



TRUST YOUR BATTERIES™

## Измерение Активного Сопротивления Батарей: История и Факты

*Гленн Албер, Президент  
Albercorp, Boca Raton, Florida, USA.*

Измерения внутреннего активного сопротивления батареи волнуют умы пользователей и производителей батарей на протяжении последних десятилетий. Скорее всего каждый согласится с тем, что измерение внутренних параметров батареи могут быть очень полезны для определения состояния здоровья батареи. Эти измерения, которые на протяжении последних лет одобрялись отделом батарей организации IEEE и большинством производителей батарей, но до сих пор правильно не поняты.

Что не было правильно задокументировано и объяснено – так это разница между используемыми различными методами измерения и факт, что внутреннее сопротивление батареи это важный параметр в определении состояния здоровья батареи. Большинство измерителей импеданса по переменному току и измерителей проводимости батарей, не важно портативного либо лабораторного исполнения, не измеряют истинное сопротивление батареи и не показывают надежных данных о состоянии здоровья батареи.

За последние 50-лет было очень мало опубликовано статей о внутренних параметрах батарей. Этот документ освятит наиболее выдающиеся тесты и эксперименты и объяснит как результаты этих экспериментов подтверждают выводы, сделанные здесь автором этой статьи.

### ***Разница между измерениями по переменному току и сопротивлением по постоянному току***

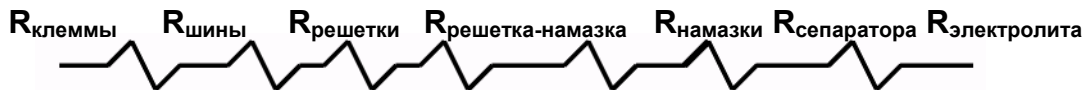
Давайте взглянем на электрическую модель батареи, представленную на рисунке 2, для того что бы подчеркнуть различия в возможных подходах. Сопротивление по постоянному току электрической модели не зависит от внутренней емкости батареи и равно  $R_1 + R_2$ . Измерения по переменному току не могут игнорировать внутреннюю емкость, которая выступает как параллельное к  $R_2$  активное сопротивление. Поскольку емкость параллельна сопротивлению  $R_2$ , это маскирует проблемы, которые могут возникнуть в сопротивлении  $R_2$ , как части электрической цепи батареи, и искажает происходящее в сопротивлении  $R_1$ , как части электрической цепи батареи. При достаточно высоких частотах измерений по переменному току емкость превращается в короткозамкнутую цепь и измерители по переменному току не детектируют никаких изменений в  $R_2$  независимо от величины этих изменений. Измерители по переменному току обычно ограничены применением для 12-вольтовых батарей малой емкости и только как

индикаторы состояния здоровья батарей, а не как измерители, потому, что батареи малой емкости имеют большое внутреннее сопротивление и малое значение внутренней емкости. Глубина воздействия внутренней емкости на измерения зависит от частоты измерений и величины внутренней емкости батареи. Величина внутренней емкости батареи напрямую зависит от емкости батареи в Ампер-Часах.

### ***Почему измерения по постоянному току более точные***

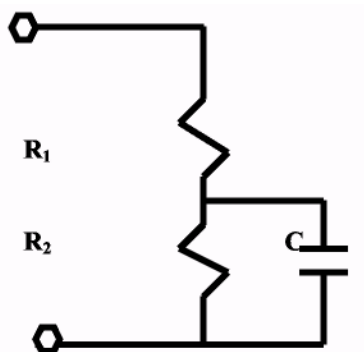
По мере того как батарея разрушается, теряя свою емкость, внутреннее сопротивление батареи увеличивается. Увеличение значения внутреннего сопротивления может быть использовано для определения срока окончания службы батареи. Эксперименты, проведенные компанией Albercorp показывают, что если сопротивление батареи увеличилось более чем на 25% от базового значения (хорошо известное сопротивление новой 100%-заряженной батареи), то батарея не сможет далее отдавать 80% и более своей заявленной емкости. Поскольку производители батарей для целей гарантии хотят иметь более широкий диапазон внутреннего сопротивления батареи – то они признают от 40% до 50% увеличения внутреннего сопротивления батареи как допустимое увеличение в течение срока службы батареи.

Сопротивление батареи включает в себя все компоненты батареи, через которые протекает ток при разряде батареи, передавая накопленную энергию во внешнюю нагрузку. На рисунке 1 показаны все основные компоненты внутреннего сопротивления батареи.



Некоторые сопротивления это металлы, а некоторые сопротивления это части химических реакций. Потеря емкости батареи есть результат увеличения сопротивления, которое в свою очередь может быть вызвано металлическими или химическими проблемами.

В состав батареи входит также большая емкость – которая показана на рисунке 2 в виде конденсатора. Типичная величина емкости этого конденсатора около 1,5 фарад на каждые 100Ач емкости батареи. Различные исследователи и электрохимики до сих пор не пришли к единому мнению по поводу места емкости в электрической принципиальной схеме батареи.



**Рисунок 2. Упрощенная принципиальная электрическая схема батареи**

На рисунке 2 представлена электрическая модель батареи, которая в общем принимается всеми исследователями, и содержит множество сопротивлений, сгруппированных в два основных сопротивления, помеченных как  $R_1$  и  $R_2$ . Так же показана емкость в виде конденсатора, параллельного сопротивлению  $R_2$ . В инструкции об измерениях импеданса и проводимости батарей серии Dynasty бывшая компания Johnson Controls (ныне C&D Technologies Inc. [www.cdtechno.com](http://www.cdtechno.com), форма 41-7271) приписывает сопротивлению  $R_2$  (сопротивление намазанных пластин, запараллеленное с емкостью батареи) 40% общего сопротивления батареи. Автор текущей статьи будет использовать величину в 45% как более близкую к результатам исследований реальных образцов.

Далее перечислены причины потери емкости батареи:

1. Любое увеличение сопротивления металлической цепи вызывает огромное снижение напряжения на клеммах батареи при разряде на нагрузку. Это означает, что конечное напряжение разряда на клеммах батареи будет достигнуто раньше чем положенное время. В соответствие с наихудшим сценарием разряда на нагрузку внутреннее сопротивление перегреется и сработает предохранитель, который и прервет процесс разряда.
2. Любое увеличение сопротивления химической цепи батареи, такой как электролит или намазка на решетке, будет означать что снабжение топливом батареи будет повреждено и батарея не сможет сохранить положенное количество энергии. Выкипание электролита в свинцово-кислых с клапаном сброса необслуживаемых батареях хороший тому пример.

То что заставляет измерения сопротивления батареи по переменному току становится такими неэффективными – так это факт, что внутренняя емкость батареи параллельна огромной части проводящей цепи батареи и, поэтому, склонна маскировать увеличение сопротивления, которое имеет место в части проводящей цепи батареи, параллельной этой емкости. Эксперименты, сделанные и описанные пользователем (2) и компанией производителем (4), в которых использовались измерители по переменному току, описанные ниже, четко показывают, что измерения импеданса и проводимости плохо коррелируются с изменением емкости батареи и они доказали, что чем выше частота измеряющего сигнала то тем хуже эта корреляция выражена. Последующий математический анализ докажет почему это так и есть.

### ***Сравнение сопротивления батареи с ее импедансом***

По мере старения батареи этот процесс может быть выявлен при помощи мониторинга общего активного сопротивления батареи. Измерения импеданса батареи по переменному току или проводимости батареи по переменному току не будут правильно отражать изменения сопротивления батареи за исключением случаев, когда измерения проводятся на очень низкой частоте, то есть по сути дела по постоянному току.

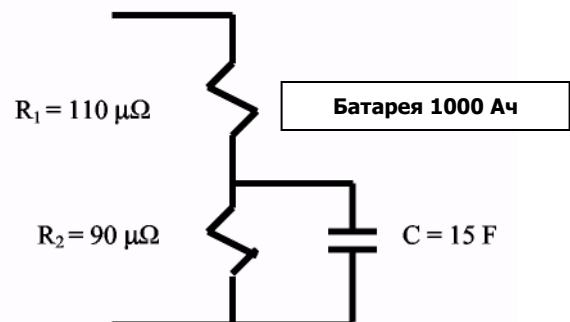
**Пример:** Возьмем популярный типоразмер батареи и оценим, что происходит с ней по мере ее старения. Популярный типоразмер батареи от 800 до 1200 Ач имеет внутреннее сопротивление приблизительно 200 микроом (в соответствии с реальными измерениями сопротивления). Сопротивление указанного типоразмера батареи также зависит и от дизайна батареи – для применения и ИБП или телекоммуникациях. Этот типоразмер батарей имеет приблизительно емкость в 15 фарад.

Использование этих реальных данных для электрической модели батареи на рисунке 2 позволит нам посчитать импеданс или проводимость батареи по переменному току. Мы также можем использовать различные значения частоты измеряющего сигнала, для того что бы показать, что эти измерения по переменному току totally неэффективны и обманчивы более и более по мере роста частоты измеряющего сигнала.

$$R_{Tot} = R_1 + R_2 = 110 \mu\Omega + 90 \mu\Omega = 200 \mu\Omega$$

$$X_C = 1/2\pi fC = 1/2 (3.14)(f)(15)$$

$$Z_{Tot} = R_1 + \frac{(R_2)(jX_C)}{R_2 + jX_C}$$



$R_{Tot}$  – активное сопротивление батареи

$X_c$  – реактивное сопротивление батареи

$Z_{Tot}$  – импеданс батареи

- Хорошо известные батареи имеют сопротивление в 200 микроом
- Импеданс рассчитывается формулой выше
- Частоты измерений характерны для современных приборов

Этот пример проиллюстрирует что произойдет с измерениями импеданса для 200 микроомной батареи в процессе ее старения до момента прихода ее в полную негодность. Как было указано ранее, увеличение внутреннего сопротивления батареи на 25% (на 50 микроом) будет означать, что батарея пришла в негодность, но мы так же посмотрим на то что произойдет при увеличении внутреннего сопротивления на 50%, поскольку эта цифра используется производителями батарей.

Таблица 1 показывает, что происходит с импедансом когда батарея приходит в негодность в результате либо увеличения сопротивления  $R_1$  либо  $R_2$ . Вначале анализа будем увеличивать сопротивление  $R_2$  до величины, когда батарея приходит в негодность, а затем тот же анализ сделаем увеличивая сопротивление  $R_1$ . Частоты измерительных сигналов использованные в анализе совпадают с частотами реально выпускаемых измерительных приборов.

Частота Измерит Сигнала	Параметр Негодности батареи	$R_{Tot}=R_1+R_2$ (микроом)	Изменение $R_{Tot}$ Батареи От начальной величины	$X_c$ (микроом)	$Z_{Tot}$ (микроом)	Изменение $Z_{Tot}$ Батареи от начальной величины
60	Нет	200	0	177	185	0
60	$R_2 > 140$	250	25%	177	208	12%
60	$R_1 > 160$	250	25%	177	234	26,5%
60	$R_2 > 190$	300	50%	177	220	19%
200	Нет	200	0	53	139	0
200	$R_2 > 140$	250	25%	53	135	-2,2%
200	$R_1 > 160$	250	25%	53	187	35%
200	$R_2 > 190$	300	50%	53	133	-4%

Результаты анализа очень интересны:

1. Когда общее сопротивление батареи увеличивается как результат увеличения сопротивления  $R_2$ , запараллеленного внутренней емкостью батареи, величина импеданса показывает небольшое увеличение, что явно будет недостаточной информацией для пользователя при определении состояния здоровья батареи. Измерители с частотой сигнала 60Гц показывают всего лишь увеличение импеданса на 12% вместо реальных 25%-ти увеличения. При этом эти измерители немного преувеличивают возникшую проблему в случае увеличения сопротивления  $R_1$ .
2. Также очевидно, что мере роста частоты измерительного сигнала при измерениях по переменному току растет и величина проблем с адекватностью результатов измерений. Для частоты 200Гц устройство измерения по переменному току показывает улучшение в состоянии здоровья батареи при реальном увеличении сопротивления  $R_2$  вплоть до выхода батареи из строя. Тоже самое измерительное устройство декларирует, что батарея вышла из строя (импеданс увеличился на 35%) в то время как ее внутреннее сопротивление  $R_1$  выросло всего на 25%.
3. Другое важное наблюдение состоит в том, что по мере роста сопротивления  $R_2$  электрической цепи батареи, увеличивается общее сопротивление батареи на величину более 25% по сравнению с исходной цифрой и при этом измерения импеданса совершенно не отражают состояние здоровья батареи, более того еще больше усугубляют неточность показаний. Заключение, которое может быть сделано на основе вышесказанного, состоит в том, что задолго до момента когда измерения импеданса покажут увеличение импеданса на 50% (момент выхода батареи из строя) измеряемая батарея уже давно будет по сути дела мертва.
4. Появляется все больше и больше систем мониторинга батарей, использующих внутренний переменный ток ИБП для измерения импеданса. Но это не есть удачная идея так как переменный (пульсирующий) ток имеет частоту 360Гц. В таблице 1 не показаны расчеты на такой высокой частоте, потому что результаты на меньшей частоте в 200Гц уже пугающе неточны и просто вводят в заблуждение относительно состояния здоровья батарей.

### ***ИСТОРИЯ ВОПРОСА***

Ниже приведен список экспериментальных измерений активного сопротивления батарей в доказательство тезиса о том, что «для определения состояния здоровья батарей должно учитываться внутреннее сопротивление батарей (а не импеданс и не проводимость)».

1. В 1959 году E.Willihnganz и Peter Rohner (1), оба из C&D Technologies (производитель батарей) занимались исследованиями внутренних параметров батарей и опубликовали статью под названием «Импеданс Батареи: Фарады, Милиомы, Микрогенри» (“Battery Impedance: Farads, Miliohms, Microhenrys.”) Основной идеей их исследований было не изучение измерения активного сопротивления как индикатора состояния здоровья батареи, а измерение абсолютных значений внутренних параметров батарей.

Измерения E.Willihnganz/Peter Rohner показали, что батарея имеет огромную емкость (приблизительно 1,5 фарада на каждые 100Ач емкости) и по мере роста емкости батареи в Ач (увеличение типоразмера) внутреннее сопротивление батареи уменьшается соответственно.

В связи с тем, что оборудование, использованное в тестах 1959 года имело ограниченные характеристики, авторы использовали способ пропускания сигнала, разного по частотам, через батареи. Результаты экспериментов отчетливо показали, что величина внутреннего активного сопротивления батареи зависит от значения частоты пропускаемого сигнала. Тот факт, что измеренное активное сопротивление зависит от частоты доказывает, что технологии измерения по переменному току не измеряют реальное сопротивление батареи.

2. В 1968 году инженер Нью-Йоркской телефонной компании Sheldon DeBardelaben (2) опубликовал статью под названием «Определяя окончание срока службы батарей» (“Determining the End of Battery Life”). В статье обсуждались результаты экспериментов, разработанных для того, что бы показать что измерения активного сопротивления батареи могут быть использованы в определении состояния здоровья батареи. Автор текущей статьи считает, что господин DeBardelaben может быть назван первооткрывателем этой концепции.

DeBardelaben разработал его собственный измеритель параметров батареи по переменному току, и измерил активное сопротивление на частотах 5 и 45Гц и сравнил результаты измерений с результатами испытаний реальных больших цепочек заливных батарей. Когда другие исследователи испытывали связь между активным сопротивлением и емкостью батареи в Ач на образцах малой емкости DeBardelaben использовал для тестов большие цепочки батарей и подтвердил что чем меньше частота измерения тем более точные результаты получаются. Он доказывал идею о том, что внутреннее сопротивление и есть предварительный индикатор емкости батареи. Он использовал аналогичную электрическую модель батареи (смотри



рисунк 2) для объяснения причин почему емкость значительно искажает величину внутреннего сопротивления батареи причем больше и больше с ростом частоты.

3. В 1994 году Misra, Noveske Holden и Mraz (3) все из C&D Technologies, опубликовали их открытия, полученные в результате экспериментов, разработанных для определения возможности использования измерительных приборов для измерения импеданса и проводимости по переменному току с целью определения надежности систем герметичных необслуживаемых батарей. Результаты из измерений, сделанных для огромного количества батарей, показали очень слабую связь между измерениями импеданса/проводимости и остаточной емкости батарей. Сделанные выводы дипломатически подчеркивали, что эти измерения импеданса/проводимости не могут быть использованы как надежный источник информации по определению состояния здоровья батарей, но могут быть использованы как индикаторы общих проблем.

Некоторые из проведенных тестов были сделаны для сравнения различных инструментов измерения между собой и для сравнения с методом измерения псевдо-сопротивления, известного как измерения при разряде батареи. По существу, сопротивление высчитывалось на основе данных, полученных при разряде ячейки, при котором измерялось изменение в напряжении при начале и при конце разряда, поделенное на ток разряда.

Несколько различных тестов были проведены для разной степени связи результатов между собой, но только один тест, сравнивший три различных прибора измерения параметров батарей по переменному току с прибором, измеряющим внутреннее сопротивление по постоянному, еще раз доказал, что чем ближе измерительный прибор к измерению чистого сопротивления по постоянному току, тем лучше результаты измерений. Далее в таблице приведены результаты измерения для батареи емкости 100 Ач.

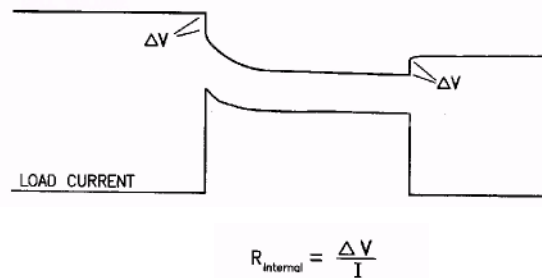
Принцип Измерения для прибора	Частота Измерения	Процент корреляции результата с емкостью батареи
По постоянному току	----	92%
Проводимость	20 Гц	59%
Импеданс	60 Гц	45%
Импеданс (Hewlett Packard)	1000 Гц	28%



**КАК ПРОВОДЯТСЯ ИЗМЕРЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ?**

В этой статье не будет представлена схема измерителя, но будет показано как получить реальные данные о сопротивлении батареи при использовании методики динамических измерений.

Когда батарея нагружена на короткий отрезок времени, напряжение на ее клеммах уменьшится в момент включения нагрузки и восстановится в момент отключения от нагрузки. На рисунке 3 показано напряжение на батарее в начальный момент в буферном режиме, а затем нагруженное на 3 секунды током приблизительно в 72 ампера.



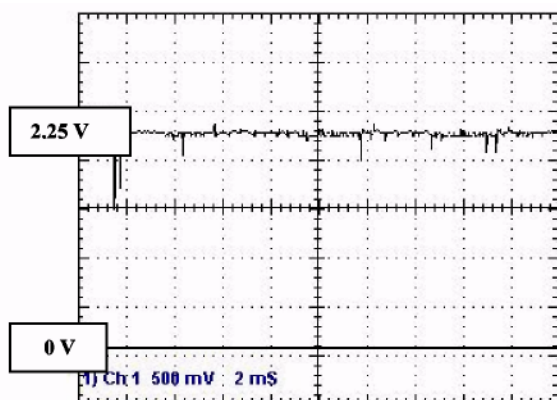
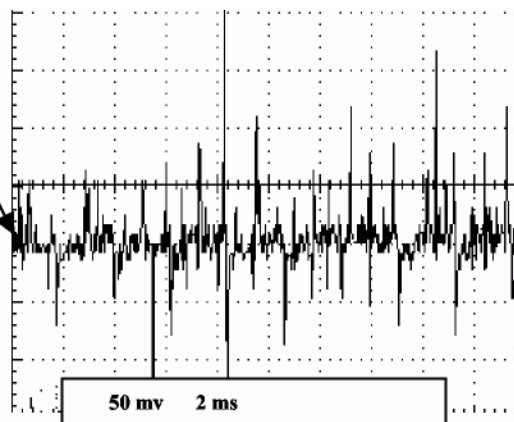
**Рисунок 3**

Мгновенное падение напряжения в начальный момент времени и в момент отключения нагрузки показывает падение напряжения на внутреннем сопротивлении. Сопротивление может быть рассчитано на основе измерения падения напряжения и тока нагрузки. Экспоненциальное падение напряжения на клеммах батареи с нулевого момента до момента отключения нагрузки есть результат разряда внутренней емкости батареи.

Откуда мы можем знать, что сопротивление при таких динамических измерениях правильное? Результаты этих динамических измерений были подтверждены расчетным путем при тестах на короткое замыкание батарей, проведенных совместно компанией C&D Technologies и Albercorp в присутствии технических специалистов с атомных станций, для которых вопрос состояния здоровья промышленных батарей бесконечно важен.

**ДРУГИЕ ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ АКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ БАТАРЕЙ****Шумы и пульсации**

Все стационарные батареи в буферном режиме подключены к зарядному устройству, которое параллельно критически важной нагрузке. Это означает, что измерительный прибор должен уметь работать в реальной обстановке. Эта реальная обстановка довольно сложна и насыщена шумами. На рисунке 4А показана осциллограмма реального напряжения выпрямителя

**Рисунок 4А****Рисунок 4В**

ИБП, а на рисунке 4В осциллограмма этого напряжения сделана с более высоким разрешением и показывает все присутствующие шумы.

Огромный объем шумов выходного напряжения выпрямителя взаимодействует с измерителем параметров батарей по переменному току, и нередко случаи, когда можно видеть пульсирующий ток, среднеквадратичного значения в 25 ампер, проходит через батареи ИБП мощностью на 300КВА. Величина пульсаций тока выпрямителя ИБП напрямую зависит от степени нагруженности ИБП. Измеритель параметров батарей по переменному току будет показывать различные результаты для одного и того же ИБП, но по разному нагруженного.

Результаты измерений по постоянному току, если правильно измерены, фактически игнорируют шумы и пульсации тока и будут одинаковы для различно нагруженных батарей и выпрямителей.

Так же необходимо подчеркнуть, что точность измерителей по постоянному току более высока нежели точность измерителей по переменному току – достаточно сравнить точность, приведенную в описаниях к продающимся на рынке цифровым измерителям напряжения.

### **Величина измеряемого тока**

Другой очень важный фактор измерений это величина тока измерения. В зашумленной обстановке при которой необходимо произвести измерения активного (омического) сопротивления, важно что бы был использован достаточно большой ток измерения. Это справедливо и для измерений по переменному и по постоянному току. Очень важно иметь наибольшее соотношение сигнал/шум. Огромное количество современных



## TRUST YOUR BATTERIES™

измерительных приборов используют величину тока измерения около одного ампера.

Один из способов проиллюстрировать важность высокого тока измерения это посмотреть на требуемую разрешающую способность измерителя. Из нашего предыдущего примера, хорошо известное внутреннее сопротивление батареи было 200 микроом, а вышедшая из строя батарея имеет сопротивление 250 микроом. Разница всего лишь в 50 микроомах. Для того, что бы измерить такую разницу прибором с током измерения в один ампер, такой прибор должен надежно измерить напряжение величиной в 50 микровольт в условиях зашумленности. Это практически невозможно – стоит лишь взглянуть на спецификацию вольтметра по переменному току в разделе точность.

Важно так же помнить, что (смотри таблицу 1) если сопротивление батареи изменилось на 50 микроом, то импеданс, измеренный по переменному току в 60 Гц, изменится лишь на 23 микроома – что делает эти измерения еще более нереальными. А прибор с частотой измерения в 200 Гц вообще не обнаружит изменений.

### **Разрешающая способность**

Большинство доступных на рынке измерителей по переменному току рекламируют разрешающую способность в 100 микроом. Если применить этот прибор в случае батареи с сопротивлением 200 микроом, по определению он будет показывать значения в 100, 200 или 300 микроом, что абсолютно не приемлемо! – это просто поведет пользователя в неправильном направлении.

## **ВЫВОДЫ**

Вся батарейная индустрия в целом, включая организацию IEEE и производителей батарей ошибочно игнорирует измерение активного сопротивления батарей как эффективного способа определения состояния здоровья батарей. Эта статья поможет пользователю понять, что изменение или увеличение сопротивления батареи отражает процесс старения батареи. Использование измерений параметров батареи по переменному току не обеспечит достаточных данных для поддержания степени надежности батарейной системы.

Точность измерений состояния здоровья батареи по переменному току растет по мере уменьшения емкости батареи в ампер-часах. Это происходит потому, что величина внутренней емкости батареи не настолько большая, что бы сильно искажать результаты измерений по переменному току. Также точность измерения состояния здоровья батареи по переменному току растет по мере уменьшения частоты измерения по аналогичной причине. Необходимо учитывать ограничения в использовании



## **TRUST YOUR BATTERIES™**

измерений параметров батареи по переменному току в зависимости от частоты измерений и емкости тестируемой батареи в Ач.

Независимые исследования и математические выкладки подтверждают насколько важен параметр внутреннего активного (омического) сопротивления батареи.

### **БИБЛИОГРАФИЯ**

- (1) E. Willihnganz and P. Rohner, "Battery Impedance: Farads, Miliohms, Microhenrys," AIEE, 1959/
- (2) S. DeBrdelaben, "Determining the End of Battery Life," Intelec 1986, Toronto, Canada.
- (3) Misra, Noveske, and Holden, C&D Charter Power System, The Use of AC impedance/Conductance and DC Resistance for Determining the Reliability of VRLA Battery Systems."
- (4) C&D Technologies Inc ([www.cdtechno.com](http://www.cdtechno.com)) (former Johnson Controls), "Impedance and Conductance Testing," Application note form 41-7271, August 1998.