

УДК 621.311.004.12

А. В. ГОРПИНИЧ – к. т. н., доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, gorginich@ieeee.org

А. С. ГОЛУБЯТНИК – магистр, электромонтёр по ремонту и обслуживанию электрооборудования, ЧАО «МК «Азовсталь», г. Мариуполь, goloobytnik96@gmail.com

ПРИМЕНЕНИЕ СУПЕРКОНДЕНСАТОРОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ С РАСПРЕДЕЛЁННОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ

Распространение источников электроэнергии с распределённой генерацией (солнечные и ветровые электростанции, электростанции с использованием топливных элементов, когенерационные установки и др.), помимо положительного эффекта, связанного со снижением вредных выбросов в атмосферу, снижением потерь электроэнергии (ЭЭ) за счёт максимального приближения таких источников к потребителям, повышением степени резервирования и т.д., приводит и к ряду проблем, вызванных ухудшением качества электроэнергии (КЭ) в распределительной сети. Например, подключение солнечных и ветровых электростанций к «слабой» сети может привести к ухудшению качества напряжения в точке общего присоединения за счёт возникновения значительных отклонений напряжения, обусловленных переменным характером генерации активной мощности. Кроме того, широкое использование современных преобразователей частоты в источниках ЭЭ с распределённой генерацией (РГ) приводит к повышению содержания высших гармоник, субгармоник, интергармоник и высокочастотных составляющих напряжения с частотами в несколько кГц в кривой напряжения питающей сети.

Для устранения проблем, связанных с ухудшением качества напряжения в электрических сетях с РГ, можно использовать аккумуляторные батареи (АБ), потоковые электрохимические батареи, магнитные аккумуляторы с использованием эффекта сверхпроводимости, маховиковые накопи-

тели ЭЭ и суперконденсаторы (СК). Практический интерес представляют экспериментальные исследования эффективности использования СК как средств сглаживания отклонений и колебаний напряжения в реальной микросети, например, с солнечной панелью (СП). СК как достойная замена АБ становятся доступнее. За счёт своих преимуществ (большое количество циклов «заряд-разряд», широкий диапазон рабочих температур, высокий КПД и т.п.) их использование в сфере альтернативной электроэнергетики в дальнейшем будет только увеличиваться.

За счёт большой ёмкости и соответствующей постоянной времени разряда СК можно использовать как средства сглаживания, например, отклонений напряжения, вызванных переменным характером генерации активной мощности в нетрадиционных источниках ЭЭ. В качестве примера можно привести фотоэлектрические установки (ФУ), генерация ЭЭ с помощью которых сопровождается ухудшением качества напряжения в точке общего присоединения, потому что наличие облаков (особенно в осенний и весенний периоды) приводит к изменению солнечной радиации, которая используется СП. Следует отметить, что изменения солнечной активности могут быть как длительными, так и кратковременными. Именно в случае кратковременных изменений (несколько мс – единицы с) и используются СК для сглаживания отклонений напряжения, так как АБ имеют недопустимо большое время реакции [1, 2]. Типичная за-

висимость солнечной активности от продолжительности светового дня, полученная с помощью пиранометра исследователями из университета Аристотеля в Салониках (Греция), показана на рис. 1 [1]. В результате исследований было установлено, что наибольшие изменения солнечной радиа-

ции наблюдались 10.09.2016 г., когда их продолжительность достигла 2,4 с (рис. 2). На рис. 2 приведены зависимости от времени активной мощности, генерируемой СП ($P_{СП}$), и активной мощности, выдаваемой в сеть (P_C).

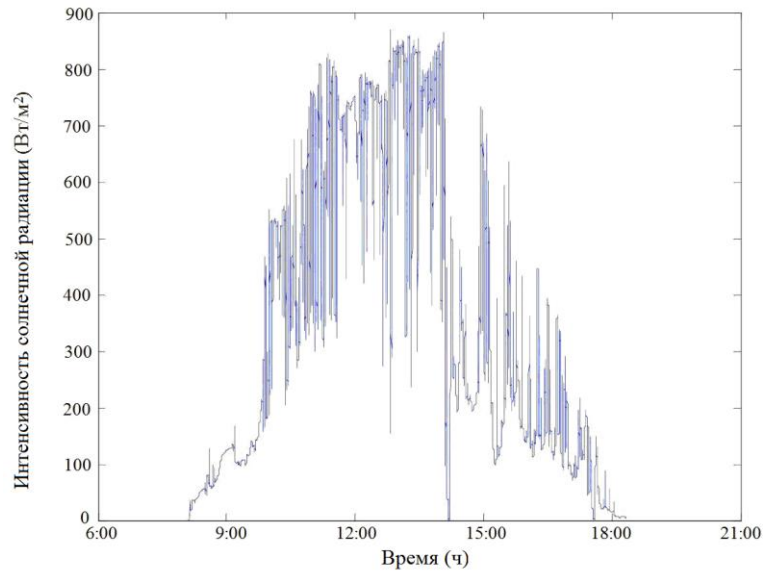


Рис. 1. Зависимость солнечной активности от продолжительности светового дня

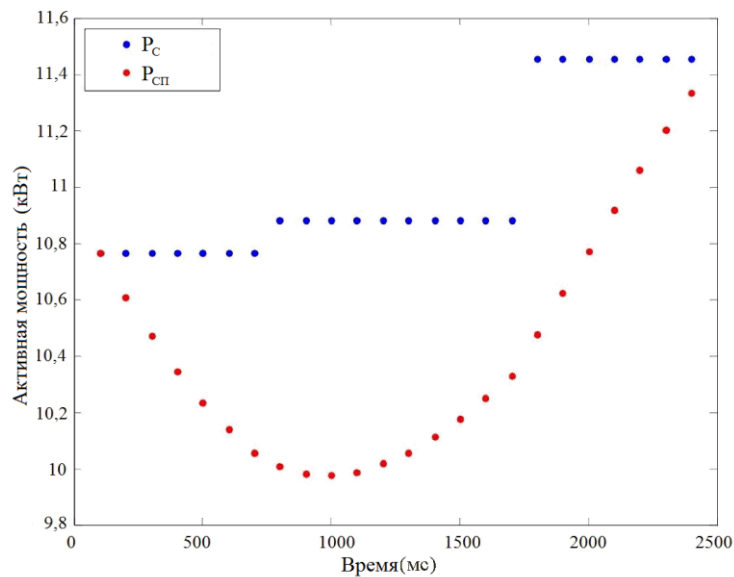


Рис. 2. Наибольшие изменения солнечной радиации продолжительностью 2,4 с

При наличии средств сглаживания, например, в виде СК:

$$P_c = P_{сп} + P_{ск}, \quad (1)$$

где $P_{ск}$ – составляющая активной мощности, которая обеспечивается за счёт СК.

В последнее время вопросам сглаживания отклонений и колебаний напряжения в электрических сетях с СП, как и вопросам увеличения срока службы традиционно применяемых свинцово-кислотных АБ (за счёт оптимизации параметров гибридных накопительных модулей (ГНМ)), уделяется значительное внимание в зарубежной научной литературе [3-7]. Например, в работе [3] предложена двухуровневая иерархическая модель управления, позволяющая решить проблему улучшения параметров ЭЭ, получаемой от источников с РГ, путём добавления СК в исходную схему с АБ. Предлагаемая авторами модель может быть использована при решении вопросов КЭ в электрических сетях с РГ.

Стратегия управления ГНМ (состоит из АБ и СК) на базе модифицированного метода роя частиц предложена в [4]. Разработанный алгоритм позволяет получить оптимальное соотношение мощности между АБ и СК при условии обеспечения минимального уровня колебаний мощности, генерируемой нетрадиционными источниками ЭЭ.

Состояние разработок в области накопительных модулей, используемых в системах электроснабжения зданий с СП, как и современные методы оптимизации параметров ГНМ при различных критериях оптимизации, рассмотрены в [5]. Авторы также делают вывод о перспективности дальнейших исследований в области оптимизации параметров ГНМ, влияния их работы на сеть энергоснабжающей организации, выбора наилучшей стратегии управления.

В работе [6] предложен подход к снижению колебаний активной мощности, выда-

ваемой ФУ, основанный на ограничении режима работы контроллера для отслеживания точки максимальной мощности (maximum power point tracking controller – MPPT-controller). На базе этого подхода авторами разработана специальная скоординированная стратегия управления ГНМ. С математической точки зрения эта стратегия базируется на использовании модификации метода роя частиц с применением так называемого «коэффициента инерции» (inertia weight). При решении анализируемой проблемы её рассматривали как проблему сложной многокритериальной частично целочисленной комбинаторной нелинейной оптимизации с заданными ограничениями в виде равенств и неравенств, поскольку при этом учитывались такие критерии, как минимизация суммарных потерь мощности в элементах ГНМ, оптимальное значение уровня заряда АБ и СК, получение максимального годового дохода от генерации ЭЭ с помощью ФУ, обеспечение минимальных инвестиционных затрат, затрат на обслуживание и эксплуатацию ФУ, минимальных затрат из-за ухудшения свойств АБ, а также минимальной величины возможных штрафных санкций за превышение допустимых пределов уровня активной колебаний мощности.

В [7] представлен «умный» встраиваемый модуль, состоящий из СК, литий-ионной батареи, двунаправленных преобразователей, контроллера мощности и контроллера режима, который предназначен для увеличения срока службы свинцово-кислотных АБ за счёт снижения негативного влияния колебаний и бросков тока, вызванных изменениями солнечной радиации. Эффективность применения предлагаемого модуля была верифицирована путём имитационного моделирования в среде MATLAB Simulink с реальными данными об изменениях солнечной радиации в сельской местности в районе г. Кучинг (провинция Саравак, Малайзия). Результаты

имитационного моделирования были подтверждены авторами статьи на практике с помощью прототипа реальной ФУ и многочисленных экспериментов.

Цель работы – продемонстрировать возможности экспериментальной установки, которая позволяет осуществить мониторинг и анализ протекающих электромагнитных процессов в электрических сетях с СП (выполнить измерения параметров режима (токи, напряжения) и параметров элементов схемы (кривые заряда и разряда СК, остаточное напряжение и т.д.)); представить результаты экспериментальных исследований эффективности применения СК как средств сглаживания отклонений и колебаний напряжения, которые могут возникнуть при работе СП, и результаты имитационного моделирования в среде PSCAD (Канада).

На кафедре электроэнергетических комплексов и систем ГВУЗ «Приазовский гос-

ударственный технический университет» была собрана экспериментальная установка, состоящая из СП мощностью 10 Вт, СК типа Power Store с номинальным напряжением 2,7 В и ёмкостью 100 Ф, современных преобразователей напряжения и цифрового мультиметра Sanwa (Япония), подключенного к ноутбуку с помощью специального кабеля, что позволило в режиме реального времени фиксировать 2-3 замера за секунду, используя программу PC Link (Япония). Внешний вид экспериментальной установки показан на рис. 3, а внешний вид СК – на рис. 4. Экспериментальная установка используется в учебном процессе ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет» при проведении лабораторных работ по дисциплине «Альтернативные источники электроэнергии». Схемы замещения СП и СК приведены на рис. 5, 6 [8-15].

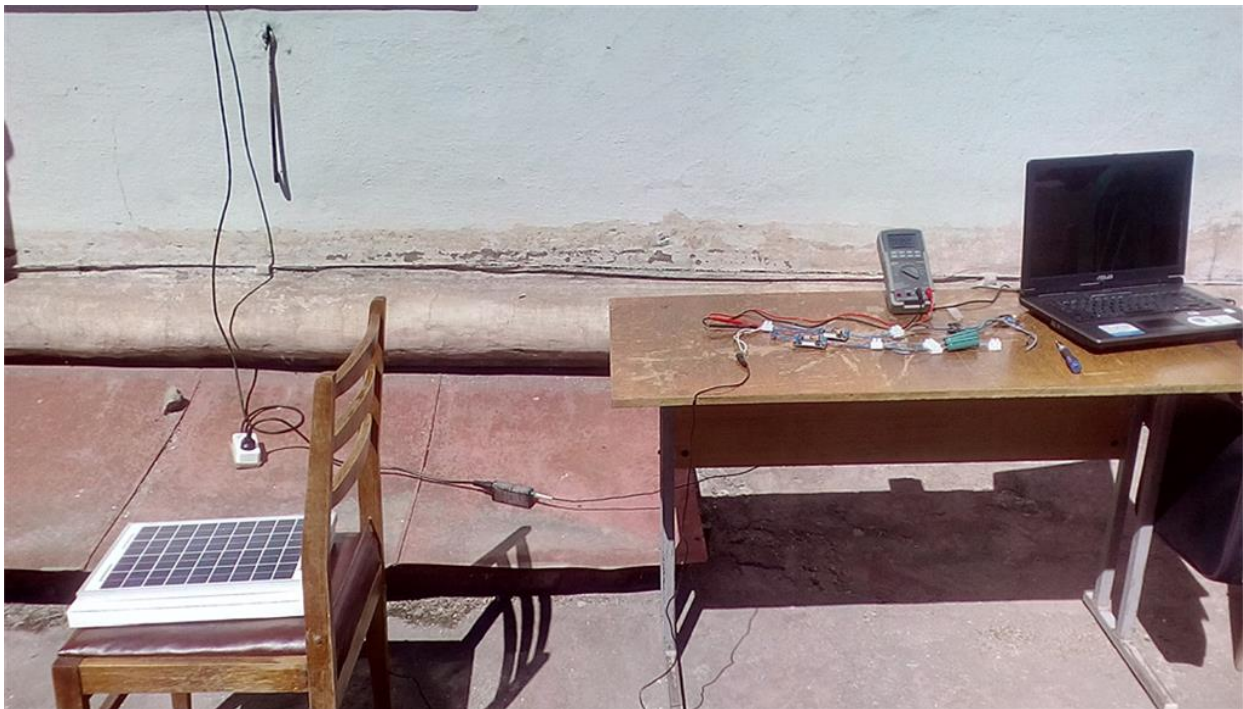


Рис. 3. Внешний вид экспериментальной установки

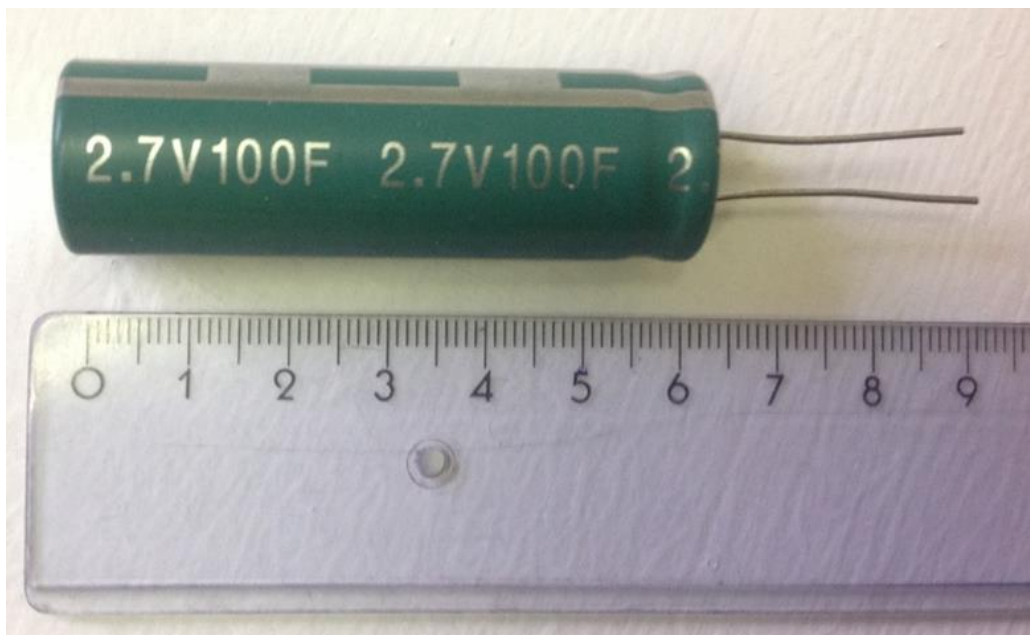


Рис. 4. Внешний вид СК типа Power Store

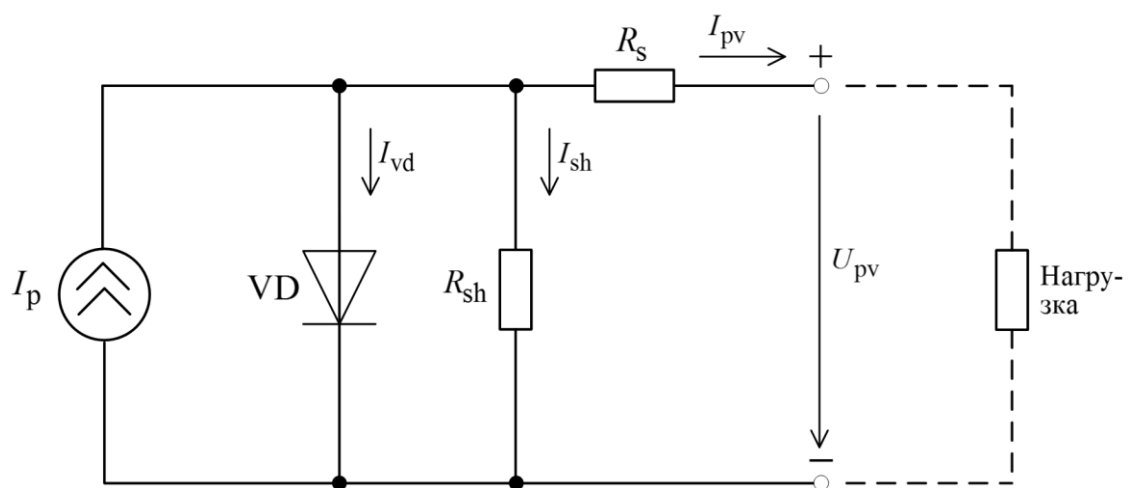


Рис. 5. Схема замещения СП

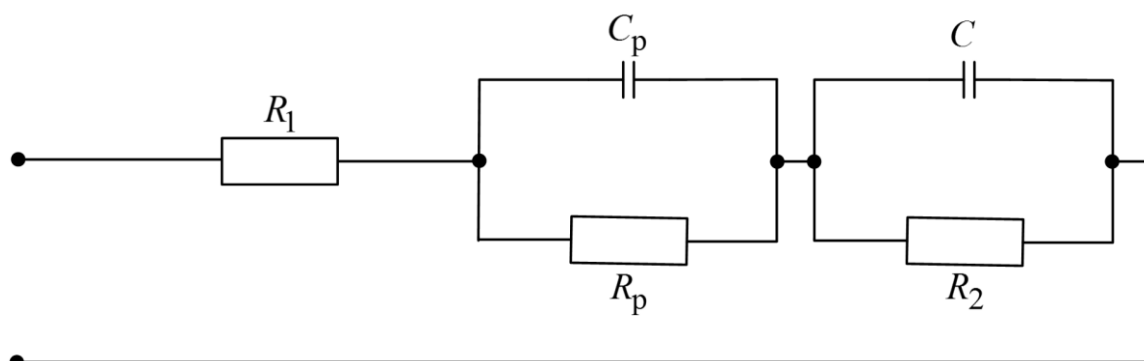


Рис. 6. Схема замещения СК

На схеме замещения СП (рис. 5) обозначены: I_p – эквивалентный источник тока; R_s – последовательное сопротивление, характеризующее наличие сопротивления контактов; R_{sh} – эквивалентное шунтирующее сопротивление. На схеме замещения СК (рис. 6) обозначены: R_1 – сопротивление, отображающее потери мощности, обусловленные процессами «заряд-разряд»; R_p , C_p – сопротивление и ёмкость, отображающие быстропротекающие процессы «заряд-разряд», соответственно; C – ёмкость, характеризующая способность накапливать заряд (энергию); R_2 – сопротивление, отображающее влияние эффекта саморазряда.

В соответствии с результатами исследований [12, 13] ёмкость C_p можно определить следующим образом:

$$C_p = C/13. \quad (2)$$

Сопротивление R_p и ёмкость C_p связаны с постоянной времени τ , отображающей время циклов «заряд-разряд», известным соотношением:

$$R_p = \tau/C_p. \quad (3)$$

Величину сопротивления R_2 , отображающего влияние эффекта саморазряда, для практических расчётов можно принять равной $R_2 = 18$ кОм [12].

Схема замещения СП (рис. 5) используется для проведения исследований (моделирования) в условиях, отличных от условий стандартного теста (standard test condition (STC)). Именно для условий стандартного теста производители ФУ приводят паспортные данные СП (интенсивность солнечной радиации составляет $G_n = 1000$ Вт/м², а температура СП – $T_n = 25$ °С).

Уравнение, которое математически описывает вольт-амперную характеристику

(ВАХ) реальной СП, состоящей из ряда последовательно и параллельно соединённых ячеек, можно представить в виде:

$$I_{pv} = I_p - I_0 \left(\exp \left(\frac{U_{pv} + R_s I_{pv}}{\alpha N_s \phi_t} \right) - 1 \right) - \frac{U_{pv} + R_s I_{pv}}{R_{sh}}, \quad (4)$$

где I_p – ток, генерируемый реальной ФУ; I_0 – обратный ток диода, показанного на рис. 5; U_{pv} – напряжение на зажимах нагрузки; $\phi_t = kT/q$ – тепловой (температурный) потенциал; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана; T – температура р-п-перехода, К; $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд электрона; при $T_n = 25$ °С тепловой потенциал $\phi_t = 0,026$ В; $\alpha = 1 \div 2$ – коэффициент идеальности диода, зависящий от материала полупроводника; N_s – количество последовательно соединённых ячеек в составе СП.

Уравнение (4) описывает так называемую «однодиодную модель», представленную на рис. 5 [8-11]. В качестве примера на рис. 7 показана типичная ВАХ реальной СП, построенная с учётом уравнения (4). На этой ВАХ можно выделить три характерные точки: точка, соответствующая режиму короткого замыкания (КЗ), – $(0, I_{KЗ})$; точка максимальной мощности (maximum power point (MPP)) – (U_{MPP}, I_{MPP}) ; точка, соответствующая режиму холостого хода (XX) – $(U_{XX}, 0)$.

Вид ВАХ реальной СП, показанной на рис. 7, зависит как от внутренних параметров СП (сопротивления R_s и R_{sh}), так и от параметров окружающей среды (реальная температура СП T и реальная интенсивность солнечной радиации G).

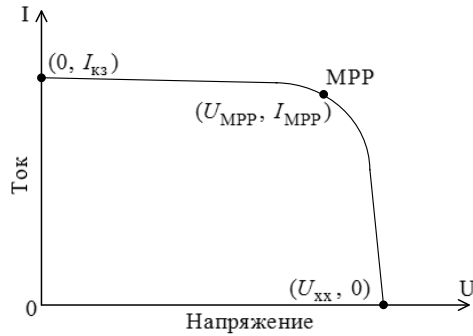


Рис. 7. Типичная ВАХ реальной ФУ

Входящие в уравнение (4) параметры I_p , R_s , R_{sh} , α , I_0 в паспортных данных на СП производителями не приводятся. Большинство производителей приводят, как правило, только ряд экспериментально полученных данных, касающихся электрических и тепловых характеристик СП для условий STC: максимальная мощность $P_{max n}$; ток КЗ $I_{k3 n}$; напряжение ХХ $U_{xx n}$; ток, соответствующий точке максимальной мощности I_{MPP} ; напряжение, соответствующее точке максимальной мощности U_{MPP} ; температурный коэффициент изменения тока K_I (по отношению к току $I_{k3 n}$); температурный коэффициент изменения напряжения K_U (по отношению к напряжению $U_{xx n}$). В качестве примера в табл. 1 приведены параметры СП мощностью 10 Вт, используемой в составе экспериментальной установки, показанной на рис. 3.

Таблица 1

Параметры СП

$P_{max n}$	10 Вт
$I_{k3 n}$	0,61 А
$U_{xx n}$	21,75 В
I_{MPP}	0,56 А
U_{MPP}	17,83 В
K_I	0,05 %/°C
K_U	-0,036 %/°C

Ток I_p линейно зависит от интенсивности солнечной радиации и температуры. Ток I_p можно найти из выражения [9, 10]:

$$I_p = \left(I_{k3 n} + K_I(T - T_n) \right) \frac{G}{G_n} \quad (5)$$

Ток I_0 можно определить следующим образом [9, 10]:

$$I_0 = \frac{I_{k3 n} + K_I(T - T_n)}{\exp\left(\frac{U_{xx n} + K_U(T - T_n)}{\alpha N_s \phi_t}\right) - 1} \quad (6)$$

Для условий STC с достаточной для практических расчётов точностью можно принять сопротивление R_{sh} равным бесконечности ($R_{sh} = \infty$). В этом случае ток $I_p = I_{k3 n}$ и сопротивление R_s можно рассчитать по формуле [11]:

$$R_s = \frac{\alpha \phi_t \ln\left(1 - \frac{I_{MPP}}{I_p}\right) - U_{MPP} + U_{xx n}}{I_{MPP}} \quad (7)$$

В табл. 2 представлены результаты расчёта параметров R_s и I_0 по формулам (6), (7) для условий STC ($I_p = I_{k3 n}$) при значениях коэффициента идеальности диода $\alpha = 1$ и $\alpha = 2$ с учётом паспортных данных СП мощностью 10 Вт, представленных в табл. 1 (для рассматриваемой СП $N_s = 36$). Приведенные в табл. 2 параметры могут быть использованы на практике для получения значений (U_{pv}, I_{pv}) при изменении параметров окружающей среды.

Таблица 2

Результаты расчёта параметров R_s и I_0

$\alpha = 1$	$\alpha = 2$
$R_s = 6,88 \text{ Ом}$	$R_s = 6,77 \text{ Ом}$
$I_0 = 4,95 \cdot 10^{-11} \text{ А}$	$I_0 = 5,49 \cdot 10^{-6} \text{ А}$

Паспортные данные используемых в составе экспериментальной установки СК типа Power Store приведены в табл. 3.

Таблица 3

Параметры СК	
Номинальное напряжение при 65 °С	2,7 В
Максимально допустимое кратковременное перенапряжение (< 1 с)	2,85 В
Номинальная ёмкость	100 Ф
Максимальное отклонение ёмкости	0 – +20 %
Среднее отклонение ёмкости	0 – +10 %
Максимальное значение эквивалентного последовательного сопротивления, нормируемого при постоянном токе	12 мОм
Среднее значение эквивалентного последовательного сопротивления, нормируемого при постоянном токе	8 мОм
Максимальное значение тока утечки	0,26 мА
Максимальное значение длительно допустимого тока	10 А
Максимальное амплитудное значение неповторяющегося тока	61 А
Максимальное значение запасаемой энергии при номинальном напряжении	0,1 Вт·ч
Удельная мощность	3,47 Вт/кг
Диапазон рабочих температур	-40 °С ÷ ÷ 65 °С
Наработка до отказа	1500 ч
Срок службы при комнатной температуре и при номинальном напряжении	10 лет
Количество циклов «заряд-разряд» до разрушения	500000

Поскольку СК типа Power Store имеют номинальное напряжение 2,7 В, а напряжение СП $U_{\text{ххн}} = 21,75 \text{ В}$, то для согласования напряжений СП и СК используется понижающий преобразователь напряжения 4,5-35 В / 1,23-34 В, параметры которого представлены в табл. 4, а внешний вид показан на рис. 8. Так как в качестве нагрузки используется лампа накаливания мощностью 4 Вт напряжением 12 В, то для согласования напряжений СП и нагрузки используется ещё один понижающий преобразователь напряжения 4,5-35 В / 1,23-34 В. Кроме этого, в составе экспериментальной установки задействован и повышающий преобразователь напряжения 2-24 В / 5-28 В, параметры которого приведены в табл. 5, а внешний вид показан на рис. 9.

Таблица 4

Параметры понижающего преобразователя напряжения

Диапазон регулирования входного напряжения	4,5-35 В
Диапазон регулирования выходного напряжения	1,23-34 В
Выходной ток при наличии дополнительного радиатора охлаждения	3 А
КПД	92 %
Диапазон рабочих температур	-40 °С ÷ ÷ 85 °С

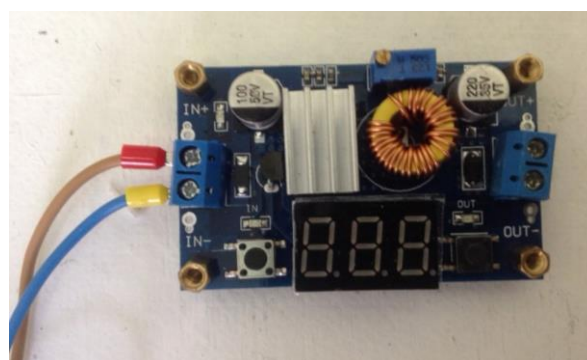


Рис. 8. Внешний вид понижающего преобразователя напряжения

Таблиця 5

Параметры повышающего преобразователя напряжения

Диапазон регулирования входного напряжения	2-24 В
Диапазон регулирования выходного напряжения	5-28 В
Выходной ток	2 А
КПД	94 %
Диапазон рабочих температур	-40 °С ÷ 85 °С



Рис. 9. Внешний вид повышающего преобразователя напряжения

На первом этапе исследований были выполнены измерения напряжения на СК с целью получения данных о процессах заряда и разряда. Для регистрации напряжения в режиме реального времени был использован цифровой мультиметр Sanwa типа PC 510a (внешний вид представлен на рис. 10), который был подключен к ноутбуку с помощью специального кабеля, что позволило фиксировать 2-3 измерения за секунду, используя программу PC Link (Япония).

Графики, которые демонстрируют изменение напряжения на СК в процессе заряда и разряда, приведены на рис. 11, 12 (эксперимент проводился с использованием четырёх СК – два последовательно соединённых СК были параллельно включены с ещё двумя последовательно соединёнными СК с целью согласования напряжения между повышающим преобразователем напряжения и СК).



Рис. 10. Внешний вид цифрового мультиметра Sanwa типа PC 510a

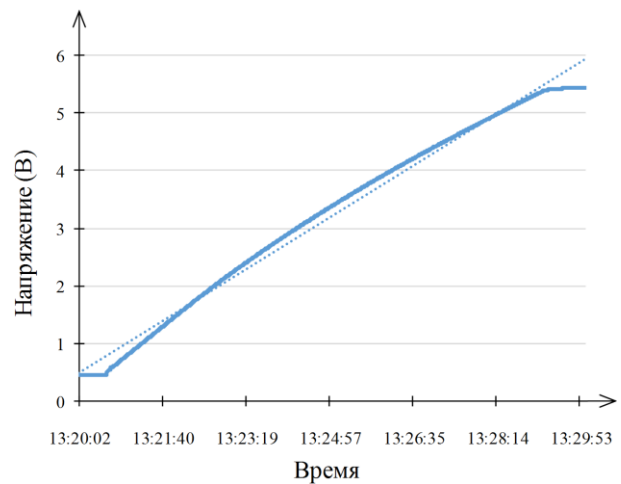


Рис. 11. График, который демонстрирует изменение напряжения на СК в процессе заряда

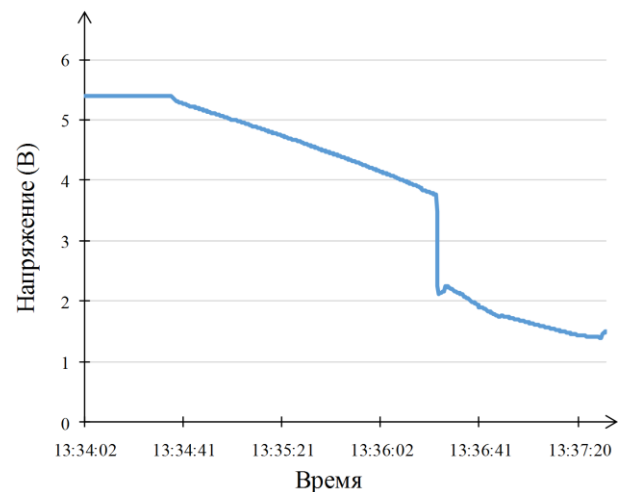


Рис. 12. График, который демонстрирует изменение напряжения на СК в процессе разряда на нагрузку в виде лампы накаливания мощностью 4 Вт напряжением 12 В

Как видно из рис. 11, заряд СК начинается с какого-то начального напряжения, обусловленного наличием остаточного заряда (точное значение этого начального напряжения по данным эксперимента составило 0,12 В). На рис. 12 в момент времени 13:36:22 наблюдается резкий спад напряжения, вызванный наличием минимально допустимого напряжения на входе повышающего преобразователя напряжения и качеством предшествующего процесса заряда с точки зрения накопленной ёмкости.

Следующий этап исследований предусматривал регистрацию напряжений при изменении солнечной радиации. На рис. 13 показан график изменения напряжения, зарегистрированного на выходе исследуемой СП при имитации облаков или других преград, вызывающих затемнение. График изменения напряжения на рис. 13 получен непосредственно с помощью программы PC Link.

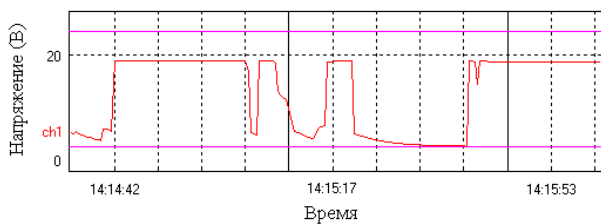


Рис. 13. График изменения напряжения, зарегистрированного на выходе исследуемой СП при имитации облаков или других преград, вызывающих затемнение

Эффективность применения СК как средств сглаживания отклонений и колебаний напряжения, которые могут возникнуть при работе СП, продемонстрирована на рис. 14. Изменения напряжения, наблюдающиеся до момента времени 14:17:14, возникли за счёт изменения солнечной радиации при появлении облаков (до указанного времени СК не были подключены). После указанного времени отклонения и колебаний напряжения не наблюдаются, что подтверждает эффективность применения СК.

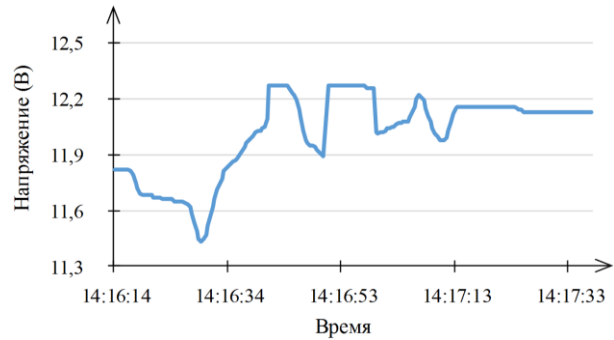


Рис. 14. График изменения напряжения в точке подключения нагрузки

Помимо экспериментальных исследований с использованием цифрового мультиметра Sanwa типа PC 510a и программы PC Link, было выполнено имитационное моделирование в среде PSCAD (Канада) с целью получения графика изменения напряжения на СК в процессе заряда. Программа PSCAD (Power Systems Computer Aided Design) представляет собой графический интерфейс пользователя для программы моделирования электромагнитных переходных процессов EMTDC (Electromagnetic Transients including DC). Она содержит библиотеку готовых простых и сложных электрических элементов, элементов управления, элементов отображения графиков, измерительных приборов и т.д., что позволяет выполнять схематическое построение электрических цепей, анализировать результаты моделирования и управлять данными. Если в библиотеке готовых элементов отсутствует требуемая модель, пользователь может создать собственную путём соединения существующих элементов в схему или путём создания её с нуля.

На рис. 15 представлена имитационная модель эквивалентной схемы замещения СК (рис. 6), разработанная в среде PSCAD [12, 13] (эквивалентная схема замещения экспериментальной установки и график изменения напряжения на СК в процессе заряда показаны на рис. 16 и 17, соответственно).

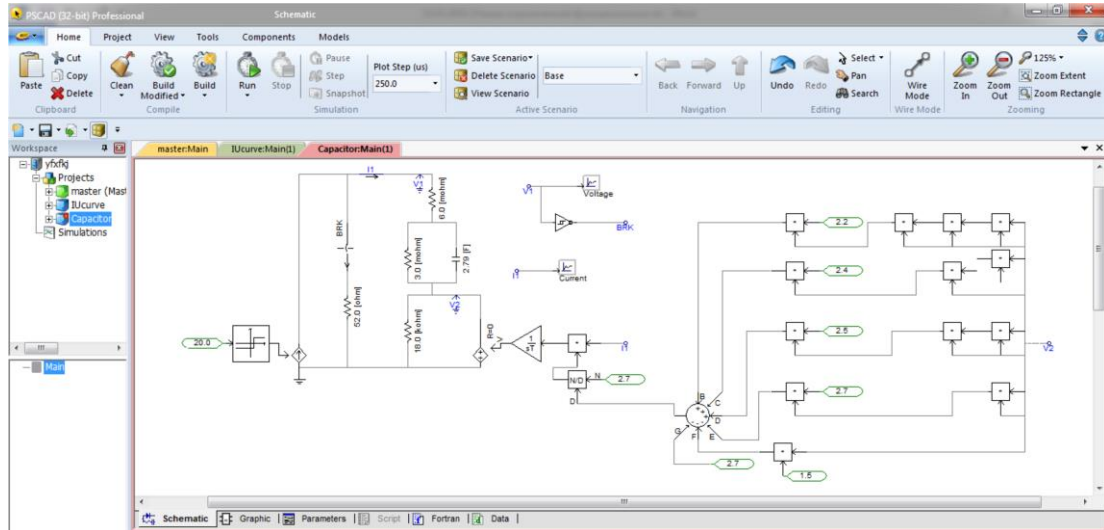


Рис. 15. Эквивалентная схема замещения СК, разработанная в среде PSCAD

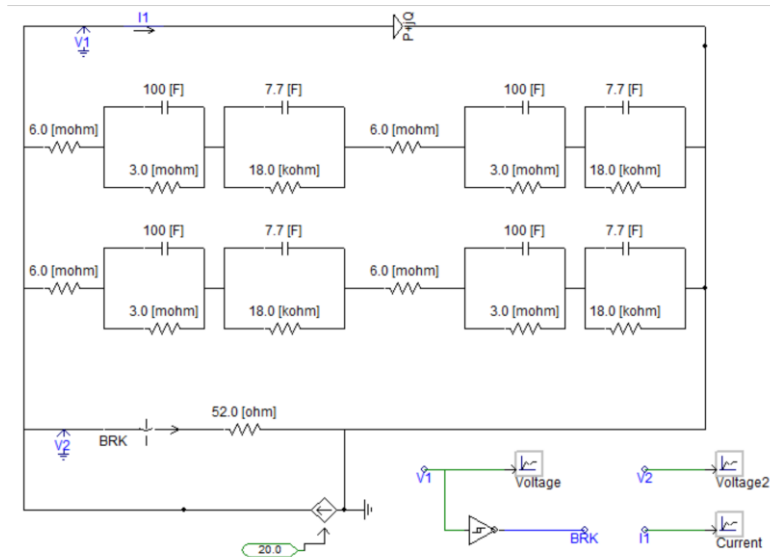


Рис. 16. Эквивалентная схема замещения экспериментальной установки в среде PSCAD

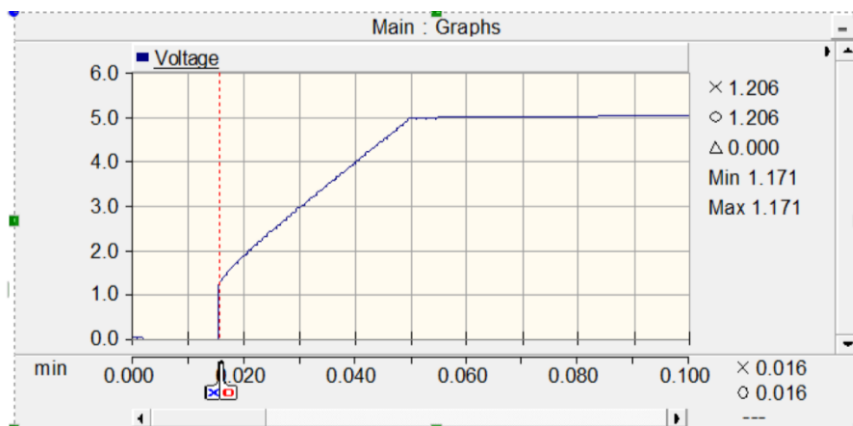


Рис. 17. График изменения напряжения на СК в процессе заряда

Висновки

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Разработана экспериментальная установка, состоящая из СП мощностью 10 Вт, СК с номинальным напряжением 2,7 В и ёмкостью 100 Ф каждый, преобразователей напряжения и нагрузки в виде лампы накаливания мощностью 4 Вт напряжением 12 В, которая позволяет осуществить мониторинг и анализ протекающих электромагнитных процессов в электрических сетях с СП (выполнить измерения параметров режима (токи, напряжения) и параметров элементов схемы (кривые заряда и разряда СК, остаточное напряжение и т.д.)).

2. Измерения и регистрация напряжений в разных точках схемы были выполнены с помощью цифрового мультиметра Sanwa (Япония), подключенного к ноутбуку с помощью специального кабеля, что позволило в режиме реального времени фиксировать 2-3 измерения за секунду, используя программу PC Link (Япония).

3. Экспериментально подтверждена эффективность применения СК как средств сглаживания отклонений и колебаний напряжения, которые могут возникнуть при работе СП.

4. В среде PSCAD (Канада) разработаны имитационные модели эквивалентной схемы замещения СК и эквивалентной схемы замещения экспериментальной установки, которые позволили получить график изменения напряжения на СК в процессе заряда.

5. Представленная в работе экспериментальная установка используется в учебном процессе ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет» при проведении лабораторных работ по дисциплине «Альтернативные источники электроэнергии».

6. В настоящее время проводятся исследования в области оптимизации параметров ГНМ с целью увеличения срока службы традиционно применяемых в составе ФУ

СВИНЦОВО-КИСЛОТНЫХ АБ.

Библиографический список

1. Tragianni, S. Supercapacitor sizing based on comparative study of PV power smoothing methods [Text] / S. D. Tragianni, O. K. Oureilidis, S. C. Demoulias // Proc. 52nd International Universities Power Engineering Conference (UPEC). – 28-31 August 2017. – Heraklion (Greece). – P. 1 – 6.
2. Pegueroles-Queralt, J. A power smoothing system based on supercapacitors for renewable distributed generation [Text] / J. Pegueroles-Queralt, F. D. Bianchi, O. Gomis-Bellmunt // IEEE Electrical Insulation Magazine. – 2015. – Vol. 62. – No. 1. – P. 343 – 350.
3. Masaki, M. S. A hierarchical predictive control for supercapacitor-retrofitted grid-connected hybrid renewable systems [Text] / M. S. Masaki, L. Zhang, X. Xia // Applied Energy. – 2019. – Vol. 242. – No. 9. – P. 393 – 402.
4. A capacity configuration control strategy to alleviate power fluctuation of hybrid energy storage system based on improved particle swarm optimization [Text] / T. Wu, X. Shi, L. Liao, C. Zhou, H. Zhou, Y. Su // Energies. – 2019. – Vol. 12. – No. 4. – P. 642 – 653.
5. Overview on hybrid solar photovoltaic-electrical energy storage technologies for power supply to buildings [Text] / J. Liu, X. Chen, S. Cao, H. Yang // Energy Conversion and Management. – 2019. – Vol. 187. – No. 9. – P. 103 – 121.
6. Optimal allocation of hybrid energy storage systems for smoothing photovoltaic power fluctuations considering the active power curtailment of photovoltaic [Text] / W. Ma, W. Wang, X. Wu, R. Hu, F. Tang, W. Zhang, X. Han, L. Ding // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – No. 1. – P. 74787 – 74799.

7. Battery lifetime enhancement via smart hybrid energy storage plug-in module in standalone photovoltaic power system [Text] / W. Jing, C. H. Lai, D. K. X. Ling, W. S. H. Wong, M. L. D. Wong // Journal of Energy Storage. – 2019. – Vol. 21. – No. 1. – P. 586 – 598.
8. Rekioua, D. Optimization of photovoltaic power systems: modelization, simulation and control [Text] / D. Rekioua, E. Matagne. – London: Springer-Verlag, 2012. – 296 p. – ISBN 978-1-4471-2348-4.
9. Villalva, M. Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays [Text] / M. G. Villalva, J. R. Gazoli, E. R. Filho // IEEE Transaction on Power Electronics. – 2009. – Vol. 24. – No. 5. – P. 1198 – 2008.
10. Villalva, M. Modeling and circuit-based simulation of photovoltaic arrays [Text] / M. G. Villalva, J. R. Gazoli, E. R. Filho // Proc. Brazilian Power Electronics Conference (COBEP). – 27 September – 1 October 2009. – Bonito-Mato Grosso do Sul (Brazil). – P. 1244 – 1254.
11. Development of a new compound method to extract the five parameters of PV modules [Text] / J. Bai, S. Liu, Y. Hao, Z. Zhang, M. Jiang, Y. Zhang // Energy Conversion and Management. – 2014. – Vol. 79. – No. 3. – P. 294 – 303.
12. Johansson, P. Comparison of simulation programs for supercapacitor modelling [Text] / P. Johansson, B. Andersson. – M.Sc. thesis, Dept. of Energy and Environment, Div. of Electric Power Engineering, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2008. – 131 p.
13. Hadartz, M. Battery-supercapacitor energy storage [Text] / M. Hadartz, M. Julander. – M.Sc. thesis, Dept. of Energy and Environment, Div. of Electric Power Engineering Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2008. – 117 p.
14. Cultura, A. B. Modeling, evaluation and simulation of a supercapacitor module energy storage application [Text] / A. B. Cultura, Z. M. Salameh // Proc. International Conference on Computer Information Systems and Industrial Applications (CISIA 2015). – 28-29 June 2015. – Bangkok (Thailand). – P. 876 – 882.
15. Saha, P. Equivalent circuit model of supercapacitor for self-discharge analysis – A Comparative Study [Text] / P. Saha, M. Hanra // Proc. International Conference on Signal Processing, Communication, Power and Embedded System (SCOPE). – 3-5 October 2016. – Paralakhemundi (India). – P. 1381 – 1386.

Ключові слова: суперконденсатор, сонячна панель, експериментальна установка, якість електроенергії, згладжування, криві заряду та розряду, програмне забезпечення PSCAD, моделювання.

Ключевые слова: суперконденсатор, солнечная панель, экспериментальная установка, качество электроэнергии, сглаживание, кривые заряда и разряда, программное обеспечение PSCAD, моделирование.

Keywords: supercapacitor, photovoltaic panel, experimental setup, power quality, smoothing, charge and discharge curves, PSCAD software, simulation.

Рецензенти:

проф., д.т.н., А. Б. Бойнік,
проф., д.ф.-м.н., В.І. Гаврилюк.

Поступила в редколлегию 10.05.2019

Принята к печати 17.05.2019