

В.Я. Ромашко, Л.М. Батрак, О.О. Абакумова

## Особливості роботи імпульсних регуляторів в режимі передавання максимальної потужності, за наявності акумулятора на їх виході

Для ефективного використання нетрадиційних та відновлюваних джерел електричної енергії необхідно забезпечувати їх роботу в точці максимальної потужності, що можливо при рівності опорів навантаження та вихідного опорів джерела. Для узгодження опорів навантаження з вихідним опором джерела між джерелом та навантаженням підключають узгоджувальний імпульсний регулятор. Досить часто кількість енергії, що отримують від подібних джерел, залежить від зовнішніх умов. Щоб забезпечити більш рівномірне надходження електричної енергії до навантаження, на виході імпульсного регулятора підключають акумулятор, що працює в буферному режимі. За таких умов навантаженням імпульсного регулятора є акумулятор, а роль навантаження джерела живлення виконуватиме вхідний опір регулятора. Цей опір залежить від величини напруги на акумуляторі, типу імпульсного регулятора та режиму його роботи. У таких випадках режим відбору максимальної потужності джерела може бути забезпечений шляхом вибору відповідного режиму роботи імпульсного регулятора. **Метою** роботи є аналіз умов та визначення режимів, за яких забезпечується передача від джерела в акумулятор максимально можливої кількості електричної енергії, а також особливостей роботи імпульсного регулятора у зазначеному режимі. З цієї метою було визначено та проаналізовано регулювальні характеристики імпульсних регуляторів підвищувального та понижувального типів з урахуванням наявності акумулятора на їх виході. Враховуючи, що у режимі передавання максимальної потужності вихідний опір джерела та опір навантаження є величинами одного порядку, при визначенні регулювальних характеристик враховувався внутрішній опір джерела. В результаті аналізу отриманих регулювальних характеристик було визначено умови, за яких забезпечується передавання енергії від джерела до акумулятора, а також визначено параметри режиму роботи імпульсного регулятора, за яких від джерела електричної енергії буде відбиратися максимальна потужність. **Оригінальністю** роботи є врахування внутрішнього опорів джерела електричної енергії при визначенні регулювальних характеристик імпульсних регуляторів. **Одержані результати** дали можливість вказати доцільний діапазон напруг акумулятора для різних типів імпульсних регуляторів, а також дати практичні рекомендації щодо вибору режиму роботи імпульсного регулятора у залежності від його типу, а також величини напруги на акумуляторі. Бібл. 17, табл. 1, рис. 4.

**Ключові слова:** вихідний опір джерела, узгоджувальний імпульсний регулятор, робота на акумулятор, передавання максимальної потужності.

**Вступ.** У зв'язку зі значним поширенням нетрадиційних та відновлюваних джерел постає задача отримання від них максимально можливої кількості електричної енергії. Для цього робоча точка джерела живлення має перебувати в точці максимальної потужності (ТМП). Як відомо [1-4], такий режим роботи джерела буде забезпечений за умови, що опір навантаження  $R$  співпадає з вихідним опором джерела  $r$ . Якщо ж  $R \neq r$ , для забезпечення можливості відбирання від джерела максимальної потужності, між джерелом та навантаженням вмикають імпульсний регулятор (ІР), який узгоджує опір навантаження з вихідним опором джерела. На сьогодні основним методом відбирання максимальної потужності від нетрадиційних та відновлюваних джерел є використання різних алгоритмів пошуку ТМП джерела [5-10]. Більшість цих алгоритмів полягають у періодичній зміні тривалості замкненого стану ключа ІР і, у залежності від наслідків такої зміни, коректування цієї тривалості в сторону зменшення або збільшення. Основним недоліком подібних методів є те, що у моменти запуску або різкої зміни зовнішніх умов, коли координати ТМП невідомі, її пошук може тривати певний час, протягом якого від джерела буде недоотримана певна кількість енергії. Більш того, у процесі пошуку ТМП можливі випадки, коли зміна тривалості замкненого стану ключа відбуватиметься у протилежному від необхідного напрямку, що збільшуватиме кількість недоотриманої енергії. Доповнення існуючих алгоритмів аналітичними методами визначення ТМП дає можливість значно пришвидшити її пошук і зменшити кількість недоотриманої від джерела електричної енергії.

Досить часто кількість енергії, що надходить від нетрадиційних та відновлюваних джерел, залежить

від зовнішніх умов. Тому, для забезпечення більш рівномірного надходження енергії до навантаження, на виході ІР підключають акумулятор, який працює в буферному режимі [11-13]. У таких випадках навантаженням ІР буде саме акумулятор, а роль навантаження джерела виконуватиме вхідний опір регулятора. Режим відбирання від джерела максимальної потужності може бути забезпечений шляхом вибору відповідного режиму роботи ІР.

**Метою роботи** є аналіз умов, за яких можливе і доцільне передавання від джерела живлення до акумулятора максимально можливої кількості електричної енергії, а також особливостей роботи ІР в такому режимі.

Для цього необхідно визначити та проаналізувати регулювальні характеристики регулятора з урахуванням внутрішнього опорів його джерела електроживлення. Розглянемо ці питання на прикладі схем ІР понижувального та підвищувального типів, які найчастіше використовують для узгодження вихідного опорів джерела живлення з опором навантаження.

**Визначення та аналіз регулювальних характеристик.** Оскільки нас цікавить відбирання максимальної потужності від джерела живлення, розглянемо ті варіанти схем ІР, які забезпечують таку можливість [14]. Відповідні схеми регуляторів понижувального та підвищувального типів представлено на рис. 1 та рис. 2.

Вважатимемо, що внутрішній опір джерела  $r$  є лінійним, а внутрішній опір акумулятора є значно меншим у порівнянні з внутрішнім опором джерела. Визначимо та проаналізуємо регулювальні характеристики схем регуляторів, представлених на рис. 1 та рис. 2.

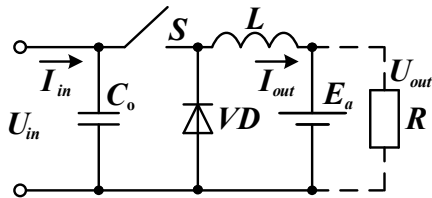


Рис. 1 Схема регулятора понижувального типу

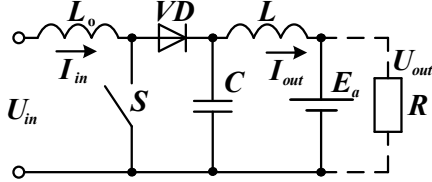


Рис. 2 Схема регулятора підвищувального типу

**Регулятор понижувального типу.** Якщо не враховувати втрати в елементах схеми ІР, для регулятора (рис. 1) у режимі безперервного струму індуктивності завжди виконуватимуться умови [15]

$$U_{out} = U_{in} t^* ; I_{out} = I_{in} / t^* , \quad (1)$$

де  $t^* = t_c / T$  – відносний час замкненого стану ключа  $S$ .

Враховуючи, що внутрішній опір акумулятора є значно меншим за внутрішній опір джерела, можемо вважати, що в процесі регулювання вихідна напруга регулятора залишається майже незмінною і дорівнює  $U_{out} = E_a$ . Отже, для того, щоб у процесі регулювання система перебувала у стані рівноваги, вхідна напруга регулятора має бути

$$U_{in} = U_{out} / t^* = E_a / t^* . \quad (2)$$

В реальних джерелах живлення, через наявність в них внутрішнього опору, вхідна напруга регулятора змінюватиметься, внаслідок змін струму, що споживається від джерела. У випадку лінійного внутрішнього опору джерела, його вихідна напруга (вихідна напруга ІР  $U_{in}$ ), визначатиметься вихідною характеристикою джерела

$$U_{in} = U_{oc} - I_{in} r , \quad (3)$$

де  $U_{oc}$  – напруга холостого ходу джерела живлення.

Отже, в стані рівноваги, повинні одночасно виконуватись (2) та (3)

$$U_{oc} - I_{in} r = E_a / t^* , \quad (4)$$

або у відносних одиницях [15]

$$1 - I_{in}^* = E_a^* / t^* , \quad (5)$$

де  $I_{in}^* = I_{in} / I_{sc}$ ;  $U^* = U / U_{oc}$ ;  $E_a^* = E_a / U_{oc}$ ;  $I_{sc} = U_{oc} / r$  – струм короткого замикання джерела.

Враховуючи, що напруга холостого ходу джерела, а також напруга акумулятора є фіксованими величинами, внаслідок змін параметра  $t^*$  відбуватиметься регулювання вхідного і, відповідно, вихідного струму регулятора

$$I_{in}^* = [1 - E_a^* / t^*] . \quad (6)$$

З урахуванням (1)

$$I_{out}^* = I_{in}^* / t^* = [1 - E_a^* / t^*] \cdot \frac{1}{t^*} . \quad (7)$$

Отже, регулювальні характеристики ІР (рис. 1) описуються (6) та (7). Проаналізуємо одержані характеристики.

Відповідно до (6), для забезпечення передавання енергії від джерела живлення до акумулятора ( $I_{in} > 0$ ), має виконуватись умова

$$[1 - E_a^* / t^*] > 0 , \quad (8)$$

або

$$t^* > E_a^* . \quad (9)$$

Враховуючи фізичний зміст параметра  $t^*$ , приходимо до висновку, що він може змінюватись в обмеженому діапазоні

$$1 \geq t^* > E_a^* , \quad (10)$$

а напруга акумулятора не може бути більшою за напругу холостого ходу джерела живлення ( $E_a^* \leq 1$ ).

Чим меншою буде напруга акумулятора  $E_a^*$ , тим ширшим буде допустимий діапазон регулювання параметра  $t^*$ .

Як відомо [16], у випадку лінійного внутрішнього опору джерела, його ТМП має координати  $I^* = 0,5$ ;  $U^* = 0,5$ . Враховуючи, що  $I^* = I_{in}^*$  регулятора, умова відбирання максимальної потужності від джерела відповідно до (6), приймає вигляд

$$[1 - E_a^* / t^*] = 0,5 . \quad (11)$$

Таким чином, максимальна потужність від джерела до акумулятора передаватиметься за умови, що  $t^* = t_{MP}^*$ , де

$$t_{MP}^* = 2E_a^* . \quad (12)$$

Враховуючи, що  $t^* = [0...1]$ , приходимо до висновку, що максимальна потужність від джерела до акумулятора може бути передана лише за умови, що

$$E_a^* \leq 0,5 . \quad (13)$$

**Регулятор підвищувального типу.** Для цього регулятора (рис. 2), в режимі безперервного струму індуктивності  $L_0$ , є дійсними такі співвідношення

$$U_{out} = U_{in} / t^* ; I_{out} = I_{in} t^* , \quad (14)$$

де  $t^* = t_{open} / T$ ;  $t_{open}$  – тривалість розімкненого стану ключа  $S$  на періоді  $T$ . Отже, в усталеному режимі, вхідна напруга регулятора має бути

$$U_{in} = U_{out} t^* = E_a t^* . \quad (15)$$

Система перебуватиме у стані рівноваги за умови

$$E_a t^* = U_{sc} - I_{in} r . \quad (16)$$

У відносних одиницях ця умова матиме вигляд

$$E_a^* t^* = 1 - I_{in}^* . \quad (17)$$

Отже регулювальні характеристики ІР підвищувального типу (рис. 2) будуть такими

$$I_{in}^* = [1 - E_a^* \cdot t^*] ; \quad (18)$$

$$I_{out}^* = [1 - E_a^* \cdot t^*] t^* . \quad (19)$$

Відповідно до (18), умова передавання енергії від джерела до акумулятора ( $I_{in}^* > 0$ ) матиме вигляд

$$I_{in}^* = [1 - E_a^* \cdot t^*] > 0 , \quad (20)$$

тобто параметр  $t^*$  може змінюватись у діапазоні

$$0 < t^* < 1/E_a^* . \quad (21)$$

Отже, для цього регулятора напруга акумулятора, теоретично, може бути як більшою, так і меншою за напругу холостого ходу джерела. Однак, у випадку  $E_a^* > 1$ , допустимий діапазон регулювання параметра  $t^*$  буде обмеженим. Чим сильніше виконуватиметься нерівність  $E_a^* > 1$ , тим вужчим буде допустимий діапазон регулювання параметра  $t^*$ .

Умова відбирання від джерела максимальної потужності буде такою

$$\left[1 - E_a^* t^*\right] = 0,5 . \quad (22)$$

Отже

$$t_{MP}^* = 1/2E_a^* . \quad (23)$$

З урахуванням (23), максимальна потужність може бути відібрана від джерела лише за умови

$$E_a^* \geq 0,5 , \quad (24)$$

тобто напруга акумулятора може бути як більшою, так і меншою за напругу холостого ходу джерела. На рис. 3 та рис. 4 представлено графіки сімейства регулювальних характеристик розглянутих регуляторів для різних значень відносної напруги на акумуляторі  $E_a^*$ . Ці графіки підтверджують результати проведеного аналізу.

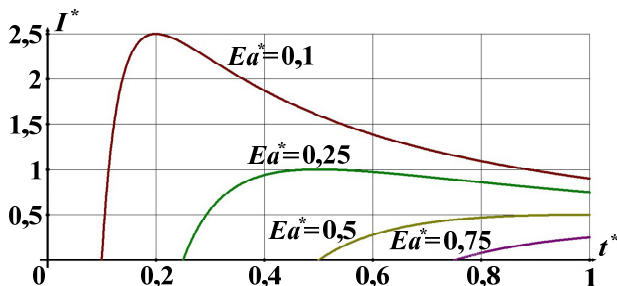


Рис. 3. Регулювальні характеристики регулятора понижувального типу для різних значень відносної напруги на акумуляторі

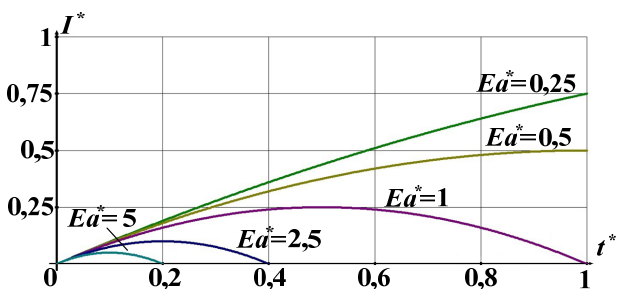


Рис. 4. Регулювальні характеристики регулятора підвищуючого типу для різних значень відносної напруги на акумуляторі

В табл. 1 наведено умови, за яких можливе передавання енергії від джерела живлення до акумулятора у випадку роботи ІР в режимі *безперервного* струму індуктивності.

Вказано параметр  $t_{MP}^*$ , за якого забезпечується відбирання максимальної потужності від джерела живлення, а також запропоновано доцільний діапазон зміни параметра  $E_a^*$ .

Таблиця 1

Імпульсний регулятор	Умова відбирання енергії від джерела	Умова відбирання максимальної потужності	Доцільний діапазон зміни $E_a^*$
Понижувального типу (рис. 1)	$t^* > E_a^*$	$t_{MP}^* = 2E_a^*$	$0,1 \leq E_a^* \leq 0,5$
Підвищуючого типу (рис. 2)	$t^* < 1/E_a^*$	$t_{MP}^* = 1/2E_a^*$	$0,5 \leq E_a^* \leq 5$

У випадку переходу регулятора в режим *переривчастого* струму індуктивності, з'являється можливість регулювання параметра  $t^*$  у повному діапазоні [0 ... 1]. Однак у цьому режимі струм заряджання акумулятора має незначну величину [17]. Тому цей режим доцільно використовувати не для заряджання акумулятора, а для компенсації його саморозряду у зарядженому стані.

### Висновки.

1. За наявності акумулятора на виході, ІР працюватиме у режимі регулятора вхідного і, відповідно, вихідного струму (струму заряджання акумулятора).

2. Регулювальна характеристика струму буде залежати від співвідношення чисельних значень напруги акумулятора та напруги холостого ходу джерела  $E_a^*$ .

3. У режимі безперервного струму індуктивності допустимий діапазон регулювання параметра  $t^*$  є обмеженим і залежить від типу регулятора, а також чисельного значення параметра  $E_a^*$ .

4. Вихідний струм регулятора (вихідна потужність джерела) досягає максимального значення за певного значення параметра  $t^* = t_{MP}^*$ , яке є функцією параметра  $E_a^*$ , а також типу ІР.

**Конфлікт інтересів.** Автори статті заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. Twaha S., Zhu J., Yan Y., Li B., Huang K. Performance analysis of thermoelectric generator using DC-DC converter with incremental conductance based maximum power point tracking. *Energy for Sustainable Development*, 2017, vol. 37, pp. 86-98. doi: <https://doi.org/10.1016/j.esd.2017.01.003>.
2. Danandeh M.A., Mousavi G. Comparative and comprehensive review of maximum power point tracking methods for PV cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, vol. 82, part 3, pp. 2743-2767. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.009>.
3. Claude Bertin N.F., Kamta M., Wira P. A comprehensive assessment of MPPT algorithms to optimal power extraction of a PV panel. *Journal of Solar Energy Research*, 2019, vol. 4, no. 3, pp. 172-179. doi: <https://doi.org/10.22059/jser.2019.287029.1126>.
4. Mohamed S.A., Abd El Sattar M. A comparative study of P&O and INC maximum power point tracking techniques for grid-connected PV systems. *SN Applied Sciences*, 2019, no. 1, art. no. 174. doi: <https://doi.org/10.1007/s42452-018-0134-4>.
5. Yahya K., Bilgin M.Z., Erfidan T. Practical Implementation of Maximum Power Tracking Based Short-Current Pulse Method for Thermoelectric Generators Systems. *Journal of Power Electronics*, 2018, vol. 18, no. 4, pp. 1201-1210. doi: <https://doi.org/10.6113/JPE.2018.18.4.1201>.
6. Karthikeyan V., Vijayalakshmi V.J., Vinod A., Vanitha U., Jeyakumar P., Ramarajan M. Step and search control method to track the maximum power in wind energy conversion systems -

A study. *International Review on Modelling and Simulations*, 2013, vol. 6, no. 4, pp. 1205-1211.

7. Rajabi M., Hosseini S.M.H. Maximum power point tracking in photovoltaic systems under different operational conditions by using ZA-INC algorithm. *SN Applied Sciences*, 2019, vol. 1, no. 12, art. no. 1535. doi: <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1536-7>.

8. Saad W., Hegazy E., Shokair M. Maximum power point tracking based on modified firefly scheme for PV system. *SN Applied Sciences*, 2022, vol. 4, no. 4, art. no. 94. doi: <https://doi.org/10.1007/s42452-022-04976-3>.

9. Louarem S., Kebbab F.Z., Salhi H., Nouri H. A comparative study of maximum power point tracking techniques for a photovoltaic grid-connected system. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2022, no. 4, pp. 27-33. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2022.4.04>.

10. Saeed H., Mehmood T., Khan F.A., Shah M.S., Ullah M.F., Ali H. An improved search ability of particle swarm optimization algorithm for tracking maximum power point under shading conditions. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2022, no. 2, pp. 23-28. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2022.2.04>.

11. Anandhi T.S., PremKumar S. Application of DC-DC boost converter for solar powered traffic light with battery backup. *Indian Journal of Science and Technology*, 2015, vol. 8, no. 32, pp. 1-5. doi: <https://doi.org/10.17485/ijst/2015/v8i32/84408>.

12. Krieger E.M., Arnold C.B. Effects of undercharge and internal loss on the rate dependence of battery charge storage efficiency. *Journal of Power Sources*, 2012, vol. 210, pp. 286-291. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.03.029>.

13. Vieira J.A.B., Mota A.M. Implementation of a stand-alone photovoltaic lighting system with MPPT battery charging and LED current control. *2010 IEEE International Conference on Control Applications*, 2010, pp. 185-190. doi: <https://doi.org/10.1109/CCA.2010.5611257>.

14. Batrak L.M., Romashko V.Y. Switching Regulators Features in the Matching Mode Operation. *Microsystems, Electronics and Acoustics*, 2021, vol. 26, no. 1, pp. 232833-1 – 232833-7. (Ukr). doi: <https://doi.org/10.20535/2523-4455.me.232833>.

15. Goncharov Y.P., Budonny O.V., Morozov V.G., Panasenko M.V., Romashko V.Y., Rudenko V.S. *Power conversion equipment. Text book. Part 2*. Kharkiv, Folio Publ., 2000. 360 p. (Ukr).

16. Bessonov L.A. *Theoretical Foundations of Electrical Engineering. In 2 vols. Vol. 1. Electric circuits: textbook for universities*. Moscow, Yurayt Publ. House, 2021. 831 p. (Rus).

17. Romashko V.Y., Batrak L.M. Features of the Switching Regulator Operation on a Rechargeable Battery. *Microsystems, Electronics and Acoustics*, 2018, vol. 23, no. 4, pp. 22-30. doi: <https://doi.org/10.20535/2523-4455.2018.23.4.131272>.

Надійшла (Received) 05.01.2023

Прийнята (Accepted) 24.03.2023

Опублікована (Published) 02.11.2023

Ромашко Володимир Якович<sup>1</sup>, д.т.н., проф.,

Батрак Лариса Миколаївна<sup>1</sup>, к.т.н., доц.,

Абакумова Олена Олегівна<sup>1</sup>, к.ф.н., доц.,

<sup>1</sup> Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,

#### How to cite this article:

Romashko V.Y., Batrak L.M., Abakumova O.O. Features of the work of pulse regulators in the maximum power transmission mode, with the presence of an accumulator at their output. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2023, no. 6, pp. 63-66. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2023.6.11>

03056, Київ, пр. Берестейський, 37,

e-mail: rvy90593-eds@ill.kpi.ua;

batrakln5@gmail.com (Corresponding Author);

e.o.abakumova@gmail.com

V.Y. Romashko<sup>1</sup>, L.M. Batrak<sup>1</sup>, O.O. Abakumova<sup>1</sup>

<sup>1</sup> National Technical University of Ukraine

«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»,

37, Prospect Beresteyskyi, Kyiv-56, 03056, Ukraine.

#### Features of the work of pulse regulators in the maximum power transmission mode, with the presence of an accumulator at their output.

**Introduction.** For the efficient use of non-traditional and renewable sources of electrical energy, it is necessary to ensure their operation at the maximum power point, which is possible if the load resistance is equal to the output resistance of the source. To match the load resistance with the output impedance of the source, a matching switching regulator is connected between the source and the load. Very often, the amount of energy received from such sources depends on external conditions. To ensure a uniform supply of electrical energy to the load, a battery operating in buffer mode is connected at the output of the switching regulator. **Problem.** In this case, the load of the switching regulator is the battery, and the input impedance of the regulator will perform the role of the load of the power source. This resistance depends on the voltage of the battery, the type of switching regulator and its mode of operation. In such cases, the maximum power extraction mode from the source can be provided by selecting the appropriate operating mode of the switching regulator. The **aim** of the work is to analyze the conditions and determine the modes under which the transfer of the maximum possible amount of electrical energy from the source to the battery is ensured, as well as the features of the switching regulator in these modes. **Methods.** For this purpose, the regulating characteristics of step-up and step-down switching regulators were determined and analyzed, taking into account the presence of an accumulator at their output. Taking into account that in the maximum power transmission mode, the output resistance of the source and the load resistance are of the same order of magnitude, when determining the regulating characteristics, the internal resistance of the source was taken into account. **Results.** As a result of the analysis of the obtained regulating characteristics, the conditions were determined under which the transfer of energy from the source to the battery is ensured, and the parameters of the operating mode of the switching regulator were determined, under which the maximum power will be taken from the source of electrical energy. **Novelty.** The originality of the work is the consideration of the internal resistance of the source of electrical energy in determining the regulating characteristics of pulse regulators. **Practical value.** The obtained results made it possible to indicate the appropriate range of battery voltages for different types of pulse regulators, as well as to give practical recommendations for choosing the mode of operation of the pulse regulator depending on its type, as well as the amount of voltage on the battery. References 17, tables 1, figures 4.

**Key words:** source output impedance, matching switching regulator, battery operation, maximum power transmission.