

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

Отримання максимуму потужності від джерела за допомогою імпульсних регуляторів підвищувально-понижувального типу, що працюють на акумулятор

Проаналізовано регульовальні характеристики імпульсних регуляторів підвищувально-понижувального типу з урахуванням внутрішнього опору джерела живлення, за умови підключення акумулятора на їх виході. Показано, що за наявності акумулятора, регулятори напруги працюватимуть у режимі регулювання струму зарядження акумулятора. При цьому діапазон регулювання відносного часу замкненого стану ключа буде обмеженим. Дано рекомендації щодо вибору режимів роботи регулятора, за яких забезпечується передавання енергії від джерела до акумулятора, в залежності від схеми регулятора, а також значення напруги на акумуляторі. Визначено умови, за яких забезпечується передавання максимальної потужності від джерела живлення до акумулятора. Бібл. 15, табл. 1, рис. 4.

Ключові слова: вихідний опір джерела, узгоджувальний імпульсний регулятор, робота на акумулятор, передавання максимальної потужності, регулятори підвищувально-понижувального типу.

Вступ. При використанні різних типів нетрадиційних та відновлювальних джерел, від них прагнуть отримати максимально можливу кількість електричної енергії. Для цього робоча точка джерела має перебувати в точці максимальної потужності (МП) на його вихідній характеристиці. Однак, такий режим роботи джерела можливий лише у випадку, коли вихідний опір джерела r співпадає з опором його навантаження R [1, 2].

Для забезпечення можливості відбирання МП від джерела в широкому діапазоні зміни опору навантаження, між джерелом та навантаженням вмикають імпульсний регулятор (ІР), який узгоджує вихідний опір джерела з опором навантаження [3-6]. В таких випадках роль навантаження джерела виконуватиме вхідний опір регулятора $R_e = f(R, t^*)$, який є функцією опору навантаження регулятора R , а також відносного часу замкненого стану ключа регулятора $t^* = t_{closed} / T$ на періоді роботи ключа T . Змінюючи параметр t^* можна забезпечити виконання умови $R_e = r$ в широкому діапазоні змін опору навантаження R .

Кількість енергії, що надходить від нетрадиційних та відновлюваних джерел, часто залежить від зовнішніх умов. Тому, для забезпечення більш рівномірного надходження енергії до навантаження, на виході ІР вмикають акумулятор, який працює в буферному режимі. В таких випадках навантаженням ІР буде саме акумулятор, а навантаженням джерела – вхідний опір регулятора. Передавання МП від джерела до акумулятора може бути забезпечене шляхом вибору відповідного режиму роботи ІР [5, 7, 8].

У [9] проаналізовано умови, за яких можливе і доцільне передавання МП від джерела до акумулятора за допомогою ІР підвищувального та понижувального типу, а також особливості роботи цих регуляторів у зазначеному режимі. Для узгодження вихідного опору джерела з навантаженням, також можуть бути використані відомі схеми ІР підвищувально-понижувального типу [10-12].

Метою роботи є аналіз особливості роботи ІР підвищувально-понижувального типу в режимі передавання МП від джерела до акумулятора, а також визначення умов, за яких можливе і доцільне використання таких регуляторів із зазначеною метою.

Схеми регуляторів. Розглянемо ті варіанти схем ІР підвищувально-понижувального типу, які забезпечують можливість відбирання МП від джерела жив-

лення [13]. Відповідні схеми регуляторів представлено на рис. 1 та 2.

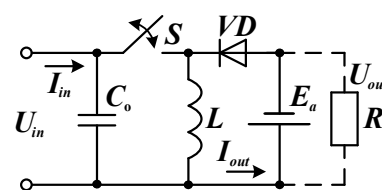


Рис. 1. Регулятор підвищувально-понижувального типу з послідовним вмиканням ключа

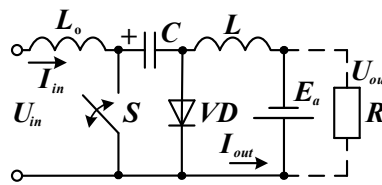


Рис. 2. Регулятор підвищувально-понижувального типу з паралельним вмиканням ключа

Визначимо та проаналізуємо регульовальні характеристики цих регуляторів, за допомогою яких може бути визначений режим роботи ІР, при якому від джерела живлення відбиратиметься МП. Оскільки в режимі відбирання МП опір навантаження та вихідний опір джерела є величинами одного порядку, при визначенні регульовальних характеристик регуляторів, будемо враховувати внутрішній опір джерела, вважаючи його лінійним.

Регулятор підвищувально-понижувального типу з послідовним вмиканням ключа (рис. 1). Якщо не враховувати втрати в елементах схеми ІР, в режимі безперервного струму індуктивності L , завжди виконуватимуться умови [12]

$$U_{out} = U_{in} \frac{t^*}{1-t^*}; \quad I_{out} = I_{in} \frac{1-t^*}{t^*}. \quad (1)$$

Якщо вважати, що внутрішній опір акумулятора є значно меншим від внутрішнього опору джерела, можна стверджувати, що в процесі регулювання вихідна напруга регулятора залишатиметься практично незмінною і дорівнюватиме напрузі на акумуляторі $U_{out} = E_a$. Отже, для того, щоб у процесі регулювання система перебувала у стані рівноваги, вхідна напруга регулятора має дорівнювати

$$U_{in} = U_{out} \frac{1-t^*}{t^*} = E_a \frac{1-t^*}{t^*}, \quad (2)$$

де $t^* = t_{closed} / T$ – відносний час замкненого стану ключа S на періоді T , t_{closed} – тривалість замкненого стану ключа.

Внаслідок наявності внутрішнього опору джерела, вхідна напруга регулятора змінюватиметься при змінах струму, що споживається і визначатиметься вихідною характеристикою джерела [12]

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

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

Таким чином, у стані рівноваги, мають одночасно виконуватись умови (2) та (3)

$$U_{oc} - I_{in}r = E_a \frac{1-t^*}{t^*}, \quad (4)$$

або переходячи до відносних одиниць [12]

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

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

Враховуючи, що напруга холостого ходу джерела, а також напруга акумулятора є фіксованими, змінюючи параметр t^* , тим самим регулюватимемо вхідний і, відповідно, вихідний струм регулятора

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

З урахуванням (1)

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

Отже, (6) та (7) і є регулювальними характеристиками ІР за схемою (рис. 1).

Регулятор підвищувально-понижувального типу з паралельним вмиканням ключа (рис. 2). Для цієї схеми у режимі безперервного струму індуктивності L_0 є дійсним співвідношення [12]

$$U_{out} = U_{in} = \frac{1-t^*}{t^*}; \quad I_{out} = I_{in} \frac{t^*}{1-t^*}, \quad (8)$$

де $t^* = t_{open} / T$; t_{open} – тривалість розімкненого стану ключа S на періоді T .

Отже, в усталеному режимі роботи, вхідна напруга регулятора має бути

$$U_{in} = U_{out} \frac{t^*}{1-t^*} = E_a \frac{t^*}{1-t^*}. \quad (9)$$

Для того, щоб система перебувала у стані рівноваги, має виконуватись умова

$$E_a \frac{t^*}{1-t^*} = 1 - I_{in}r, \quad (10)$$

або у відносних одиницях

$$E_a^* \frac{t^*}{1-t^*} = 1 - I_{in}^*. \quad (11)$$

Отже, регулювальні характеристики ІР за схемою (рис. 2) матимуть вигляд

$$I_{in}^* = \left[1 - E_a^* \frac{t^*}{1-t^*} \right]; \quad (12)$$

$$I_{out}^* = \left[1 - E_a^* \frac{t^*}{1-t^*} \right] \frac{t^*}{1-t^*}. \quad (13)$$

Таким чином, за наявності акумулятора на виході, регулятори, що розглядаємо, працюватимуть у режимі регулювання вхідного та вихідного струму (струму заряджання акумулятора). В той же час вихідна напруга регуляторів залишатиметься практично постійною і дорівнюватиме напрузі на акумуляторі.

Аналіз регулювальних характеристик регуляторів. За наявності акумулятора на виході, ІР працюватимуть в режимі регулювання струму заряджання акумулятора. У випадку $t^* = 0$ джерело живлення та навантаження роз'єднані між собою і передавання енергії до акумулятора буде відсутнє. Якщо ж $t^* > 0$, для забезпечення передавання енергії від джерела до акумулятора має виконуватись умова $I_{in} > 0$. Для схеми (рис. 1), з урахуванням (6), ця умова приймає вигляд

$$\left[1 - E_a^* \frac{1-t^*}{t^*} \right] > 0, \quad (14)$$

а для схеми (рис. 2)

$$\left[1 - E_a^* \frac{t^*}{1-t^*} \right] > 0. \quad (15)$$

Враховуючи, що у загальному випадку параметр t^* може змінюватись у діапазоні $[0..1]$, з урахуванням (14), (15) приходимо до висновку, що за наявності акумулятора допустимий діапазон зміни параметра t^* буде обмеженим. Для схеми (рис. 1) допустима зміна параметра лежить у діапазоні

$$1 \geq t^* > \frac{E_a^*}{E_a^* + 1}, \quad (16)$$

а для схеми (рис. 2)

$$0 < t^* < \frac{1}{1 + E_a^*}. \quad (17)$$

Отже, чим більшою буде напруга на акумуляторі E_a^* , тим більш обмеженим буде допустимий діапазон регулювання параметра t^* в ІР. В той же час аналіз (16) та (17) показує, що напруга акумулятора може бути як більшою, так і меншою за напругу холостого ходу джерела живлення U_{oc} .

Як відомо [1], у випадку лінійного внутрішнього опору джерела живлення, в точці МП відносно значення його вихідного струму (вихідного струму ІР) має бути $I_{in}^* = 0.5$.

Отже, умова відбирання МП від джерела для схеми регулятора (рис. 1) матиме вигляд

$$1 - E_a^* \frac{1-t^*}{t^*} = 0.5, \quad (18)$$

а для схеми (рис. 2)

$$1 - E_a^* \frac{t^*}{1-t^*} = 0.5. \quad (19)$$

Таким чином, МП буде передаватись від джерела до навантаження за умови, що $t^* = t_{MP}^*$, де для схеми регулятора (рис. 1)

$$t_{MP}^* = \frac{E_a^*}{E_a^* + 0,5}, \quad (20)$$

а для схеми (рис.2)

$$t_{MP}^* = \frac{0,5}{0,5 + E_a^*}. \quad (21)$$

Регулювальні характеристики розглянутих схем, що представлені на рис. 3, 4, підтверджують результати проведеного аналізу. Основні властивості цих схем є аналогічними. Однак, якщо для схеми (рис. 1) допустимий діапазон регулювання обмежений зліва $[t_{\min} \dots 1]$, то для схеми (рис. 2) – справа $[0 \dots t_{\max}]$. Це є наслідком дуальності схем розглянутих регуляторів [13].

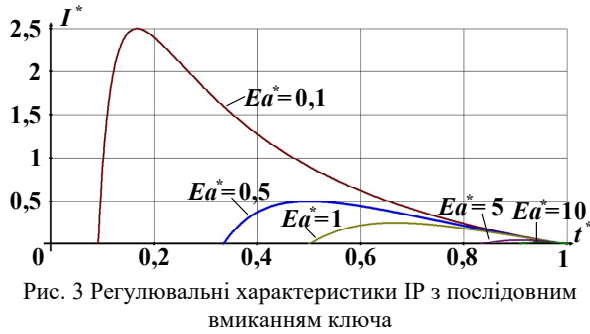


Рис. 3 Регулювальні характеристики ІР з послідовним вмиканням ключа

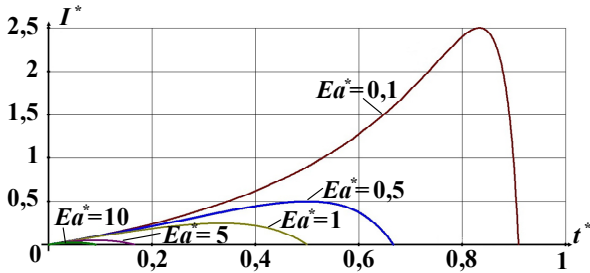


Рис. 4 Регулювальні характеристики ІР з паралельним вмиканням ключа

Для порівняння властивостей чотирьох основних схем ІР в табл. 1 наведено їх основні особливості при роботі в режимі передавання МП від джерела живлення до акумулятора, а саме:

- умова передавання енергії від джерела до акумулятора;
- умова відбору МП від джерела;
- доцільний діапазон зміни напруги акумулятора E_a .

Таблиця 1

Умови передавання енергії від джерела до акумулятора

№	Тип регулятора	Умова передавання енергії	Умова відбирання МП	Доцільний діапазон зміни E_a^*
1	Понижувальний	$t^* > E_a^*$	$t_{MP}^* = 2E_a^*$	$0,1 \leq E_a^* \leq 0,5$
2	Підвищувальний	$t^* < 1/E_a^*$	$t_{MP}^* = 1/2E_a^*$	$0,5 \leq E_a^* \leq 5$
3	Підвищувально-понижувальний (рис. 1)	$t^* > \frac{E_a^*}{1 + E_a^*}$	$t_{MP}^* = \frac{E_a^*}{E_a^* + 0,5}$	$0,1 \leq E_a^* \leq 5$
4	Підвищувально-понижувальний (рис. 2)	$t^* < \frac{1}{1 + E_a^*}$	$t_{MP}^* = \frac{0,5}{0,5 + E_a^*}$	$0,1 \leq E_a^* \leq 5$

На сьогодні існують модифіковані варіанти схем ІР підвищувально-понижувального типу, які відрізняються від розглянутих полярністю вихідної напруги (ZETA та SEPIC converters) [14, 15]. Зміна полярності вихідної напруги досягається шляхом відповідної побудови вихідного кола регулятора. Однак, оскільки основні властивості регулятора визначаються способом побудови його вхідного кола, і в першу чергу способом підключення керованого ключа S , одержані результати будуть дійсними і для відповідних типів модифікованих схем регуляторів підвищувально-понижувального типу.

Висновки.

1. За наявності акумулятора на виході, імпульсні регулятори напруги працюватимуть у режимі регулятора струму.
2. Характер регулювальної характеристики і допустимий діапазон регулювання залежить від типу регулятора та значення напруги на акумуляторі.
3. Максимальна потужність від джерела відбиратиметься за певного значення параметра $t^* = t_{MP}^*$, яке визначається типом регулятора та значенням напруги на акумуляторі.
4. Імпульсний регулятор підвищувально-понижувального типу, у порівнянні з регуляторами підвищувального та понижувального типів, мають найширший допустимий діапазон зміни відносної напруги на акумуляторі.

Конфлікт інтересів. Автори статті заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. Panchenko S.V., Ananieva O.M., Babaev M.M. *Theory of electric and magnetic circuits. Textbook.* Kharkiv, UkrDUZT Publ., 2020. 246 p. (Ukr).
2. 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>.
3. 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>.
4. Olalla C., Clement D., Rodriguez M., Maksimovic D. Architectures and Control of Submodule Integrated DC-DC Converters for Photovoltaic Applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2013, vol. 28, no. 6, pp. 2980-2997. doi: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2012.2219073>.
5. 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>.
6. Tseng S.-Y., Wang H.-Y. A Photovoltaic Power System Using a High Step-up Converter for DC Load Applications. *Energies*, 2013, vol. 6, no. 2, pp. 1068-1100. doi: <https://doi.org/10.3390/en6021068>.
7. 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>.
8. 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>.

9. 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>.

10. Dinniyah F.S., Wahab W., Alif M. Simulation of Buck-Boost Converter for Solar Panels using PID Controller. *Energy Procedia*, 2017, vol. 115, pp. 102-113. doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.05.011>.

11. Shayeghi H., Pourjafar S., Sedaghati F. A Buck-Boost Converter; Design, Analysis and Implementation Suggested for Renewable Energy Systems. *Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering*, 2021, vol. 17, no. 2, p. 1862. doi: <https://doi.org/10.22068/IJEEE.17.2.1862>.

12. 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).

13. Romashko V.Y., Batrak L.M., Abakumova O.O. Step-up/step-down regulators in maximum power transmission mode. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2022, no. 2, pp. 18-22. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2022.2.03>.

14. Soedibylo, Amri B., Ashari M. The comparative study of Buck-boost, Cuk, Sepic and Zeta converters for maximum power point tracking photovoltaic using P&O method. *2015 2nd International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering (ICITACEE)*, 2015, pp. 327-332. doi: <https://doi.org/10.1109/ICITACEE.2015.7437823>.

15. Chavan F.T., Mopari S.S., Swami P.S. Performance analysis of SEPIC and zeta converter for power quality improvement. *International Journal of Scientific and Technology Research*, 2019, vol. 8, no. 12, pp. 1925-1929.

Надійшла (Received) 22.11.2023

Прийнята (Accepted) 16.01.2024

Опублікована (Published) 01.05.2024

Ромашко Володимир Якович¹, д.т.н., проф.,

Батрак Лариса Миколаївна¹, к.т.н., доц.,

Абакумова Олена Олегівна¹, к.ф.н., доц.,

¹Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,

03056, Київ, пр. Берестейський, 37,

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

batrakln5@gmail.com (Corresponding Author);

e.o.abakumova@gmail.com

V.Y. Romashko¹, L.M. Batrak¹, O.O. Abakumova¹

¹National Technical University of Ukraine

«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»,

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

Obtaining the maximum power from the source using step-up and step-down type pulse regulators that work on battery.

Introduction. Pulse regulators are widely used to match the output resistance of the source with the load resistance in order to ensure the possibility of taking maximum power when the value of the load resistance changes. **Problem.** In the case of using non-traditional and renewable sources of electrical energy, for a more uniform supply of energy to the load, a battery is often connected to the output of the pulse regulator, which works in buffer mode. In such cases, the load for the pulse regulator will be the battery itself, and the role of the source load will be performed by the input resistance of the regulator. To ensure the mode of operation of the pulse regulator, in which the maximum power will be transmitted from the source to the load, it is necessary to know the regulating characteristics of the regulator. There are works that analyze the regulating characteristics of step-up and step-down pulse regulators, which are used to match the load with the output resistance of the source. At the same time, for the same purpose, pulse regulators of the step-up and step-down type can be used. **Goal.** The purpose of the work is to analyze the features of the operation of step-up and step-down type pulse regulators in the mode of maximum power transmission from the source to the battery, as well as to determine the conditions under which it is possible and appropriate to use such regulators for the specified purpose. **Methodology.** The regulating characteristics of step-up and step-down type pulse regulators with sequential and parallel switching on of the controlled key were determined and analyzed, taking into account the presence of a battery at their output. **Results.** It is shown that the transfer of energy from the source to the battery is possible only under certain modes of operation of the regulator, which depend on the type of regulator, as well as the amount of voltage on the battery. The conditions under which it is possible to draw the maximum power from the source are determined. **Originality.** Since the output resistance of the source and the load resistance are of the same order in the maximum power selection mode, the internal resistance of the power source was taken into account when determining the regulating characteristics of the regulators. **Practical value.** The obtained results made it possible to formulate practical recommendations for a justified choice of the regulator's operating modes, depending on its type and the value of voltage on the battery. References 15, tables 1, figures 4.

Key words: source output impedance, matching pulse regulator, battery operation, maximum power transmission, step-up and step-down type regulators.

How to cite this article:

Romashko V.Y., Batrak L.M., Abakumova O.O. Obtaining the maximum power from the source using step-up and step-down type pulse regulators that work on battery. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2024, no. 3, pp. 44-47. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2024.3.06>