

# ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ

УДК 621.311.25: 621.311.29

**Н. Е. Житник, Р. Ю. Левченко, С. В. Плаксин, д-р физ.-мат. наук**  
(Украина, Днепр, Институт транспортных систем и технологий НАН Украины)

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОТБОРА ЭНЕРГИИ СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ ДЛЯ ЗАРЯДКИ НАКОПИТЕЛЯ ПРИ НИЗКИХ УРОВНЯХ ОСВЕЩЕННОСТИ

**Анотація** Робота присвячена імітаційному моделюванню процесу відбору низькопотенційної енергії фотоелектричних перетворювачів з метою більш раціонального використання сонячної енергії. На основі запатентованого методу авторами розроблена імітаційна модель процесу зарядки накопичувача в середовищі Matlab/Simulink. Отримані результати підтверджують адекватність моделі. Верифікація моделі проведена з використанням параметрів серійно виробляемого фотоелектричного модуля PSM4 150W, який складається з 72 сонячних елементів.

**Ключові слова:** фотоелектричний модуль, низькопотенційна енергія, зарядка накопичувача, імітаційна модель, Matlab/Simulink.

**Аннотация** Работа посвящена имитационному моделированию процесса отбора низкопотенциальной энергии фотоэлектрических преобразователей с целью более рационального использования солнечной энергии. На основе запатентованного метода авторами разработана имитационная модель процесса зарядки накопителя в среде Matlab/Simulink. Полученные результаты подтверждают адекватность модели. Верификация модели проведена с использованием параметров серийно выпускаемого фотоэлектрического модуля PSM4 150W, состоящего из 72 солнечных элементов.

**Ключевые слова:** фотоэлектрический модуль, низкопотенциальная энергия, зарядка накопителя, имитационная модель, Matlab/Simulink.

**Abstract** This work is devoted to the simulation modeling of low potential energy photoelectric converters take process for the purpose of more rational use of solar energy. Based on the patented method, the authors developed a simulation model of the storage charging process in Matlab/Simulink. The results obtained confirm the adequacy of the model. The model verification carried out using parameters of commercially available photovoltaic module PSM4 150W, consisting of 72 solar cells.

**Keywords:** photovoltaic module, low-potential energy, storage charging, simulation model, Matlab/Simulink.

### Введение

Вследствие присущей фотоэлектрическим установкам (ФЭУ) нестабильности уровня генерируемой энергии возникает необходимость в ее накоплении для энергоснабжения потребителей в периоды неблагоприятных условий работы ФЭУ, когда выработка электроэнергии снижается ниже допустимого уровня. В свою очередь, входящие в состав ФЭУ накопители энергии на основе химических источников тока (ХИТ) нуждаются в восполнении израсходованной в эти периоды энергии.

Известно [1], что современные ФЭУ способны функционировать при суммарной интенсивности освещенности величиной от 10 Вт/м<sup>2</sup>, в то время как зарядка накопителей традиционными методами возможна при интенсивности солнечного излучения величиной от 100 Вт/м<sup>2</sup>. Следовательно, энергия солнечной батареи, выработанная в интервале солнечной интенсивности от 10 Вт/м<sup>2</sup> до 100 Вт/м<sup>2</sup>, не может быть использована для зарядки входящего в состав ФЭУ накопителя. В связи с этим актуальной задачей на современном этапе развития солнечной энергетики является рациональное использование выработанной солнечной батареей энергии в широком диапазоне освещенности. Авторами [2] разработан метод зарядки накопителя энергией солнечной батареи в неблагоприятных условиях ее работы. Метод основан на порционном отборе энергии солнечных элементов батареи промежуточными накопителями на основе суперконденсаторов малой емкости с последующим ее суммированием и передачей на накопительный суперконденсатор до необходимого уровня энергии зарядного импульса накопителя. Теперь, для имплементации запатентованного метода назрела необходимость в его детальной проработке, что удобно сделать путём имитационного моделирования процесса отбора энергии солнечной батареи для

энергетической оценки возможности зарядки накопителя в условиях низкой освещенности солнечной батареи.

**Цель работы**

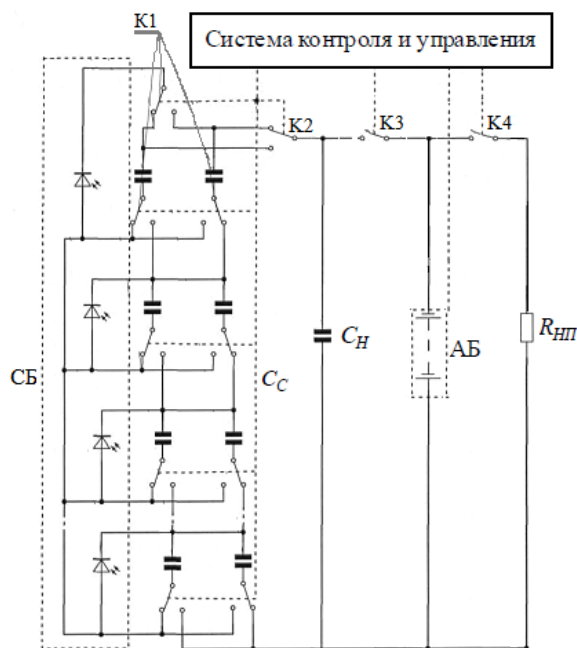
Повышение эффективности использования энергии солнечной батареи.

**Постановка задачи**

Разработать имитационную модель процесса отбора энергии солнечной батареи для энергетической оценки возможности зарядки накопителя в условиях низкой освещенности солнечной батареи и определить время зарядки накопителя в зависимости от уровня освещенности.

**Основная часть**

При разработке имитационной модели отбора энергии солнечной батареи использовали устройство [3], реализующее метод зарядки накопителей в составе ФЭУ [2]. Функционально-структурная схема устройства представлена на рис. 1.



**Рис. 1. Блок-схема устройства для отбора энергии солнечной батареи для зарядки накопителя**

В кратком изложении принцип работы устройства заключается в следующем. Для отбора энергии от солнечной батареи каждый суперконденсатор блока  $C_C$  соединяют с каждым элементом солнечной батареи (СБ), накапливают энергию каждого элемента солнечной батареи в каждом суперконденсаторе путем зарядки током  $I_{3C}$  в течение времени  $t_{3C}$  до получения на нем необходимого уровня напряжения.

Допустимые значения параметров суперконденсаторов в зависимости от текущих параметров солнечных элементов определяются из выражения:

$$U_{C_C} = \frac{1}{C_C} \int_0^{t_{3C}} i_{СБ}(t) dt = \frac{I_{3C}}{C_C} \cdot t_{3C}, \tag{1}$$

где  $C_C \geq \frac{I_{K3max} \cdot \tau_{Bmax}}{0,03 U_{xx}}$  – емкость суперконденсаторов, подключенных к солнечной батарее;  $I_{K3max}$  – ток короткого замыкания солнечной батареи при максимальном уровне освещенности;  $\tau_{Bmax}$  – максимальная длительность включенного состояния конденсатора, или время его заряда;  $U_{xx}$  – напряжение холостого хода солнечной батареи;  $i_{СБ}$  – текущее значение тока солнечной батареи;  $t_{3C}$  – время зарядки суперконденсаторов;  $I_{3C}$  – постоянный ток зарядки суперконденсаторов.

Затем перемещают накопленную в суперконденсаторах электрическую энергию в накопительный конденсатор  $C_H$  путем подключения к нему коммутатором K1 отключенных от солнечных элементов и последовательно соединенных суперконденсаторов каждого элемента солнечной батареи. При этом от-

бор энергии от солнечной батареи и передача ее в накопительный конденсатор осуществляется до тех пор, пока накопленная в нем энергия достигнет уровня, достаточного для формирования одного зарядного импульса накопителя, равного:

$$W_3 = \frac{1}{2} C_H \cdot U_{C_H}^2, \quad (2)$$

где  $C_H$  – емкость накопительного конденсатора;  $U_{C_H}$  – напряжение на конденсаторе  $C_H$ , которое удовлетворяет условию  $U_{C_H} > U_{AB}$ ;  $U_{AB}$  – напряжение аккумуляторной батареи.

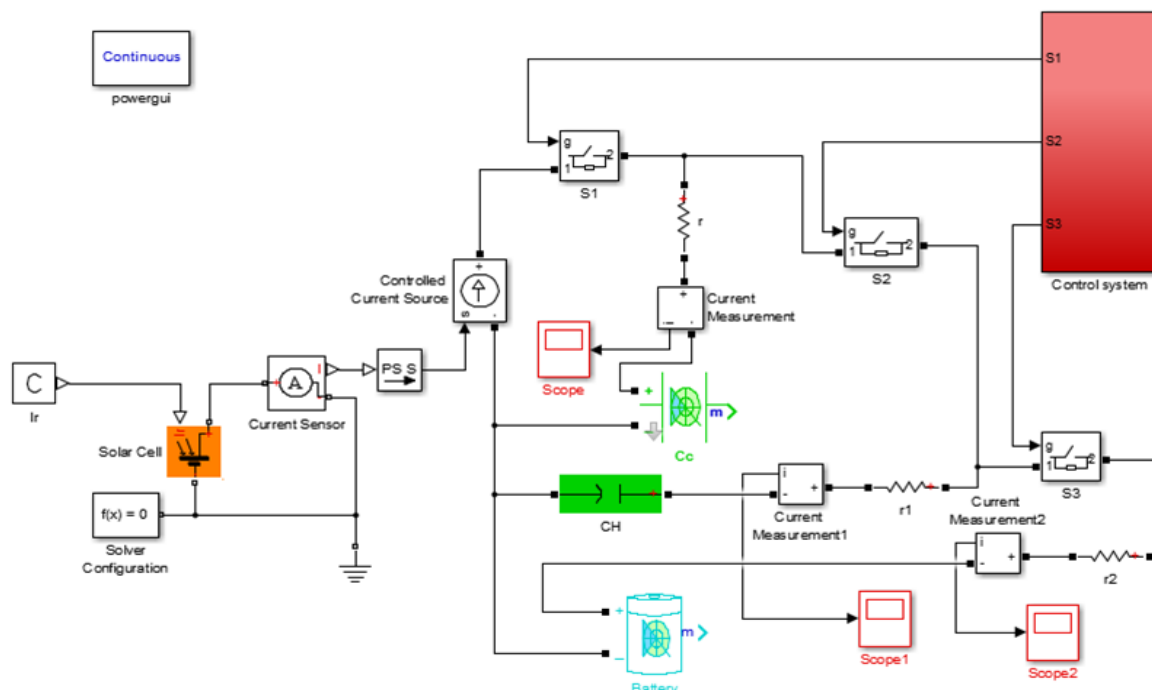
После выполнения условия  $U_{C_H} > U_{AB}$ , ключ К2 размыкается и замыкается ключ К3. Энергия  $W_3$  передается от накопительного конденсатора аккумуляторной батарее импульсами тока амплитудой  $I_3 = \frac{U_{C_H}}{R_{AB}}$  и продолжительностью  $t_3 = R_{AB} C_H \ln \frac{U_{C_H}}{U_{AB}}$  до достижения уровня полной заряженности аккумуляторной батареи (АБ) с сопротивлением  $R_{AB}$ . При условии допустимого уровня разряженности аккумуляторной батареи, равном 40 %, необходимое для полной зарядки аккумуляторной батареи количество импульсов определяется из выражения:

$$N = \frac{\Delta W_{AB}}{W_i}, \quad (3)$$

где  $\Delta W_{AB}$  – энергия, которую необходимо подать на аккумуляторную батарею для полной зарядки;  $W_i$  – энергия зарядного импульса.

При достижении аккумуляторной батареей уровня полной заряженности по сигналу системы контроля и управления ключ К3 размыкается, замыкается ключ К4 и заряженная аккумуляторная батарея подключается к нагрузке  $R_{HP}$ .

Для проверки возможности зарядки накопителя энергией солнечной батареи в диапазоне интенсивностей освещенности от 10 Вт/м<sup>2</sup> до 100 Вт/м<sup>2</sup> и определения зависимости времени зарядки накопителя от уровня освещенности необходимо определить соответствующие этим уровням параметры промежуточных накопителей  $C$  и  $C_H$ , исходя из выражений (1) и (2). Для решения этой задачи была создана приведенная на рис. 2 имитационная модель процесса отбора энергии от солнечной батареи с помощью программного продукта Matlab/Simulink и с использованием компонентов библиотеки Simscape [4].



**Рис. 2. Модель процесса отбора энергии в Matlab/Simulink**

Имитационная модель разработана на примере серийно выпускаемого фотоэлектрического модуля PSM4 150W на основе монокристаллического кремния, состоящего из 72 солнечных элементов [5]. Па-

## Энергоэкономия и энергоэффективность

параметры солнечных элементов, необходимые для определения значений параметров суперконденсаторов  $C_C$  и  $C_H$  в соответствии с выражениями (1) и (2), приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Электрические параметры солнечных элементов							
Тип ФЭМ	Группа	КПД	Пиковая мощность, Вт	Ток короткого замыкания, А	Напр. холостого хода, В, не менее	Ток пик. мощн., А	Напр. пик. мощн., В, не менее
ФЭМ 125/150	135	13,5	от 2,00 до 2,06	от 4,21 до 5,51	0,58	от 2,00 до 2,06	0,41
	140	14	от 2,07 до 2,14	от 4,37 до 5,43	0,59	от 2,00 до 2,06	0,41
	145	14,5	от 2,15 до 2,20	от 4,53 до 5,62	0,59	от 2,00 до 2,06	0,41
	150	15	от 2,21 до 2,29	от 4,68 до 5,70	0,59	от 2,00 до 2,06	0,42

В модели в качестве накопителя энергии используется свинцово-кислотная аккумуляторная батарея емкостью 100 А·ч, а в качестве промежуточных накопителей  $C_C$  и  $C_H$  используются суперконденсаторы производства фирмы Maxwell [6].

Моделирование процесса отбора энергии по методу [2] заключается в последовательном выполнении операций по алгоритму, краткое описание которого приведено в [3]. Условия моделирования приведены в таблице 2.

Таблица 2.

Условия моделирования	
Диапазон уровней освещенности, Вт/м <sup>2</sup>	10-100
Емкость АБ, А·ч	100
Энергия полностью заряженной АБ, Дж	4320·10 <sup>3</sup>
Допустимый уровень разряда АБ, %	40
Энергия, которую необходимо подать на АБ для полной зарядки, $\Delta W_{AB}$ , Дж	1728·10 <sup>3</sup>

Результаты моделирования процесса отбора энергии солнечной батареи для зарядки накопителя при выполнении приведенных выше условий отражены в таблице 3.

Таблица 3.

Результаты моделирования							
Емкость, Ф		Освещенность, Вт/м <sup>2</sup>	Энергия $C_C$ , Дж	Количество импульсов для зарядки $C_H$	Энергия зарядного импульса $C_H$ , $W_i$ , Дж	Количество зарядных импульсов, N	Время зарядки АБ, час
$C_C$	$C_H$						
1	2,5	100	22,14	14	320	5400	6,05
		90	19,93	16			6,06
		80	17,38	18			6,07
		70	15,12	21			6,08
		60	13,29	24			6,09
		50	11,08	28			6,11
		40	8,81	36			6,14
		30	6,48	49			6,19
		20	4,43	72			6,28
		10	2,26	141			6,55

Как следует из приведенных в таблице данных, для полной зарядки аккумуляторной батареи от уровня ее разряженности от 40 А·ч до 100 А·ч в зависимости от интенсивности освещенности в интервале от 10 Вт/м<sup>2</sup> до 100 Вт/м<sup>2</sup> требуется соответственно от 6,55 часов до 6,05 часов, что удовлетворяет условиям эксплуатации накопителей энергии на основе ХИТ свинцово-кислотной электрохимической системы. Для наглядности на рис. 3 приведена диаграмма зависимости времени зарядки накопителя от уровня освещенности.

Следует отметить, что на продолжительность времени зарядки свинцово-кислотных ХИТ существенное влияние оказывает режим зарядки. Авторы [7] установили, что длительность процесса зарядки свинцово-кислотного аккумулятора от разряженного состояния до достижения 100 %-ной степени заряженности составляет в среднем 12–15 часов, при этом наиболее продолжительное время зарядки, примерно 7–10 часов, 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 %. Задача повышения эффективности зарядки успешно решается применением импульсных

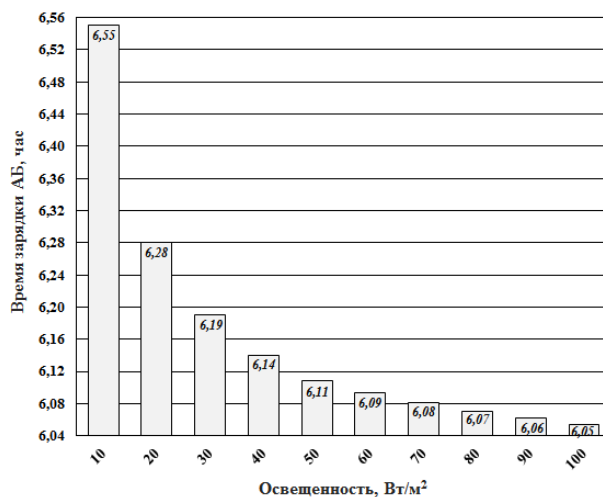


Рис. 3. Диаграмма зависимости времени зарядки накопителя от уровня освещенности

методов зарядки различных модификаций. Существенное значение при этом имеет то обстоятельство, что режим зарядки импульсным током позволяет значительно сократить время зарядки накопителя на последнем его этапе. Предложенный авторами метод [2], положенный в основу разработанной имитационной модели, наряду с возможностью использования энергии солнечной батареи для зарядки накопителя при низких уровнях освещенности обеспечивает импульсный режим зарядки накопителя в интервале уровней зарядки от 40 % до 100 %, в котором использование режима с постоянным током малоэффективно, и таким образом сокращает время зарядки накопителя.

#### Выводы

Разработана имитационная модель автоматизированного электротехнического комплекса отбора энергии солнечной батареи для зарядки накопителя энергии в условиях низких уровней освещенности. По результатам моделирования определено, что время, необходимое для зарядки накопителя от уровня заряженности 40 % до полной зарядки, равно примерно 6,0–6,5 часов.

Анализ полученных результатов имитационного моделирования подтверждает возможность использования энергии солнечной батареи для зарядки накопителя в условиях низких уровней освещенности по методу [2], который в сочетании с импульсным режимом зарядки обеспечивает допустимое по эксплуатационным нормам время зарядки накопителя на основе свинцово-кислотных химических источников тока.

#### Список использованных источников

1. Кудря, С. О. Підвищення ефективності акумуляування енергії вітру в автономних системах. / С. О. Кудря, В. М. Головка, В. Б. Павлов, В. І. Будько. // Відновлювана енергетика. – 2009. – № 3. – С. 10-18.
2. Дзензерский, В. А. Метод зарядки химических источников тока в составе фотоэлектрической установки / В. А. Дзензерский, С. В. Плаксин, Н. Е. Житник, Л. М. Погорелая. // Электротехника и электроэнергетика. – 2009. – № 2. – С. 73-77.
3. Пат. на корисну модель 105347 Україна, МПК H02J7/32, H02J7/35. Пристрій для заряджання хімічного джерела струму енергією сонячної батареї / В. О. Дзензерський, М. Я. Житник, С. В. Плаксін, С. Я. Остаповська, О. І. Ширман; власник Інститут транспортних систем і технологій НАНУ «Трансмаг». – № а 2013 10093; заявл. 14.08.2013; опубл. 25.04.2014, Бюл. №8.
4. Черных, И. В. SimPowerSystems: Моделирование электротехнических устройств и систем в Simulink [Электронный ресурс]. – <http://matlab.exponenta.ru/simpower/book1/>
5. Фотоэлектрический модуль на основе монокристаллического кремния PSM4 150W [Электронный ресурс]. – <http://rmcip.com/rus/production/pvl/psm4.html>
6. Конденсаторы: Ультраконденсаторы [Электронный ресурс]. – <http://www.efo-power.ru/products/?l3=25>
7. Каменев, Ю. Б. Ускоренный метод заряда свинцово-кислотного аккумулятора. 3. Импульсный заряд / Ю. Б. Каменев, Г. А. Штомпель. // Электрохимическая энергетика. – 2013. – Т. 13, № 2.– С. 77–82.

Рекомендовано к печати: д-ром техн. наук, проф. Шкрабцем Ф.П.