

6. Сопов В.И. Способы повышения эффективности использования энергии электрического торможения подвижного состава // Онлайн Электрик: Электроэнергетика. Новые технологии, 2012. – URL:<http://www.online-electric.ru/articles.php?id=43>.
7. Шевлюгин М.В. Ресурсо- и энергосберегающие технологии на железнодорожном транспорте и метрополитенах, реализуемые с использованием накопителей энергии: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / М.В. Шевлюгин; МГУПС. – Москва, 2014. – 49 с.
8. Сулим А.А., Сичев С.Д., Распопин В.Р. Экономия электроэнергии при использовании рекуперативного торможения на вагонах метрополитена / А.А. Сулим, С.Д. Сичев, В.Р. Распопин. – Материалы X междунаучной конференции молодых ученых и специалистов «Электромеханические и энергетические системы, методы моделирования и оптимизации». КНУ им. М. Остроградского. – Кременчуг, 2012. – С. 344.
9. Саблин О. И. Анализ качества рекуперированной электроэнергии в системе электрического транспорта / О. И. Саблин // Вестник НТУ «ХПИ». – Харьков, 2013. – Вып. 38. – С. 186-189.
10. Саблін О.І. Дослідження ефективності процесу рекуперації електроенергії в умовах метрополітену / О.І. Саблін // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2014. – № 6/8 (72). – С. 9-13.
11. Szelağ A., Maciołek T., Drajek Z., Patoka M. Aspekty efektywności i energooszczędności w procesie modernizacji układów zasilania trakcji tramwajowej // Pojazdy szynowe. Kwartalnik naukowo-techniczny poświęcony zagadnieniom konstrukcji, budowy i badań taboru szynowego. № 3, 2011. P.34-42.
12. Кузнецов В. Г., Калашников К.А. Разработка научных принципов уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети постоянного тока путем регулирования транспортного потока / В. Г. Кузнецов, К.А. Калашников // Электрификация транспорта. – 2014. – № 8. – С. 104-109.

*Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Мухомою А.М.*

УДК 541.136

*Н.Е. Житник, С.В. Плаксин, д-р физ.-мат. наук, О.И. Ширман*

*(Украина, г.Днепропетровск, Институт транспортных систем и технологий НАН Украины «Трансмаг»)*

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЗАРЯДНОГО ТОКА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИМИ НАКОПИТЕЛЯМИ ЭНЕРГИИ В СОЛНЕЧНЫХ ЭНЕРГОУСТАНОВКАХ**

***Анотація.** Представлено результати дослідження впливу постійного магнітного поля певної структури на параметри електрохімічного процесу у свинцево-кислотних акумуляторах. Показано можливість використання виникаючих в акумуляторі магнітогідродинамічних явищ для підвищення ефективності використання зарядного струму електрохімічними накопичувачами енергії на основі свинцево-кислотних акумуляторних батарей.*

***Ключові слова:** свинцево-кислотна акумуляторна батарея, електрохімічний процес, поляризаційний опір, магнітне поле, магнітофорез, сила Лоренца.*

***Аннотация.** Представлены результаты исследования влияния постоянного магнитного поля определенной структуры на параметры электрохимического процесса в свинцево-кислотных аккумуляторах. Показана возможность использования возникающих в аккумуляторе магнитогидродинамических явлений для повышения эффективности использования зарядного тока электрохимическими накопителями энергии на основе свинцево-кислотных аккумуляторных батарей.*

***Ключевые слова:** свинцево-кислотная аккумуляторная батарея, электрохимический процесс, поляризационное сопротивление, магнитное поле, магнитофорез, сила Лоренца.*

***Abstract.** The investigation results on the influence of constant magnetic field with the specific structure on the lead-acid batteries electrochemical processes are presented. It's shown the possibility for using the MHD phenomena which occurs in the lead-acid battery for more effective charge current using by electrochemical energy storage on the base of these batteries.*

***Keywords:** lead-acid battery, electrochemical process, polarization resistance, magnetic field, magnetophoresis, Lorentz force.*

### **Введение.**

Возобновляемые источники энергии все более широко используются в благоприятных для этого регионах, как в сетевой, так и в автономной энергетике, что позволяет снизить зависимость от органических источников энергии и повысить надежность энергоснабжения особо важных и отдаленных объектов.

Особенностью использования солнечной энергии являются суточные и сезонные неравномерности генерации электроэнергии, поэтому энергоустановки на базе фотоэлектрических преобразователей должны снабжаться системами аккумулирования энергии при высоком уровне солнечной радиации с отдачей её потребителю при недостаточном уровне радиации.

В настоящее время наряду с использованием аккумулирующих систем с применением электрохимических накопителей на основе литий-ионных и свинцово-кислотных аккумуляторных батарей (АБ) ведутся работы по созданию новых накопителей энергии на основе водородного цикла, проточных ванадиевых редокс-батарей, топливных элементов и др. Авторы работы [1] провели расчетно-аналитическую оценку различных типов накопителей электроэнергии, а также сравнение различных технологий её аккумулирования. Приведенные в [1] результаты оценок показали, что для длительного хранения в установках на базе возобновляемых источников наиболее перспективными являются две системы: проточные редокс-батарей и водородный цикл. Вместе с тем обе эти системы имеют серьезные недостатки, затрудняющие практическую реализацию этих технологий – низкая эффективность использования первичной энергии для водородного цикла и низкие массогабаритные показатели для проточных накопителей.

В связи с этим актуальной является задача совершенствования существующих технологий аккумулирования энергии с использованием электрохимических накопителей на основе литий-ионных и свинцово-кислотных аккумуляторных батарей для их практического применения в ближайшей перспективе. При этом должное внимание необходимо уделить накопителям на основе свинцово-кислотных аккумуляторных батарей, которые существенно выигрывают по сравнению с литий-ионными по ценовым показателям и хорошо отработанной унифицированной технологией производства.

Накопители на основе свинцово-кислотных аккумуляторных батарей могут успешно применяться в стационарных электроустановках на базе фотоэлектрических преобразователей, в которых нет ограничения на массогабаритные показатели, однако следует отметить, что наряду с указанными преимуществами свинцово-кислотные аккумуляторные батареи имеют существенный недостаток, заключающийся в длительном времени зарядки, составляющем около 16 – 20 часов.

По данным авторов работы [2] для зарядки свинцово-кислотной аккумуляторной батареи до уровня 80 % заряженности требуется около 3-х часов, а для достижения 100 % уровня заряженности необходимо еще около 17 часов. Такая продолжительность зарядки на второй стадии, т.е. от 80 % до 100 % уровня, объясняется спецификой поведения электрохимической системы, которая характеризуется снижением коэффициента использования зарядного тока, вследствие повышения поляризационного сопротивления.

Указанная особенность свинцово-кислотных аккумуляторов не позволяет в полной мере использовать энергию солнечной батареи при их зарядке. Особенно остро встает вопрос эффективного использования энергии солнечной батареи при неблагоприятных условиях ее работы.

**Цель работы** – исследование возможности повышения эффективности использования зарядного тока электрохимическими накопителями энергии путем воздействия на них магнитным полем.

### Экспериментальные результаты и их краткое теоретическое обоснование.

Химический источник тока представляет собой сложную электрохимическую систему, в которой протекают электрохимические реакции, в совокупности представляющие электрохимический процесс.

Скорость протекания электрохимических реакций в общем случае определяется изменением концентрации реагирующих веществ во времени

$$v = -\frac{dC}{dt} = -\frac{1}{V} \cdot \frac{dN}{dt}, \quad (1)$$

где  $C$ ,  $N$ ,  $V$  – концентрация, количество реагирующих частиц и объем соответственно.

Физической мерой скорости реакции является плотность электрического тока.

Скорость электрохимического процесса определяется прохождением трех стадий: - перенос ионов или электронов к поверхности электрода; - электрохимические реакции; - удаление от поверхности электрода в электролит продуктов электрохимических реакций.

Первую и третью стадии называют диффузионной стадией процесса, которая определяет суммарную скорость электрохимической реакции. Ускорению диффузионной стадии способствует энергичное перемешивание электролита, за счет чего снижается диффузионное сопротивление электрохимической системы. В отсутствие принудительного перемешивания концентрация электролита изменяется естественной конвекцией, вызванной неравномерным распределением теплоты реакции.

Следовательно, одним из параметров электрохимического процесса, посредством которого можно управлять плотностью зарядного тока, является скорость протекания электрохимических реакций.

Основными факторами электрохимической природы, ограничивающими скорость зарядки АБ и влияющими на энергозатраты, являются:

- конечное значение плотности тока, ограниченное количеством реагирующих частиц и скоростью их диффузии, как это следует из (1);

- наличие на границе электрод-электролит двойного электрического слоя (ДЭС), представляющего собой ионный барьер для носителей заряда и требующего дополнительных энергозатрат на его преодоление;

- явление концентрационной поляризации, связанное с сопротивлением диффузионного слоя в приэлектродной области и вызвано неравномерностью распределения ионов в объеме электролита.

Ослабить влияние вышеперечисленных факторов на скорость протекания электрохимического процесса в АБ и, в конечном итоге, на скорость его зарядки можно путем воздействия на процесс внешними физическими факторами, в частности магнитным полем.

Нами проведены экспериментальные исследования эффектов воздействия постоянного магнитного поля на электрохимический процесс в свинцово-кислотных аккумуляторах и предложено теоретическое обоснование механизмов воздействия, основанное на физических представлениях об эффектах влияния магнитного поля на движущиеся электрические заряды [3], в нашем случае на ионы в объеме электролита, которое изложено ниже.

При совместном воздействии на ионы электрического и магнитного полей в объеме электролита возникают магнитогидродинамические явления, вызывающие эффекты магнитофореза и силу Лоренца  $F_L$ . При этом действующая на ионы результирующая сила описывается векторным уравнением

$$F_L = g \cdot (\bar{E} + [\bar{v} \times \bar{B}]), \quad (2)$$

где  $g$  – заряд иона,  $\bar{E}$  – вектор напряженности электрического поля,  $\bar{B}$  – вектор индукции магнитного поля,  $\bar{v}$  – вектор скорости движения иона.

Применительно к электрохимической системе скорость движения ионов в электролите определяется из соотношения

$$v = K \cdot g \cdot E,$$

где  $K$  – коэффициент затухания скорости движения ионов в жидкости, связанный с коэффициентом диффузии соотношением

$$K = \frac{D}{kT},$$

где  $D$  – коэффициент диффузии равен количеству вещества, проходящему через сечение в  $1 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup> в секунду при разности концентраций  $\Delta C$  равной единице,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – абсолютная температура.

После соответствующих преобразований выражение для силы Лоренца (2), действующей на ионы в электролите, принимает вид

$$F_L = \frac{g^2}{k \cdot T \cdot c} \cdot D \cdot B \cdot E$$

где  $c$  – скорость света, откуда прослеживается прямая связь силы Лоренца с коэффициентом диффузии и скоростью электрохимической реакции в соответствии с (1).

Под действием силы Лоренца заряды совершают движение по винтовой траектории с радиусом окружности

$$R = \frac{v \cdot T}{2\pi} = \frac{m \cdot v_{\perp}}{[g \cdot B]} \quad (3)$$

и с шагом

$$h = v_{\parallel} \cdot T, \quad (4)$$

где  $m$  – масса заряда,  $T$  – период вращения,  $v_{\perp} = v \cdot \sin \alpha$  – скорость заряда перпендикулярно направлению силы Лоренца,  $v_{\parallel} = v \cdot \cos \alpha$  – скорость заряда параллельно направлению силы Лоренца,  $\alpha$  – угол между вектором движения заряда и вектором индукции магнитного поля.

Основной вывод из теоретических обоснований можно сформулировать следующим образом. При воздействии магнитного поля на ионы в электролите аккумулятора возникает магнитофорез, вызывающий дрейф ионов в область повышенной индукции магнитного поля, вследствие чего происходит дополнительный, по отношению к естественному, массоперенос участников электрохимической реакции и конвективное движение ионов, то есть возникает явление магнетоконвекции без затрат дополнительной энергии внешнего источника тока, т.е. энергии солнечной батареи. Дрейф ионов нарушает структуру двойного электрического слоя на границе раздела электролит-электрод, облегчая его преодоление зарядами при включении зарядного тока, а также понижает внутреннее активное сопротивление и сопротивление электрохимической поляризации за счет дополнительного массо- и электропереноса в области протекания электрохимических реакций.

После включения зарядного тока явление магнетоконвекции усиливается силой Лоренца, воздействующей на движущиеся ионы при условии взаимно-перпендикулярной ориентации векторов скорости ионов, то есть направления электрического тока в аккумуляторе, и вектора магнитной индукции (2).

Под действием силы Лоренца траектория движения ионов изменяется с упорядоченно прямолинейной на винтовую с определенным радиусом (4) и шагом (5), что приводит к принудительному перемешиванию ионов и выравниванию их концентрации в порах активных масс электродов и в межэлектродном объеме, а также к увеличению общей площади реагирующей поверхности активных масс.

Ожидаемыми признаками проявления совокупного воздействия указанных эффектов на ионы в объеме электролита, выраженными через параметры электрохимического процесса, могут быть снижение активного внутреннего сопротивления аккумулятора вследствие облегчения преодоления ионами сопротивления двойного электрического слоя на границе раздела электрод-электролит за счет эффекта магнитофореза и снижения диффузионного сопротивления в результате выравнивания концентрации ионов в объеме электролита при их перемешивании под действием силы Лоренца, а также увеличение площади реагирующей поверхности порового пространства активных масс в связи с изменением траектории движения ионов.

Приведенное теоретическое обоснование подтверждает возможность использования эффектов воздействия магнитного поля на ионы в объеме электролита в качестве механизмов управления электрохимическим процессом с целью повышения эффективности использования зарядного тока электрохимическими накопителями энергии на основе свинцово-кислотных аккумуляторных батарей.

Экспериментальные исследования проявления эффектов воздействия магнитного поля на протекание электрохимического процесса проводились с применением импульсного гальваностатического метода [4], реализованного в стенде для автоматизированного контроля состояния химических источников тока [5]. Для этих целей стенд дополнительно укомплектован магнитной системой (см. рис. 1).

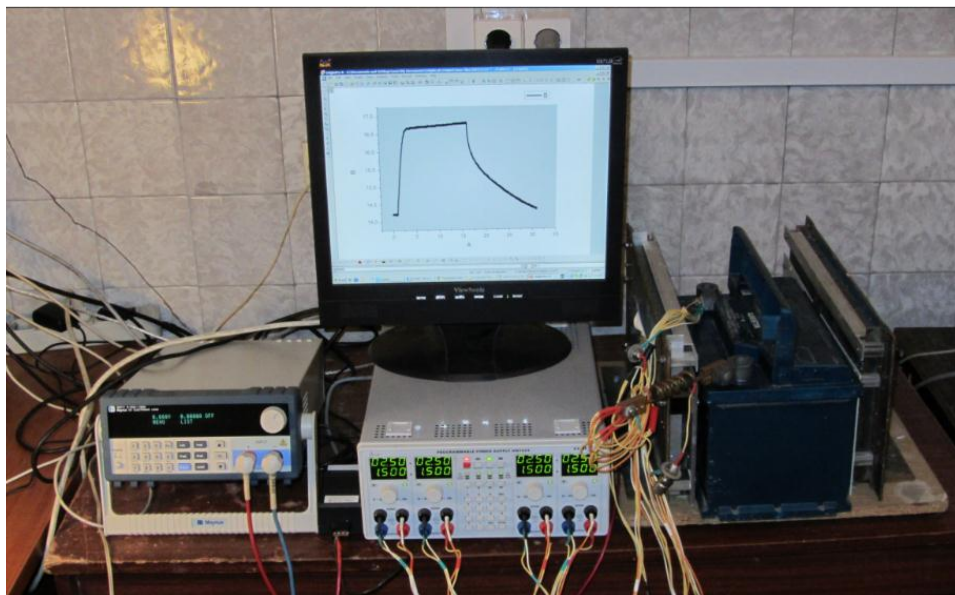


Рис. 1 Экспериментальный стенд для автоматизированного контроля состояния электрохимических накопителей энергии импульсным методом (магнитная система справа)

Основу магнитной системы составляют постоянные магниты прямоугольной формы, расположенные в определенной комбинации на ферромагнитных панелях. Расчет требуемой величины индукции магнитного поля проводился, исходя из сведений, что для получения эффекта активации водных сред

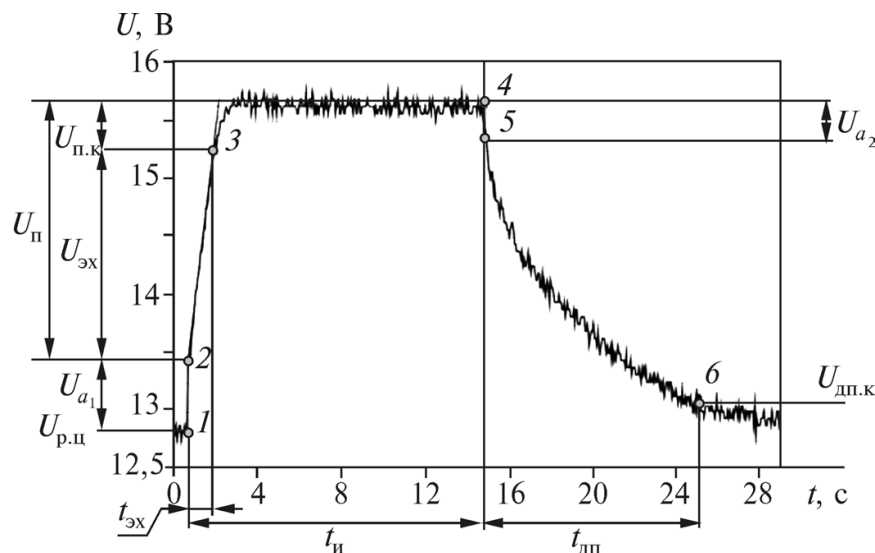
индукция воздействующего магнитного поля должна иметь величину не менее 20 мТл. Было определено минимальное значение величины магнитной индукции на поверхности постоянных магнитов величиной 200 – 300 мТл, позволяющее получить величину магнитной индукции в центре пространства расположения АБ не менее 20 мТл.

Суть метода исследований заключается в подаче на АБ тестового зарядного импульса с заданными значениями амплитуды и длительности и регистрации сигнала отклика АБ на тестовый импульс в виде функциональной зависимости величины напряжения на его клеммах от времени. Разработанные методы обработки сигнала отклика [4] позволяют получить информацию о параметрах электрохимического процесса, а также о его кинетике, включающей отмеченную выше закономерную последовательность стадий протекания процесса и представленную в более подробном рассмотрении, а именно: падение напряжения на внутреннем активном сопротивлении источника в момент подачи на него импульса, стадию электрохимической поляризации, стадию концентрационной поляризации, падение напряжения на активном внутреннем сопротивлении в момент снятия импульса и стадию деполяризации, или разряда псевдоемкости электрохимической системы после снятия импульса.

При этом падение напряжения на внутреннем активном сопротивлении носит название резистивной поляризации, электрохимическая поляризация вызвана преодолением зарядами сопротивления двойного электрического слоя и активизацией электрохимических реакций при подаче зарядного импульса, а концентрационная поляризация, вызванная диффузионным сопротивлением, возникает по причине торможения переноса продуктов реакции в приэлектродном диффузионном слое, в результате чего их концентрация в поровом пространстве активных масс электродов отличается от концентрации в межэлектродном объеме электролита.

Типичная форма сигнала отклика АБ на зарядный импульс приведена на рис.2, где обозначены параметры процесса:  $U_{a1}$  и  $U_{a2}$  – падение напряжения на активном сопротивлении в момент подачи и снятия импульса соответственно,  $U_{эx}$  – напряжение электрохимической стадии поляризации,  $U_{к}$  – напряжение концентрационной стадии поляризации,  $U_{н}$  – суммарное напряжение поляризации,  $U_{дп.к.}$  – напряжение деполяризации после снятия импульса,  $t_{эx}$  – время протекания электрохимической стадии поляризации, а цифрами обозначены участки сигнала отклика, соответствующие стадиям протекания электрохимического процесса.

Указанные параметры в совокупности дают достаточно полную информацию о динамике электрохимического процесса при воздействии на АБ внешними физическими факторами, в частности магнитным полем. Эффекты воздействия определялись путем сравнения значений параметров процесса при помещении АБ в магнитное поле и вне его.



**Рис. 2 Типичная форма сигнала отклика аккумуляторной батареи на зарядный импульс тока**

При сравнительной оценке значений параметров процесса во внимание принимались следующие признаки проявления ожидаемых эффектов воздействия магнитного поля на электрохимический процесс, которые находят физическое объяснение:

- изменения величины крутизны  $K$  электрохимической составляющей  $U_{эx}$  поляризации, которая характеризует скорость протекания электрохимических реакций при прохождении потока зарядов через

## Энергозбереження та енергоефективність

двойной электрический слой в его плотной части и определяется как отношение величины падения напряжения  $U_{\text{эx}}$  к времени протекания  $t_{\text{эx}}$  электрохимической стадии:

$$K = \frac{U_{\text{эx}}}{t_{\text{эx}}}$$

- уменьшения активного сопротивления АБ, наблюдаемые соответствующими уменьшениями значений  $U_{a1}$  и  $U_{a2}$ , что вызвано увеличением площади реагирующей поверхности порового пространства активных масс электродов за счет изменения траектории движения зарядов под действием силы Лоренца, а также за счет активизации процессов массо- и электропереноса в электролите, вызванной эффектом магнитофореза.

- понижение величины напряжения концентрационной составляющей поляризации  $U_K$  за счет перемешивания зарядов в электролите под действием силы Лоренца и выравнивания их концентрации в поровом пространстве активных масс электродов и в межэлектродном объеме электролита.

- площадь фигуры  $S$  под линией спада напряжения (деполяризации) после снятия зарядного импульса, величина которой пропорциональна части энергии, накопленной аккумулятором за время действия зарядного импульса и отображает скорость саморазряда аккумулятора

В качестве примера в таблице 1 приведены значения параметров процесса в опытных образцах аккумуляторных батарей без воздействия магнитного поля (а) и при воздействии (б), а в таблице 2 приведено их сравнение в процентном выражении, где отрицательные значения указывают на уменьшение величины соответствующего параметра в результате воздействия магнитного поля.

Таблица 1.

**Параметры электрохимического процесса опытных образцов АБ без воздействия магнитным полем (а) и с воздействием (б)**

Тип батареи (торговая марка)		$U_{a1}, (В)$	$U_{ex}, (В)$	$t_{ex}, (с)$	$K=U_{ex}/t_{ex},$ (В/с)	$U_K, (В)$	$U_{a2}, (В)$	$S$
6СТ-60 (Forse)	(а)	0,560	1,9375	1,300	1,490	0,313	0,313	10,488
	(б)	0,490	1,9275	1,250	1,542	0,288	0,293	10,738
6СТ-65 (Ве- ста)	(а)	0,660	1,4300	0,900	1,589	1,254	0,323	8,713
	(б)	0,563	1,4375	0,700	2,054	0,861	0,272	8,941
6СТ-55 (Fire ball)	(а)	0,595	0,869	1,078	0,806	0,273	0,327	4,863
	(б)	0,532	1,085	1,084	1,001	0,208	0,254	5,841

Таблица 2.

**Сравнительная оценка параметров опытных образцов АБ**

Тип батареи (торговая марка)	$\Delta U_{a1}, \%$	$\Delta K, \%$	$\Delta U_K, \%$	$\Delta U_{a2}, \%$	$\Delta S, \%$
6СТ-60 (Forse)	-12,500	3,463	-8,00	-6,400	2,384
6СТ-65 (Ве- ста)	-14,772	29,246	-31,34	-15,814	2,617
6СТ-55 (Fire ball)	-10,588	24,165	-23,81	-22,324	20,111

Данные таблицы 2 наглядно отражают признаки проявления эффектов воздействия магнитного поля на параметры электрохимического процесса, а именно:

- уменьшение величины падения напряжения  $\Delta U_{a1}$  и  $\Delta U_{a2}$ , соответствующие уменьшению активного сопротивления АБ, основной вклад в которое вносит сопротивление электролита;
- увеличение величины крутизны  $\Delta K$  электрохимической стадии поляризации  $U_{\text{эx}}$ ;
- уменьшение величины напряжения концентрационной поляризации  $\Delta U_K$ , соответствующее уменьшению диффузионного сопротивления;
- увеличение площади фигуры  $S$ .

Приведенные результаты сравнительной оценки являются доказательством возникновения в АБ магнитогидродинамических явлений, способствующих повышению эффективности использования зарядного тока электрохимическими накопителями энергии.

**Выводы.**

Таким образом, результаты экспериментальных исследований воздействия магнитного поля на свинцово-кислотные батареи подтвердили возникновение эффектов магнитофореза и силы Лоренца и их влияние на кинетику протекающего в аккумуляторной батарее электрохимического процесса, что позволяет использовать их в качестве механизмов повышения эффективности использования зарядного тока электрохимическим накопителем энергии на основе свинцово-кислотных аккумуляторных батарей в электроустановках на базе фотоэлектрических преобразователей, а также позволит ускорить процесс зарядки батарей.

**Список литературы**

1. Михайлин С.В. Решения для длительного хранения энергии, выработанной солнечными энергоустановками [Текст] / С.В. Михайлин, И.Т. Пар, О.С. Попель, А.Б. Усанов, А.Б. Тарасенко, В.Ф. Титов // Автономная энергетика: технический прогресс и экономика. – 2014. – №33. – С.36–45.
2. 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.
3. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Электричество [Текст] / Д.В. Сивухин. – М.: Изд-во МФТИ, 2004. – 656 с.
4. Дзензерский В.А. Контроль состояния химических источников тока [Текст] / В.А. Дзензерский, С.В. Плаксин, Н.Е. Житник, О.И. Ширман. – К.: Наукова думка, 2014. – 132 с.
5. Плаксин, С.В. Экспериментальный стенд для автоматизированного контроля состояния химических источников тока импульсным методом [Текст] / С.В. Плаксин, Н.Е. Житник, О.И. Ширман // Горная электромеханика и автоматика. – 2012. – №89, – С. 58–63.

*Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Шкрабцем Ф.П.*