

токов и несинусоидальности в других.

### Перечень ссылок

1. Вагин Г. Я. Основные направления экономии энергии на металлургических предприятиях / Г. Я. Вагин, А. Б. Лоскутов, С. А. Шалаев – М. : Промышленная энергетика. – 1995. – № 9. – С. 12–15.
2. Энергетика України / Міністерство енергетики України. – К. : Міненерго України, 1998. – 34 с.
3. Борисов Б. П. Электроснабжение электротехнологических установок / Б. П. Борисов, Г. Я. Вагин – К. : Наук. Думка, 1985. – 248 с.
4. Гудим В. І. Електромагнітна сумісність електропостачальних систем дугових сталеплавильних печей. / В. І. Гудим // Праці III Міжнародної науково-технічної конференції «Математичне моделювання в електротехніці, електроніці та електроенер-

гетиці». – Львів, 1994. – С. 63–67.

5. Зиновкин В. В. Анализ повреждаемости трансформаторов, питающих энергоёмкие резкопеременные потребители промпредприятий / В. В. Зиновкин, А. П. Васильковский, Д. В. Зозуля, А. П. Лютый // Труды научн-техн. конф. «Трансформаторостроение». – Запорожье: ВИТ, 1995. – С. 138–145.
6. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И. В. Жежеленко – М. : Энергоатомиздат, 2004. – 358 с.
7. Рейгольд Р. Эксплуатационные режимы электро-энергетических систем и установок / Р. Рейгольд; пер. с нем.; под ред. К. С. Демирчяна. – Л. : Энергия, 1980. – 578 с.

Поступила в редакцию 23.03.09 г.

После доработки 13.04.09 г.

*Запропонована математична модель і методика комп'ютерного моделювання нестационарних електромагнітних процесів в системі електропостачання енергоємного електротехнологічного комплексу з нелінійним навантаженням і приведені результати досліджень.*

*A mathematical model and method of computer design of non-stationary electromagnetic processes in the power supply system of power-intensive electrical engineering complex with the nonlinear loading are offered and the results of researches are presented.*

УДК 621.355.1(088.8)

В. А. Дзензерский, С. В. Плаксин, Н. Е. Житник, Л. М. Погорелая

## Метод зарядки химических источников тока в составе фотоэлектрической установки

*Предложен метод зарядки химических источников тока в составе фотоэлектрических установок с применением системы промежуточных накопителей энергии, позволяющей повысить эффективность использования энергии фотопреобразователей в неблагоприятных условиях их работы.*

### Введение

Вследствие присущей фотоэлектрическим установкам (ФЭУ) нестабильности генерируемой энергии, вызванной совокупностью как внешних, так и внутренних факторов, возникает необходимость в резервировании энергии для энергоснабжения потребителей в периоды неблагоприятных условий работы, когда выработка электроэнергии ФЭУ снижается или полностью отсутствует.

Проблема резерва электроэнергии особенно остро проявляется при использовании работающих вне централизованной сети энергообеспечения автономных фотоэлектростанций малой и средней мощности. Традиционно в таких случаях в качестве резервного источника электроэнергии используются химические источники тока (ХИТ), входящие в состав ФЭУ. Однако в силу своих внутренних особенностей ХИТ не допускают снижения уровня накопленной в них энергии ниже критического значения, при этом восполнение

израсходованной энергии осуществляется за счет части энергии, вырабатываемой ФЭУ. Но в реальных условиях работы существует вероятность продолжительных периодов с низким уровнем освещенности, когда текущие значения напряжения и тока вырабатываемой ФЭУ энергии недостаточны для зарядки ХИТ, и тогда только энергоёмкость ХИТ определит продолжительность непрерывного энергоснабжения потребителей.

Наглядно режимы работы фотобатареи (ФБ) совместно с ХИТ можно проиллюстрировать с помощью типичной вольтамперной характеристики ФБ (см., например, [1]), приведенной в упрощенном виде на рис. 1. Устойчивое энергоснабжение потребителей, по мнению авторов цитируемой работы, обеспечивается ФБ при уровнях освещенности, соответствующих режиму работы ФБ в области 1, расположенной выше линии ОА – прямой максимальной мощности ФБ. При уровнях освещенности, соответствующих области 2, расположенной ниже прямой максимальной мощности, ФБ

© В. А. Дзензерский, С. В. Плаксин, Н. Е. Житник, Л. М. Погорелая 2009 г.

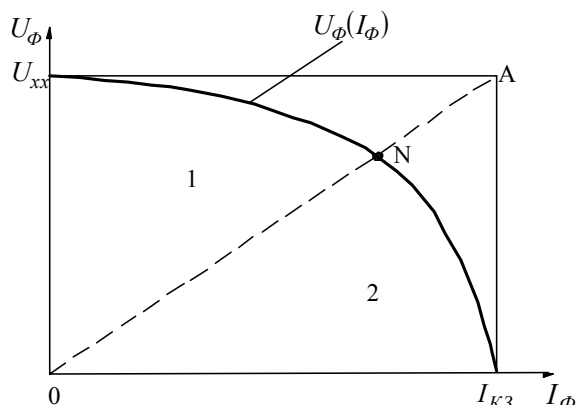


Рис. 1. Вольтамперная характеристика фотобатареи

не в состоянии обеспечить потребителей электроэнергией заданного качества, и эту функцию берет на себя ХИТ. Решить эту задачу в данной работе предлагается путем рационального использования энергии, генерируемой ФБ при низких уровнях освещенности — в области 2.

Цель данной работы — разработать такой метод зарядки химического источника тока, который позволит использовать электроэнергию с недостаточными для стандартной зарядки параметрами, вырабатываемую фотоэлектрической установкой при неблагоприятных условиях ее работы.

Метод использует принцип энергосберегающих импульсных технологий, заключающийся в порционном отборе от ФЭУ энергии любого качества и количества, накоплении ее в промежуточных пассивных накопителях и последующей передаче на заряжаемый ХИТ в виде сформированных зарядных импульсов заданных амплитуды и длительности.

### Зарядка химических источников тока с использованием пассивных накопителей электроэнергии

Известные из литературы работы по применению конденсаторов и катушек индуктивности в качестве промежуточных накопителей описывают технические решения, предполагающие либо отбор энергии от всех элементов фотобатареи в общий конденсатор [2], либо от каждого элемента на отдельный конденсатор с последующей поочередной передачей ее в индуктивность [3]. И в том и другом случае для обеспечения эффективного отбора энергии от ФБ необходимо согласование внутреннего сопротивления ФБ с внутренним сопротивлением конденсатора, который является для нее нагрузкой.

Для точки максимальной мощности ФБ, определяемой из ее вольтамперной характеристики, емкость накопительного конденсатора должна удовлетворять условию [2]

$$C \geq \frac{I_{K3 \max} \cdot \tau_{B \max}}{0,03U_{xx}}, \quad (1)$$

где  $I_{K3 \max}$  — ток короткого замыкания ФБ при максимальном уровне освещенности;  $\tau_{B \max}$  — максималь-

ная длительность включенного состояния конденсатора, или время его заряда;  $U_{xx}$  — напряжение холостого хода ФБ.

В соответствии с выражением (1) конкретным значениям тока и напряжения ФБ должно соответствовать конкретное значение емкости конденсатора, и именно оно отвечает за условия согласования ФБ с конденсатором как с нагрузкой. В связи с этим в системах отбора такого типа оптимальное согласование нагрузки с фотобатареей осуществляется в сравнительно узком интервале изменения напряжений и токов ФБ, который определяется из выражения

$$C \geq \frac{I_{CB} \cdot \tau_B}{\Delta U}, \quad (2)$$

где  $I_{CB}$  — текущее значение тока ФБ при данном уровне освещенности ФБ;  $\Delta U$  — максимально допустимое отклонение напряжения ФБ от точки максимальной мощности.

При рассогласовании фотобатареи и нагрузки эффективность работы ФБ резко снижается в соответствии с выражением [4]

$$\eta = \frac{R_H}{R_H + R_{BH}}, \quad (3)$$

где  $\eta$  — КПД ФБ,  $R_H$  и  $R_{BH}$  — сопротивления нагрузки и фотобатареи соответственно.

Таким образом, из анализа технических решений [2, 3] следует, что при их реализации диапазон освещенностей, при которых фотобатарея используется наиболее эффективно, ограничивается областью 1 на рис. 1.

В предлагаемом нами техническом решении для минимизации влияния рассогласования ФБ и нагрузки на КПД фотобатареи и более эффективного отбора энергии от фотобатареи при низких уровнях освещенности в качестве нагрузки ФБ используется блок низковольтных суперконденсаторов, коммутируемых по определенному алгоритму в зависимости от уровня освещенности фотобатареи и, следовательно, величины ее внутреннего сопротивления  $R_{BH}$ .

Как видно из блок-схемы, приведенной на рис. 2, роль промежуточных накопителей энергии, как и в вышеописанных технических решениях, выполняют индуктивность  $L_H$  и конденсаторы  $C_C$  и  $C_H$ , из которых система контроля и управления, работающая по заданному алгоритму, образует зарядно-разрядные энергетические контуры. С помощью этих контуров накопленная энергия, отобранная от ФБ, формируется в зарядно-разрядные импульсы заданных длительности и амплитуды для зарядки химического источника тока, или аккумуляторной батареи (АБ). Схема управления элементами системы коммутации, которые для простоты изображены ключами К1–К5, на блок-схеме не приведена, поскольку имеет множество вариантов схмотехнического исполнения.

Управление режимами работы блока суперконденсаторов заключается в том, что суперконденсаторы при подключении к ФБ для зарядки соединяются по

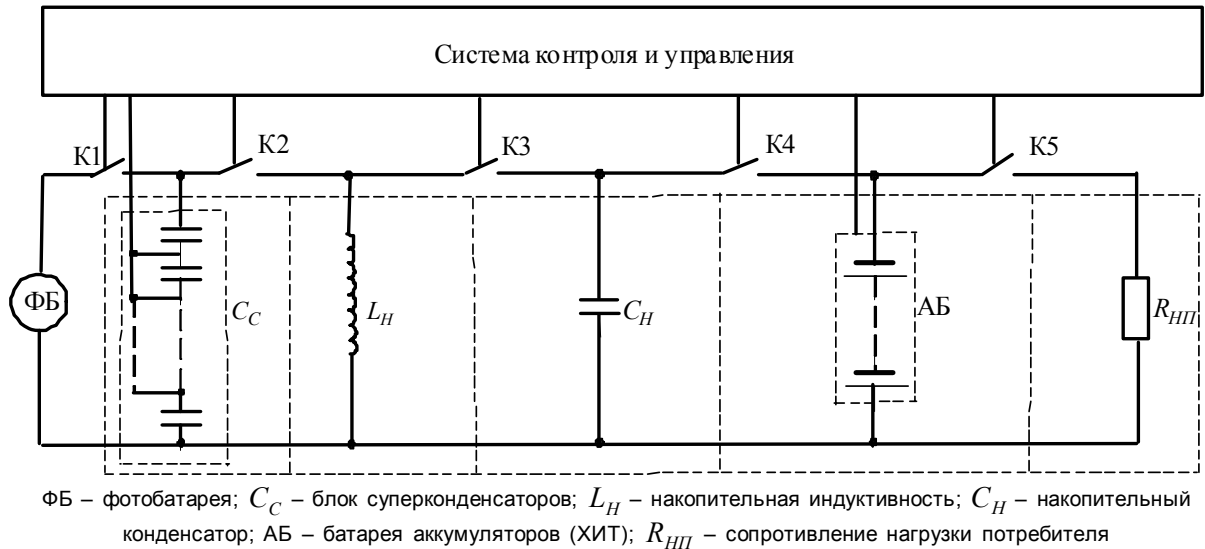


Рис. 2. Блок-схема системы отбора энергии от фотобатареи и зарядки химического источника тока

параллельной либо последовательно-параллельной схеме в зависимости от величины снимаемого с ФБ напряжения, а при подключении для разряда к нагрузке, в качестве которой используется индуктивность  $L_H$ , соединяются последовательно, благодаря чему удается легко осуществлять как согласование ФБ и конденсаторов по сопротивлению, так и преобразование напряжения низкого уровня на входе блока  $C_C$  в напряжение высокого уровня на выходе и исключить потери энергии, которые имели бы место в случае преобразования другими методами.

Рассмотрим работу системы с кратким анализом происходящих в ней энергетических процессов.

В исходном состоянии фотобатарея, изображенная на рис. 2 как первичный источник энергии (ФБ), посредством системы контроля и управления подключена к блоку суперконденсаторов  $C_C$ . Поскольку фотобатарея эквивалентна источнику тока (что подтверждается возможностью ее работы в режиме короткого замыкания), напряжение на суперконденсаторах описывается выражением

$$U_{C_C} = \frac{1}{C} \int_0^{t_{3C}} i_{\text{ФБ}}(t) dt = \frac{I_{3C}}{C} \cdot t_{3C}, \quad (4)$$

где  $C$  – емкость суперконденсаторов, подключенных к ФБ;  $i_{\text{ФБ}}$  – текущее значение тока фотобатареи;  $t_{3C}$  – время зарядки суперконденсаторов;  $I_{3C}$  – постоянный ток зарядки суперконденсаторов.

Отбор энергии от ФБ и передача ее в индуктивность  $L_H$  осуществляется до того момента, когда накопленного в индуктивности количества энергии будет достаточно для формирования с помощью накопительного конденсатора  $C_H$  зарядного импульса для ХИТ. Причем величина этого временного промежутка будет определяться энергетическими возможностями ФБ, прямо пропорционально зависящими от интенсивности солнечной освещенности, и скоростью

передачи энергии от ФБ к катушке индуктивности  $L_H$ , ограниченной частотой заряда-разряда суперконденсаторов, которая не должна превышать допустимого паспортного значения на конкретный тип конденсаторов. С этой частотой производится поочередное переключение ключей K1 и K2 и порционная передача энергии от ФБ к  $C_C$  и  $L_H$  для ее накопления.

Величина индуктивности  $L_H$ , выполняющей функции накопителя-дозатора энергии, определяется исходя из величины требуемого напряжения заряда накопительного конденсатора  $C_H$  и длительности зарядных импульсов, подаваемых на ХИТ.

При накоплении в индуктивности заданного количества энергии замыкается ключ K3 и энергия передается в накопительный конденсатор  $C_H$ . Энергия полностью заряженного конденсатора определяется известным выражением

$$W_C = \frac{1}{2} C \cdot U_{C_0}^2, \quad (5)$$

где  $C$  – емкость накопительного конденсатора;  $U_{C_0}$  – напряжение на накопительном конденсаторе, соответствующее моменту окончания его заряда.

Необходимым условием полного заряда конденсатора, достаточного для формирования зарядного импульса ХИТ, является выполнение неравенства

$$U_{C_0} > U_{\text{АБ}}, \quad (6)$$

где  $U_{\text{АБ}} = U_{\text{РЦ}} + \Delta U_{\text{АБ}}$ ;  $U_{\text{РЦ}}$  – напряжение разомкнутой цепи химического источника тока (АБ);  $\Delta U_{\text{АБ}}$  – напряжение поляризации АБ.

После выполнения условия (6) ключ K3 размыкается и замыкается ключ K4 на время  $t_3$ , в течение которого на батарею аккумуляторов передается энергия

$$W_3 = \int_0^{t_3} i_3^2 R_{\text{АБ}} dt, \quad (7)$$

где  $i_3$  – величина тока зарядного импульса, равная емкостному току, возникшему после замыкания ключа К4;  $R_{AB} = R_a + R_n$  – сопротивление АБ, состоящее из активного сопротивления  $R_a$  электролита и активных масс электродов и поляризационного сопротивления  $R_n$ .

Так как конденсатор  $C_H$  разряжается до напряжения, равного по величине  $U_{AB}$ , то баланс энергии с учетом неполного разряда конденсатора определится выражением

$$\frac{1}{2}CU_{C_0}^2 = \int_0^{t_3} i_3^2 R_{AB} dt + \frac{1}{2}CU_{C_{t_3}}^2 + W_n, \quad (8)$$

где  $U_{C_{t_3}}$  – напряжение на конденсаторе  $C_H$  в момент окончания зарядного импульса, равное по величине правой части неравенства (6);  $W_n$  – энергия потерь.

Ток зарядки АБ при разряде на нее конденсатора  $C_H$  равен

$$i_3 = C \frac{dU_C}{dt} = \frac{U_{C_0}}{R_{AB}} e^{-t_3/\tau}, \quad (9)$$

где  $\tau = R_{AB}C$  – постоянная времени цепи  $C_H$  – АБ, при этом процесс разряда накопительного конденсатора протекает при токе

$$i_{C_p} > i_3 = \frac{U_{C_0}}{R_{AB}} \cdot e^{-t_3/\tau}, \quad (10)$$

С учетом этого из (8) видно, что энергия, затраченная на зарядку аккумуляторной батареи за один импульс на величину

$$\frac{1}{2}C(U_{C_0}^2 - U_{C_{t_3}}^2) = \int_0^{t_3} i_3^2 R_{AB} dt + W_n, \quad (11)$$

меньше первоначальной энергии конденсатора, определяемой из (5).

Известно [5], что при разряде конденсатора на сопротивление напряжение на нем изменяется по закону

$$U_C(t) = U_{C_0} e^{-t/\tau}, \quad (12)$$

следовательно,

$$U_C(t) = U_{C_{t_3}} = U_{C_0} e^{-t_3/\tau}. \quad (13)$$

Тогда, подставив в (11) значение для  $U_{C_{t_3}}$ , получим выражение для энергии, непосредственно израсходованной на зарядку АБ за один импульс

$$W_3 = \frac{1}{2}CU_{C_0}^2 (1 - e^{-2t_3/\tau}). \quad (14)$$

После разряда накопительного конденсатора на батарею аккумуляторов напряжение на нем в конце

разряда принимает значение, равное  $U_{C_{t_3}}$ , величина которого зависит от степени заряженности АБ. По достижении этого значения напряжения ключ К4 размыкается, замыкается ключ К3 и происходит очередной цикл заряда накопительного конденсатора, но уже не от начального значения  $U_C = 0$ , а от значения  $U_{C_{t_3}}$ , при этом энергия конденсатора в момент замыкания ключа К3, то есть начальная энергия  $W_0 \neq 0$ , а  $W_0 = \frac{1}{2}CU_{C_{t_3}}^2$  и представляет собой энергию сбережения.

Таким образом, и при разряде  $C_H$  за время  $t_3$  на АБ, и при его заряде от индуктивности  $L_H$  происходит экономия электроэнергии, вырабатываемой ФБ и накапливаемой в катушке индуктивности, то есть достигается энергосбережение в системе электроснабжения потребителей в целом.

Длительность зарядного импульса  $t_3$ , действующего на АБ, можно определить из выражения (9)

$$t_3 = \tau \ln \frac{U_{C_0}}{R_{AB}i_3} = R_{AB}C \ln \frac{U_{C_0}}{R_{AB}i_3},$$

или

$$t_3 = R_{AB}C \ln \frac{U_{C_0}}{U_{AB}}. \quad (15)$$

Полученные выражения устанавливают связь между длительностью зарядного импульса, величиной зарядного тока АБ, ее сопротивлением, емкостью накопительного конденсатора  $C_H$  и величиной напряжения на нем.

Аналогичным образом получим выражение для времени заряда накопительного конденсатора  $C_H$  в виде

$$t_{3C} = \tau_{3Ц} \ln \frac{E - U_{C_{t_3}}}{E - U_{C_0}}, \quad (16)$$

где  $\tau_{3Ц}$  – постоянная времени зарядной цепи  $LC$ ;  $E$  – напряжение на индуктивности, приложенное к конденсатору;  $U_{C_{t_3}}$  – напряжение на конденсаторе в конце зарядного импульса.

Для формирования импульса зарядки АБ необходимо выполнение неравенства

$$t_3 > t_{3C}, \quad (17)$$

что легко осуществимо, так как конденсатор  $C_H$  разряжается до напряжения  $U_{C_0}$  не от нулевого значения, а от начального напряжения  $U_{C_{t_3}}$ .

Таким образом, частота воздействия зарядными импульсами на батарею аккумуляторов будет определяться кинетикой электрохимического процесса зарядки. Контроль состояния АБ при ее зарядке осуществляется системой контроля и управления по значениям информационных параметров АБ, приведен-

ных в [6], а оптимизация процесса зарядки АБ производится с учетом взаимосвязи параметров батареи аккумуляторов с параметрами зарядных импульсов, описываемой выражением (15).

Для реализации метода необходимо наличие в составе ФЭУ двух химических источников тока, работающих в циклическом режиме: когда один из них разряжается на нагрузку, то есть обеспечивает потребителя электроэнергией, другой заряжается от ФЭУ и т. д. с поочередной сменой режимов их работы.

По достижении аккумуляторной батареей полной зарядки по сигналу системы контроля и управления ключ К4 размыкается, замыкается ключ К5 и заряженная аккумуляторная батарея подключается к нагрузке  $R_{НП}$ , а другая аккумуляторная батарея, работавшая до этого на нагрузку, подключается к системе зарядки.

При работе ФБ в режимах, соответствующих освещенностям области 1, ключи К1–К5 переводятся в замкнутое состояние и энергия от фотобатареи поступает непосредственно в нагрузку и на АБ для ее подзарядки.

### Выводы

Разработан метод зарядки химических источников тока в составе фотоэлектрических установок с использованием промежуточных пассивных накопителей электроэнергии в виде низковольтных суперконденсаторов и последующей ее порционной передачей на заряжаемый ХИТ в виде сформированных зарядных импульсов заданных амплитуды и длительности. Метод позволяет использовать электроэнергию, вырабатываемую фотоэлектрической установкой при неблагоприятных условиях ее работы с недостаточными для стандартной зарядки текущими параметрами.

*Запропоновано метод зарядження хімічних джерел струму у складі фотоелектричних установок з системою проміжних накопичувачів енергії, яка дозволяє підвищити ефективність використання енергії фотоперетворювачів в несприятливих умовах їх роботи.*

*The method of chemical current sources charging in a body of the photovoltaic power stations with the use of the intermediate energy storage system is offered; it allows improving the efficiency of photovoltaic power system use at the adverse working condition.*

### Перечень ссылок

1. Богдан А. В. Проектирование автономных фото-энергетических систем / А. В. Богдан, В. М. Спивак, А. Н. Шмырева, Ю. И. Якименко // Технічна електродинаміка. Тем. випуск. Силова електроніка та енергоефективність. – Ч.2. – 2007. – С. 35–38.
2. Пат. 2195754 Российская Федерация, МПК H02J7/32, H02J7/35. Устройство и способ отбора электрической энергии от солнечной батареи / Н. К. Чернилевский, П. Ф. Гнатенко; Заявитель и патенто-обладатель Чернилевский Н. К. – № 99119111/09; заявл. 01.09.99; опубл. 27.12.02. – 8 с.
3. Пат.10269 U Україна, МПК H02J7/32, H02J7/35. Спосіб відбору електричної енергії від сонячної батареї / М. В. Чашко, О. В. Левшов, К. О. Філь; Заявник і патентовласник Донецький нац.-техн. ун-т. – № 200503035; заявл. 04.04.05; опубл. 15.11.05. Бюл. № 11. – 2 с.
4. Чирва В. П. Кремниевые планарные фотоэлектрические генераторы / В. П. Чирва, М. С. Саидов / Гелиотехника. – 1993. – № 6. – С. 19–37.
5. Гинзбург С. Г. Методы решения задач по переходным процессам в электрических цепях. – М. : Высшая школа, 1967. – 388 с.
6. Житник Н. Е. Информационные параметры для реализации адаптивной зарядки вторичных химических источников тока. / Н. Е. Житник, Ю. Л. Миропольский, С. В. Плаксин, Л. М. Погорелая, И. И. Соколовский // ТКЭА. – 2008. – № 5(77). – С. 40–42.

*Поступила в редакцию 11.02.09 г.*

*После доработки 02.04.09 г.*