



ISSN 1311-0829

ГОДИШНИК НА ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ-СОФИЯ

Том 64, книга 4, 2014

VI^{та} КОНФЕРЕНЦИЯ НА ЕЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИ ФАКУЛТЕТ „ЕФ 2014“

15 – 17 септември 2014 г., Созопол, България



PROCEEDINGS OF TECHNICAL UNIVERSITY OF SOFIA

Volume 64, Issue 4, 2014

VIth CONFERENCE OF FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING “EF 2014”

September 15 - 17, 2014, Sozopol, Bulgaria

МОДЕЛИРАНЕ НА МИКРОМРЕЖИ И АВТОНОМНИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГИЙНИ СИСТЕМИ С АКУМУЛИРАЩИ УСТРОЙСТВА

Рад Станев, Анастасия Кръстева, Методи Георгиев, Мартин Райков,
Михаил Анчев, Христо Анчев

Резюме: Тази статия представя математични модели за симулационен анализ на микромрежи и автономни електроенергийни системи (ЕЕС) с акумулиращи устройства. Особено внимание е отделено на моделирането на акумулаторните батерии за съхранение на електрическа енергия. Представена е верификация и оценка на точността чрез сравнение на резултати от моделните симулации със записи на режимните параметри от реален обект.

Ключови думи: автономни електроенергийни системи, микромрежи, устройства за съхранение на електрическа енергия, акумулаторни батерии

MODELING OF MICROGRIDS AND AUTONOMOUS POWER SYSTEMS WITH STORAGE DEVICES

Rad Stanev, Anastasia Krusteva, Metody Georgiev, Martin Raykov,
Michail Anchev, Hristo Antchev

Abstract: This article presents mathematical models of the elements of microgrids and autonomous power systems with storage devices. A special attention is payed to the energy storage devices' modeling. A verification and accuracy analysis using comparison between model simulations and state parameters measurements of existing is presented.

Keywords: autonomous electrical power systems, microgrids, energy storage devices

1. ВЪВЕДЕНИЕ

През последните години е налице тенденция на навлизане на децентрализирани източници за производство и съхранение на електрическа енергия в ЕЕС. Увеличава се броят и мощностите на автономните, островни и хибридни системи, където възобновяемите източници са основен източник на електроенергия. Променливият и стохастичен характер на производството и потреблението в такива системи налага съхраняването на част от енергията. В процеса на експлоатация автономните системи и микромрежите се намират в различни режими, обусловени от техните параметри, които следва да бъдат изследвани. Целта на настоящия доклад е да се изследват математични модели на акумулиращите елементи в микромрежи и автономни ЕЕС, които да позволят анализа на пове-

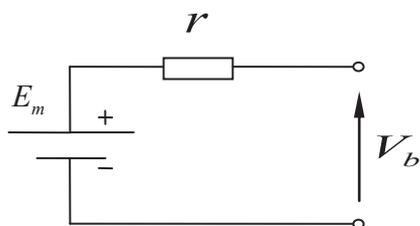
дението им при бавни преходни процеси, както и възникващите взаимовъздействия с останалите елементи в системата.

2. МОДЕЛЕН ПОДХОД

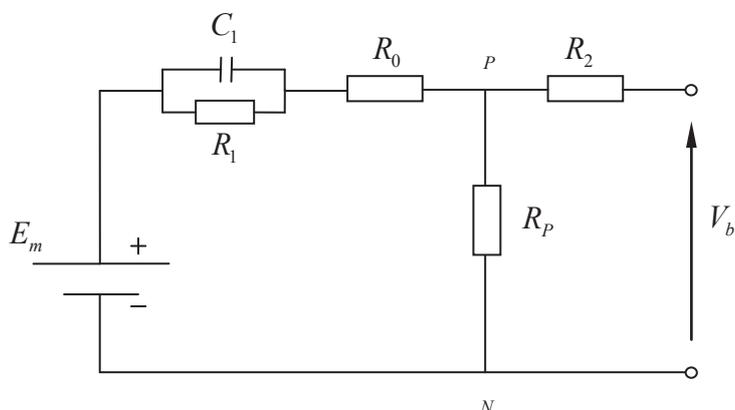
За анализа на най-бавните преходни процеси в многомерни микромрежи и автономни ЕЕС е приложен структурен квазидинамичен подход с обобщени модели на единични типови елементи [1,2]. Ползваните модели са опростени и същевременно отразяват достатъчно точно свързаността между елементите и взаимодействията им. Описанието на фотоволтаичните генератори е осъществено чрез модифициране на моделът от [3] до вида от [4]. Полупроводниковите преобразуватели - мрежови инвертори, автономни инвертори и зарядни регулатори са симулирани посредством моделните описания, представени в [2] при отчитане на ограниченията, породени от режимните параметри в системата и ограниченията в останалите единични елементи. Пасивната част на системата се описва посредством моделите представени в [2].

3. МАТЕМАТИЧЕСКИ МОДЕЛ НА АКУМУЛИРАЩ ЕЛЕМЕНТ

Представени са два модела – опростен и усъвършенстван. Опростеният модел [5] се състои от идеален източник на напрежение E_m , представляващ електродвижещото напрежение на батерията и свързано последователно съпротивление r , представляващо вътрешното съпротивление – фиг.1. V_b е напрежението на изходите на батерията.



Фиг.1. Еквивалентна заместваща схема на батерия - опростен модел



Фиг.2. Еквивалентна заместваща схема на батерия - усъвършенстван модел

Този модел е прост и може да се използва за груби, ориентировъчни изчисления. Описва се с уравнението:

$$V_b = E_m \pm r \cdot I \quad (1)$$

Усъвършенстваният модел на батерия [6,7] отразява основните динамични изменения, възникващи в батерията и същевременно не изисква голямо изчислително време, което го прави приложим в анализа на бавните преходни процеси. Еквивалентна му заместваща схема е показана на фиг.2. Схемата се състои от динамично променящ се източник на напрежение (E_m), променливи съпротивления, отчитащи вътрешното съпротивление, съпротивление, възникващо при по-

вишено напрежение, както и идеален кондензатор, представящ капацитета на батерията. Характерна особеност на заместващата схема е, че не отчита само-разряда на батерията, тъй като в съвременните технологии той е пренебрежимо малък при режим близък до цикличния, в който най-често работят автономните и хибридни микро електроенергийни системи [6,7].

Друга характеристика на тази схема е добавянето на паралелен клон ($P-N$). Този клон отчита загубите, които възникват при заряд на батерията, например поради частична електролиза на водата и непълна рекомбинация. Неговото действие се отчита само при заряд на батерията. Съпротивлението на паралелния клон R_p е функция на тока (I_p), който е функция на напрежението на клона V_{PN} , отразявайки по този начин нелинейното поведение на целия клон. Други моделни параметри са:

- Ниво на заряд и дълбочина на заряда

При усъвършенствания модел на акумулаторна батерия за номинален капацитет може да се използва капацитета $C(0, \theta)$, а за действителния капацитет - $C(I_{avg}, \theta)$. Следователно за нивото на заряда SOC и дълбочината на разряда DOC се получава:

$$SOC = 1 - Q_e / C(0, \theta) \quad (3); \quad DOC = 1 - Q_e / C(I_{avg}, \theta), \quad (2)$$

където $Q_e(t) = \int_0^t I(\sigma) d\sigma$ е зарядът, изразходен от батерията; $C(0, \theta)$ - номинален капацитет на батерията; $C(I_{avg}, \theta)$ - действителният капацитет на батерията при определен разряден ток.

- Електродвижещо напрежение

Електродвижещото напрежение на батерията (E_m) е разликата между потенциалите на двата електрода. Когато батерията се зарежда или разрежда, плътността на електролита се променя, следователно електродвижещото напрежение се променя в зависимост от промяната на нивото на заряд. Връзката между двете е право пропорционална – с повишаване на нивото на заряд се увеличава и електродвижещото напрежение. То може да бъде представено с уравнението:

$$E_m = E_{m0} - K_E (273 + \theta)(1 - SOC), \quad (3)$$

където E_{m0} , K_E - константи за батерията; θ - температура на клетката на батерията.

- Вътрешно съпротивление на батерията

Съпротивленията, представени на фиг.2, могат да бъдат пресметнати чрез следните уравнения:

$$R_0 = R_{00} [1 + A_0 (1 - SOC)] \quad (4); \quad R_1 = -R_{10} \ln(DOC) \quad (5); \quad R_2 = R_{20} \frac{e^{[A_{21}(1-SOC)]}}{1 + \exp(A_{22} I_m / I^*)}, \quad (6)$$

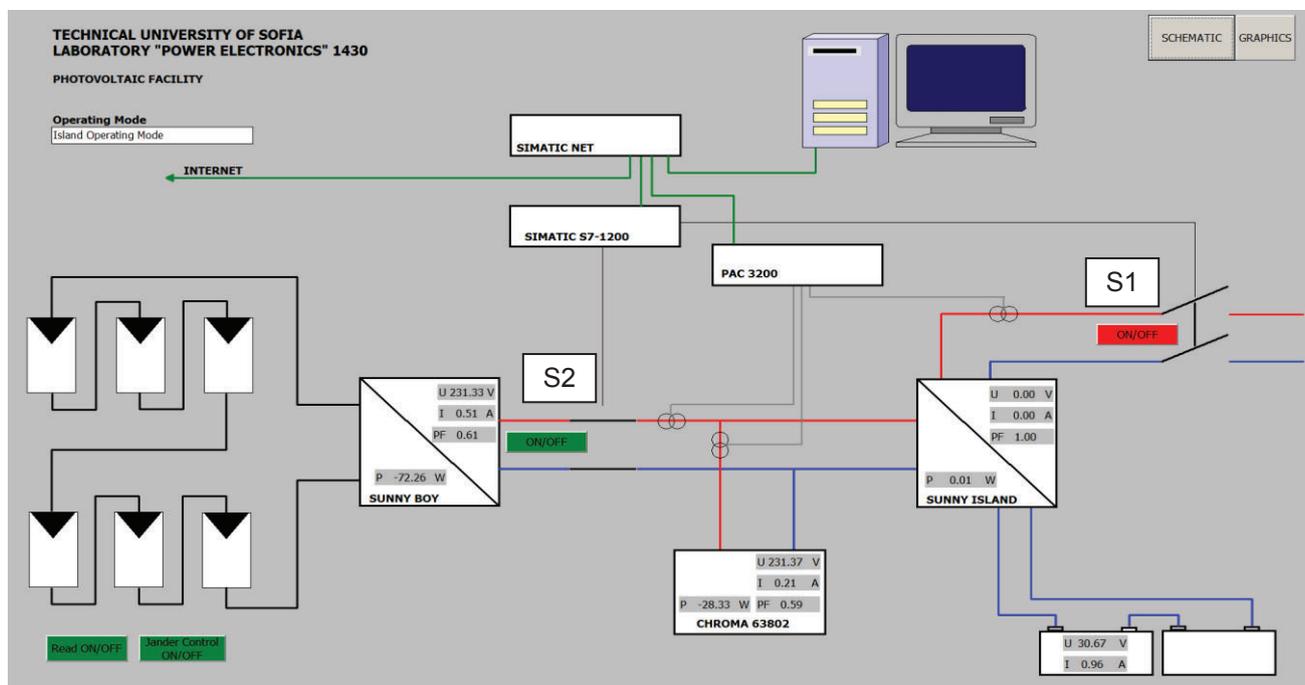
където A_0 , A_{21} и A_{22} са константи за всяка батерия, а R_{00} , R_{10} и R_{20} са параметри, свързани със състоянието на здравето SOH [4]. При този модел съпротивлението R_{20} може да се приеме за равно на нула, когато батерията се разрежда.

6. РЕАЛИЗАЦИЯ

Представените модели са реализирани програмно в средата на Matlab като модул, интегриран към програмата STATUS [2] за статичен и квазидинамичен анализ на електроенергийни системи. Благодарение на приложеният обектно ориентиран подход, моделът може да бъде ползван и от други приложения.

7. ИЗСЛЕДВАНА СИСТЕМА

За верификация и оценка на адекватността на моделите е изследвана хибридна система в лаборатория Силова Електроника на ТУ-София, свързана към електрическата мрежа ниско напрежение (фиг.3).



Фиг.3. Общ вид и принципна схема на изследваната тестова система

Системата се състои от фотоволтаичен генератор с 6 броя фотоволтаични модули Sharp NT175, мрежови инвертор SMA Sunny Boy 1200, автономен инвертор-заряден регулатор SMA Sunny Island 2224, 2 броя оловно киселини акуму-

латорни батерии CSB GPL121000 (12V, 100Ah), управляем променливотоков товар Chroma AC 63802, система за мониторинг, свързана към интернет, SCADA система и PLC контролер за управление на параметрите и превключвателите S1 и S2.

8. ИЗСЛЕДВАНИ РЕЖИМИ

За да бъде анализирана приложимостта и валидността на представените математически модели са проведени експериментални и моделни изследвания в различни режими на работа на системата. В настоящата работа накратко ще бъдат представени част от резултатите, отнасящи се до два характерни режима- на заряд и разряд. Сходни резултати са получени и при останалите режими.

- Режим на разряд, с активен товар $P=800W$ при $\cos\varphi=1$

В начално състояние батерията е напълно заредена, след като преди експеримента автономният инвертор- заряден регулатор Sunny Island е работил достатъчно дълго, свързан към външната мрежа (S1- включен) в режим на заряд и последващ продължителен подзаряд.

Състоянията на елементите по време на експеримента са както следва: Превключвател външна мрежа S1- изключен; Превключвател вътрешна мрежа S2- изключен; Sunny Boy- изключен; Sunny Island- включен; Акумулаторни батерии- включени; Товар Chroma AC 63802- включен, $P=800W$; фактор на мощността на товара $\cos\varphi=1$.

Продължителността на експеримента е до спиране на работата на Sunny Island в автономен инверторен режим поради разреждане на батериите до максималния допустим експлоатационен разряд.

- Режим на заряд в три фази: 1- с ограничен заряден ток; 2- с ограничено зарядно напрежение; 3- режим на подзаряд.

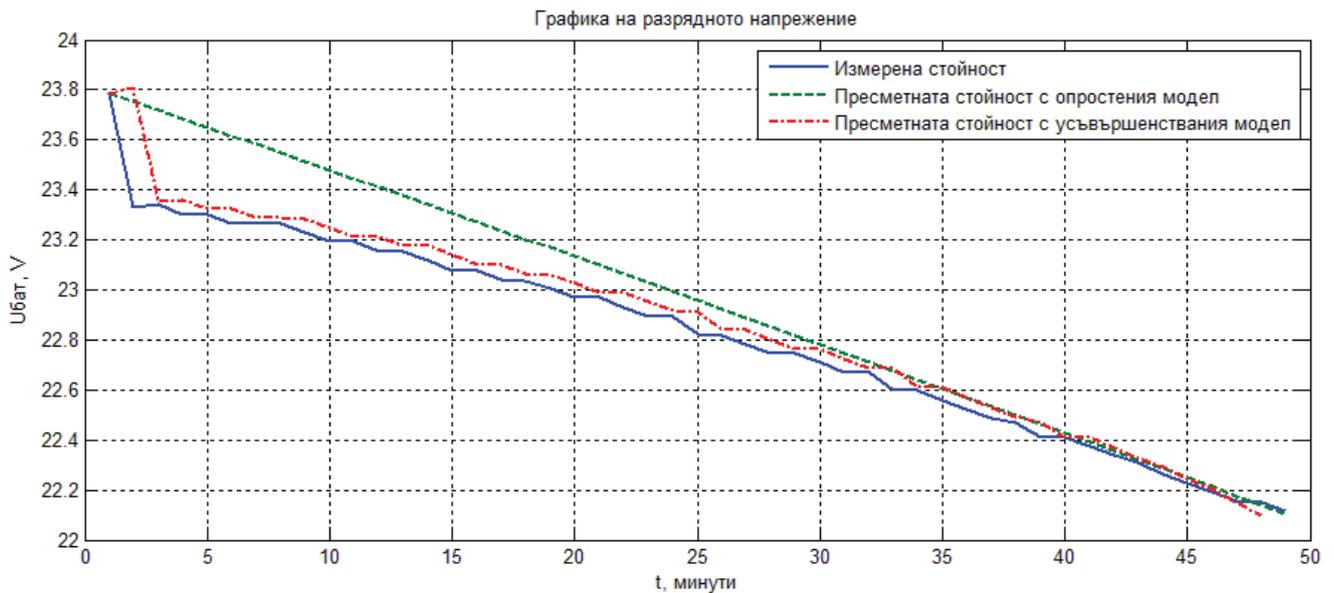
В начално състояние батерията е разрежена, след като Sunny Island е работил достатъчно дълго в режим на разряд.

Състоянията на елементите по време на експеримента са както следва: Превключвател външна мрежа S1- включен; Превключвател вътрешна мрежа Sunny Boy S2- изключен; Sunny Boy- изключен; Sunny Island- включен; Акумулаторни батерии- включени; Товар Chroma AC 63802- изключен.

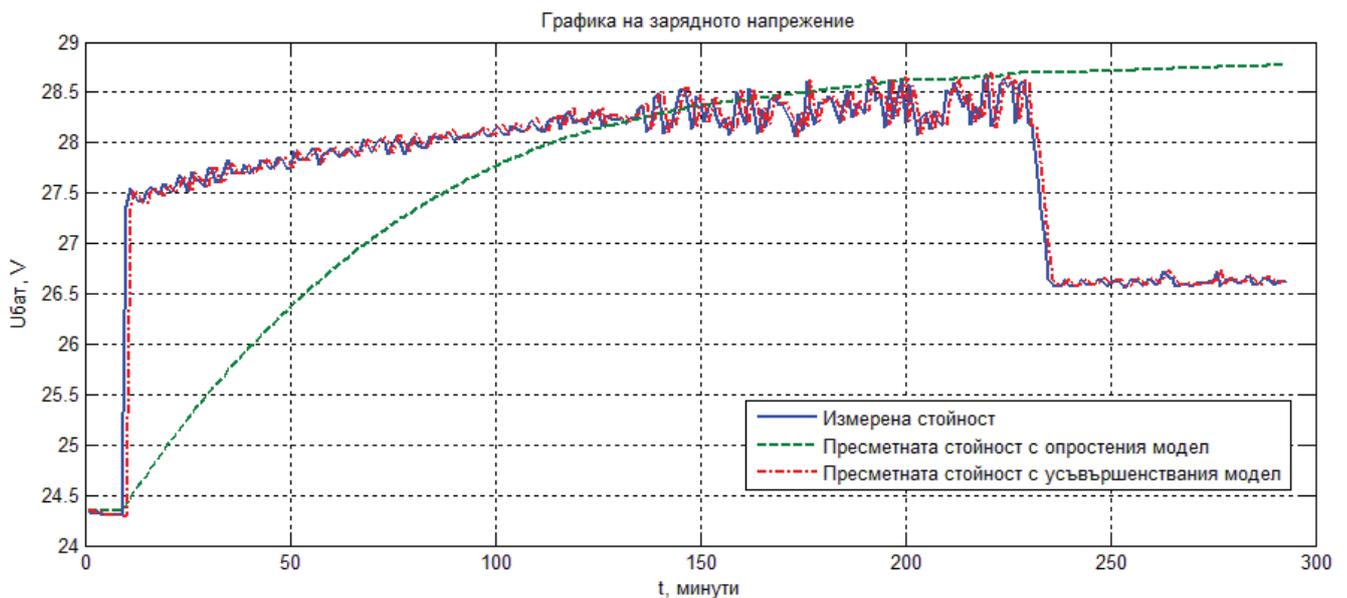
Продължителността на експеримента е до пълно разреждане на батериите.

9. РЕЗУЛТАТИ

Разгледаните характерни режими на разряд и заряд на акумулаторните батерии са изследвани симулационно с помощта на програмата *STATUS*. Фиг.4 представя измереното действително разрядно напрежение, както и разрядните напрежения, получени аналитично чрез опростения и усъвършенствания модел на акумулаторна батерия. Аналогично фиг.5 представя сравнение между измерените и изчислените от симулацията стойности за зарядното напрежение. Поради несъвършенства на регулаторите на елементите на системата се наблюдават флукутации в разрядното и зарядното напрежение, породени от измененията в тока от или към батерията.



Фиг.4. Графика на разрядните напрежения



Фиг.5. Графика на зарядните напрежения

Както е видно от графиките при усъвършенствания модел е налице добро съвпадение между аналитично изчислените и практически измерените параметри, както в режим на заряд, така и в режим на разряд.

Противно на него опростения модел има задоволителна за груби изчисления точност при разряд и твърде ниска точност в режим на заряд.

В табл.1 са синтезирани резултатите от направения анализ на грешките. Показани са отклоненията (грешките) на двата модела спрямо действителните измерени стойности. Получените резултати показват добра адекватност и приемлива точност на усъвършенствания модел.

Таблица 1
Грешки на моделите

		Модел 1 (опростен)	Модел 2 (усъвършенстван)
Разряд	Максимална абсолютна грешка, V	0,4214	0,4749
	Максимална относителна грешка, %	1,8061	2,0357
	Относителна интегрална грешка, %	0,6134	0,1983
Заряд	Максимална абсолютна грешка, V	3,0757	0,2646
	Максимална относителна грешка, %	11,1641	0,9257
	Относителна интегрална грешка, %	0,1125	0,0132

10. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представени са математични модели на елементи за симулационно изследване на микромрежи и автономни ЕЕС с акумулаторни батерии, които са реализирани в програмата *STATUS*. Акцент в настоящата работа представлява направения анализ на точността на моделите за симулация на акумулаторни батерии посредством сравнително симулационно и физическо моделиране на система с оловно киселинни акумулаторни батерии. Получените резултати показват добра адекватност за представения усъвършенстван модел. Този модел може успешно да се използва при анализа на установените режими, бавните динамични процеси в разпределителните мрежи, както и за анализа на стратегии за енергийно управление на хибридни и автономни микро-мрежи. От резултатите и вида на графиките е видно, че получените отклонения до голяма степен имат детерминистичен характер и при необходимост моделът има потенциал за постигане на още по-висока точност чрез модифициране и по-прецизно определяне на моделните параметри за конкретния обект на изследване.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторите изказват своята благодарност към Министерството на образованието и науката на Република България и Европейската комисия за подкрепата в рамките на проекта DERri GA No 228449 по FP7 <http://www.der-ri.net>, съфинансиран от МОН по договор № ДКОФ7РП02/4-03 на НИС при ТУ– София. Авторите са единствено отговорни за съдържанието на тази публикация. Тя не представя мнението на Европейската комисия и Европейската комисия не е отговорна за никое приложение, което може да е направено от данните показани в нея.

ACKNOWLEDGEMENT

The authors thank the Bulgarian Ministry of Education and Research and European Commission for the support from the FP7 project DERri, GA No 228449 (<http://www.der-ri.net>) co-financed from Bulgarian Ministry of Education and Research, Contract No ДКОФ7РП02/4. The authors are solely responsible for the content of this publication, it does not represent the opinion of the European Community and the European Community is not responsible for any use that might be made of data appearing therein.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Stanev R., A. Krusteva, C. Tornelli, C. Sandroni, *A quasi-dynamic approach for slow dynamics time domain analysis of electrical networks with distributed energy resources*, Fifth Scientific Conference of EF 2013, 02.09.-05.09.2013, Proceedings of the Technical University of Sofia, Volume 63, Issue 6 (2013), pp. 273-281, ISSN 1311-0829
- [2] T. Strasser, E. Rikos, P. Moutis, P. Kotsampopoulos, C. Tornelli, A. Villa, R. Chiumeo, F. Belloni, A. Guagliardi, C. Sandroni, A. Krusteva, R. Stanev, F. Andren, P. Jonke, F. Lehfuss, *Parameter Identification and Validation Procedure for DER Component Models - Part B: Procedures D3.3.2*, DERri FP7 Deliverable, 01.2013
- [3] Helmut Eckstein, *Detailed Modeling of Photovoltaic System Components*, University of Wisconsin - Madison, 1990.
- [4] Станев Р., М. Райков, Л. Кръстев, Л. Костова, И. Чаталбашев, *Математическо моделиране на фотоволтаичен генератор за нуждите на анализа на установени режими в разпределителни електрически мрежи*, III Научна конференция ЕФ 2011, Том 1, 2011г.
- [5] Guo, S., *The Application of Genetic Algorithms to Parameter Estimation in Lead-Acid Battery Equivalent Circuit Models*, University of Birmingham, May 2010
- [6] Al-Qasem, O., *Modeling and Simulation of Lead-Acid Storage Batteries within Photovoltaic Power Systems*, PhD Thesis An-Najah National University, 2012
- [7] Станев Р, М. Райков, *Математическо моделиране на акумулаторни батерии за нуждите на квазидинамичния анализ на хибридни микро ЕЕС*, V научна конференция ЕФ 2013, 02.09-05.09.2013, Созопол, България, стр. 281-288, ISSN 1311-0829

Автори: Рад Станев, доцент д-р инж., катедра „Електроенергетика”, Електротехнически Факултет, Технически Университет-София, E-mail adress: rstanev@tu-sofia.bg, Анастасия Кръстева, доцент д-р инж., катедра „Силова електроника”, Факултет Електронна Техника и Технологии, Технически Университет-София, E-mail adress: krusteva@tu-sofia.bg, Методи Георгиев, доцент д-р инж., катедра „Автоматизация на непрекъснатите производства”, Факултет Автоматика, Технически Университет-София; Мартин Райков маг. инж., катедра „Електроенергетика”, Електротехнически Факултет, Технически Университет-София; Михаил Анчев, професор д-р инж., катедра „Силова електроника”, Факултет Електронна Техника и Технологии, Технически Университет-София, инж. Христо Анчев – асистент д-р, катедра „Силова електроника”, Факултет Електронна Техника и Технологии, Технически Университет-София,

Постъпила на 15.12.2014 г.

Рецензент проф. д-р инж. Владимир Лазаров