

## ENERGY LOSSES FROM SUPERCAPACITOR BANKS USED IN AUTONOMOUS PV POWERED IRRIGATION SYSTEMS<sup>6</sup>

---

**Assoc. Prof. Dr. Boris I. Evstatiev**

Department of Electronics,  
University of Ruse, Bulgaria  
E-mail: bevstatiev@uni-ruse.bg

**Assist. Prof. Dr. Katerina Gabrovska-Evstatieva**

Department of Computer Science,  
University of Ruse, Bulgaria  
E-mail: kgg@ami.uni-ruse.bg

***Abstract:** In this paper are investigated through simulation the energy losses of a supercapacitor bank, used in an autonomous PV powered pumping installation. initially, a methodology of the investigation is created based on well-known electrical engineering dependencies and several approximations. Next, a testing scenario is selected with a 300 F/27 V supercapacitor bank, a 200 W PV module and 200 W/24 V pump. Furthermore, three typical weather conditions are selected – sunny day, partly cloudy day and cloudy day. for each of them is performed a simulation and the energy losses from charging/discharging are estimated. The obtained results show that the energy losses increase with the increase in the cloudiness, which is caused by the increased capacitor currents. Nevertheless, if low-resistance connections are ensured between the supercapacitors, the energy losses should not surpass 1%. Therefore, the results from this study show that a supercapacitor bank could be an extremely efficient and effective addition to a PV powered pumping station.*

***Keywords:** Supercapacitors, PV, Irrigation system, Charge controller*

***JEL Codes:** L60*

### ВЪВЕДЕНИЕ

За развитието на съвременното устойчиво и конкуретноспособно земеделие е задължително напояването на земеделските култури. От друга страна, редица селскосоптански райони нямат директен достъп до водоизточник и/или електроенергия. В такива ситуации е целесъобразно използването на вода за напояване от подпочвени източници, които се запазват от възобновяеми енергийни източници (ВЕИ).

Редица научни изследвания изследват приложимостта на ВЕИ в системите за напояване. В Elgendy et al (2010) е показано, че утилизацията на енергия от помпи, запазвани директно от фотоволтаични (ФВ) източници, е доста ниска, но ефективността на системата може да се повиши чрез използването на DC-DC преобразувател. Sontake et al (2020) изследват влиянието на водния стълб и на различни ФВ конфигурации върху критичната стойност на слънчевата радиация и върху количеството изпомпана вода. Общата ефективност на помпените системи се изменя в големи граници, но не надвишава 60%. Stoyanov et al (2019) представят методология за оразмеряване на ФВ система за осигуряване на помпена станция. В изследването се предполага наличието на водно хранилище, в което се изпомпва водата, а след това се използва при необходимост. Evstatiev et al. (2019) анализират потенциала на слънчевата енергия за региона на Русе (България) за енергоосигуряване на напоителна система. Установено е, че ФВ система с мощност 1kW има потенциал да осигури необходимата напоителна норма за 900 дръвчета, при дълбочина на кладенеца – 25m. Изследването разглежда и възможността за съгласуване на източник и товар, използвайки няколко помпи с малка мощност.

---

<sup>6</sup> Докладът е представен на 13 ноември 2020 с оригинално заглавие на български език: ОЦЕНКА НА ЕНЕРГИЙНИТЕ ЗАГУБИ ОТ СУПЕРКОНДЕНЗАТОРИ, ИЗПОЛЗВАНИ В АВТОНОМНИ НАПОИТЕЛНИ СИСТЕМИ, ЗАХРАНВАНИ ОТ ФОТОВОЛТАИЧНИ ИЗТОЧНИЦИ

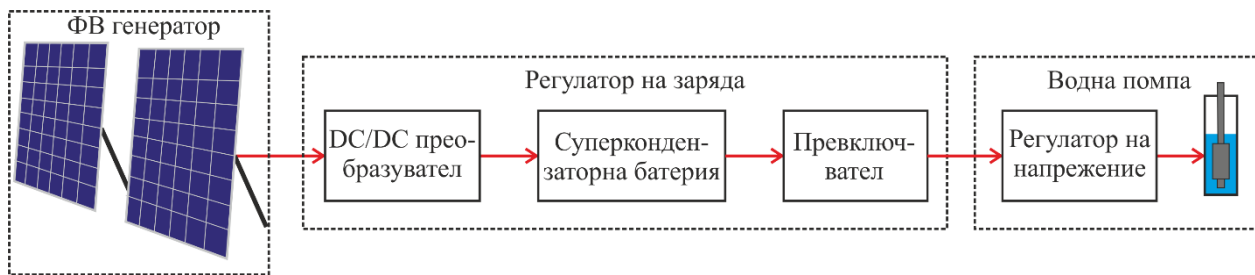
Glavin and Hurley (2012) и Camara et al (2013) изследват помпени системи, захранвани от ФВ източници с батерии и суперкондензатори. Das and Mandal (2018) сравняват ефективността на малка водна помпа при различни схеми на електроснабдяване. Най-добри резултати са получени при използване на ФВ с батерии и заряден контролер и ФВ със суперкондензатор без заряден контролер, в зависимост от водния стълб. Das et al. (2017) показват, че използването на суперкондензатор, свързан паралелно на постояннотокова помпа, може да увеличи значително ефективността на системата. На този етап не са известни публикации, изследващи ефективността на фотоволтаична система със суперкондензаторни батерии и регулатор на заряда.

**Целта на настоящия доклад е** да се изследват загубите на електроенергия от зареждане и разреждане на суперкондензаторна батерия в помпена система, захранвана от фотоволтаичен генератор.

## ИЗЛОЖЕНИЕ

### Методика на изследването

В настоящото изследване се разглежда напоителна помпена система, захранване от фотоволтаичен източник на напрежение, посредством регулатор на заряда (Фиг. 1). В него условно се включват DC/DC преобразувател, суперкондензаторна батерия и превключвател, който отговаря за включването и изключването на помпата. Приема се, че самата водна помпа има собствен регулатор на напрежението, който поддържа консумираната мощност в необходимите граници.



Фиг. 1. Принципна схема на помпената система с фотоволтаично захранване.

От теорията на електротехниката е известно, че ако напрежението на кондензатор е  $U_C$ , енергията  $A_C$ , заредена в кондензатора, е:

$$A_C = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U_C^2, J. \quad (1)$$

Следователно, ако напрежението на кондензатора се промени от  $U_{C1}$  до  $U_{C2}$ , допълнителната заредена/разредена енергия е:

$$A_C = \frac{1}{2} \cdot C \cdot (U_{C2}^2 - U_{C1}^2). \quad (2)$$

В случай, че  $U_{C2} \approx U_{C1} \gg 0$  и кондензаторът се зарежда с постоянна мощност  $P$  за време  $\Delta T$ , горното уравнение може да се представи като:

$$A_C = P \cdot \Delta T \approx \frac{1}{2} \cdot C \cdot (U_{C2}^2 - U_{C1}^2), \quad (3)$$

от където, за напрежението  $U_{C2}$  се получава:

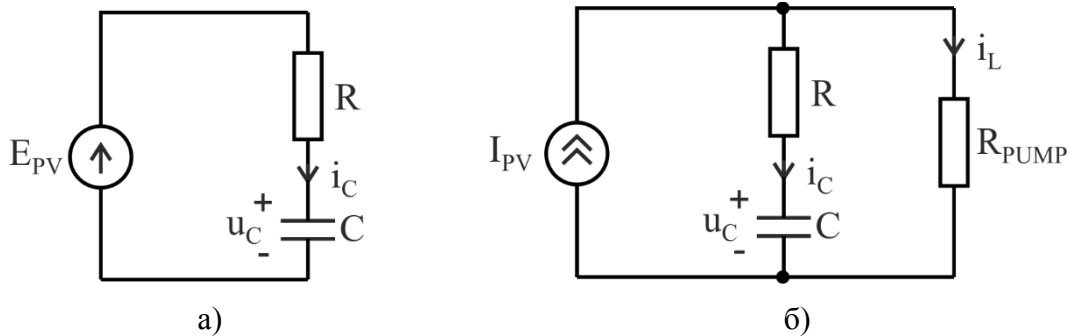
$$U_{C2} = \sqrt{\frac{2 \cdot P \cdot \Delta T}{C} + U_{C1}^2}. \quad (4)$$

Средната стойност на тока  $i_C$  във времевия интервал  $\Delta T$  може да се изрази чрез:

$$i_C = C \frac{du_C}{dt} = C \frac{U_{C2} - U_{C1}}{\Delta T} \quad (5)$$

Моделирането на процеса на енергозахранване на напоителна помпа се реализира с две еквивалентни заместващи схеми (Фиг. 2):

- При изключена помпа (Фиг. 2а) – комбинацията от фотоволтаичен източник и DC/DC преобразувател се представя чрез идеалния източник ( $E_{PV}$ ), който захранва последователна RC верига;
- При включена помпа (Фиг. 2б) – комбинацията от фотоволтаичен източник и DC/DC преобразувател се представя чрез идеалния източник на ток ( $I_{PV}$ ). Помпата ( $R_{PUMP}$ ) се захранва едновременно от източника и от кондензатора.



Фиг. 2. Еквивалентна заместваща схема при: а) изключена помпа; б) включена помпа.

Следователно, зарежданата/разрежданата в кондензатора енергия  $p_C(t)$  и загубите на енергия  $p_{loss}(t)$  в следствие на зареждане/разреждане се определят съответно с:

$$p_C(t) = i_C(t) \cdot u_C(t) \quad (6)$$

$$p_{loss}(t) = i_C^2(t) \cdot R \quad (7)$$

## Резултати

Загубите от зареждане/разреждане на суперкондензатора, се оценяват при следния сценарий:

- Инсталирана мощност на фотоволтаика:  $P_{PV} = 200 \text{ W}$ ;
- Суперкондензаторна батерия:  $C = 300 \text{ F}$ ,  $R \geq 2,9 \text{ m}\Omega$ ,  $U_{WRK} = 27 \text{ V}$ ;
- Водна помпа:  $P_{PUMP} = 200 \text{ W}$ ,  $U_{PUMP} = 24 \text{ V}$ .

Суперкондензаторната батерия се реализира с десет последователно съединени кондензатори MAXWELL, с капацитет  $3000 \text{ F}$ , активно съпротивление  $0,29 \text{ m}\Omega$  и работно напрежение  $2,7 \text{ V}$ . Освен това, загубите на енергия се изследват при три сценария на товаровия график от фотоволтаичния генератор:

- Слънчев ден;
- Ден с променлива облачност;
- Облачен ден.

За целта са използвани експериментални данни от фотоволтаичен парк Arev Premier OOD (гр. Русе), налични на уеб сайта Sunny Portal. С цел повишаване прецизността на изследването, стъпката на дискретизация на товаровия график е намалена от  $15 \text{ min}$  до  $1 \text{ min}$  ( $60 \text{ s}$ ). Резултатите от извършените симулации са представени графично на фиг. 3, като за по-добра видимост са показани единствено часовете от денонощието, в които има произведена ФВ енергия. Вижда се, че мощността на кондензатора приема положителни и отрицателни

стойности: положителните съответстват на периодите на зареждане (при изключена помпа), а отрицателните – на периодите на разреждане (при включена помпа).

Резултатите от изследването са обобщени в табл. 1. От нея се вижда, че загубите са по-малки в слънчев ден и се увеличават с появата на облачност. Това се дължи, на по-големите токове, течащи през кондензатора при включена помпа, тъй като по-малка част от хранящия ток идва от ФВ източник. Както се очаква, с увеличаване активното съпротивление  $R$  на кондензаторната батерия, се увеличават и загубите, като зависимостта е почти линейна. Все пак, загубите от зареждане/разреждане на суперкондензаторната батерия са сравнително малки, като при  $R = 500 \text{ m}\Omega$  те не надхвърлят 12%, а при  $R = 5 \text{ m}\Omega$  са по-малки от 0,13%.

Таблица 1. Обобщение на резултатите от изследването при различни стойности на активното съпротивление  $R$  на резистора.

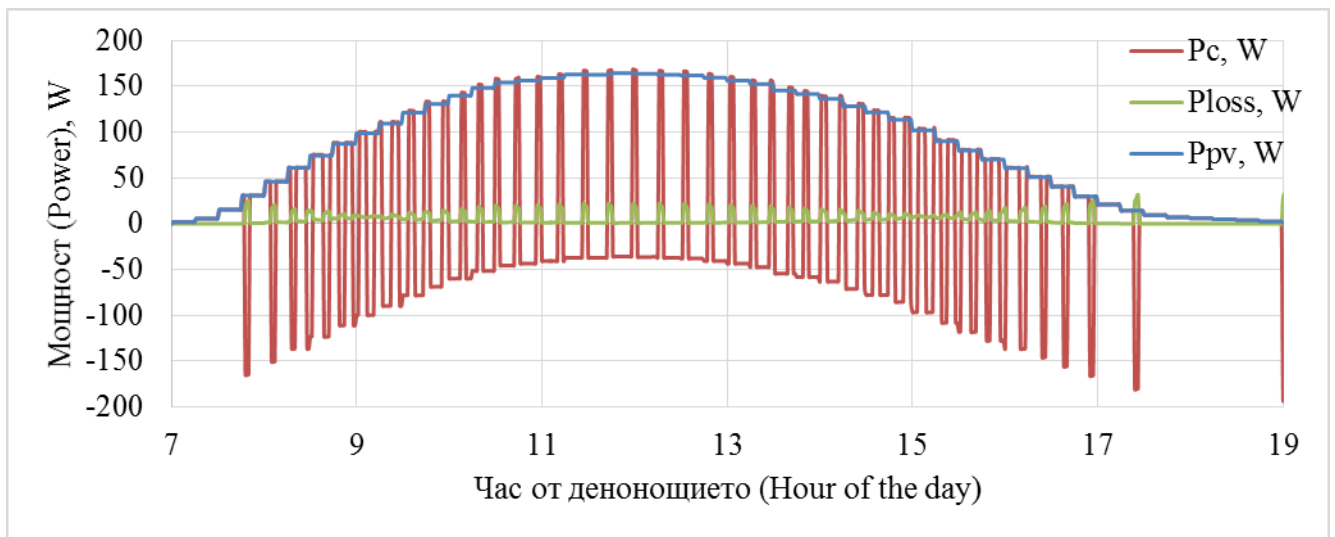
$R, \text{ m}\Omega$	Слънчев ден			Ден с променлива облачност			Облачен ден		
	5	50	500	5	50	500	5	50	500
ФВ енергия, $Wh$	1149			777			336		
Консумирана енергия от помпите, $Wh$	1148	1143	1090	776	770	713	335	332	297
Загуби на енергия, $Wh$	0,62	6,2	59	0,7	7	64	0,44	4,3	39
Загуби на енергия, %	0,054	0,54	5,13	0,09	0,90	8,2	0,13	1,3	11,6
Време на работа на помпите, $h$	5,7	5,7	5,5	3,9	3,9	3,6	1,7	1,7	1,5

От табл. 1 също така може да се види, че наличието на суперкондензаторна батерия позволява използването на почти цялата налична ФВ енергия. За конкретните използвани товарни графици, помпата работи около 5,7 h, 3,9 h и 1,7 h, съответно при слънчев ден, ден с променлива облачност и облачен ден.

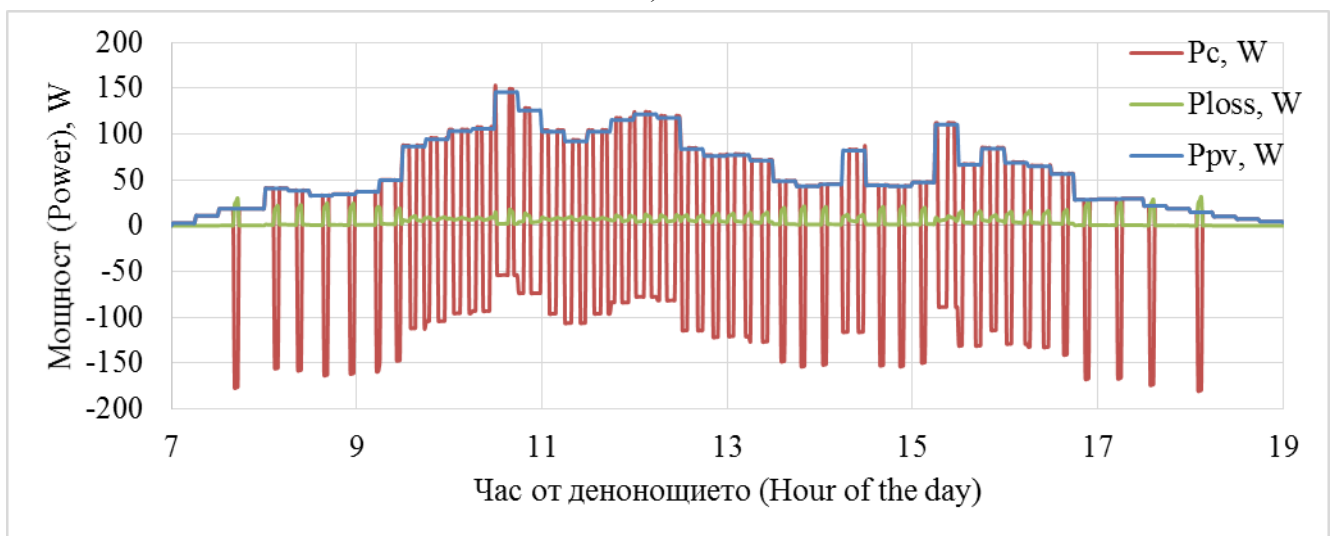
## ИЗВОДИ

В настоящия доклад е извършено симулационно изследване за определяне загубите при зареждане/разреждане на суперкондензаторна батерия, използвана в автономна ФВ система за храняване на помпена инсталация. Представена е методика на изследването и са разработени еквивалентни заместващи схеми на инсталацията.

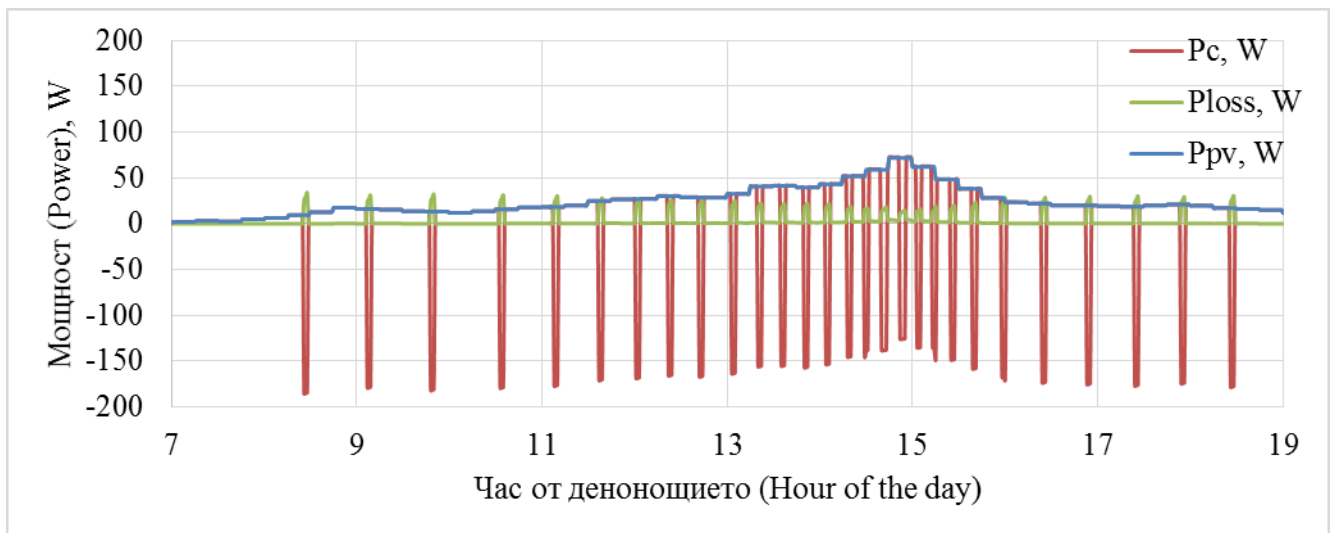
Съгласно методиката, са проведени симулационни изследвания. Подбрани са три товарни графика от реална ФВ инсталация, съответно за слънчев ден, ден с променлива облачност и облачен ден. Получените резултати показват, че загубите на енергия от зареждане/разреждане на суперкондензаторната батерия са сравнително малки. От една страна, те се увеличават с увеличаване на облачността, а от друга – с увеличаване активното съпротивление на суперкондензатора. В случай, че се осигурят добри връзки между отделни суперкондензатори, очакванията са загубите от зареждане разреждане да не надхвърлят 1% от произведената ФВ енергия.



а)



б)



в)

Фиг. 3. Резултати от изследването при типичен: а) слънчев ден; б) ден с променлива облачност; в) облачен ден.

От получените резултати може да се направи извод, че използването на суперкондензаторни батерии заедно с регулатор на заряда, може да бъде изключително ефективно решение при автономно хранване на поливни системи. Този подход позволява уеднавяване на товарите графици на източник и товар.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Настоящото научно изследване е реализирано в рамките на договор № 2020-ФНИ-ФЕЕА-02, финансиран от Фонд „Научни изследвания“ на Русенски университет „Ангел Кънчев“.

### REFERENCES

Elgendy, M. A., Zahawi, B. & Atkinson, D. J. (2010) *Comparison of Directly Connected and Constant Voltage Controlled Photovoltaic Pumping Systems*. IEEE Transactions on Sustainable Energy, Vol. 1, No. 3, pp. 184-192.

Sontake, V. Ch., Tiwari, A. K., & Kalamkar, V. R. (2020) *Performance investigations of solar photovoltaic water pumping system using centrifugal deep well pump*. Thermal Science, Vol. 24, No. 5A, pp. 2915-2927.

Stoyanov, L., Govedarski, I. & Lazarov, V. (2019) *Sizing of PV Based Power Supply for Irrigation System – Application in Sandanski, Bulgaria*. XVI-th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems ELMA 2019, 6-8 June 2019, Varna, Bulgaria, pp. 579-585.

Evstatiev, B., Gabrovska-Evstatieva, K., Trifonov, D., Mihailov, N. (2019) *Solar energy potential to power the irrigation of orchards in Bulgaria*. Proceedings of the 47th international symposium Actual tasks on agricultural engineering, Opatija, Croatia, University of Zagreb, Faculty of Agriculture, pp. 213-221, ISBN 1848-4425.

Glavin, M.E., & Hurley, W.G. (2012) *Optimisation of a photovoltaic battery ultracapacitor hybrid energy storage system*. Solar Energy, Vol. 86, pp. 3009–3020.

Camara, M. A., Djellad, A., Logerais, P. O., Riou, O. & Durastanti, J. F. (2013) *Modeling of a hybrid energy storage system supplied by a photovoltaic source to feed a DC motor*. International Journal of Renewable and Sustainable Energy, Vol. 2, No. 6, pp. 222-228.

Sunny Portal (n.d.), Website of Sunny Portal: <https://www.sunnyportal.com>