

## УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ЗАРЯДКИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ

- ДЗЕНЗЕРСКИЙ В. А.** д-р техн. наук, директор Института транспортных систем и технологий Национальной академии наук Украины, Днепр, Украина;
- ЖИТНИК Н. Е.** научный сотрудник Института транспортных систем и технологий Национальной академии наук Украины, Днепр, Украина;
- ПЛАКСИН С. В.** д-р ф.м. наук, зав. отделом Института транспортных систем и технологий Национальной академии наук Украины, Днепр, Украина, e-mail: svp@westa-inter.com ;
- ЛИСУНОВА В. В.** ведущий инженер Института транспортных систем и технологий Национальной академии наук Украины, Днепр, Украина, e-mail: vvl@westa-inter.com .

**Цель работы.** Обоснование импульсного гальваностатического метода контроля и управления процессом зарядки электрохимического накопителя энергии на основе свинцово-кислотной электрохимической системы и разработка алгоритма его реализации.

**Методы исследования.** Исследования проведены с использованием импульсного метода автоматизированного контроля текущего состояния накопителя энергии, при котором значения информационных параметров определяются из сигнала отклика накопителя на тестовый импульс тока, а управление процессом зарядки производится по разработанному алгоритму с учетом текущего состояния накопителя.

**Полученные результаты.** Разработанные метод контроля и управления процессом зарядки накопителя и алгоритм его реализации позволяют сократить время зарядки накопителя по сравнению с гальваностатическим способом. Информация о динамике процесса зарядки отображается на экране монитора, что позволяет в наглядной форме контролировать процесс зарядки накопителя и фиксировать время его окончания.

**Научна новизна.** Авторами обоснован импульсный гальваностатический метод контроля и управления процессом зарядки электрохимического накопителя энергии, в котором в качестве информационных параметров при управлении процессом зарядки используются параметры протекающего в накопителе электрохимического процесса, отражающие текущее состояние накопителя.

**Практическая ценность.** Разработан алгоритм реализации метода контроля и управления процессом зарядки электрохимического накопителя энергии, который может быть использован для обеспечения оптимального режима зарядки накопителей энергии в составе автономных систем электроснабжения на базе фотоэлектрических установок.

**Ключевые слова:** электрохимический накопитель энергии; сигнал отклика; текущее состояние; управление; алгоритм; процесс зарядки; электрохимический процесс.

### I. ВВЕДЕНИЕ

Электрохимические накопители энергии на основе свинцово-кислотных химических источников тока широко применяются в стационарных автономных системах электроснабжения на базе возобновляемых источников энергии в виду их сравнительно низкой стоимости и унифицированной технологии производства. Они обычно используются в стационарных фотоэлектрических станциях (ФЭС), где массо-габаритные параметры накопителей не ограничиваются, а их стоимость должна быть минимальной [1]. В силу технических особенностей и принципа действия ФЭС значительной частью рабочего цикла накопителя является процесс накопления энергии – зарядка. Зарядка накопителя представляет собой сложный электрохимический процесс, от условий протекания

которого зависит эффективность использования ресурса и срок эксплуатации накопителя [2]. Опыт эксплуатации накопителей на основе свинцово - кислотных аккумуляторов показывает, что одной из основных причин, ограничивающих их ресурс, является применение неоптимального режима зарядки. Производители электрохимических накопителей энергии рекомендуют стандартные режимы зарядки, которые в первую очередь должны обеспечить их гарантийный срок службы при соблюдении всех рекомендаций и ограничений, обусловленных технологией производства накопителей. Производителей же зарядного оборудования интересует главным образом возможность произвести зарядку накопителя до необходимого уровня без его повреждения в процессе зарядки и практически не принимается во внимание влияние режима зарядки на процессы деградации при даль-

нейшей эксплуатации накопителя [3]. Для устранения сложившихся различий в подходах разработчиков накопителей и зарядного оборудования по вопросам текущей эксплуатации накопителей необходимо разработать новые либо усовершенствовать существующие методы управления зарядным процессом, учитывая текущее состояние накопителя энергии. Особенно актуальной эта задача становится при эксплуатации накопителей энергии в составе децентрализованных автономных систем электроснабжения на базе возобновляемых источников энергии.

Объектом исследования является процесс зарядки электрохимических накопителей энергии на основе свинцово-кислотных химических источников тока.

Предметом исследования являются методы управления процессом зарядки электрохимических накопителей энергии.

## II. АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Одним из недостатков свинцово-кислотной электрохимической системы является значительная длительность процесса зарядки, при этом в силу особенностей кинетики электрохимического процесса к ней не применимы форсированные режимы зарядки. Установлено [4], что длительность процесса зарядки свинцово-кислотного аккумулятора до достижения 100%-ной степени заряженности составляет в среднем 12 - 15 ч, при этом наиболее продолжительное время зарядки, примерно 7 - 10 ч, необходимо для достижения 80-100%-ной степени заряженности, что связано с крайне низкой эффективностью использования зарядного тока на этом этапе, которая составляет примерно 5 - 10 %.

Согласно данным авторов работы [5], оптимальный режим зарядки свинцово-кислотного аккумулятора обеспечивается зарядным процессом, при котором ток изменяется во времени в соответствии с уравнением Вудбриджа по закону ампер-часов

$$I_{зар} = A_e \cdot e^{-t}, \quad (1)$$

где  $I_{зар}$  – ток заряда, А;  $A_e$  – количество ампер-часов, отданных к каждому моменту времени заряда, А·ч;  $e$  – основание натурального логарифма;  $t$  – время заряда, ч. Реализовать условие (1) технически достаточно сложно, поэтому на практике для зарядки электрохимических накопителей энергии применяются методы, использующие комбинированные режимы зарядки различных модификаций [3].

Существующее на сегодняшний день множество различных способов и режимов зарядки аккумуляторных батарей (АКБ) сочетает три основных способа: гальваностатический, при котором зарядка производится постоянным током, потенциостатический для зарядки постоянным напряжением и комбинированный, когда в процессе зарядки изменяется и ток, и напряжение [6]. При гальваностатическом способе на

протяжении всего зарядного процесса поддерживается заданная величина зарядного тока. Преимуществом такого способа зарядки является относительно малая продолжительность зарядного процесса, однако в данном случае происходит ускоренное «старение» АКБ из-за высоких токовых нагрузок на последней стадии зарядки и, следовательно, снижается срок службы АКБ. Если же процесс зарядки производится потенциостатическим способом, то на последней стадии процесс существенно замедляется и растет время зарядки АКБ. И, наконец, третий, комбинированный, или гальвано-потенциостатический способ, сочетающий два выше указанных в одном. При реализации этого способа сначала идет зарядка стабилизированным током, затем при достижении напряжения ограничения и до окончания процесса зарядка производится стабилизированным напряжением. Это наиболее оптимальный среди отмеченных выше и самый сложный способ зарядки, реализация которого включает три режима:

1) режим зарядки постоянным током (нормированным током  $I = 0,1 C_{20}$ ), при котором накопитель энергии получает около 80 % заряженности в течение 5 - 8 часов;

2) режим насыщения (нормированное напряжение 2,45 В на аккумулятор), в течение которого происходит восполнение оставшихся 20 % заряженности за 7 - 10 часов,

3) режим поддержания заряда, который призван сохранять аккумулятор в заряженном состоянии.

Принципиально существуют два направления сокращения длительности зарядки:

1) за счёт ограничения конечной степени заряженности на уровне 80 % путём исключения малоэффективного режима насыщения;

2) за счёт ускорения процесса зарядки, используя новые методы и алгоритмы их реализации.

Сократить время зарядки путём исключения малоэффективного режима насыщения нецелесообразно, так как его проведение необходимо для достижения следующих целей:

1) достижения полной заряженности аккумуляторов;

2) выравнивания степени заряженности аккумуляторов в батарее;

3) перемешивания электролита;

4) снижения сульфатации активных масс.

Следовательно, решать задачу выбора оптимального режима зарядки накопителей целесообразно путём управления процессом зарядки по алгоритму, который учитывает текущее состояние накопителя. При этом целесообразно исходить из общепринятого представления о том, что текущее состояние накопителя определяется коэффициентом использования активных материалов – активных масс электродов и

электролита, который в соответствии с законом Фарадея может быть выражен уравнением [7].

$$\theta = (C_p / C_o) \cdot 100\% = \frac{C_p}{k \cdot m} \cdot 100\% , \quad (2)$$

где  $C_p$  – емкость ХИТ при разряде;  $C_o$  – теоретическая емкость, рассчитанная по электрохимическим эквивалентам,  $k$  - электрохимический эквивалент разрядных процессов,  $m$  - активная масса, участвующая в токообразующем процессе.

Из уравнения (2) следует, что коэффициент использования активных материалов является функцией режима разряда, который определяется величинами тока разряда, конечного напряжения разряда и температуры. В связи с этим одним из условий соблюдения адекватности режима зарядки текущему состоянию накопителя является учет предшествующего режима разряда. При этом следует учесть, что при выборе режима зарядки накопителя немаловажное значение имеют особенности воздействия зарядных и разрядных токов на ресурс активных массы положительных и отрицательных электродов.

Особенность свинцово-кислотных источников тока состоит в том, что положительный и отрицательный электроды заряжаются независимо друг от друга. Например, в работе [8] показано, что при увеличении зарядного тока от 0,2 до 1,5 Сном долговечность положительной активной массы возрастает более чем в два раза. Однако, с другой стороны, установлено, что высокий начальный зарядный ток приводит к снижению ресурса отрицательной активной массы, вызванного ускоренным образованием на ее поверхности малоактивного сульфата свинца. Таким образом, режим зарядки требует оптимизации его не только по времени, но и по ресурсу дальнейшей эксплуатации накопителя, что предъявляет дополнительные требования к системе контроля зарядного процесса. Контроль процесса зарядки накопителя по значениям таких параметров, снимаемых с его клемм, как напряжение и зарядный ток, является малоинформативным и не обеспечивает управление зарядным процессом в оптимальном режиме. Объективную информацию о текущем состоянии накопителя энергии можно получить из параметров протекающего в нем электрохимического процесса. Электрохимический процесс представляет собой совокупность химических реакций, скорость протекания которых напрямую связана с физическим перемещением ионов и катионов в электролите и электронов в активных массах электродов и обеспечивается естественной конвекцией, диффузией и кулоновскими силами. Физической мерой скорости реакции является электрический ток. В режиме зарядки скорость химических реакций, а следовательно, и скорость процесса зарядки определяется величиной зарядного тока. При превышении скорости зарядки выше допустимой для конкретного типа накопителя увеличивается количество побочных и

вредных реакции, которые разрушают электролит, нарушают структуру активных масс катода и анода, изменяя их эффективную площадь, что приводит к уменьшению емкости накопителя или выходу его из строя. В общем случае электрохимический процесс в химическом источнике тока проходит закономерную последовательность стадий [9], которая применительно к поведению активных материалов отрицательного электрода при различных режимах зарядно – разрядного процесса авторами [10] описана следующим образом. При зарядке на отрицательном электроде протекают три стадии – электрохимическая стадия, химическая стадия, и реакция выделения водорода. Электрохимическая стадия зависит от электропроводности активных материалов и токоотвода и определяет активное сопротивление накопителя, а скорость ее протекания характеризует эффективность использования зарядного тока; вторая стадия – химическая, которая определяет поляризационное сопротивление накопителя, а скорость ее протекания зависит от концентрации серной кислоты в порах активных масс электродов.

Характер протекания этих стадий определяется скоростью предшествующего разрядного процесса, а именно:

1) если зарядку проводят после разряда малым током, то структура разряженной активной массы, равномерное распределение сульфата свинца и кислоты в порах активных масс способствуют равномерному протеканию зарядного процесса по всему объёму активных масс и снижению активного и поляризационного сопротивлений активных масс;

2) после интенсивного разряда сформировавшийся сульфат свинца локализован во внешних слоях активных масс и в силу низкой электропроводности нарушает токопроводящие пути для переноса электронов в зону реакции, то есть в поры активных масс, где плотность кислоты относительно высока, что сопровождается повышением активного и поляризационного сопротивления активных масс.

Стандартный гальвано-потенциостатический режим зарядки накопителя в таких случаях является малоэффективным и энергозатратным.

Задача повышения эффективности зарядки может быть успешно решена применением импульсных методов зарядки различных модификаций, которые существенно отличаются от рекомендованных производителями накопителей энергии, но во многих случаях обеспечивают улучшение их эксплуатационных характеристик. Подтверждением этих фактов служат результаты исследований эффектов воздействия импульсных токов на параметры аккумуляторов, изложенные в работе [11]. Установлено, что положительный эффект воздействия импульсного тока на зарядный процесс связан в большей мере с его влиянием на структуру и электрические параметры активных масс электродов.

Существенное значение при этом имеет то обстоятельство, что режим зарядки пульсирующим током позволяет значительно сократить время зарядки накопителя на последнем его этапе.

Оптимальные значения параметров зарядных импульсов могут быть определены с учетом текущего состояния накопителя и особенностей воздействия каждого из них на характер протекания зарядного процесса, информацию о котором можно получить путем исследования стадий протекающего в накопителе электрохимического процесса.

Вариант реализации метода зарядки аккумуляторов импульсным асимметричным током, учитывающим особенности воздействия отдельных параметров импульсов на зарядный процесс, изложен в работе [12]. Автором указанной работы предложен адаптивный метод зарядки аккумуляторов и разработан алгоритм управления зарядным процессом, которые позволяют повысить эффективность зарядки аккумуляторов на 12 - 34 % по сравнению с существующими методами даже при том условии, что при реализации предложенного автором [12] алгоритма зарядки не были использованы параметры зарядных импульсов в полном объеме, что, безусловно, несколько снизило эффективность импульсного метода.

С целью повышения эффективности зарядного процесса авторами [13] предложена стратегия ускоренного режима зарядки свинцово-кислотных аккумуляторов, включающая два этапа. На первом этапе зарядка проводится в гальваностатическом режиме до достижения 80 % заряженности. Первый этап включает 1 – 3 гальваностатические ступени со снижающейся величиной зарядного тока при переходе на каждую последующую ступень. Второй этап, обеспечивающий полную зарядку аккумулятора до 100%-ной степени заряженности, проводится с применением импульсного тока. Авторами цитируемой работы изучено влияние на эффективность зарядки основных параметров зарядных импульсов, таких как амплитуда и длительность импульса, длительность паузы, общая продолжительность зарядного процесса. На основании экспериментальных данных получено выражение, описывающее зависимость зарядной ёмкости от параметров импульсной зарядки:

$$Q_{зар} = (I_{зи} - I_{газ}(Q, I_{зи})) \cdot t \cdot \ln(1 + t_{зи} / t_{пауз}) \quad (3)$$

где  $Q$  — степень заряженности аккумулятора,  $I_{зар} = I_{зи} - I_{газ}(Q, I_{зи})$  — ток, идущий непосредственно на зарядку аккумулятора,  $I_{газ}$  — ток, расходуемый на газовыделение,  $I_{зи}$  — ток зарядного импульса,  $t_{зи}$  — длительность зарядного импульса,  $t_{пауз}$  — длительность пауз,  $t$  — длительность зарядного процесса.

Очевидно, что контролировать и изменять значения параметров импульсов, указанных в выражении

(3), в процессе зарядки традиционными приборными средствами с учетом текущего состояния накопителя является трудновыполнимой задачей и для ее решения необходимы новые подходы и методы, основанные на математической обработке информации и реализованные на базе современной микропроцессорной техники. Кроме того, при практической реализации предложенного метода руководствоваться приведенным выше математическим выражением для контроля эффективности зарядного процесса не представляется возможным, так как невозможно порционно разделить общий ток на ток, идущий непосредственно на зарядку аккумулятора и ток, расходуемый на газовыделение. Установлено также, что при импульсном режиме зарядки ее эффективность значительно снижается с ростом степени заряженности накопителя, что явным образом не вытекает из приведенного выражения. Отсюда вытекает необходимость определения оптимальной степени заряженности и длительности зарядного процесса путем введения критериев окончания процесса зарядки.

Следует отметить, что методика экспериментальных исследований, предложенная авторами [13], не предусматривает проведения исследований динамики протекающего в образцах электрохимического процесса, а основана на использовании информации о поведении параметров образцов, наблюдаемом на их клеммах. Полученные таким образом экспериментальные данные не содержат в себе информацию о поведении активных масс электродов в зависимости от режима зарядки и не раскрывают связи стадий протекающего в накопителе электрохимического процесса с текущими параметрами накопителя. Между тем достаточно полную информацию о состоянии накопителя можно получить путем исследования динамики протекающего в нем электрохимического процесса, который в конечном итоге определяет значения текущих параметров, используемых в алгоритме управления процессом зарядки накопителя.

### III. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является обоснование импульсного гальваностатического метода контроля и управления процессом зарядки электрохимического накопителя энергии на основе свинцово-кислотной электрохимической системы и разработка алгоритма его реализации.

### IV. ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

**Обоснование импульсного метода контроля и управления процессом зарядки электрохимического накопителя энергии.**

Управление процессом зарядки накопителя энергии разработанным методом реализуется путем решения следующих задач:

1) контроль текущего состояния накопителя по значениям его основных параметров;

2) изменение в процессе зарядки параметров зарядных импульсов по определенному алгоритму с учетом текущего состояния накопителя;

3) своевременное прекращение зарядного процесса при достижении установленных значений ряда основных параметров накопителя;

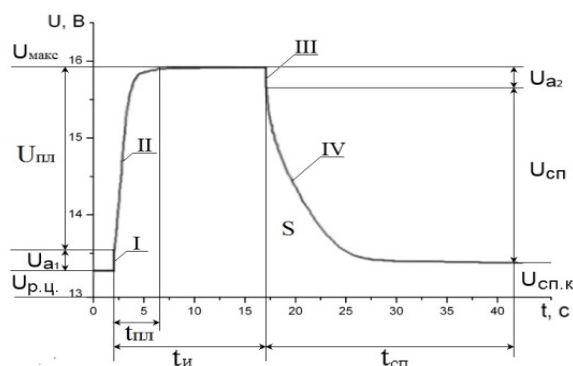
4) удовлетворять требованиям энергосберегающих технологий при зарядке накопителей.

По аналогии с предложенной авторами [13] стратегией зарядки разработанный метод предусматривает управление процессом зарядки, который включает два этапа: этап зарядки в гальваностатическом режиме до достижения напряжения ограничения, которое соответствует 80 % заряженности, и этап зарядки с применением импульсного тока до достижения 100%-ной степени заряженности. После достижения 100%-ной степени заряженности, которую определяют по установившимся значениям основных параметров накопителя, процесс зарядки прекращается.

Импульсные режимы зарядки критичны к выбору параметров зарядных импульсов и пауз, что, в частности, следует также из выражения (3). При этом параметры зарядных импульсов должны быть адекватны текущему состоянию накопителя энергии. Как отмечалось выше, объективную информацию о текущем состоянии накопителя можно получить из параметров протекающего в нем электрохимического процесса.

Предлагаемый метод контроля и управления процессом зарядки накопителя основан на контроле параметров протекающего в нем электрохимического процесса, информацию о которых получают путем обработки математическими методами сигнала отклика (СО) накопителя на тестовый импульс тока.

Типичная форма сигнала отклика накопителя с обозначением участков, соответствующих определенным стадиям протекания электрохимического процесса, а также контролируемых параметров процесса приведены на типичной форме сигнала отклика, которая изображена на рисунке 1.



**Рисунок 1.** Форма сигнала отклика накопителя на импульс тока с обозначением стадий электрохимического процесса и контролируемых параметров процесса

На рисунке введены следующие обозначения:

I – стадия падения напряжения на активном сопротивлении в момент подачи импульса;

II – стадия поляризации;

III – стадия падения напряжения на активном сопротивлении в момент снятия импульса;

IV – стадия деполяризации (участок спада напряжения после снятия импульса).

Задача контроля параметров процесса решается с помощью импульсного гальваностатического метода контроля текущего состояния накопителя, обоснование и алгоритм реализации которого изложены в работе [14].

Обработка формы СО конкретного накопителя энергии позволяет определить значения его основных текущих параметров:  $U_{р.ц}$  – напряжение разомкнутой цепи;  $U_{а1}$  – падение напряжения на активном внутреннем сопротивлении накопителя в момент подачи импульса; напряжение поляризации  $U_{пл}$ ;  $t_{пл}$  – время протекания поляризационной стадии процесса;  $t_{и}$  – длительность тестового импульса;  $t_{сп}$  – длительность спада потенциала с момента снятия импульса (время стадии деполяризации);  $U_{сп.к}$  – конечное значение напряжения деполяризации;  $S$  – площадь под линией спада напряжения деполяризации после снятия импульса, отражающая запасенную накопителем энергию.

Полученная в результате математической обработки сигнала отклика информация содержит сведения о динамике стадий протекающего в накопителе электрохимического процесса и тем самым дает возможность контролировать и управлять процессом с помощью внешних воздействий. В режиме зарядки накопителя в качестве внешних воздействий используются постоянный ток на этапе гальваностатической зарядки и импульсы зарядного тока на этапе импульсной зарядки. Импульсы зарядного тока формируются с учетом параметров электрохимического процесса, перечень которых приведен выше. Значения параметров процесса определяются из сигнала отклика накопителя на тестовые импульсы, которые подаются на накопитель периодически в гальваностатическом режиме зарядки и в паузах между зарядными импульсами в импульсном режиме зарядки.

На этапе гальваностатической зарядки определяются величины зарядного тока и напряжения ограничения. Величина зарядного тока определяется из выражения:

$$I_3 = \frac{U_{макс} - U_{р.ц.}}{R_{а1}}, \quad (4)$$

где  $U_{макс}$  – максимально допустимое напряжение для данного типа накопителя;  $U_{р.ц.}$  – напряжение

разомкнутой цепи накопителя;  $R_{a1} = \frac{U_{a1}}{I_T}$ ;  $I_T$  – величина амплитуды тока тестового импульса, равная  $0,1C_{20}$  А.

Величина напряжения ограничения устанавливается из соотношения  $U_{огр} = U_{р.ц.} + U_{нл}$  и зависит от типа накопителя. Например, для накопителя на основе свинцово - кислотных химических источников тока величина напряжения ограничения равна 2,4 В на аккумулятор.

При достижении на накопителе напряжения ограничения завершается первый этап зарядки с переходом ко второму этапу зарядки накопителя импульсным током, который реализуется выполнением нижеприведенных операций.

Определяются значения параметров зарядных импульсов: амплитуды  $I_3$ , длительности  $t_{уз}$  и длительности пауз  $t_n$ . Для этих целей используются выражения, включающие значения текущих параметров накопителя, полученные из сигнала отклика: амплитуда импульсов  $I_3 = U_{нл} / R_{a1}$ , длительность импульсов  $t_u \approx t_{нл}$  и длительность пауз  $t_n \approx t_{сн}$ .

При определении значения длительности импульсов учитывали суммарное время протекания стадии поляризации  $t_{нл} = t_{эх} + t_k$ , в течение которого происходит частичное перемешивание электролита с выравниванием его концентрации в порах и межэлектродном пространстве. Известно, что процесс выравнивания концентрации электролита эквивалентен процессу выравнивания плотности зарядов. Таким образом, в течение зарядного импульса электрохимический процесс проходит все его стадии и зарядка накопителя производится в оптимальном режиме.

Длительность пауз устанавливалась равной времени стадии деполяризации, то есть времени спада напряжения до определенного уровня после снятия зарядного импульса. Увеличение длительности паузы приведет к неоправданной потере общего времени зарядки, то есть к увеличению длительности зарядного процесса, а при сокращении длительности пауз происходит интегрирование смещения начального уровня каждого последовательного импульса, которое может привести к искажению информации о реальном состоянии накопителя.

Как видно из приведенных выше выражений значения зарядных импульсов и пауз изменяются в соответствии с изменением значений текущих параметров накопителя и отражают динамику зарядного процесса.

Основными контролируемыми параметрами накопителя в процессе зарядки являются: падение напряжения на активном сопротивлении  $\Delta U_{a1}$  в момент подачи импульса; величина зарядного тока  $I_3$  и пло-

щадь  $S$  под линией спада напряжения после снятия импульса. Для вычисления величины площади  $S$  (в условных единицах) было проведено ее интегрирование по правилу трапеции с помощью программы обработки математических и статистических функций – Origin. Программа осуществляет интегрирование кривых по следующему алгоритму:

1) рассчитывается определенный интеграл аппроксимированной функции  $\int_a^b f(x)dx$ , для чего экспоненциальная линия спада делится на отрезки;

2) для формирования трапеции используются пары соседних значений, после чего площади прямоугольных трапеций суммируются и интеграл рассчитывается по следующей формуле:

$$\int_{x_1}^{x_n} f(x)dx \approx \sum_{i=1}^{n-1} (x_{i+1} - x_i) \frac{1}{2} [f(x_{i+1}) + f(x_i)] \quad (5).$$

Критерием окончания зарядки после достижения 100% степень заряженности накопителя является постоянство значений параметров  $\Delta U_{a1}$ ,  $I_3$ ,  $S$ .

Таким образом, используя многофункциональность импульсного воздействия на протекающий в накопителе электрохимический процесс, предлагаемый метод позволяет осуществлять контроль процесса зарядки накопителя с учетом кинетики протекающего в нем электрохимического процесса и управлять зарядным процессом по специально разработанному алгоритму, используя для этих целей совместное оборудование, а также общие методы обработки сигналов отклика и формирования зарядных импульсов.

#### **Разработка алгоритма управления процессом зарядки накопителя энергии.**

Алгоритм реализации предлагаемого метода предусматривает совмещение операций контроля и управления процессом зарядки накопителя. Алгоритм разделяет выполнение операций зарядки в гальваностатическом режиме и зарядки импульсным режимом, используя при этом общие контролируемые параметры накопителя, значения которых определяются из сигнала отклика на тестовый импульс тока при неизменных значениях его параметров.

Ниже приведена последовательность выполнения операций по алгоритму контроля и управления процессом зарядки электрохимического накопителя энергии.

- 1) Формирование и подача на накопитель тестового импульса тока.
- 2) Регистрация СО накопителя.
- 3) Вычисление из СО основных текущих параметров накопителя. Занесение полученных значений параметров в память.
- 4) Определение величины зарядного тока и уста-

новка величины напряжения ограничения  $U_{огр}$ .

5) Завершение этапа зарядки в гальваностатическом режиме при  $U_3 = U_{огр}$ .

6) Вычисление параметров зарядного импульса: амплитуды  $I_3$ , длительности  $t_{из}$  и длительности пауз  $t_n$ .

7) Подача на накопитель зарядных импульсов и периодическая подача тестовых импульсов в паузах между зарядными импульсами.

8) Сравнение полученных значений параметров накопителя при очередном тестовом импульсе со значениями, полученными при подаче предыдущего тестового импульса.

9) а) Параметры накопителя изменяются:  $nU_{рц} > (n-1)U_{рц}$ ;  $nU_{пл} > (n-1)U_{пл}$ ;  $nRa_1 < (n-1)Ra_1$  и

$dS > (n-1)dS$ , где индексы (n-1) и n относятся к параметрам предшествующего и очередного тестового импульсов соответственно.

Выполняются операции 6, 7, 8, 9 до установления равенства значений параметров  $I_3, \Delta U_{a1}, S$ .

б) При отсутствии изменений значений параметров накопителя производится переход к операции 10.

10) При достижении неизменных значений параметров  $I_3, \Delta U_{a1}, S$  процесс зарядки накопителя прекращается.

Блок-схема описанного алгоритма управления процессом зарядки накопителя приведена на рис. 2.

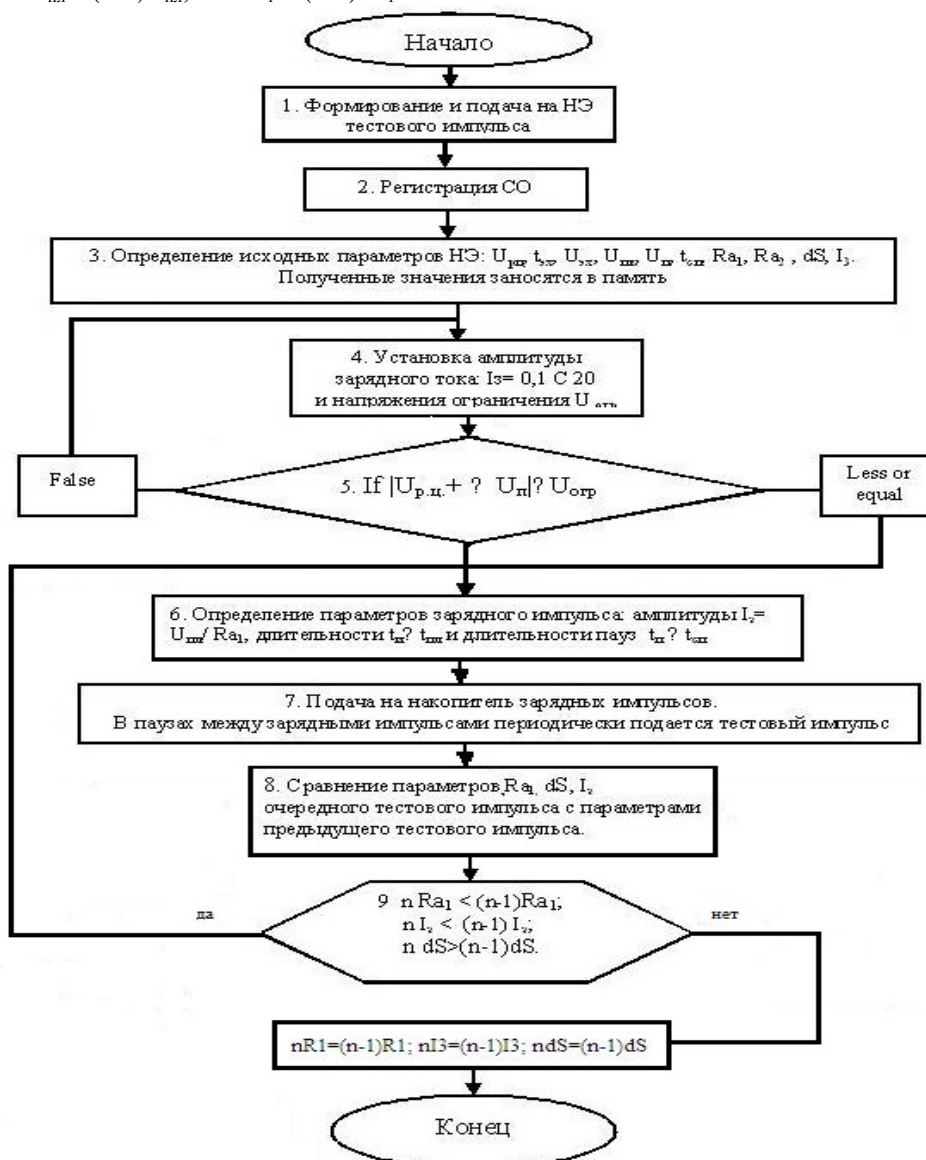


Рисунок 2. Блок-схема алгоритма управления зарядным процессом электрохимического накопителя энергии

### V. ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Разработанный метод и алгоритм его реализации отработаны на экспериментальном стенде, описанном в [15], и были апробированы при управлении процессом зарядки свинцово-кислотных аккумуляторных батарей описанным в [16] методом.

### VI. РЕЗУЛЬТАТЫ

В качестве примера на рис. 3а приведена форма сигнала отклика накопителя в начале зарядки накопителя в гальваностатическом режиме, на рис. 3б – форма сигнала отклика при переходе на режим зарядки импульсным током и на рис. 3(в, г) приведены формы периодических сигналов отклика накопителя в процессе его зарядки импульсным током на заключительном этапе. Приведенные в качестве примера формы сигналов отклика наглядно отображают динамику процесса зарядки накопителя.

На рис. 4 (а, б, в) приведены значения контролируемых параметров накопителя, полученные из сигналов отклика с начала зарядки импульсным током, а на рис. 4(г, д, е) – значения этих параметров на заключительном этапе зарядки. При достижении неизменных значений параметров  $I_z$ ,  $\Delta U_{al}$ ,  $S$  процесс зарядки прекращается, как это видно из рис. 4(г, д, е).

Параметры накопителя определялись с интервалом, равным 30 минут на рис. 4 (а, б, в) и с интервалом, равным 15 минут на рис. 4 (г, д, е). Полученные значения параметров заносились в память и выводились на экран монитора, что позволяло осуществлять визуальный контроль процесса зарядки и фиксировать время его окончания.

### VII. ОБСУЖДЕНИЕ

Разработанный метод и алгоритм его реализации позволяют одновременно контролировать состояние заряжаемого накопителя по значениям его текущих параметров, кинетику протекающего в нем электрохимического процесса и управлять процессом зарядки накопителя режимом, адекватным его текущему состоянию. При этом в качестве информационных параметров при управлении процессом зарядки используются параметры электрохимического процесса, отражающие текущее состояние накопителя. Программное обеспечение алгоритма реализации метода позволяет в наглядной форме контролировать процесс зарядки накопителя и фиксировать время его окончания.

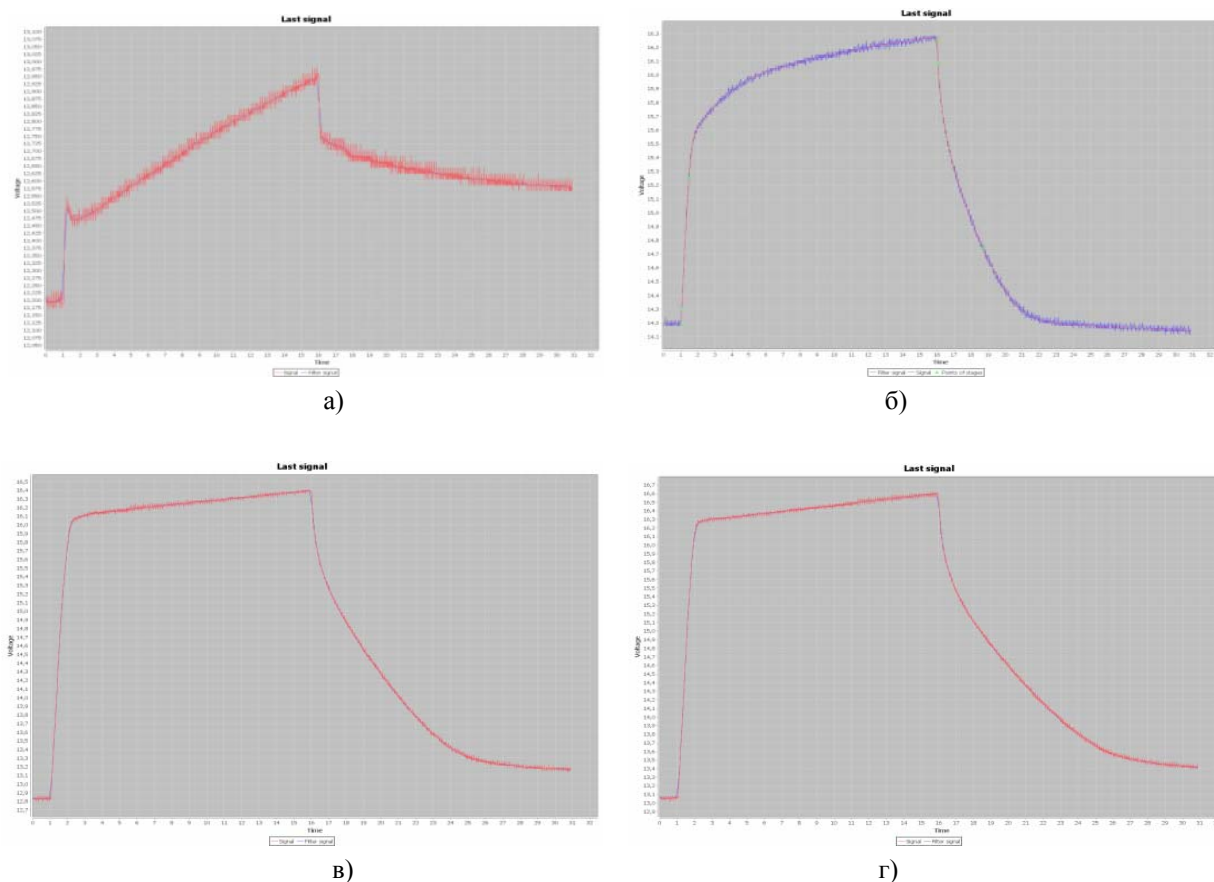
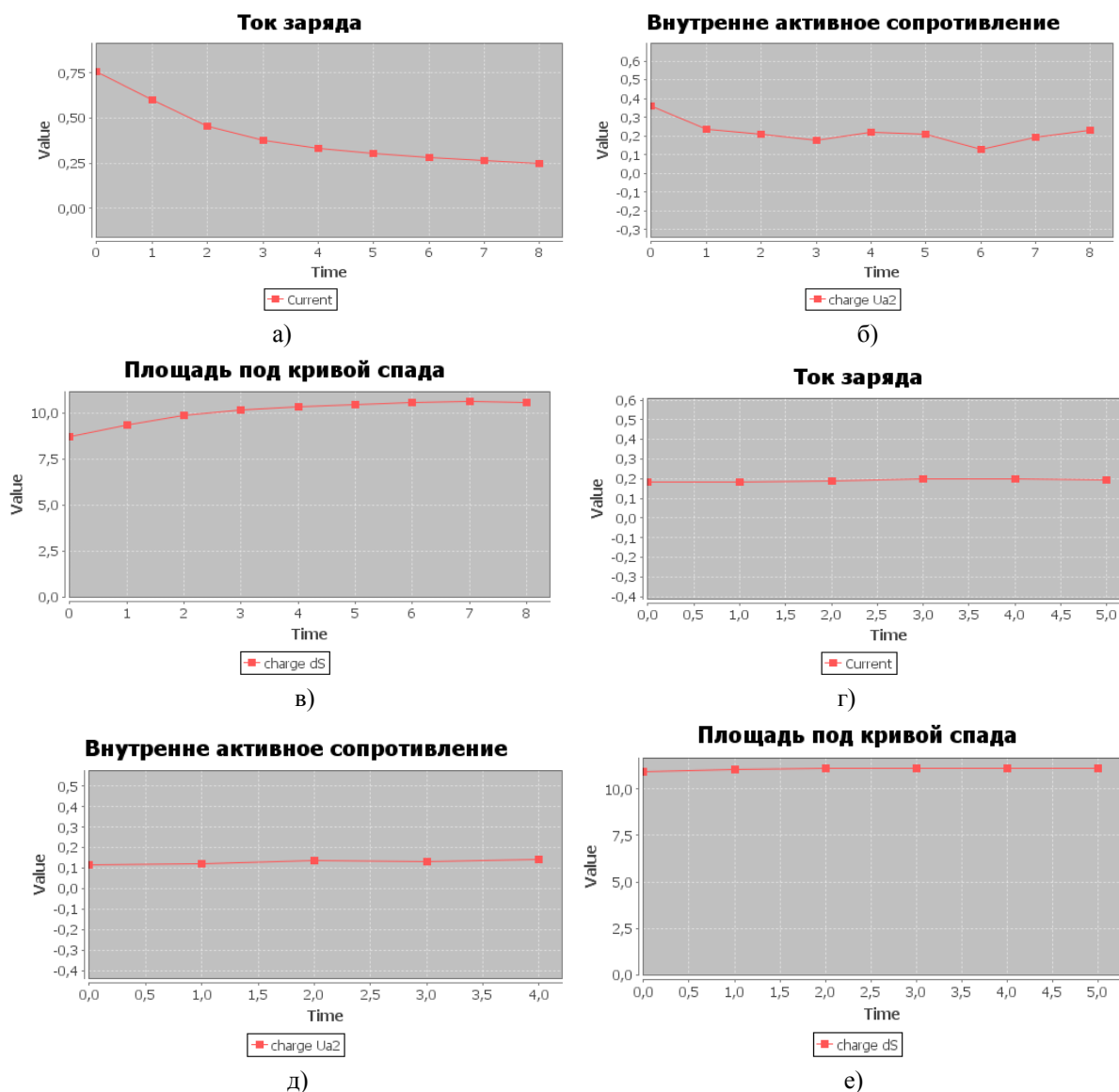


Рисунок 3. Формы сигналов отклика накопителя





**Рисунок 4.** Значения контролируемых параметров накопителя, полученные из сигналов отклика с начала зарядки импульсным током и значения этих параметров на заключительном этапе зарядки

Как видно из рис. 4, разработанный метод обеспечивает оптимальный режим зарядки накопителя, что подтверждается сокращением времени зарядки на втором этапе зарядного процесса, то есть времени зарядки импульсным током. В приведенном частном примере время зарядки импульсным током по разработанному методу составляет пять часов 15 минут, в отличие от 7 -10 часов при использовании комбинированного гальвано - потенциостатического метода зарядки. При этом следует обратить внимание, что в приведенном примере использованы результаты, полученные при зарядке полностью разряженной аккумуляторной батареи, что исключено в условиях эксплуатации ФЭУ. Если учесть, что реальных условиях эксплуатации накопитель разряжается до 80%, то разработанный метод удовлетворяет требованиям энергосберегающих технологий зарядки накопителей.

Сравнительный анализ результатов авторов [13] позволяет сделать следующие выводы: при использовании предлагаемой авторами [13] методики зарядки значения параметров накопителя подбираются эмпирически для каждого типоразмера химического источника тока. С учетом того, что некоторые параметры имеют экстремальный характер, процесс управления зарядкой накопителей технически трудно реализовать как в ручном режиме, так и в автоматическом режиме.

### VIII. ВЫВОДЫ

Решена задача контроля и управления процессом зарядки электрохимического накопителя энергии с учетом его текущего состояния. Научная новизна результатов состоит в том, что контроль и управление

процессом зарядки накопителя основан на использовании параметров протекающего в нем электрохимического процесса, которые отражают текущее состояние накопителя, в качестве информационных параметров при управлении процессом зарядки. Практическая значимость полученных результатов состоит в том, что разработан алгоритм реализации метода контроля и управления процессом зарядки электрохимического накопителя энергии в составе автономных систем электроснабжения на базе фотоэлектрических установок. Перспективы дальнейших исследований состоят в том, чтобы на основе предложенных метода и алгоритма реализовать автоматизированный контроль и управление режимами работы электрохимических накопителей энергии в составе автономных систем электроснабжения.

### ІХ. БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена в рамках госбюджетной научно-исследовательской темы «Разработка новых и усовершенствование существующих методов исследования магнитолевитирующего транспорта и систем генерирования и накопления энергии» (№ государственной регистрации 0116U001281)

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Груздев, А. И. Основные тенденции и направления развития автономной электроэнергетики Ч. II. [Текст] / А.И. Груздев // *Электричество*. – 2008. – № 10. – С. 2-11.
- [2] Каменев, Ю. Б. Режим заряда герметизированных циклируемых свинцово – кислотных аккумуляторов [Текст] / Ю. Б. Каменев, Н. И. Чунц // *Электрохимическая энергетика*. – 2005. – № 4.– С. 226–273.
- [3] Таганова, А. А. Герметичные химические источники тока [Текст] / А. А. Таганова, Ю. И. Бубнов, С. Б. Орлов // Спб.: Химиздат. 2005. – С. 262.
- [4] Каменев, Ю. Б. Работа свинцово-кислотного аккумулятора в условиях постоянного недозаряда [Текст] / Ю. Б. Каменев, М. В. Лушина, И. А. Васина // *Электрохимическая энергетика*. – 2008. – Т. 8. № 3. – С.146–151.
- [5] Агуф, И. А. Конструкция и условия эксплуатации герметичного свинцового аккумулятора [Текст] / И. А. Агуф, М. А. Дасоян, Н. Ю. Лызлов // М.: Информэлектро. 1984. Вып. 2. С.6 –29.
- [6] Кошель, М. Д. Теоретичні основи електрохімічної енергетики: Підручник [Текст] / М. Д. Кошель // Дніпропетровськ.: УДХТУ. 2002. – 430 с.
- [7] Гинделис, Я. Е. Химические источники тока [Текст] / Я. Е. Гинделис // Саратов: Изд-во Саратовского университета. – 1984. – 174 с.
- [8] Каменев, Ю. Б. Ускоренный метод заряда свинцово-кислотного аккумулятора 1. Гальваностатический этап заряда [Текст] / Ю. Б. Каменев, Г. А. Штомпель, Н. И. Чунц // *Электрохимическая энергетика*. – 2012. – Т. 12, № 2. – С. 64–71.
- [9] Дзензерский, В. А. Контроль состояния стартерных свинцовых аккумуляторов хронопотенциометрическим методом [Текст] / В. А. Дзензерский, Н. Е. Житник, С. В. Плаксин, Соколовский И. И. // *Електротехніка та електроенергетика*. – 2005. – № 1. С. 13–18.
- [10] Каменев, Ю. Б. 1. Ускоренный метод заряда свинцово-кислотного аккумулятора 2. Гальваностатический заряд [Текст] / Ю. Б. Каменев, Г. А. Штомпель, Ю. В. Скачков // *Электрохимическая энергетика*. – 2013. – Т. 13. – № 2. – С. 70–76.
- [11] Подражанский, Ю. М. Использование импульсных режимов заряда для повышения эксплуатационных параметров аккумуляторов: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.17.03 [Текст] / Ю. М. Подражанский // Украинский гос. химико-технологический ун-т. – Д. 2000. – 17 с.
- [12] Волківський, В. Б. Напівпровідникові перетворювачі з підвищеною ефективністю заряду акумуляторів імпульсними асиметричними струмами: дис. канд. техн. наук: 05.09.12 [Текст] / В.Б. Волківський // Національний технічний ун-т України «Київський політехнічний ін-т». – К.: 2007. – 163 с.
- [13] Каменев, Ю. Б. Ускоренный метод заряда свинцово-кислотного аккумулятора. 3. Импульсный заряд [Текст] / Ю. Б. Каменев, Г. А. Штомпель // *Электрохимическая энергетика*. – 2013. – Т. 13, № 2.– С. 77–82.
- [14] Дзензерский, В. А. Разработка алгоритма автоматизированного контроля электрохимических накопителей энергии [Текст] / В. А. Дзензерский, Н. Е. Житник, С. В. Плаксин, В. В. Лисунова // *Електротехніка та електроенергетика*. – 2017.– №1. – С. 39–47.
- [15] Плаксин, С. В. Экспериментальный стенд для автоматизированного контроля состояния химических источников тока импульсным методом [Текст] / С. В. Плаксин, Н. Е. Житник, О. И. Ширман // *Гірнична електромеханіка та автоматика*. Днепропетровск, 2012. – Вып. 89. С. 58 – 63.
- [16] Дзензерский, В. А. Метод зарядки химических источников тока в составе фотоэлектрической установки [Текст] / В. А. Дзензерский, С. В. Плаксин, Н. Е. Житник, Л. М. Погорелая // *Електротехніка та електроенергетика*. – 2009. – № 2. – С. 73–77.

Стаття надійшла до редакції 03.04.2018

## УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСОМ ЗАРЯДКИ ЕЛЕКТРОХІМІЧНОГО НАКОПИЧУВАЧА ЕНЕРГІЇ

- ДЗЕНЗЕРСКИЙ В. О. д-р техн. наук, директор Інституту транспортних систем і технологій Національної академії наук України, Дніпро, Україна;
- ЖИТНИК М. Я. науковий співробітник Інституту транспортних систем і технологій Національної академії наук України, Дніпро, Україна;
- ПЛАКСІН С. В. д-р ф.-м. наук, зав. відділом Інституту транспортних систем і технологій Національної академії наук України, Дніпро, Україна, e-mail: svp@westa-inter.com;
- ЛІСУНОВА В. В. провідний інженер Інституту транспортних систем і технологій Національної академії наук України, Дніпро, Україна, e-mail: vvl@westa-inter.com.

**Мета роботи.** Обґрунтування імпульсного методу контролю і управління процесом зарядки електрохімічного накопичувача енергії на основі свинцево-кислотної електрохімічної системи і розробка алгоритму його реалізації.

**Методи дослідження.** Дослідження проведені з використанням імпульсного методу автоматизованого контролю поточного стану накопичувача енергії, при якому значення контрольованих і керуючих параметрів визначаються з сигналу відгуку накопичувача на тестовий імпульс струму, а управління процесом зарядки проводиться за розробленим алгоритмом з урахуванням поточного стану накопичувача.

**Отримані результати.** Розроблені метод контролю і управління процесом зарядки накопичувача і алгоритм його реалізації дозволяють скоротити час зарядки накопичувача в порівнянні з гальванопотенціостатичні способом. Інформація про динаміку процесу зарядки відображається на екрані монітора, що дозволяє в наочній формі контролювати процес зарядки накопичувача і фіксувати час його закінчення.

**Наукова новизна.** Авторами обґрунтовано імпульсний гальваностатичний метод контролю і управління процесом зарядки електрохімічного накопичувача енергії, в якому в якості контрольованих і керуючих параметрів використовуються параметри, що протікають в накопичувачі електрохімічного процесу, та відображають поточний стан накопичувача.

**Практична цінність.** Розроблено алгоритм реалізації методу контролю і управління процесом зарядки електрохімічного накопичувача енергії, який може бути використаний для забезпечення оптимального режиму зарядки накопичувачів енергії в складі автономних систем електропостачання на базі фотоелектричних установок.

**Ключові слова:** електрохімічний накопичувач енергії; сигнал відгуку; поточний стан; управління; алгоритм; процес зарядки; електрохімічний процес.

## CONTROLLING THE ELECTROCHEMICAL ENERGY STORAGE CHARGING PROCESS

- DZENZERSKY V. Professor, D. Sci., Director of the Institute of Transport Systems and Technologies of National Academy of Sciences of Ukraine, Dnieper, Ukraine;
- ZHITNIK N. Senior researcher of the Institute of Transport Systems and Technologies of National Academy of Sciences of Ukraine, Dnieper, Ukraine;
- PLAKSIN S. Dr. Sci., head of division of the Institute of Transport Systems and Technologies of National Academy of Sciences of Ukraine, Dnieper, Ukraine, e-mail: svp@westa-inter.com;
- LISUNOVA V. Leading Engineer of Institute of Transport Systems and Technologies of National Academy of Sciences of Ukraine, Dnieper, Ukraine, e-mail: vvl@westa-inter.com.

**Purpose.** Substantiation of the impulse galvanostatic method of monitoring and controlling the process of charging an electrochemical energy storage device based on a lead-acid electrochemical system, and developing an algorithm for its implementation.

**Methodology.** The investigations using the pulse method of automated monitoring the energy storage device cur-

rent state, in which the values of the informative parameters are determined from the storage response signal to the current test pulse, and the charging process is controlled according to the developed algorithm taking into account the current state of the storage device, were carried out.

**Findings.** The developed method of monitoring and controlling the process of storage charging and the algorithm for its implementation allow to reduce the storage charging time in comparison with the galvanopotentiostatic method. Information about the dynamics of the charging process is displayed on the monitor screen, which allows visually monitoring the storage charging process and record the completion time.

**Originality.** The authors substantiate the impulse galvanostatic method of monitoring and controlling an electrochemical energy storage device charging process, in which the parameters of the electrochemical process in the storage reflecting its current state are used as informative parameters for the charging process.

**Practical value.** An algorithm for the implementation of a method for monitoring and controlling the process of an electrochemical energy storage device charging, which can be used to provide an optimal charging regime for energy storage devices in autonomous photovoltaic power supply systems has been developed.

**Keywords:** electrochemical energy storage; response signal; current state; control; algorithm; charging process; electrochemical process.

## REFERENCES

- [1] Gruzdev, A. I. (2008). Osnovnye tendencii i napravlenija razvitiya avtonomnoj jelektrojenergetiki Ch. II., *Jelektrichestvo*, 10, 2 – 11. [in Russian].
- [2] Kamenev, Ju. B., Chunc, N. I. (2005). Rezhim zarjada germetizirovannyh cikliruemyh svincovo – kislotnyh akkumuljatorov, (№ 4). *Jelektrohimicheskaja jenergetika*, 4, 226 – 273. [in Russian].
- [3] Taganova, A. A., Bubnov, Ju. I., Orlov, S. B. (2005). Germetichnye himicheskie istochniki toka, M, Himizdat, 262.
- [4] Kamenev, Ju. B., Lushina, M. V., Vasina, I. A. (2008). Rabota svincovo-kislotnogo akkumuljatora v uslovijah postojannogo nedozarjada, *Jelektrohimicheskaja jenergetika*, 8, 3, 146 – 151. [in Russian].
- [5] Aguf, I. A., Dasojan, M. A., Lyzlov, N. Ju. (1984). Konstrukcija i uslovija jekspluatacii germetichnogo svincovogo akkumuljatora, M, Informjelektro, 2, 6 – 29.
- [6] Koshel', M. D. (2002). Teoretichni osnovi elektrohimichnoї energetiki, Pidručnik. Dnipropetrovs'k, UDHTU, 430.
- [7] Gindelis, Ja. E. (1984). Himicheskie istochniki toka. Saratov, Saratovskogo universiteta, 174.
- [8] Kamenev, Ju. B., Shtompel', G. A., Chunc, N. I. (2012). Uskorennyj metod zarjada svincovo-kislotnogo akkumuljatora 1. Gal'vanostatičeskij jetap zarjada, *Jelektrohimicheskaja jenergetika*, 12, 2, 64–71. [in Russian]
- [9] Dzenzerskij, V. A., Zhitnik, N. E., Plaksin, S. V. Sokolovskij, I. I. (2005). Kontrol' sostojanija starternyh svincovyh akkumuljatorov hronopotenciometričeskim metodom, *Electrical Engineering And Power Engineering*, 1, 13 – 18.
- [10] Kamenev, Ju. B., Shtompel', G. A., Skachkov, Ju. V. (2013). 1. Uskorennyj metod zarjada svincovo-kislotnogo akkumuljatora 2. Gal'vanostatičeskij zarjad. *Jelektrohimicheskaja jenergetika*, 13, 2, 70 – 76. [in Russian]
- [11] Podrazhanskij, Ju. M. (2000). Ispol'zovanie impul'snyh rezhimov zarjada dlja povyšeniya jekspluacionnyh parametrov akkumuljatorov, avtoref. dis. kand. tehn. nauk, 05.17.03. D, Ukraïnskij gos. himiko-tehnologičeskij un-t, 17.
- [12] Volkivskij, V. B. (2007). Napivprovodnikovij peretvorjuvachi z pidvishhenomu efektivnistju zarjadu akkumuljatoriv impul'snimi asimetričnimi strumami: dis. kand. tehn. nauk, 05.09.12, Nacional'nij tehničnij un-t Ukraïni «Kiïvs'kij politehničnij in-t», 163.
- [13] Kamenev, Ju. B., Shtompel', G. A. (2013). Uskorennyj metod zarjada svincovo-kislotnogo akkumuljatora 3. Impul'snyj zarjad, *Jelektrohimicheskaja jenergetika*, 13, 2, 77 – 82. [in Russian]
- [14] Dzenzersky, V., Zhitnik, N., Plaksin, S., & Lisunova, V. (2017). Development of the algorithm of automated control of electrochemical energy storage devices. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 1, 39-47. doi: <http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2017-1-6>
- [15] Plaksin, S. V., Zhitnik, N. E., Shirman, O. I. (2012). Jeksperimental'nyj stend dlja avtomatizirovannogo kontrolja sostojanija himičeskijh istočnikov toka impul'snym metodom, *Girniča elektromehanika ta avtomatika*, 89, 58 – 63.
- [16] Dzenzersky, V., Plaksin, S., Zhitnik, N., & Pogorelaya, L. (2009). Method of charging chemical sources of current in the composition of photoelectric installation. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 2, 73 – 77.