

УДК 621.3

Регулювальні характеристики зарядного пристрою акумулятора від сонячної батареї

Батрак Л. М., к.т.н. ORCID [0000-0001-9327-6863](https://orcid.org/0000-0001-9327-6863)Ромашко В. Я., д.т.н., проф., ORCID [0000-0002-5429-7685](https://orcid.org/0000-0002-5429-7685)

Національний технічний університет України

"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" kpi.ua

Київ, Україна

Анотація—Метою роботи є аналіз регулювальних характеристик імпульсного регулятора постійної напруги підвищувального типу, коли на його виході підключено акумулятор. Розглянуто випадок, коли джерелом живлення є сонячна батарея, внутрішній опір якої є нелінійним. Відзначено, що в такому режимі імпульсний регулятор напруги працюватиме в режимі регулювання вихідного струму (струму заряджання акумулятора). Одержані регулювальні характеристики враховують можливість виникнення режиму переривчастого струму в індуктивності регулятора. Визначено умови, за яких від сонячної батареї буде відбиратися максимальна кількість електричної енергії. Дано рекомендації щодо вибору значення напруги акумулятора для сонячної батареї заданого типу.

Ключові слова — імпульсний регулятор; сонячна батарея; акумулятор; регулювальна характеристика; відбір максимальної потужності; режим переривчастого струму.

I. ВСТУП

Одним з найпоширеніших альтернативних джерел електричної енергії є сонячні батареї (СБ). Особливістю таких джерел є залежність кількості виробленої ними електричної енергії від зовнішніх умов. Тому, у разі використання подібних джерел, застосовують проміжні накопичувані енергії. В якості накопичувача часто використовують акумуляторні батареї. Акумуляторні батареї мають обмежений термін використання, який залежить від забезпечення відповідних режимів їх заряджання та розряджання [1, 2]. Термін використання акумулятора може бути подовжений, якщо не допускати його перезаряджання, а також глибокий розряд. У процесі заряджання акумулятора бажано мати можливість регулювати значення сили струму заряду за певним законом [3]. Для забезпечення цих функцій використовують спеціальні пристрої - контролери заряду акумулятора [4, 5, 6]. Однією з складових частин подібних пристроїв є регулятор струму заряджання акумулятора.

Під час використання СБ, як джерела електричної енергії, доцільно забезпечити можливість відбирання від неї максимально можливої потужності. З цією метою використовують узгоджувальні імпульсні регулятори (ІР), які вмикають між СБ та акумулятором. За роботи ІР постійної напруги на акумулятор, він працюватиме в режимі регулювання струму [7]. У зв'язку з цим такий регулятор може бути використаний для регулювання струму заряджання акумуляторної батареї. За необхідності може бути забезпечений режим відбору максимальної потужності від СБ.

В [7] проаналізовано регулювальні характеристики ІР, що працюють на акумулятор для випадків, коли джерело живлення є традиційним, а його

внутрішній опір близький до лінійного. Внутрішній опір СБ є суттєво нелінійним. Властивості СБ описують сімейством вихідних характеристик, які відповідають різним рівням освітленості. У разі використання ІР в якості регулятора струму заряду акумулятора, важливо мати його регулювальні характеристики. Визначимо регулювальні характеристики ІР підвищувального типу для випадку, коли джерелом живлення є сонячна батарея, а на його виході підключено акумулятор (рис. 1).

II. ОСНОВНА ЧАСТИНА

Якщо підвищувальний ІР працює в режимі безперервного струму індуктивності, його вхідна та вихідна напруги пов'язані співвідношенням [8]

$$U_{\text{вих}} = U_{\text{вх}} / t^*, \quad (1)$$

де $t^* = t_p / T$ - відносний час розімкненого стану ключа S .

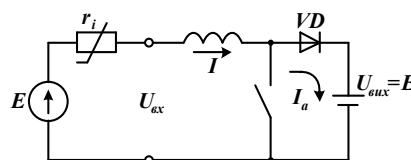


Рис. 1. – Схема імпульсного регулятора напруги

У випадках, коли внутрішній опір акумулятора значно менший від внутрішнього опору джерела, можна вважати, що вихідна напруга ІР співпадає з напругою акумулятора, тобто $U_{\text{вих}} = E_a$. За таких умов вхідна напруга ІР залежатиме від відносного часу t^*



$$U_{ex} = U_{eux} t^* = E_a t^* . \quad (2)$$

Якщо джерело вхідної напруги вважати ідеальним ($U_{ex} = E$), усталений режим роботи ІР можливий лише за фіксованого значення t^*

$$t^* = \frac{E}{E_a} . \quad (3)$$

Для $t^* > E/E_a$ струм індуктивності L необмежено зростатиме, а у випадку $t^* < E/E_a$ ІР переходить в режим переривчастого струму індуктивності.

В реальних джерелах електричної енергії, внаслідок наявності внутрішнього опору r , вихідна напруга джерела (вихідна напруга ІР U_{ex}) змінюватиметься при змінах вихідного струму джерела. Отже, у разі роботи ІР на акумулятор, із зміною t^* буде змінюватись його вхідна напруга, а отже вхідний і, відповідно, вихідний струм ІР. Умовою усталеного режиму є виконання рівності (2). Якщо внутрішній опір джерела E близький до лінійного, середнє значення вихідної напруги визначається відомим співвідношенням [8]

$$U = U_{ex} = E - I \cdot r . \quad (4)$$

Прирівнюючи (2) та (4) одержимо регульовальну характеристику ІР для лінійного внутрішнього опору джерела E

$$E - I \cdot r = E_a t^* ,$$

звідки середнє значення вхідного струму ІР

$$I = \frac{E - E_a t^*}{r} . \quad (5)$$

Відповідно середнє значення струму заряджання акумулятора

$$I_a = I t^* . \quad (6)$$

Одержані регульовальні характеристики (5) та (6) співпадають з характеристиками, отриманими в [7].

III. ЖИВЛЕННЯ ВІД СОНЯЧНОЇ БАТАРЕЇ

Сонячна батарея, як джерело електроживлення, має нелінійний внутрішній опір. При заряджанні акумулятора від СБ важливим питанням є вибір ЕРС акумулятора. Якщо в якості узгоджувального пристрою використовують ІР підвищувального типу, вихідна напруга СБ не може бути більшою від напруги акумулятора E_a [8]. Як відомо [9], вихідна напруга СБ досягає максимального значення $U_{CB \max}$ в режимі холостого ходу за максимальної освітленості та мінімальної температури. Припустимо, що ЕРС акумулятора дорівнює максимально можливий вихідний напрузі СБ ($E_a = U_{CB \max}$). З урахуванням (2) можемо записати рівність

$$U_{CB} = E_a t^* . \quad (7)$$

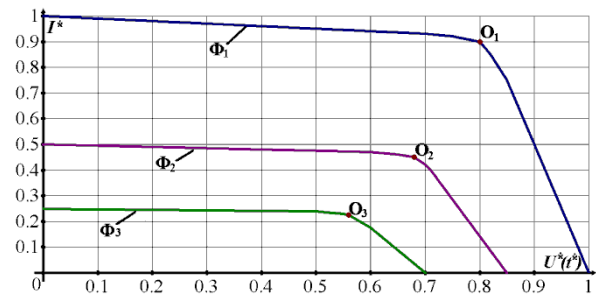


Рис. 2. Нормовані вихідні характеристики сонячної батареї

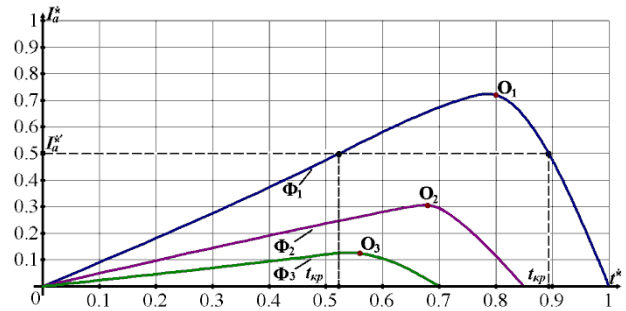


Рис. 3. Регульовальні характеристики для струму заряджання акумулятора

Для заданої освітленості Φ , вихідна напруга СБ U_{CB} залежатиме від її вихідного струму. Типові нормовані графіки цієї залежності для трьох рівнів освітленості наведено на рис. 2.

Нормування здійснене по максимальній напрузі холостого ходу і максимальній силі струму короткого замикання СБ

$$U^* = \frac{U}{U_{xx \max}} ; I^* = \frac{I}{I_{кз \max}} \quad (8)$$

З урахуванням (8), рівняння (7) у нормованому вигляді є таким

$$U_{CB}^* = E_a^* t^* , \quad (9)$$

де $E_a^* = E/U_{xx \max}$ - нормована напруга акумулятора. Якщо напруга акумулятора дорівнює максимальній напрузі холостого ходу СБ ($E_a = U_{xx \max}$), рівняння (9) матиме вигляд

$$U^* = t^* , \quad (10)$$

тобто залежність середнього значення вхідного струму ІР (вихідного струму СБ) від відносного часу t^* $I^* = f(t^*)$ співпадатиме з вихідною характеристикою СБ $I^* = f(U^*)$ в якій вісь напруг U^* замінено віссю відносного часу t^* (рис. 2). Відповідно регульовальні характеристики ІР (залежність середнього значення струму заряджання акумулятора від t^*) $I_a = f(t^*)$ матимуть вигляд, наведений на рис. 3.

Проаналізуємо отримані графіки. Координати точки максимальної потужності (ТМП) СБ приблизно

можуть бути визначені з наступних співвідношень [10]

$$U_{МП} \cong 0,8U_{xx}; I_{МП} \cong 0,9I_{кз}, \quad (11)$$

де U_{xx} та $I_{кз}$ - відповідно напруга холостого ходу і струм короткого замикання СБ для заданого рівня освітленості Φ .

Якщо освітленість є максимальною ($\Phi = \Phi_1$), у випадку $t^* = 1$ СБ працюватиме у режимі холостого ходу і її вихідний струм $I_1^* = 0$. У разі зменшення t^* від 1 до 0,8 вихідна напруга СБ поступово зменшуватиметься, в той же час її вихідний струм швидко зростатиме, до тих пір поки робоча точка не опиниться в ТМП 0_1 , координати якої $U_{0_1}^* = 0,8$; $I_{0_1}^* = 0,9$.

Якщо t^* зменшуватиметься і далі ($t^* < 0,8$), вихідний струм СБ змінюватиметься мало, оскільки вона працюватиме в режимі, близькому до режиму короткого замикання. В той же час вихідна напруга СБ U_1^* , а також струм заряджання акумулятора $I_{a_1}^*$ швидко спадатимуть.

Відповідно до графіків рис. 3 та сама величина струму заряджання акумулятора I_a^* може бути отримана при двох різних значеннях t^* , тобто існує неоднозначність функції $t^* = f(I_a^*)$. З практичної точки зору доцільно працювати на ділянці характеристики, розташованої зліва від ТМП 0_1 , оскільки на цій ділянці регульовальна характеристика є майже лінійною і змінюється плавно. Крім того, у разі роботи на цій ділянці СБ працюватиме в режимі близькому до режиму короткого замикання при якому втрати потужності у ній зменшуються.

Аналогічний вигляд матимуть регульовальні характеристики для середнього ($\Phi = \Phi_2$) та мінімального ($\Phi = \Phi_3$) рівня освітленості. Відмінність полягатиме в координатах точок холостого ходу U_{xx}^* та короткого замикання $I_{кз}^*$, а також точки максимальної потужності t_{mn}^* ; U_o^* ; I_o^* та I_{ao}^* .

В табл. 1 наведено координати цих точок для різних рівнів освітленості.

Таблиця 1 Координати основних точок для різних рівнів освітленості

Φ	U_{xx}^*	$I_{кз}^*$	t_{mn}^*	U_o^*	I_o^*	I_{ao}^*
Φ_1	1	1	0,8	0,8	0,9	0,72
Φ_2	0,85	0,5	0,68	0,68	0,45	0,305
Φ_3	0,7	0,25	0,56	0,56	0,225	0,126

Відповідно до наведених графіків (рис. 2 та 3), при $t^* \geq 0,85$ для $\Phi = \Phi_2$, і $t^* \geq 0,7$ для $\Phi = \Phi_3$, вихідний струм СБ I^* , а також струм заряджання акумулятора I_a^* стають рівними нулю. Однак вказані графіки

отримано за умови, що струм індуктивності L є безперервним. В реальних умовах, внаслідок зменшення струму I^* при наближенні t^* до $t_{кр2}^* < 0,85$, ($t_{кр3}^* < 0,7$), в індуктивності L настає режим переривчастого струму. Після настання цього режиму характеристики, наведені на рис. 2 та 3 стають недійсними. У діапазоні зміни $t^* = (t_{кр}^* \dots 1)$ матиме місце режим переривчастого струму в індуктивності L , за якого струм I^* поступово зменшуватиметься від $I_{кр}^* = I^*(t_{кр}^*)$ до нуля [7]. Проаналізуємо більш детально вказаний режим.

IV. РЕЖИМ ПЕРЕРИВЧАСТОГО СТРУМУ ІНДУКТИВНОСТІ.

Як відомо [8], режим переривчастого струму в індуктивності настає за умови

$$\frac{\Delta I_L}{2} \geq I_{Lcp}. \quad (12)$$

Нехай освітленість є мінімальною і їй відповідає характеристика Φ_3 з напругою холостого ходу $U_{xx3}^* = 0,7$. На границі режиму переривчастих струмів, у момент замикання ключа S , струм індуктивності дорівнює нулю. Після замикання ключа S струм індуктивності починає знову зростати. Зміну цього струму приблизно можна описати наступним виразом

$$i_L(t) = \frac{U_{xx3}}{r_3} \left(1 - e^{-\frac{tr_3}{L}} \right) = \frac{U_{xx3}}{r_3} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_3}} \right) \cong \frac{U_{xx3}}{r_3} \frac{t}{\tau_3}, \quad (13)$$

де U_{xx3} - напруга холостого ходу СБ за мінімальної освітленості Φ_3 ; $r_3 = \Delta U' / \Delta I'$ - диференційний опір вихідної характеристики на ділянці ($U_{xx3} \dots U_{МП3}$); $\tau_3 = L / r_3$.

Оскільки на інтервалі замкненого стану ключа t_3 струм через індуктивність наростатиме, зміна цього струму ΔI_L дорівнюватиме

$$\Delta I_L = i_L(t_3) = i_L(T - t_p) = \frac{U_{xx3}}{r_3} \frac{(T - t_p)}{\tau}. \quad (14)$$

Перейдемо до нормованого значення $\Delta I_L^* = \Delta I_L / I_{кз1}$, поділивши ліву і праву частини на $I_{кз1}$

$$\Delta I_L^* = \frac{U_{xx3}}{r_3 I_{кз1}} \frac{(1 - t^*) \cdot T}{\tau_3} = \frac{U_{xx1}}{U_{xx1}} \frac{U_{xx3}}{I_{кз1} r_3} \frac{1 - t^*}{\tau_3} = \frac{U_{xx3}^* (1 - t^*) U_{xx1}}{\tau_3^* I_{кз1} \Delta U'} = \frac{U_{xx3}^* (1 - t^*)}{r_3^* \tau_3^*}, \quad (15)$$



де $\tau_3^* = \tau_3/T$ – відносна стала часу; $r_3^* = \Delta U^*/\Delta I^*$ – нормований диференційний опір.

Закон зміни середнього значення струму індуктивності I_L^* на ділянці $U_{03} \dots U_{xx3}$ ($t^* \cong 0,56 \dots 0,7$) приблизно можна описати формулою

$$I_L^* \cong 0,225 \left(1 - \frac{t^* - 0,56}{0,14} \right). \quad (16)$$

Отже, чисельне значення $t_{кр3}^*$, при якому в індуктивності L настає режим переривчастого струму, може бути визначено з рівняння

$$\frac{U_{xx3}^*(1-t^*)}{2r_3^* \tau_3^*} = 0,225 \left(1 - \frac{t^* - 0,56}{0,14} \right), \quad (17)$$

звідки

$$t_{кр3}^* = \frac{2,22\tau^* r^* - U_{xx3}^*}{3,2\tau^* r^* - U_{xx3}^*}, \quad (18)$$

Враховуючи, що для характеристики, що відповідає мінімальній освітленості Φ_3 , $U_{xx3} = 0,7$,

а $r_3^* = \frac{\Delta U^*}{\Delta I^*} \cong \frac{0,14}{0,225} \cong 0,62$, для різних значень τ_3^*

можна визначити чисельні значення $t_{кр3}^*$. Використовуючи аналогічні підходи можна визначити $t_{кр}^*$ і для інших рівнів освітленості. В табл. 2 наведено чисельні значення $t_{кр}^*$ для середнього Φ_2 та мінімального (Φ_3) рівнів освітленості в залежності від чисельного значення τ^* .

На рис. 4 та 5 наведено графіки регулювальних характеристик ІР (рис. 1) для різних рівнів освітленості СБ, з урахуванням можливості виникнення режиму переривчастого струму в індуктивності.

Відповідно до рис. 5, струм заряджання акумулятора I_a^* доцільно регулювати змінюючи t^* в діапазоні $(0 \dots t_{МП}^*)$, оскільки на цій ділянці регулювальна характеристика змінюється плавно і є майже лінійною. ІР працюватиме в режимі безперервного струму індуктивності з майже постійною величиною струму I^* . В той же час струм заряджання акумулятора I_a^* можна змінювати в широкому діапазоні, починаючи з нуля і до максимального значення, яке відповідає роботі СБ в ТМП. Крім того, при зменшенні струму заряджання акумулятора I_a^* (зменшенні t^*), СБ працюватиме в режимі, близькому до режиму короткого замикання, у якому втрати потужності в СБ є мінімальними.

ТАБЛИЦЯ 2. Чисельні значення $t_{кр}^*$ для різних рівнів освітленості

τ^*	1,5	2	3	5
Φ_2	0,79	0,82	0,83	0,84
Φ_3	0,61	0,64	0,66	0,68

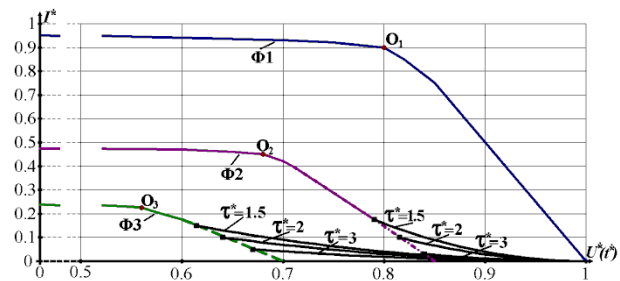


Рис. 4 Регулювальні характеристики для вихідного струму сонячної батареї

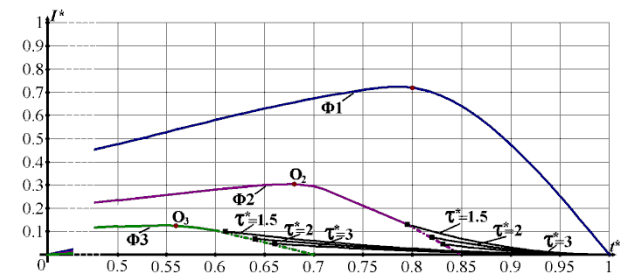


Рис. 5 Регулювальні характеристики вихідного струму регулятора для режиму переривчастого струму індуктивності

V. ЗМЕНШЕННЯ КІЛЬКОСТІ НЕДООТРИМАНОЇ ВІД СБ ЕНЕРГІЇ ПРИ ЗАРЯДЖАННІ АКУМУЛЯТОРА

При використанні СБ бажано отримати від них максимально можливу кількість електричної енергії. Для цього на кожному рівні освітленості (Φ_1 ; Φ_2 ; Φ_3) СБ має працювати у відповідній ТМП (0_1 ; 0_2 ; 0_3). Оскільки максимально можлива потужність може бути отримана від СБ при максимальному рівні освітленості Φ_1 , бажано, щоб саме у цьому режимі роботи була можливість отримувати максимально можливу кількість електричної енергії.

Відповідно до одержаних характеристик (рис. 2 та 3) для максимальної освітленості Φ_1 СБ працюватиме поблизу її ТМП 0_1 за умови, що $t^* \cong 0,8$. Відповідно струм заряджання акумулятора I_a^* буде максимальним і дорівнюватиме:

$$I_a^* = I^* t^* \cong 0,9 \cdot 0,8 \cong 0,72.$$

Однак у цьому випадку вхідний струм ІР (вихідний струм СБ) буде пульсуючим, в результаті чого робоча точка СБ буде коливатись відносно ТМП. Внаслідок цього від СБ буде недоотримуватись певна кількість енергії [11]. Кількість недоотриманої енергії залежатиме від коефіцієнта пульсації вихідного струму СБ. Для зменшення кількості недоотриманої енергії в найбільш сприятливих режимах роботи СБ, напругу

акумулятора доцільно вибрати рівною $E_a = U_{МП1} \cong 0,8U_{xx1}$, тобто $E_a^* = 0,8$.

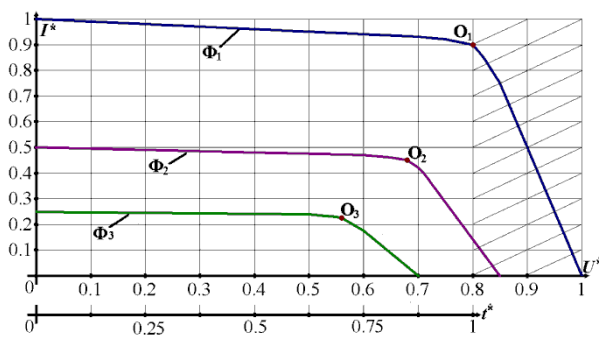
За такої умови у випадку $t^* = 1$ вихідна напруга СБ $U^* = E_a^* = 0,8 = U_{МП1}^*$. Оскільки при $t^* = 1$ вихідний струм СБ не матиме пульсацій, кількість недоотриманої енергії у цьому режимі буде мінімальною. За такої умови вихідна напруга СБ не перевищуватиме $U^* \leq 0,8$, тобто робота відбуватиметься на обмежній ділянці вихідної характеристики, а регульовальна характеристика ІР співпадатиме з обмеженою ділянкою вихідної характеристики СБ. Відповідність між шкалою U^* та t^* визначатиме співвідношення

$$t^* = \frac{U^*}{E_a^*}; U^* = E_a^* t^*, \quad (19)$$

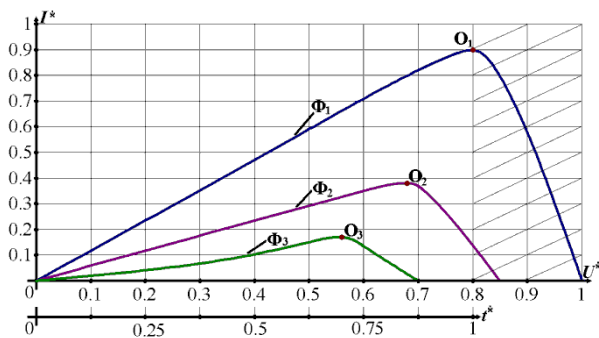
що відображено на рис. 6.

Відповідно до графіків, при зміні t^* в діапазоні (0 ... 1) вихідний струм СБ I^* буде змінюватись поступово від 1 до 0,9. В той же час струм зарядження акумулятора $I_a^* = I^* t^*$ зростатиме майже за лінійним законом в діапазоні (0 ... 0,9). У випадку менших рівнях освітленості (Φ_2 та Φ_3) ТМП СБ буде досягатись при більших значеннях $t^* = t_{МП}^* / E_a^*$, тобто менших пульсаціях вихідного струму СБ, що зменшуватиме кількість недоотриманої енергії.

$$E_a^* \approx 0,8. \quad (20)$$



a)



b)

Рис. 6. Регульовальні характеристики для випадку $E_a^* = 0,8$

Таким чином, для зменшення кількості недоотриманої від СБ електричної енергії, доцільно акумуляторну батарею вибрати таким чином, щоб її ЕРС відповідала напрузі СБ в ТМП за максимальної освітленості, тобто

Якщо напруга акумуляторної батареї $E_a^* < 0,8$, при зміні t^* від 0 до 1 буде задіяна ще менша ділянка вихідної характеристики СБ. Струм, що споживатиметься від СБ змінюватиметься мало. Струм зарядження акумулятора I_a^* зростатиме майже по лінійному закону. Однак, навіть при $t^* = 1$ ТМП 0₁ не буде досягнута і від СБ не буде отримана максимально можлива кількість електричної енергії.

ВИСНОВКИ

Якщо джерелом живлення є сонячна батарея, а на виході ІР підключено акумулятор, задана величина відносного часу t^* однозначно визначатиме середнє значення вхідної напруги ІР (вихідної напруги СБ). Використовуючи вихідні характеристики СБ для заданого рівня освітленості можна однозначно визначити величину середнього значення її вихідного струму I^* , а потім розрахувати середнє значення струму зарядження акумулятора I_a^* . У статті показано, що в залежності від вибраної величини напруги акумуляторної батареї, будуть задіяні або усі вихідні характеристики сонячної батареї, або їх обмежена ділянка. Для зменшення кількості недоотриманої від СБ електричної енергії доцільно, щоб напруга акумуляторної батареї відповідала напрузі СБ в точці максимальної потужності за максимальної освітленості.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] I. N. Haq. *et al.*, "Development of battery management system for cell monitoring and protection" *International Conference on Electrical Engineering and Computer Science (ICEECS)*, Kuta, 2014, pp. 203-208. DOI: [10.1109/ICEECS.2014.7045246](https://doi.org/10.1109/ICEECS.2014.7045246).
- [2] E. M. Krieger, C. B. Arnold "Effects of undercharge and internal loss on the rate dependence of battery charge storage efficiency" *Journal of Power Sources* Vol. 210, 2012, pp. 286-291. DOI: [10.1016/j.jpowsour.2012.03.029](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.03.029)
- [3] Thomas B. Reddy and David Linden, Eds., "Linden's handbook of batteries" 4th ed., *McGraw-Hill Companies*, Inc. 2011, ISBN: 978-0-07-162419-0 1457 p. URL: http://dl.booktolearn.com/ebooks2/engineering/electrical/9780071624213_lindens_handbook_of_batteries.pdf
- [4] Arash Shafiei, Ahmadreza Momeni and Sheldon S. Williamson "A Novel Photovoltaic Maximum Power Point Tracker for Battery Charging Applications", *25th IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)*, Montreal, QC, Canada, 2012, DOI: [10.1109/CCECE.2012.6335050](https://doi.org/10.1109/CCECE.2012.6335050)
- [5] José M. N. Vieira, Alexandre Manuel Mota "Implementation of a stand-alone photovoltaic lighting system with MPPT battery charging and LED current control" *IEEE International Conference on Control*, 2010 pp. 185-190. DOI: [10.1109/CCA.2010.5611257](https://doi.org/10.1109/CCA.2010.5611257)



- [6] Khaehintung N., Pramotung K., Sirisuk P. "RISC microcontroller built-in fuzzy logic controller for maximum power point tracking in solar-powered battery charger" *Proceedings of IEEE TENCON 2004 Conference*, 2004. DOI: [10.1109/TENCON.2004.1415013](https://doi.org/10.1109/TENCON.2004.1415013).
- [7] V. Y., Romashko, L. M., Batrak "Osoblyvosti rezhymu roboty uz-hodzhuval'noho impulsnoho rehulyatora, shcho pratsyuje na akumulyator [Features of the switching regulator operation on a rechargeable battery]," *Microsystems, Electronics and Acoustics* 2018, № 4, Т. 23, pp. 22 - 30. DOI: [10.20535/2523-4455.2018.23.4.131272](https://doi.org/10.20535/2523-4455.2018.23.4.131272).
- [8] Y. P. Goncharov, O. V. Budonny, V. G. Morozov, M. V. Panasenko, V. Y. Romashko, V. S. Rudenko, Peretovuyvalna technicala. Navchalnyi posibnyk. Chastyna 2 [Power conversion equipment. Text book. Part 2], Kharkiv: Folio, 2000. ISBN 966-03-0697-0.
- [9] Masoum M.A.S., Dehbonei H. Design construction and testing of a voltage-based maximum power point tracker (VMPPPT) for small satellite power supply *Proceedings of 13th annual AIAA/USU Conference on Small Satellites*, 1999. URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download>.
- [10] Salas V., Olías A. Barrado A., Lázaro A. Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems *Solar Energy Materials and Solar Cells* Vol. 90, Issue 11, 6 July 2006, pp. 1555-1578. DOI: [10.1016/j.solmat.2005.10.023](https://doi.org/10.1016/j.solmat.2005.10.023).
- [11] Romashko, V. J.; Verbitsky, I. V.; Kyrychik, I. I. «Analiz vtrat energii v sistemi vidboru maksimalnoi potuzhnosti sonyachnoi batariei [Energy losses analyze in solar battery maximum power picking system]» *Tekhnichna elektrodynamika*, No 4, pp. 55-57, 2014. URL: http://techmed.org.ua/2014_4/st18.pdf.

Надійшла до редакції 02 липня 2019 р.

УДК 621.3

Регулировочные характеристики зарядного устройства аккумулятора от солнечной батареи

Батрак Л. Н., к.т.н. ORCID [0000-0001-9327-6863](https://orcid.org/0000-0001-9327-6863)

Ромашко В. Я., д.т.н., проф., ORCID [0000-0002-5429-7685](https://orcid.org/0000-0002-5429-7685)

Национальный технический университет Украины

"Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского" kpi.ua

Киев, Украина

Аннотация—Целью работы является анализ регулировочных характеристик импульсного регулятора постоянного напряжения повышающего типа, когда на его выходе подключены аккумулятор. Рассматривается случай, когда источником питания является солнечная батарея, внутреннее сопротивление которой является нелинейным. Отмечено, что в режиме рассматриваемого импульсный регулятор напряжения будет работать в режиме регулирования выходного тока (тока зарядки аккумулятора). Полученные регулировочные характеристики учитывают возможность возникновения режима прерывистого тока в индуктивности регулятора. Определены условия, при которых от солнечной батареи отбираться максимальное количество электрической энергии. Даны рекомендации по выбору величины напряжения аккумулятора для солнечной батареи заданного типа.

Ключевые слова — импульсный регулятор; солнечная батарея; аккумулятор; регулировочная характеристика; отбор максимальной мощности; режим прерывистого тока.



UDC 621.3

Regulatory Features of Solar Battery Charger

L. M. Batrak, PhD, ORCID [0000-0001-9327-6863](https://orcid.org/0000-0001-9327-6863)

V. Ya. Romashko, Dr.Sc.(Eng), prof., ORCID [0000-0002-5429-7685](https://orcid.org/0000-0002-5429-7685)

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute" kpi.ua
Kyiv, Ukraine

Abstract—The aim of the work is the analyze the of regulation characteristics of a switching voltage regulator of the step-up type. The case when the regulator's power source is a solar battery and the load is a rechargeable battery is considered. It is noted that in this mode, the switching voltage regulator operates in the mode of regulation of the output current (battery charging current).

The case when the battery voltage is equal to the maximum no-load voltage of the solar battery is analyzed. It is shown that in this case regulation characteristic of the input current of the switching regulator coincide with the output characteristics of the solar battery, in which the axis of voltage is replaced by the axis of the relative open-time of the key of the switching regulator. Taking into account the received input regulation characteristics, the output regulation characteristics of the switching regulation were built.

If the battery voltage is less than the maximum no-load voltage of the solar battery, the regulation characteristics of the switching regulation will coincide with a limited section of the output characteristics of the solar battery. In this case, the correspondence between the voltage scale and the scale of the relative open time of the key of the switching regulator will depend on the ratio between the battery voltage and the maximum no-load voltage of the solar battery. The conditions, under which the maximum amount of electrical energy will be obtain from the solar battery at different levels of illumination were analyzed. The condition, under which the inductance of the switching regulator will receive a discontinuous current mode were analyzed. For different levels of illumination of the solar battery, as well as depending on the magnitude of the inductance, the critical value of the relative open-time time of the key of the switching regulator, at which a discontinuous current mode occurs in the inductance were determined. Taking into account the possibility of the occurrence of such a mode, the adjustment of the previously obtained regulation characteristics were carried out. The normalized graphs of the regulation characteristics for the input and output current of the switching regulator, taking into account the possibility of the occurrence of a discontinuous current inductance in it are given. Recommendations on the expediency of using various sections of these characteristics, when charging batteries from a solar battery, are given. The dependence of the amount of under-received electrical energy from the solar battery, which is related to the pulsating nature of the input current of the switching regulator and the selected battery voltage value is analyzed. Recommendations regarding the choice of the battery voltage for a solar cell of the selected type are given.

Keywords — *switching regulator; solar battery; rechargeable battery; regulation characteristic; maximum power take-off; intermittent current mode.*

