

ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 53.084.872

DOI: 10.34680/2076-8052.2023.1(130).88-99

ГРНТИ 47.59.39

Специальность ВАК 2.2.2

Научная статья

ВЫБОР МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЁМКОСТИ КИСЛОТНЫХ АККУМУЛЯТОРОВ ВИЛОЧНЫХ ПОГРУЗЧИКОВ

Павлов Д. В.¹, Осетров А. А.², Чашин В. Л.³

¹АО НПП «Стрела» (Великий Новгород, Россия)

²ООО «НовАК» (Великий Новгород, Россия)

³Морской центр капитана Варухина Н. Г. (Великий Новгород, Россия)

Аннотация В данной работе кратко рассмотрены методы определения ёмкости кислотных аккумуляторных батарей вилочных погрузчиков. Из всех методов, рассмотренных в этой работе, предлагается выбор комбинированного метода определения ёмкости кислотных аккумуляторных батарей. Этот метод используется в комбинации с математической моделью, которая была разработана для аккумуляторной батареи вилочного погрузчика на базе экспериментальных данных, полученных на производстве. Специалист в области силовой электроники, владея этим методом, способен разработать автоматизированное зарядное устройство. Это зарядное устройство опционально сможет автоматически контролировать изменение ёмкости кислотных аккумуляторных батарей, регулировать ток и напряжение подзарядки и выдавать информацию об оставшемся сроке службы рабочей модели кислотной аккумуляторной батареи.

Приведёна математическая модель изменения ёмкости тяговой аккумуляторной батареи АКБ 80V 4PzSH 480 Ah. В модели приведены математические выражения зарядового тока и ёмкости данной батареи.

Ключевые слова: ёмкость, аккумуляторная батарея, заряд, модель

Для цитирования: Павлов Д. В., Осетров А. А., Чашин В. Л. Выбор метода определения ёмкости кислотных аккумуляторов вилочных погрузчиков // Вестник НовГУ. 2023. 1(130). 88-99. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.1(130).88-99

Research Article

THE CHOICE OF METHOD FOR DETERMINING THE CAPACITY OF FORKLIFT ACID BATTERIES

Pavlov D. V.¹, Osetrov A. A.², Chashchin V. L.³

¹Public Joint Stock Company "Scientific and Production Association 'Strela'" (Veliky Novgorod, Russia)

²Limited Liability Company "Novgorod Accumulator Company" (NovAK) (Veliky Novgorod, Russia)

³The marine center of captain Varukhin N. G. (Veliky Novgorod, Russia)

Abstract This article briefly discusses methods for determining the capacity of acid batteries of forklifts. Of all the methods considered in this work, the choice of a combined method for determining the capacity of acid batteries is proposed. This method is used in combination with a mathematical model that was developed for a forklift battery based on experimental data obtained in production. A specialist in the field of power electronics, having this method, is able to develop an automated charger. This charger will optionally be able to automatically monitor changes in the capacity of acid batteries, adjust the charging current and voltage and provide information about the remaining service life of the working model of the acid battery.

A mathematical model of the change in the capacity of the traction battery of the 80V 4PzSH 480 Ah battery is given. The mathematical expressions of the charging current and the capacity of this battery are presented in the model.

Keywords: capacity, battery, charge, model

For citation: Pavlov D. V., Osetrov A. A., Chashchin V. L. The choice of method for determining the capacity of forklift acid batteries // Vestnik NovSU. 2023. 1(130). 88-99. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.1(130).88-99

Введение

Сегодня вопрос производства аккумуляторов различного типа очень актуален. Так же и актуален вопрос отслеживания состояния аккумуляторов, например, в цехах их производства, на автомобильном транспорте, вилочных погрузчиках на промышленных предприятиях.

Известно, что текущее состояние АКБ можно определить по двум параметрам: SOC (состояние заряда) и SOH (уровень). С помощью двух этих параметров можно рассчитать ожидаемое время работы батареи. Оба параметра зависят друг от друга и влияют на производительность аккумулятора.

Во время работы аккумулятора его производительность может снижаться из-за необратимых физических и химических изменений, которые происходят внутри его во время использования аккумулятора. Со временем эти внутренние необратимые изменения приведут к тому, что больше не получится использовать аккумулятор [1].

Главный параметр, который показывает состояние аккумуляторной батареи (АКБ) – это ёмкость. По текущей, начальной ёмкости и её изменению можно определить однозначно состояние АКБ.

Сегодня задача более точного измерения ёмкости стала ещё более актуальной при внедрении в производство микроэлектронной базы и нанотехнологий. Например, в электромобилях информация о состоянии заряда и ёмкости АКБ нужна в текущий момент времени. Система будет выдавать этот параметр с определённой частотой. Более точное определение ёмкости и уровня заряда даст информацию пользователю о фактическом состоянии АКБ. Таким образом, сегодня остро стала проблема поиска эффективного метода измерения ёмкости и уровня заряда АКБ.

В данной работе рассмотрены основные проблемы определения ёмкости АКБ различных типов аккумуляторов. Рассмотрен эффективный метод измерения ёмкости на примере АКБ кислотного типа для вилочных погрузчиков.

Основные факторы, влияющие на ёмкость кислотного АКБ

1) Изменение ёмкости АКБ при зарядке и разрядке

Ёмкость любого аккумулятора изменяется при зарядке и разрядке. Заряд батарей должен осуществляться в режиме, при котором ток сильно понижается к концу заряда. Используется несколько стратегий заряда кислотной АКБ, которые требуют оборудования различной сложности и стоимости. Наиболее простое и дешёвое оборудование осуществляет заряд при постоянном напряжении 2,4–2,45 В/ак (это потенциостатический режим). Заряд считается законченным если ток заряда остается неизменным в течении 3-х часов. Но чаще применяют

комбинированный режим, при котором начальный ток ограничивают, а по достижении заданного напряжения, заряд проводится при стабилизации напряжения.

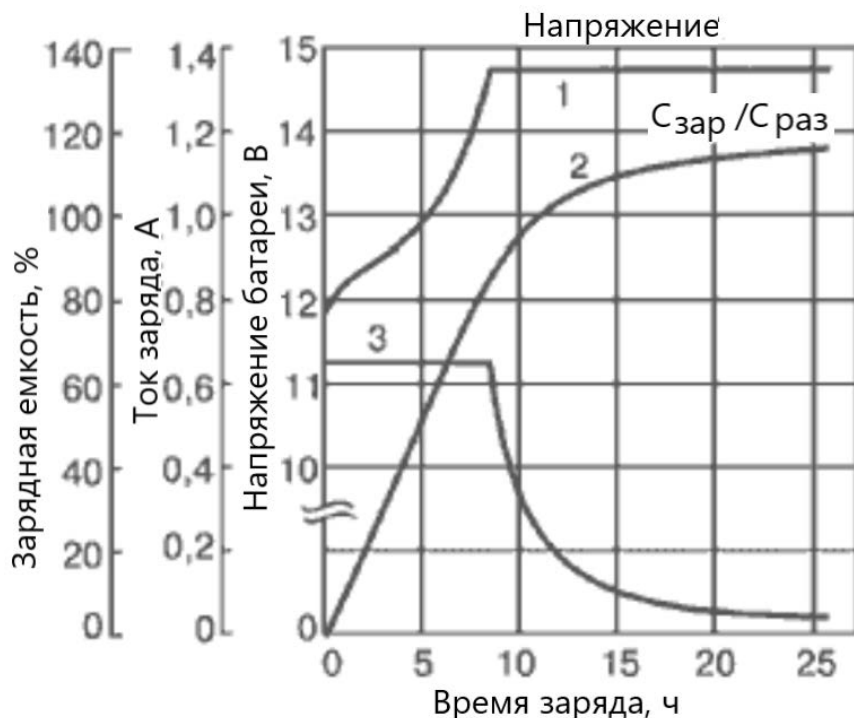


Рисунок 1. Зарядные кривые герметизированной свинцово-кислотной аккумуляторной батареи при комбинированном режиме заряда нормированным током $0,1C$ и нормированным напряжением $2,45В/эл$ для циклического режима: 1 – напряжение, 2 – зарядная ёмкость, 3 – ток заряда

Ускорение процесса заряда достигается при повышении тока на первой стадии заряда, но в соответствии с советами производителей не более чем до $0,3C$. В конце заряда для большей безопасности, может быть применена ещё одна ступень заряда: при снижении напряжения источника питания до напряжения подзаряда аккумулятора $2,30–2,35 В$.

2) Зависимость ёмкости АКБ от наружной температуры

При уменьшении температуры эксплуатации доступная ёмкость свинцово-кислотного аккумулятора падает примерно на 1% от номинальной на $1^{\circ}C$ [2]. Это обусловлено тем, что при отрицательной температуре вещество электролита становится более вязким, ограничивая диффузионные явления и приводя к уменьшению полезной ёмкости, особенно при высоких скоростях разряда. Кроме того, сопротивление электролита увеличивается, что дополнительно приводит к потере ёмкости. При $0^{\circ}C$ доступная ёмкость составляет 60% от номинальной и быстро падает при дальнейшем уменьшении температуры. При увеличении температуры ёмкость растет, т. к. высокая температура ускоряет кинетику протекающих химических реакций. При этом, увеличивается не только ёмкость, но и скорость саморазряда.

Экспериментальные зависимости ёмкости от температуры представлены на рисунке 2. Красная кривая – зависимость для СКБ, синяя – для щелочной батареи [3].

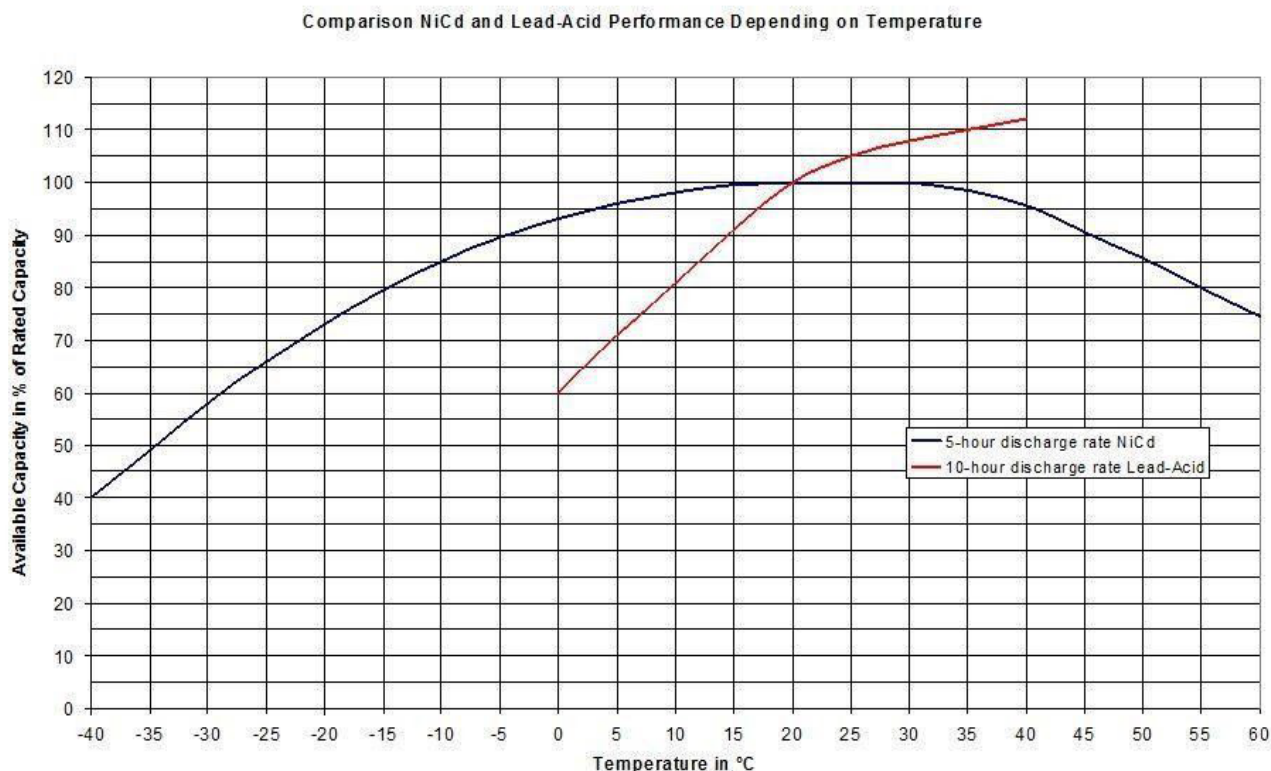


Рисунок 2. Зависимость доступной ёмкости от температуры для свинцово-кислотных (красная линия) и никель-кадмиевых аккумуляторов (синяя линия)

3) Зависимость ёмкости АКБ от циклов заряда-перезаряда.

На рисунке 3 показана зависимость ёмкости АКБ от циклов заряда-перезаряда на примере Li-ion батареи.

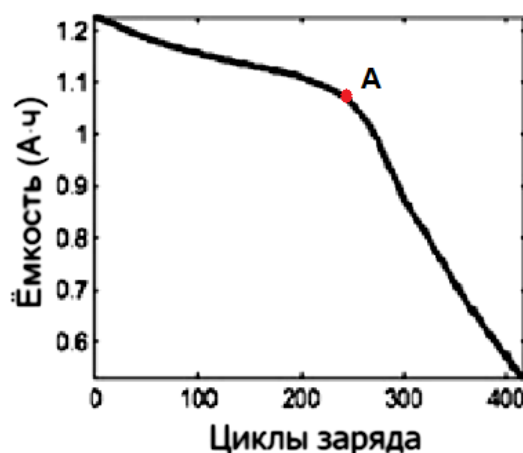


Рисунок 3. Зависимость ёмкости Li-ion батареи от циклов заряда-перезаряда

На данном рисунке точка А – точка начала деградации ёмкости. Точное положение точки может варьироваться в зависимости от вида батареи и

параметров, в которых работает аккумулятор. Например, у кислотных аккумуляторов вилочных погрузчиков эта точка деградации находится в области 780-960 циклов заряда-перезаряда.

Методы, определяющие состояние заряда и ёмкости АКБ

Самые первые попытки исследования состояния батарей были проведены Виллингансом в 1941 г. Его метод был основан на измерении внутреннего сопротивления [4, 5].

Ранее, различные фирмы применяли различные методы измерения заряда и ёмкости АКБ (таблица 1).

Таблица 1. История методов измерения параметров аккумуляторов

Год исследования	Исследователь / компания	Метод
1963	Кёртис	Измерение напряжения
1970	Лернер	Сравнение между двумя аккумуляторами (техника SOC)
1974	Йорк	Сравнение заряда с несколькими аккумуляторами
1974	Брандвейн	Метод измерения напряжения, температуры и тока
1975	Кристиансон	Метод измерения напряжения разомкнутой цепи (OCV)
1975	Дауджиалло	Измерение внутреннего сопротивления
1975	Фингер	Кулоновский расчет
1978	Эбби	OCV и напряжение под нагрузкой
1980	Кикиока	Регистрация данных
1981	Фингер	Измерение устоявшегося напряжения аккумулятора (релаксация)
1984	Пелед	Наглядные таблицы данных OCV и температурных измерений
1985	Мураматсу	Спектроскопия внутреннего сопротивления
1986	Копманн	Наглядные таблицы данных напряжения, тока и температурных измерений
1988	Сейфанг	Регистрация данных и адаптивные системы
1992	Айлор	OCV, OCV-предположения и кулоновские измерения
1997	Джерард	Измерение тока и напряжения, использование искусственных нейронных сетей
1999	Салкинд	Кулоновский расчет, спектроскопия внутреннего сопротивления, нечёткая логика
2000	Гарш	Измерение напряжения и тока, использование фильтров Калмана
2000	Бергвельд	Регистрация данных, перезаряд, ЭДС, самообучающийся алгоритм определения максимальной ёмкости

Следует обратить внимание, в 1997–2000 гг. проводились исследования с использованием нейросетей или эффективных рекурсивных фильтров.

Таким образом, на складах с применением вилочных погрузчиков или в цеху с производством кислотных АКБ следует применять зарядное устройство с опцией автоматического измерения ёмкости аккумуляторов с целью определения текущего состояния и прогноза срока службы АКБ. Возможен вариант отдельного программно-аппаратного модуля, который автоматически измеряет ёмкость АКБ и контролирует

её параметры состояния на текущий момент времени. Такая реализация программно-аппаратного модуля требует более сложных алгоритмов вычисления ёмкости и текущего заряда, а также предсказывающие алгоритмы, которые вычисляют срок службы и ресурс АКБ.

Основные проблемы определения ёмкости и заряда АКБ

На сегодняшний день отсутствует эффективный способ определения текущей ёмкости кислотного АКБ и текущего заряда. Например, для кислотных негерметичных АКБ существует косвенный метод определения заряженности по плотности электролита. Этот метод даёт большую погрешность и имеет недостатки. Один из недостатков связан с изменением плотности электролита при изменении температуры. Зависимость выходит нелинейная и не всегда однозначная [6].

В компьютерах и мобильных телефонах, также как и во многих зарядных устройствах, судят о степени разряженности или заряженности батареи по напряжению на его клеммах. Но это также косвенный способ, а связь ёмкости и напряжения имеет нелинейную зависимость, что даёт неопределённые результаты измерения, и однозначно определить значение ёмкости таким образом невозможно, так как у разряженной батареи, в зависимости от нагрузки, напряжение на его клеммах будет меняться.

Существуют различные индикаторы ёмкости. Например, индикаторы «Бастион» и «SKAT-T» имеют погрешности до 25%. Измеряемая ёмкость ограничена у них до 120 А·ч. АКБ вилочных погрузчиков обладают ёмкостями свыше 350 А·ч.

Многие предприятия-изготовители кислотных АКБ для определения ёмкости применяют метод разряда-заряда. Этот способ не эффективен. Для определения ёмкости кислотных АКБ таким способом уходит от недели и больше. К тому же, такая проверка показывает, какая ёмкость была в начальном состоянии.

Существуют новые методы определения ёмкости АКБ, защищенные патентами РФ № 2172044 (БИ № 24 2001 г.) «Способ измерения ёмкости химических источников тока» и №2214025, №2248073 «Устройство для измерения ёмкости химических источников тока», а также патентом № 70359 (БИ № 10, 2004 г.). Способ заключается в сравнении ёмкости измеряемого химического источника тока с известной ёмкостью образцового (эталонного) конденсатора. В этом способе путём измерения напряжения на измеряемом химическом источнике тока и разряде его на конденсаторную нагрузку измеряют время заряда конденсатора известной ёмкости и рассчитывают электрическую ёмкость измеряемого химического источника тока по формуле:

$$Q_{эл} = \frac{C \cdot U}{2 \cdot k \cdot t_{зар}}, \quad (1)$$

где $Q_{эл}$ – электрическая ёмкость, измеряема C – ёмкость эталонного конденсатора; U – напряжение на измеряемом химическом источнике тока; $t_{зар}$ – время заряда

конденсатора от химического источника тока; k – коэффициент, учитывающий конструктивные и технологические его особенности.

Другим методом является определение внутреннего сопротивления АКБ. Можно сказать, что величина снижения напряжения на элементах АКБ при протекании тока определяется внутренним сопротивлением элементов. Известно, что ёмкость АКБ связана с её внутренним сопротивлением и, получив опытным путём значение внутреннего сопротивления, можно оценить и ёмкость АКБ. Так, если внутреннее сопротивление АКБ увеличилось в 2 раза, то можно утверждать, что ёмкость АКБ уменьшилась в 2 раза.

При обследовании АКБ кроме внутреннего сопротивления её элементов измеряются сопротивления и межэлементных соединений. Это позволяет своевременно выявлять характерные дефекты, обусловленные коррозией токовых выводов аккумуляторов.

Можно измерять внутреннее сопротивление на базе толчкового тока и переменным током. Толчковый ток достигается в несколько сотен ампер. Измерение сопротивления АКБ на переменном токе проще измерения сопротивления, базирующегося на создании толчкового тока. Тем более, протекание по АКБ переменного тока в течение 1,5 часов, необходимых для замера напряжения на всех её элементах, менее вредно, чем многократное протекание толчкового тока в сотни ампер. Однако измерение внутреннего сопротивления АКБ на переменном токе имеет существенный недостаток. Измеренное сопротивление содержит не только активную составляющую, но и реактивную (рисунок 4):

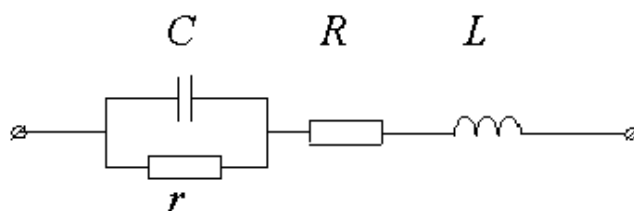


Рисунок 4. Эквивалентная схема замещения с определением внутреннего сопротивления АКБ

Следовательно, сопротивление, полученное одночастотным методом измерения на переменном токе, не будет равно интересующему нас активному сопротивлению АКБ, определенному на постоянном токе. И в случае, если мы имеем частотную зависимость, то переход к сопротивлению на постоянном токе весьма затруднителен в силу специфики электрохимических процессов. Поэтому, такие измерения могут применяться лишь для оценки тенденций изменения технического состояния аккумуляторов и обладают также существенной погрешностью [7].

Ценность результатов измерения на переменном токе снижается за счёт использования тока малой амплитуды, что не даст достаточной информации о нелинейном участке вольт-амперной характеристики АКБ.

Комбинированный метод с применением математической модели

В данной работе предложен метод измерения ёмкости по известному напряжению и силе тока в данный момент времени. Измерение силы тока и напряжения можно проводить с помощью высокоточного амперметра и вольтметра.

Электрическая схема замещения предложенного метода показана на рисунке 5:

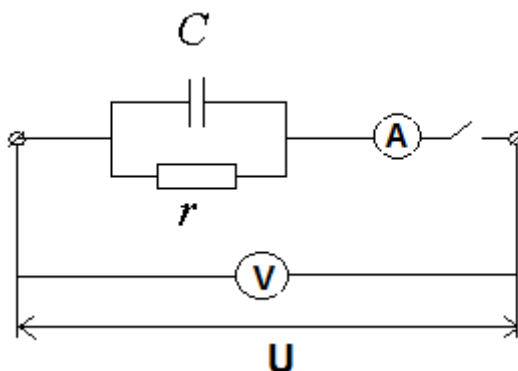


Рисунок 5. Электрическая эквивалентная схема замещения метода

Используется тягового АКБ 80V 4PzSH 480 Ah.

Используется эталонный конденсатор с электрической ёмкостью C , которая при постоянной температуре не меняется. Будем считать, что ёмкость этого эталонного конденсатора не будет меняться и во время зарядки-разрядки его. Для исследования АКБ 80V 4PzSH 480 Ah рекомендуется взять эталонный конденсатор с ёмкостью не менее 50 мФ и напряжением не менее 100 В. r – внутреннее сопротивление электролита.

Подключают клеммы известной АКБ к конденсатору и заряжают его. При зарядке конденсатора меняется ток и напряжение на конденсаторе. Энергия АКБ вычисляется по формуле:

$$W = Q \cdot U, \quad (2)$$

где Q – ёмкость кислотного АКБ, А·ч;

U – напряжение на клеммах АКБ, В.

При зарядке конденсатора напряжение и ток в эквивалентной схеме замещения являются функциями времени: $U = U(t)$ и $I = I(t)$.

Делаются замеры напряжения на конденсаторе в начальный момент времени, когда ключ замкнули: $U(0) = U_0$. $I(0) = I_{max}$.

Считаем, что при одном цикле заряда конденсатора внутреннее сопротивление электролита не изменилось. При многократных циклах заряда конденсатора внутреннее сопротивление может заметно измениться из-за нагрева электролита при прохождении через него тока заряда.

Когда заряжается конденсатор до величины U_k , энергия АКБ уменьшается на величину dW . U_k – значение напряжения на конденсаторе в конце цикла заряда. Тогда, по закону сохранения энергии в процессе заряда конденсатора:

$$-dW = \frac{C \cdot U^2}{2} + I^2 \cdot r \cdot t, \quad (3)$$

$0 \leq t \leq t_3$, t_3 – время цикла заряда конденсатора.

Время заряда можно измерить с помощью электронного осциллографа или электронного таймера.

Уравнение (3) запишем в неявном виде:

$$\frac{C \cdot U^2}{2} + I^2 \cdot r \cdot t + dW = 0 \quad (4)$$

Продифференцируем выражение (4) по времени:

$$C \cdot U \cdot \frac{dU}{dt} + I^2 \cdot r + 2 \cdot t \cdot r \cdot I \cdot \frac{dI}{dt} + Q \cdot \frac{dU}{dt} + U \cdot \frac{dQ}{dt} = 0 \quad (5)$$

Известно соотношение между зарядом конденсатора и электроёмкостью:

$$q = C \cdot U \quad (6)$$

Дифференцируя это выражение, получаем, что $\frac{dq}{dt} = C \cdot \frac{dU}{dt}$; $\frac{dq}{dt} = I$.

Отсюда, $\frac{dU}{dt} = \frac{I}{C}$.

Тогда получаем дифференциальное уравнение (7):

$$U \cdot I + I^2 \cdot r + 2 \cdot t \cdot r \cdot I \cdot \frac{dI}{dt} + Q \cdot \frac{I}{C} + U \cdot \frac{dQ}{dt} = 0 \quad (7)$$

Уравнение (7) представляет собой математическую модель физического процесса зарядки конденсатора с помощью кислотного АКБ с внутренним сопротивлением r . С помощью математического выражения (7) можно получить аналитическое выражение функции ёмкости АКБ от времени при каждом цикле заряда конденсатора, используя численные метод приближений Пикара. Имея выражение $Q = Q(I_n, U_n, t_n)$, можно предсказать изменения ёмкости АКБ и предсказать поведение ёмкости при зарядовых токах и напряжений. I_n – максимальный ток заряда конденсатора при n -м цикле, U_n – напряжение АКБ после каждого n -го цикла заряда конденсатора, t_n – время заряда каждого n -го цикла. Если сделать большое число циклов заряда конденсатора, то можно АКБ разрядить до глубокого разряда. Тогда можно получить множество точек I_n и U_n и получить одну кривую, которая будет «склеена» из множества кусочных функций $Q = Q(I_n)$ и $Q = Q(U_n)$; в этом случае время разряда АКБ: $T = n \cdot t_3$.

Также, используя выражение (4) можно получить экстремумы функционала с помощью вариационного исчисления.

Для вычисления Q в конце каждого n -го цикла заряда конденсатора в уравнении (5) можно ввести приближения: $\frac{dQ}{dt} \approx \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{Q_{n+1} - Q_n}{t_3}$; Q_n – ёмкость АКБ в начальный момент времени цикла зарядки конденсатора. $Q_0 = 480 \text{ А} \cdot \text{ч}$ – для тягового АКБ 80V 4PzSH 480 Ah.

C – номинальное значение ёмкости конденсатора; $\frac{dU}{dt} \approx \frac{\Delta U}{\Delta t} = \frac{U_{n+1}-U_n}{t_3}$; U_n – напряжение в начальный момент времени цикла зарядки конденсатора; $t = t_3$; r – сопротивление электролита АКБ. Сопротивление электролита можно измерить известными методами или найти значение для изучаемой модели АКБ. $I = I_{max}$ – максимальный ток зарядки конденсатора в начале цикла заряда; $U = U_n$ – напряжение заряда в начале цикла зарядки конденсатора.

Вспомогательная математическая модель

В данной работе была получена вспомогательная упрощённая математическая модель изменения зарядовых токов и ёмкости тягового АКБ 80V 4PzSH 480 Ah.

Входные данные вспомогательной модели:

- зарядовое постоянное напряжение 96 В;
- АКБ в начальный момент времени был разряжен до уровня 40% от C ;
- температура окружающей среды 25°C.

Допущения в модели:

- предполагалось, что температура окружающей среды не менялась;
- при зарядке функция изменения температуры электролита от времени считалась квазилинейной;
- применяется электролит с плотностью 1,3.

На рисунке 1 показаны графики зависимости зарядного тока и ёмкости от времени.

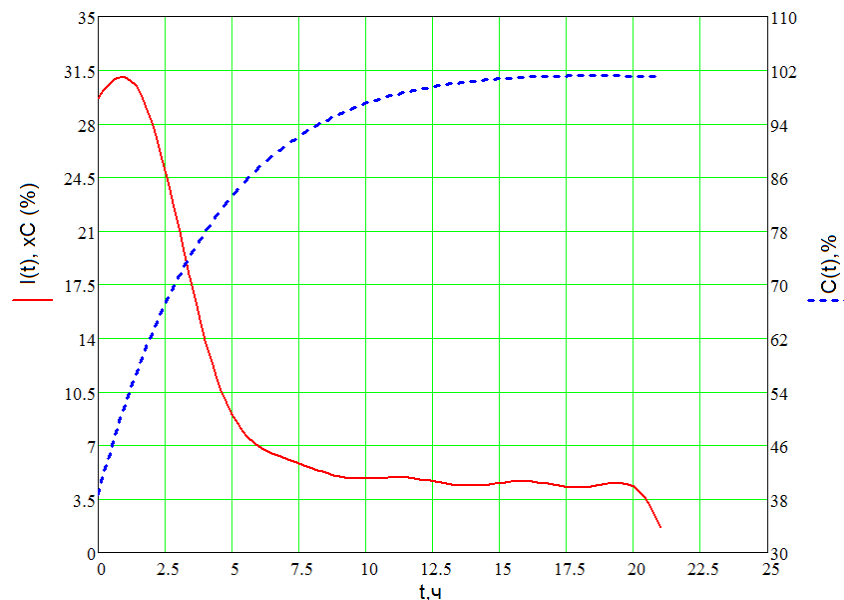


Рисунок 6. Изменение зарядного тока и ёмкости от времени

Наилучшая аппроксимация силы тока при начальной температуре электролита +25°C получена гармоническим полиномом 5-го порядка:

$$I(t) = 36,86 \cdot \sin(0,05723 \cdot t + 2,251) + 10,51 \cdot \sin(0,2522 \cdot t + 2,929) + 2,697 \cdot \sin(0,7821 \cdot t - 0,634) + 9,644 \cdot \sin(1,058 \cdot t - 0,92) + 8,176 \cdot \sin(1,097 \cdot t + 1,741) \quad (8)$$

Изменение ёмкости со временем при зарядке аппроксимируется экспоненциальным законом:

$$C(t) = 107 \cdot e^{-0,002438 \cdot t} - 68,3 \cdot e^{-0,2219 \cdot t} \quad (9)$$

Данная математическая модель позволяет предварительно предсказывать изменение тока заряда и характер изменения ёмкости в зависимости от глубины разряда АКБ.

Заключение

Используемый комбинированный метод измерения тока и напряжения со вспомогательной математической моделью позволяет вычислить ёмкость АКБ в определённый момент времени. С помощью этого метода можно получить аналитическое выражение $Q = Q(I_n, U_n, t_n)$, позволяющее определить изменение ёмкости кислотного АКБ вилочных погрузчиков при изменении тока разряда и напряжения разряда.

Список литературы

1. Lerner S., Lennon H., Seiger H. N. Development of an alkaline battery state of charge indicator // Journal of Power Sources. 1970. 3. 135-137.
2. Стационарные свинцово-кислотные аккумуляторные батареи: руководство по эксплуатации. Ч. 1: Основные понятия, конструкция, режимы работы и области применения. Москва, 2006.
3. Никель-кадмиевые и свинцово-кислотные аккумуляторы. Сравнение технологий // EnerSys, 2017.
4. Eby R. L. Method and apparatus for determining the capacity of lead acid storage batteries. US Patent 4,180,770 filed 1 March. 1978.
5. Rodrigues S., Munichandraiah N., Shukla A. K. A review of state-of-charge indication of batteries by means of A.C. impedance measurements // Journal of Power Sources. 2000. 87(1-2). 12-20. DOI:10.1016/S0378-7753(99)00351-1
6. Методика расчета и выбора аккумуляторных батарей серий Classic GroE и Classic OCSM для применения в энергетике. Москва, 2005. 28 с. URL: <https://docs.google.com/viewer?url=https://www.proektant.org/index.php?action=dlat&topic=17993.0&attach=16938> (Дата обращения: 24.06.2022).
7. Bergveld H. J., Kruijt W. S., Notten P. H. L. Electronic-network modelling of rechargeable NiCd cells and its application to the design of battery management system // Journal of Power Sources. 1999. 77(2). 143-158. DOI: 10.1016/S0378-7753(98)00188-8

References

1. Lerner S., Lennon H., Seiger H. N. Development of an alkaline battery state of charge indicator // Journal of Power Sources. 1970. 3. 135-137.
2. Statsionarnyye svintsovo-kislotnyye akkumulyatornyye batarei: rukovodstvo po ekspluatatsii. Chast' 1: Osnovnyye ponyatiya, konstruktsiya, rezhimy raboty i oblasti primeneniya [Stationary lead-acid batteries. Operating Manual. Part 1: Basic concepts, design, operating modes, and applications]. Moscow, 2006.
3. Nikel'-kadmievyye i svintsovo-kislotnyye akkumulyatory. Sravneniye tekhnologiy [Nickel-cadmium and lead-acid accumulators. Technology comparison] // EnerSys, 2017.

4. Eby R. L. Method and apparatus for determining the capacity of lead acid storage batteries. US patent, 4,180,770. 1978.

5. Rodrigues S., Munichandraiah N., Shukla A. K. A review of state-of-charge indication of batteries by means of A.C. impedance measurements // Journal of Power Sources. 2000. 87(1–2) 12–20. DOI: 10.1016/S0378-7753(99)00351-1

6. Metodika rascheta i vybora akkumulyatornykh batarey seriy Classic GroE i Classic OCSM dlya primeneniya v energetike [Methodology for calculating and selection of batteries of the Classic GroE and Classic series OCSM for energy applications]. Moscow, 2005. 28 p. Available at: <https://docs.google.com/viewer?url=https://www.proektant.org/index.php?action=dlattach;topic=17993.0;attach=16938> (Accessed: 24.06.2022).

7. Bergveld H. J., Kruijt W. S., Notten P. H. L. Electronic-network modelling of rechargeable NiCd cells and its application to the design of battery management system // Journal of Power Sources. 1999. 77(2). 143-158. DOI: 10.1016/S0378-7753(98)00188-8

Информация об авторе

Павлов Денис Викторович – соискатель, ведущий инженер-математик, АО НПП «Стрела» (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0009-0003-0461-6945, energidriver@mail.ru

Осетров Алексей Анатольевич – инженер по наладке и испытаниям оборудования, ООО "НовАК" (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0009-0004-9055-8557, alex99979@mail.ru

Чащин Владимир Леонидович – педагог дополнительного образования, Морской центр капитана Варухина Н. Г. (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0009-0002-8809-3776, 6123@mail.ru