

УДК 541.136

**БАТАРЕЙНАЯ ФОРМИРОВКА СВИНЦОВО-КИСЛОТНЫХ АККУМУЛЯТОРОВ
ИМПУЛЬСНЫМ АСИММЕТРИЧНЫМ ТОКОМ****И. А. Казаринов¹, В. Г. Дувинг¹, М. М. Бурашникова¹, В. А. Решетов¹,
А. А. Борщенко¹, М. А. Шишова²**¹*Саратовский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия*²*ОАО «Электроисточник», Саратов, Россия*

E-mail: KazarinovIA@mail.ru

Поступила в редакцию 12.12.11 г.

В работе исследуется эффективность батарейной формировки свинцово-кислотных аккумуляторов импульсным асимметричным током с помощью специально разработанного источника мощных импульсов, получаемых через преобразователь от сети переменного тока с частотой 50 Гц. Показано, что режим формировки импульсным асимметричным током позволяет понизить газовыделение и разогрев электролита. По зависимости плотности электролита от времени формирования на первом цикле сделан вывод о более эффективной формировке батарей, заряжаемых импульсным асимметричным током с частотами 25 и 50 Гц. Установленная линейная зависимость плотности электролита отформированной свинцово-кислотной батареи от степени её разряженности позволяет использовать значение плотности электролита в качестве объективной оценки степени заряженности батареи.

Ключевые слова: свинцово-кислотные батареи, формировка, заряд импульсным асимметричным током.

The paper treats effective formation of lead-acid batteries with pulse asymmetric current with the aid of a specially designed source of powerful pulses getting through a transformer from a 50 Hz alternating supply line. Our mode of formation with pulse asymmetric current provides a reduced gas release and low electrolyte heating. On the basis of the dependence of the electrolyte density on the first-cycle formation duration, a conclusion has been made of more effective formation of batteries being charged with pulse asymmetric current with frequencies of 25 and 50 Hz. The found linear dependence of the electrolyte density of a formed lead-acid battery on its discharging degree enables electrolyte density to be used as an objective estimation of the battery charging degree.

Key words: lead-acid batteries, formation, pulse asymmetric current charging.

ВВЕДЕНИЕ

Процесс формировки свинцово-кислотных аккумуляторных батарей, т. е. их первый заряд, является одной из наиболее важных технологических операций в производстве этой продукции. Неэффективность существующих постояннотоковых технологий формировки определяется следующими факторами. Во-первых, они слишком продолжительные (42–48 ч) и сопровождаются значительным газовыделением, во-вторых, при переходе к ускоренной технологии (26 ч) происходит существенный разогрев батарей, что заставляет производителей нести дополнительные затраты, связанные с разработкой системы охлаждения, и, в-третьих, эти технологии формировки являются энергозатратными (на батарею ёмкостью в 55 А·ч затрачивается около 300 А·ч электричества). Всё это заставляет исследователей вести разработку новых технологий формировки.

Постоянный ток имеет ограниченные возможности для ускорения процесса формировки. Это связано с самой природой процессов, протекающих на электродах, применяемых в аккумуляторах. В пористых электродах всегда имеется градиент тока и потенциала по глубине электрода при заряде и разряде. Увеличение тока при ускоренном заряде приводит к более неравномерному распределению

заряда по глубине электрода, благодаря чему поверхность быстро заряжается до величины потенциала газовыделения, образующиеся пузырьки газа частично или полностью закрывают устья пор, что создаёт дополнительное сопротивление протеканию тока по электролиту в глубину электрода. Одновременно с этим зарядная реакция концентрируется на поверхности электрода, а скорость заряда электрода в большей степени ограничивается диффузионным током. В таких случаях интенсификация зарядного процесса в некоторой степени возможна за счёт изменения конструкции аккумулятора, в частности уменьшения толщины электродов.

Повысить эффективность формировочного процесса позволяют различные переменноточковые методы заряда, в частности заряд импульсным асимметричным током. Режимы заряда асимметричным током предоставляют большие возможности для управления процессом заряда. Параметрами, которые могут использоваться для управления процессом заряда, являются: амплитуда зарядного импульса, амплитуда разрядного импульса, частота следования зарядного импульса, скважность, длительность пауз при переходе от разрядного к зарядному импульсу и от зарядного к разрядному. Эти параметры могут корректироваться в процессе

заряда в зависимости от изменения состояния аккумуляторов. Специфику электрохимических реакций в первую очередь определяет форма тока заряда, которая влияет на разделение тока между электрохимическими реакциями преобразования активной массы и реакциями газовой выделенной. Известны также режимы асимметричного тока с коротким по длительности и большим по амплитуде зарядным импульсом, уменьшающие время заряда.

За последние несколько десятилетий разработано большое количество разнообразных способов и устройств, предназначенных для ускоренного заряда и формировки аккумуляторов асимметричным током [1–5].

В настоящей работе исследуется эффективность батарейной формировки свинцово-кислотных аккумуляторов импульсным асимметричным током с помощью специально разработанного источника мощных импульсов, получаемых через преобразователь от сети переменного тока по патенту РФ [6].

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Объекты исследования

Исследование режимов формировки проводилось на свинцово-кислотных батареях 6СТ-55L с номинальной ёмкостью 55 А·ч, состоящих из 9 положительных и 10 отрицательных электродов, изготовленных в ОАО «Электроисточник». Производственные электроды находились в специальных сепарационных конвертах. Перед формировкой свинцово-кислотные аккумуляторы заливались электролитом из серной кислоты плотностью 1.24 г/см³. После выдержки электродов в электролите в течение 1 ч включалась поляризация (импульсная или постоянноточковая).

Формировка на постоянном токе

Программа ускоренной батарейной формировки содержала четыре ступени. Общая длительность формирования (включая 1 ч пропитки) рассчитана

на 27 ч. Максимальный ток формирования составлял 12 А. Используемый постоянноточковый режим формирования представлен в таблице.

Во время формировки батареи находились в ванне с холодной водой (18–25 °С). На втором этапе формировки, когда зарядный ток был равен 12 А, в ванну с водой подкладывали лёд. В итоге температура электролита в батарее во время заряда не превышала 34–37 °С.

Каждые 60 мин измерялась плотность электролита, затем эти данные записывались, обрабатывались и строились графики зависимости плотности электролита от времени и напряжения на клеммах СКА от времени. Как правило, формировка заканчивалась при достижении плотности электролита 1.28–1.29 г/см³. После завершения формировки свинцово-кислотный аккумулятор разряжался током 3.6 А.

Формирование импульсным (асимметричным) током

Принцип этого способа заряда основан на чередовании импульсов зарядного тока большой амплитуды, но малой длительности, с импульсами разрядного тока [6]. Частота следования импульсов зарядного тока по данному способу выбирается кратной частоте переменного тока электросети России величиной в 50 Гц. Как показали исследования, для практики наиболее подходят два значения частоты следования зарядных импульсов — 50 и 25 Гц. Кроме этого их кратность с частотой электросети позволяет создавать сравнительно несложные устройства для получения управляющих импульсов, синхронных с частотой электросети и получать для батареи зарядные токи любой величины, которые ограничиваются только возможностью ключевого элемента — тиристора. Блок-схема импульсного зарядного устройства приведена на рис. 1.

Зарядное устройство содержит сетевой трансформатор и блок формирования импульсов зарядного напряжения, синхронных с частотой сети переменного тока. Как правило, выход блока формирования подводится к управляющему электроду мощного диода (тиристора), который открывается

Программа постоянно токового режима формировки свинцово-кислотной батареи

№ ступени заряда	Время заряда ступени, ч	Ток заряда, А	Израсходованная электроэнергия ступени, А·ч	Суммарный расход электроэнергии в конце ступени, А·ч	Время от начала заряда, ч
1	5	5.5	27.5	27.5	5
2	10	12	120	147.5	15
3	5	10.5	52.5	200	20
4	6	5.5	33	233	26

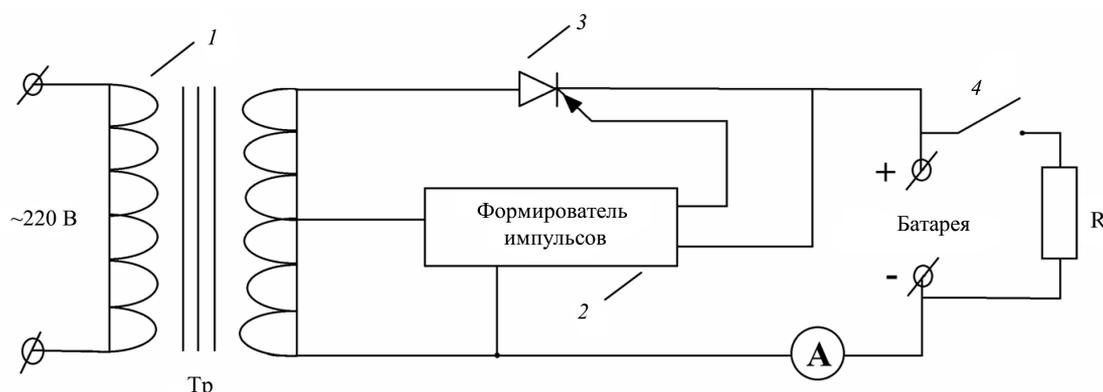


Рис. 1. Блок-схема импульсного зарядного устройства: 1 — сетевой трансформатор, 2 — блок формирования импульсов, 3 — тиристор, 4 — переключатель токоустановочного сопротивления, А — амперметр, R — токоустановочное сопротивление
Tr — трансформатор

при подаче на этот электрод импульса напряжения. Время открытия тиристора определяется длительностью подаваемого на него импульса.

Для получения зарядных импульсов с частотой 50 Гц используется один полупериод сети переменного тока, поэтому подаваемый на тиристор управляющий импульс должен быть синхронизирован именно с ним. Для получения частоты следования 25 Гц тиристор открывается через полтора сетевых периода.

Тиристор включён последовательно с вторичной силовой обмоткой сетевого трансформатора и аккумуляторной батареей. Напряжение на этой обмотке подбирается так, чтобы обеспечивался максимальный эффективный средний ток заряда. Регулировка зарядного тока осуществляется в блоке формирователя импульсов.

Реакция заряда происходит только в течение короткого зарядного импульса, длительность которого не превышает четверти периода колебаний в сети переменного тока, т. е. не более пяти миллисекунд. Поэтому, например, для получения постоянного среднего зарядного тока величиной 10 А ток в зарядном импульсе должен быть не менее 30 А при частоте следования импульсов 50 Гц и не менее 70 А при частоте 25 Гц. Большой ток в импульсе влияет на интенсивность электрохимической реакции заряда — преобразования активной массы.

Контроль заряда происходит обычным образом по измерению тока амперметром, включённого в цепь зарядного тока. Величина постоянного тока в разрядных импульсах составляет 0.1 от эффективного среднего тока заряда и определяется величиной токоустановочного сопротивления.

Как отмечено выше, в данном способе заряда импульсы зарядного тока чередовались с импульсами разрядного тока, при этом суммарное время разряда, когда на пластинах происходило устранение концентрационной поляризации, было больше

времени заряда в 3–6 раз в зависимости от длительности зарядного импульса при частоте следования импульсов в 50 Гц, а при частоте 25 Гц — не менее чем в 7–12 раз.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 приведены зарядные кривые свинцово-кислотных батарей 6СТ-55L на первом формировочном цикле, заряд которых проводился при постоянном токе согласно регламенту, приведённому в таблице (кривая 1) и импульсным асимметричным током с частотами 50 Гц (кривая 2). Как видно, заряд батареи на первом формировочном цикле при постоянно токовом режиме протекает при более высоких напряжениях, чем при заряде импульсными режимами.

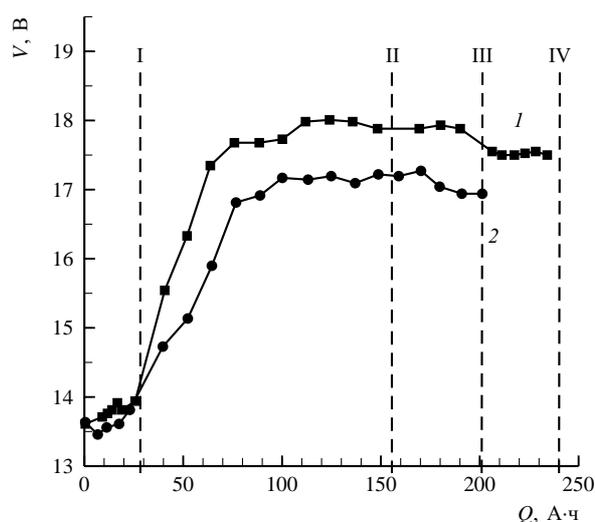


Рис. 2. Зарядное напряжение свинцово-кислотных батарей 6СТ-55L на первом формировочном цикле при постояннотоквом (1) и импульсных (2 — 50 Гц) режимах на разных этапах формовки: I этап (при токе 5.5 А в течение 5 ч); II этап (при токе 12 А в течение 10 ч); III этап (при токе 10.5 А в течение 5 ч); IV этап (при токе 5.5 А в течение 6 ч)

На рис. 3 приведены зависимости плотности электролита от времени заряда, измеренные на каждом этапе формовки различными режимами. Видно, что на I этапе при формовке плотность электролита сначала снижается с 1.17. до 1.13 г/см³. В основном это связано с продолжением процесса гидратации активной массы электродов. На II этапе формовки плотность электролита начинает постепенно повышаться, что обусловлено зарядом активных масс положительного и отрицательного электродов: оксидных соединений свинца (II) до металлического свинца на отрицательном электроде и до диоксида свинца на положительном электроде. За 10-часовой промежуток заряда асимметричным током плотность электролита достигает величины 1.24–1.25 г/см³, а при заряде постоянным током — 1.17–1.18 г/см³. На III этапе формовки плотность электролита достигает значения 1.28–1.29 г/см³, что свидетельствует о практическом завершении процесса формовки СКА. Следует отметить, что при импульсных режимах заряда данное значение плотности электролита достигается несколько раньше, чем при постоянноточковом — уже к 15-му часу заряда.

Это свидетельствует о более эффективном использовании тока при импульсном режиме формовки. Следует также отметить, что при заряде импульсным током температура электролита в батареях не поднималась выше 37 °С даже без дополнительного внесения в водяную ванну льда и не наблюдалось интенсивного газовыделения.

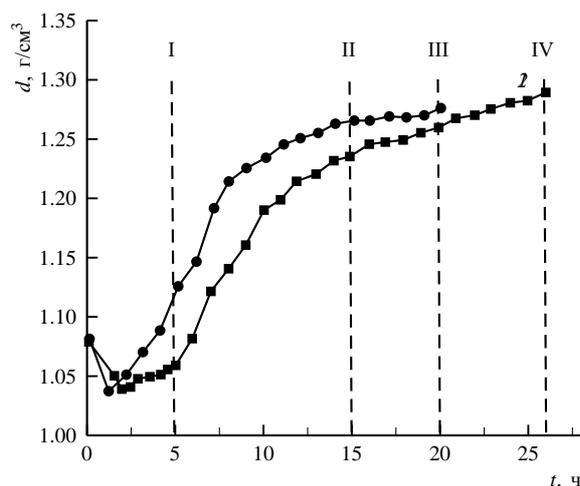


Рис. 3. Изменение плотности электролита (d) во времени на первом формовочном заряде аккумуляторных батарей 6СТ-55L различными режимами: 1 — постоянноточковым (см. таблицу), 2 — импульсным асимметричным током ($\nu = 50$ Гц)

Для оценки эффективности зарядного процесса при формовке различными режимами после её завершения был проведён разряд исследуемых СКА током 3.6 А.

На рис. 4 приведены разрядные кривые свинцово-кислотных батарей 6СТ-55L при величине разрядного тока 3.6 А после заряда на первом формовочном цикле различными режимами, из которого видно, что разряд батарей в данных условиях происходит в основном при напряжении 12 В. Используемый постоянноточковый регламент формовки СКА позволяет зарядить СКА практически на 87%: контрольным разрядом снята ёмкость в 48 А·ч, теоретическая ёмкость батареи — 55 А·ч.

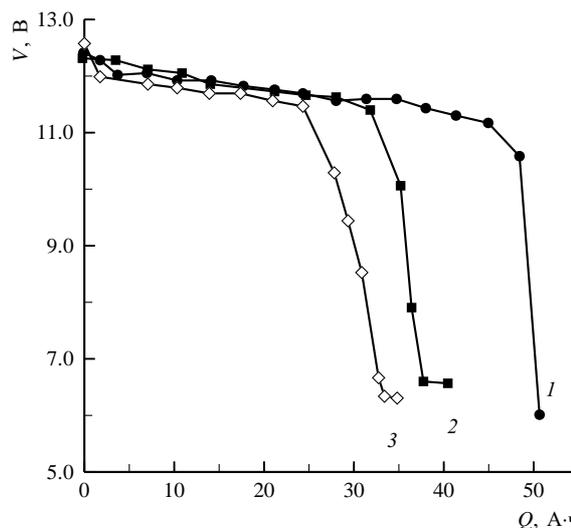


Рис. 4. Разрядное напряжение свинцово-кислотных батарей 6СТ-55L после заряда на первом формовочном цикле различными режимами: 1 — постоянным током; 2 — импульсным асимметричным током ($\nu = 50$ Гц); 3 — импульсным асимметричным током ($\nu = 25$ Гц). ($I_{\text{разр}} = 3.6$ А)

Батареи, заряжаемые импульсным асимметричным током, показали разрядную ёмкость в 41 А·ч ($\nu = 50$ Гц). Более низкое значение разрядной ёмкости отдали батареи, заряжаемые на первом формовочном цикле импульсным асимметричным током с частотой 25 Гц. ($Q_{\text{разр}} = 38$ А·ч). Снижение значения разрядной ёмкости у батарей, заряжаемых импульсным асимметричным током, связано, по-видимому, с наличием реверсной (разрядной) составляющей тока и с увеличением её длительности с уменьшением частоты переменного тока.

Оценить эффективность формовочного заряда (качество сформированной активной массы) можно и на основании зарядных и разрядных характеристик свинцово-кислотных батарей на последующих циклах. На рис. 5 приведены зарядные кривые исследуемых свинцово-кислотных батарей 6СТ-55L на втором зарядном цикле постоянным током 5.5 А после формовочного заряда на первом цикле различными режимами. Как видно, по форме зарядные кривые на втором цикле имеют характерный вид и практически не различаются между собой,

независимо от того, каким режимом формировалась батарея на первом цикле.

К такому же выводу можно прийти при анализе зависимости плотности электролита от времени заряда батарей на втором цикле. Из рис. 6, на котором представлено изменение плотности электролита в процессе заряда батарей на втором цикле, видно, что независимо от режима заряда батарей на первом цикле данные зависимости при заряде батарей на втором цикле практически совпадают, плотность электролита может служить надёжным критерием оценки степени заряженности свинцово-кислотных батарей.

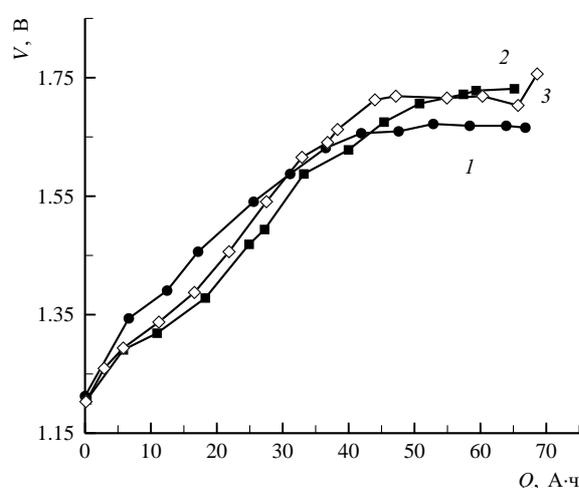


Рис. 5. Зарядные кривые свинцово-кислотных батарей 6СТ-55L на втором зарядном цикле постоянным током 5.5 А после формовочного заряда на первом цикле различными режимами: 1 — постоянным током (см. таблицу); 2 — импульсным асимметричным током ($\nu = 50$ Гц); 3 — импульсным асимметричным током ($\nu = 25$ Гц)

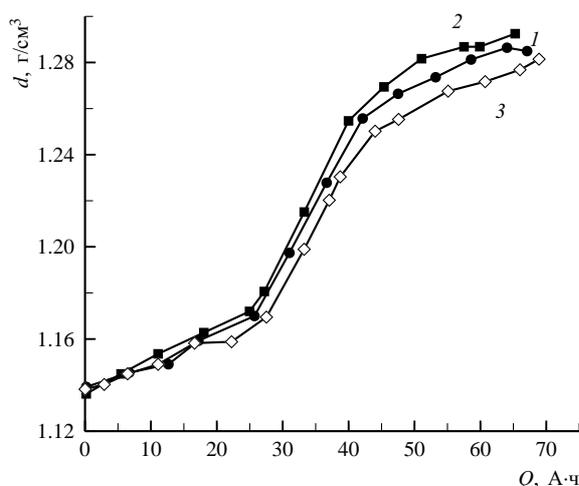


Рис. 6. Изменение плотности электролита при заряде свинцово-кислотных батарей на втором цикле током 5.5 А после заряда на первом цикле разными режимами: 1 — постоянным током (см. таблицу); 2 — импульсным асимметричным током ($\nu = 50$ Гц); 3 — импульсным асимметричным током ($\nu = 25$ Гц)

На рис. 7 приведена зависимость плотности электролита при разряде свинцово-кислотных батарей на постоянное сопротивление 3.3 Ом (начальный ток 3.6 А) от величины разрядной ёмкости. Видно, что плотность электролита линейно уменьшается с увеличением степени разряженности свинцово-кислотной батареи по уравнению:

$$y = -(0.00353 \pm 0.00006)x + 1.285 \pm 0.007.$$

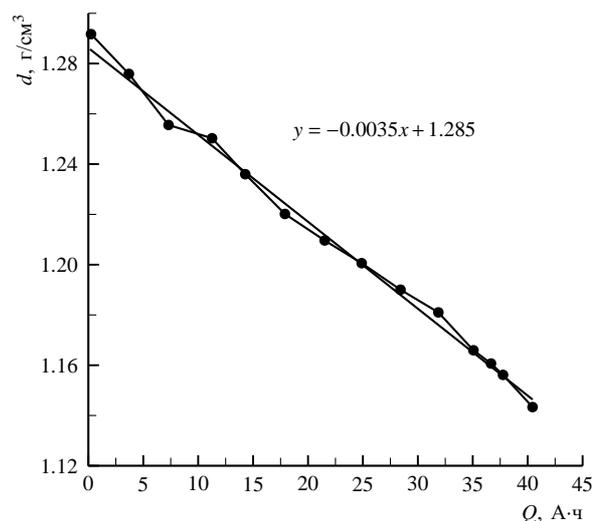


Рис. 7. Изменение плотности электролита отформированных свинцово-кислотных батарей 6СТ-55L в зависимости от величины снятой разрядной ёмкости ($I_{\text{разр}} = 3.6$ А)

Таким образом, плотность электролита прямопропорционально связана со степенью разряженности свинцово-кислотной батареи. Подтверждён известный практикам факт: по плотности электролита отформированной батареи можно с достаточной точностью определить её степень заряженности.

ВЫВОДЫ

1. Проведена сравнительная оценка эффективности постояннотоковых (ускоренных) и импульсных режимов формирования батарей свинцово-кислотных аккумуляторов. Установлено, что в качестве критерия завершения процесса формирования для всех исследуемых режимов можно использовать значение плотности электролита (1.28–1.29 г/см³). По зависимости плотности электролита от времени формирования на первом цикле можно сделать вывод о более эффективном заряде батарей импульсным асимметричным током.

2. Показано, что режим формирования, основанный на импульсных зарядных токах с частотой в 50 Гц, позволяет понизить газовыделение и разогрев электролита.

3. Установленная линейная зависимость плотности электролита отформированной батареи от степени её разряженности позволяет использовать

значение плотности электролита в качестве объективной оценки степени заряженности свинцово-кислотной батареи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Valve-regulated Lead-Acid Batteries / eds. D. A. J. Rand, P. T. Moseley, J. Garche, C. D. Parker. ELSEVIER, 2004.

2. Дзензерский В. А., Бурылов С. В., Скосарь В. Ю., Скосарь Ю. И. // Электрохим. энергетика. 2004. Т. 4, № 1. С. 43–48.

3. Дзензерский В. А., Бурылов С. В., Скосарь В. Ю., Выдута Е. Л. // Электрохим. энергетика. 2006. Т. 6, № 4. С. 195–198.

4. Сметанкин Г. П., Матекин С. С., Бурдюгов А. С., Плохова Т. В. // Электрохим. энергетика. 2008. Т. 8, № 3. С. 157–163.

5. Баюнов В. В., Кривченко Г. В. Изменение характеристик стационарных свинцовых аккумуляторов во время импульсных разрядно-зарядных режимов // Электротехника. 2004. № 5. С. 51–54.

6. Пат. 2180460 Российская Федерация, МПК⁷Н 02 J 7/00. Способ заряда свинцового аккумулятора.