Ю. Черкашин

 А.М. Литвинов

 А.В. Веретенников

 А.Г. Комаров