

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

Регулятори підвищувально-понижувального типу в режимі передавання максимальної потужності

З урахуванням внутрішнього опору джерела живлення проаналізовано регульовальні характеристики імпульсних регуляторів підвищувально-понижувального типу. Визначено умови, за яких забезпечується передавання максимальної потужності від джерела живлення до навантаження. Дано рекомендації щодо вибору доцільного діапазону зміни відносного часу замкненого стану керованого ключа регулятора, у залежності від типу джерела живлення, а також способу підключення керованого ключа в імпульсному регуляторі. Бібл. 14, табл. 3, рис. 8.

Ключові слова: регулятор підвищувально-понижувального типу, регульовальні характеристики; передавання максимальної потужності.

Вступ. Імпульсні регулятори (ІР) постійної напруги традиційно використовують для регулювання та стабілізації напруги на навантаженні [1]. З розширенням застосування нетрадиційних та відновлюваних джерел електричної енергії виникла необхідність відбирання від них максимально можливої кількості електричної енергії. Як відомо [2], максимальна потужність від джерела живлення до навантаження передаватиметься лише за умови, що вихідний опір джерела r дорівнює опору його навантаження R . Щоб забезпечити можливість передавання максимальної потужності у випадках, коли $R \neq r$, між джерелом та навантаженням вмикають ІР, який узгоджує вихідний опір джерела з опором його навантаження. За наявності ІР, роль навантаження джерела R виконуватиме його вхідний опір. Цей опір залежить від опору навантаження регулятора R_{LD} , а також відносного часу замкненого (розімкненого) стану керованого ключа t^* : $R = f(R_{LD}, t^*)$. Змінюючи параметр t^* , можна забезпечити виконання умови $R = r$, тобто умову передавання максимальної потужності від джерела до навантаження R_{LD} .

На практиці, з метою узгодження, найчастіше використовують ІР підвищувального або понижувального типів [3–5]. Робота регуляторів в узгоджувальному режимі має ряд особливостей, у порівнянні з режимом регулювання та стабілізації вихідної напруги. Зокрема, оскільки в режимі передавання максимальної потужності вихідний опір джерела та опір навантаження є величинами одного порядку, при будь-яких розрахунках внутрішній опір джерела обов'язково необхідно враховувати. В існуючій літературі [1, 9], при визначенні регульовальних характеристик ІР, які працюють в режимі стабілізації вихідної напруги вважають, що внутрішній опір набагато менший за опір навантаження. Тому внутрішній опір джерела не враховують. Крім того, внутрішній опір джерела впливатиме на коефіцієнт використання електричної енергії джерела, а отже і на загальний коефіцієнт корисної дії системи джерела живлення – імпульсний регулятор. В [6] детально проаналізовано особливості роботи ІР підвищувального та понижувального типів в режимі передавання максимальної потужності від джерела живлення до навантаження. Крім вказаних типів ІР, існують регулятори понижувально-підвищувального типів [7–9], які порівняно рідко використовують з зазначеною метою. У першу чергу це пов'язано з недостатнім вивченням особливостей роботи таких регуляторів у вказаному режимі.

Метою роботи є аналіз особливостей роботи ІР підвищувально-понижувального типу в режимі передавання максимальної потужності від джерела живлення до навантаження, і визначення умов, за яких можлива і доцільна їх робота в такому режимі.

Аналіз регульовальних характеристик. Найважливішими характеристиками будь-якого регулятора є його регульовальні характеристики. У випадку живлення від реальних джерел електричної енергії, внаслідок наявності в них внутрішнього опору, регульовальні характеристики залежатимуть від опору навантаження. У зв'язку з цим властивості регулятора описує сімейство його регульовальних характеристик, які визначають для різних значень опору навантаження R_{LD} . Проаналізуємо регульовальні характеристики класичної схеми ІР підвищувально-понижувального типу (рис. 1) [9].

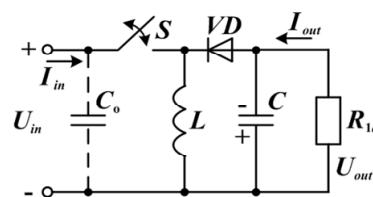


Рис. 1. Базова схема ІР підвищувально-понижувального типу

Для спрощення вважатимемо, що внутрішній опір джерела r є лінійним, а втрати в елементах ІР є незначними. Для описання регульовальних характеристик використовуватимемо відносні величини [9].

Відповідно до [10], регульовальна характеристика ІР (рис. 1) описується таким виразом

$$U^* = \frac{t^*(1-t^*)}{(1-t^*)^2 + r^*t^*}, \quad (1)$$

де $U^* = U/U_{oc}$; $r^* = r/R_{LD}$; $t^* = t_{cl}/T$; U_{oc} – напруга холостого ходу джерела; t_{cl} – тривалість замкненого стану ключа S на періоді T .

На рис. 2 представлено сімейство регульовальних характеристик для кількох фіксованих значень відносного опору r^* . На цьому ж графіку показано регульовальну характеристику для випадку живлення від ідеального джерела напруги ($r^* = 0$). Проаналізуємо одержані характеристики. Для ідеального джерела напруги ($r^* = 0$), зі збільшенням параметра t^* вихідна напруга U^* необмежено зростає. У випадку реальних джерел ($r^* \neq 0$), при $t^* = 0$ та $t^* = 1$, вихідна напруга

дорівнюватиме нулю, оскільки відсутнє передавання енергії від джерела до навантаження. За певного значення параметра $t^* = t_m^*$, вихідна напруга, а отже і вихідна потужність досягає максимального значення P_{\max} . Виникає питання: чи відповідає такий режим роботи режиму передавання максимальної потужності від джерела до навантаження?

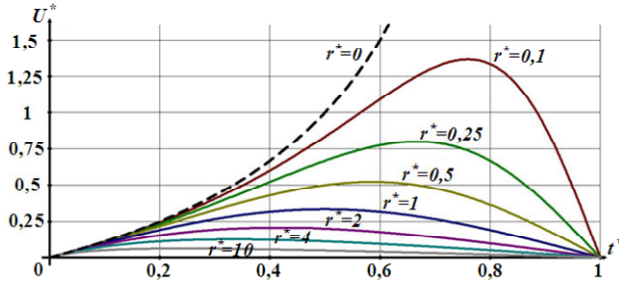


Рис. 2. Регулювальні характеристики за відсутності накопичувального конденсатора C_0

Як відомо [2], у випадку лінійного внутрішнього опору джерела, його точка максимальної потужності (ТМП) має координати: $U_{MP}^* = 0.5$; $I_{MP}^* = 0.5$. Отже, максимально можлива вихідна потужність такого джерела становить $P_{MP}^* = U_{MP}^* \cdot I_{MP}^* = 0.25$. Вихідну потужність регулятора, у точці максимуму вихідної напруги (рис. 2), можна визначити за формулою $P_{\max}^* = U_{\max}^{*2} / R_{LD}^* = U_{\max}^{*2} \cdot r^*$. Перевірка показує, що за будь-якого значення параметра r^* $P_{\max}^* < P_{MP}^*$. Отже, ця схема, за будь-якого значення параметра r^* , не забезпечує можливість передавання максимальної потужності від джерела до навантаження. Це пов'язане з тим, що енергія від джерела відбирається лише тоді, коли ключ S замкнений, тобто дискретними порціями. Якщо ж ключ S буде постійно замкнений ($t^* = 1$), джерело живлення працюватиме в режимі короткого замикання, внаслідок чого енергія від джерела до навантаження не надходитиме. Щоб забезпечити безперервність відбирання енергії від джерела, на вході ІР необхідно встановити накопичувальну ємність C_0 достатнього значення (рис. 1). Внаслідок перерозподілу струмів, за наявності C_0 , регулювальна характеристика описуватиметься таким виразом

$$U^* = \frac{t^* (1-t^*)}{(1-t^*)^2 + r^* t^{*2}} \quad (2)$$

Для цього випадку графіки регулювальних характеристик представлено на рис. 3.

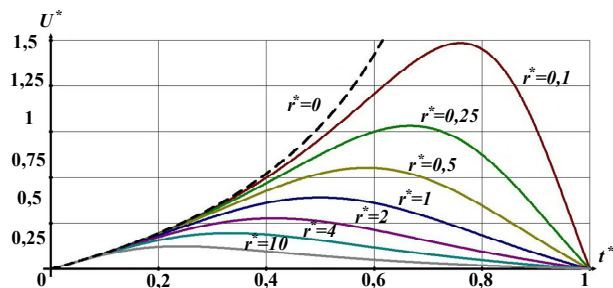


Рис. 3. Регулювальні характеристики за наявності накопичувального конденсатора C_0

Перевірка показує, що вихідна потужність в точках максимальної вихідної напруги будь-якого з цих графіків, відповідає максимальній вихідній потужності джерела

$$P_{\max}^* = P_{MP}^* = 0.25 \quad (3)$$

Отже, за наявності ємності C_0 , регулятор підвищувально-понижувального типу забезпечує можливість передавання від джерела до навантаження максимально можливої потужності. Для цього необхідно забезпечити певне значення параметра $t^* = t_{MP}^*$. Визначимо умови, за яких від джерела до навантаження передаватиметься максимально можлива потужність.

Як відомо [9], вхідні та вихідні параметри ІР підвищувально-понижувального типу (рис. 1) пов'язані співвідношеннями

$$U_{out}^* = U_{in}^* \cdot \frac{t^*}{1-t^*}; \quad I_{out}^* = I_{in}^* \cdot \frac{1-t^*}{t^*} \quad (4)$$

Враховуючи, що при лінійному внутрішньому опорі джерела його вихідна напруга та вихідний струм в ТМП $U_{MP}^* = 0.5$; $I_{MP}^* = 0.5$, можемо записати, що у випадку роботи джерела в ТМП вихідна напруга та струм ІР

$$U_{out}^* = 0.5 \cdot \frac{t^*}{1-t^*}; \quad I_{out}^* = 0.5 \cdot \frac{1-t^*}{t^*} \quad (5)$$

З іншого боку, $U_{out}^* = I_{out}^* R_{LD}^*$, тобто

$$U_{out}^* = 0.5 \cdot \frac{1-t^*}{t^*} R_{LD}^* \quad (6)$$

Прирівнюючи (5) та (6) отримаємо

$$0.5 \cdot \frac{t^*}{1-t^*} = 0.5 \cdot \frac{1-t^*}{t^*} R_{LD}^*$$

або

$$t^{*2} / R_{LD}^* = t^{*2} r^* = (1-t^*)^2 \quad (7)$$

Отже, параметр t_{MP}^* можемо визначити шляхом рішення такого квадратного рівняння

$$t^{*2} (r^* - 1) + 2t^* - 1 = 0 \quad (8)$$

Це рівняння має два корені

$$t_1^* = \frac{\sqrt{r^* - 1}}{r^* - 1}; \quad t_2^* = \frac{1 + \sqrt{r^*}}{1 - r^*} \quad (9)$$

Враховуючи фізичний зміст параметра t^* приходимо до висновку, що дійсним буде лише корінь t_1^* , тобто

$$t_{MP}^* = \frac{\sqrt{r^*} - 1}{r^* - 1} \quad (10)$$

В табл. 1 наведено розраховані чисельні значення параметра t_{MP}^* для різних значень відносного опору r^* . Чисельне значення для випадку $r^* = 1$ отримано шляхом розкриття невизначеності виду $0/0$.

Результати, представлені в табл. 1 підтверджуються графіками на рис. 3. Таким чином, якщо на вході ІР (рис. 1) встановлено накопичувальну ємність C_0 достатнього значення, цей регулятор, на відміну від ІР підвищувального та понижувального типів [6],

забезпечує можливість відбирання від джерела живлення максимальної потужності, теоретично, за будь-якої значення опору навантаження регулятора R_{LD} .

Таблиця 1

Залежність параметру t_{MP}^* від опору r^*

r^*	0,05	0,1	0,25	0,5	0,8	1
t_{MP}^*	0,84	0,77	0,67	0,58	0,53	0,5
r^*	1,25	2	4	10	20	
t_{MP}^*	0,48	0,41	0,33	0,24	0,19	

В [6] показано, що електричні кола, що утворюють ІР підвищувального та понижувального типів є дуальними. Цим, зокрема, пояснюється подібність їх параметрів та характеристик. Якщо до схеми розглянутого ІР (рис. 1) застосувати принципи побудови дуальних електричних кіл, отримаємо схему ІР, зображену на рис. 4, яка добре відома під назвою схема Кука [9, 11, 12].

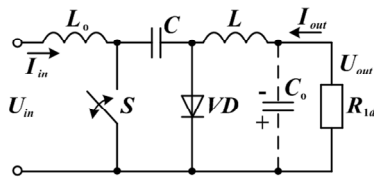


Рис. 4. Регулятор підвищувально-понижувального типу за схемою Кука

З урахуванням принципу дуальності, для неї є дійсними такі співвідношення

$$U_{out}^* = U_{in}^* \cdot \frac{1-t^*}{t^*}, \quad I_{out}^* = I_{in}^* \cdot \frac{t^*}{1-t^*}, \quad (11)$$

де $t^* = t_{OP}/T$, t_{OP} - тривалість розімкненого стану ключа S на період T .

Аналогічно до попередніх схем можна показати, що її регулювальна характеристика по вихідній напрузі матиме вигляд

$$U_{out}^* = U_{in}^* \cdot \frac{t^*(1-t^*)}{r^*(1-t^*) + t^{*2}}. \quad (12)$$

Враховуючи, що для дуальних схем аналогом параметра r^* є параметр $R_{LD}^* = R_{LD}/r = 1/r^*$, можна стверджувати, що ця схема відбиратиме від джерела максимальну потужність за умови, що

$$t^* = t_{MP}^* = \frac{\sqrt{R_{LD}^*} - 1}{R_{LD}^* - 1}. \quad (13)$$

В табл. 2 наведено розраховані чисельні значення параметра t_{MP}^* для різних значень відносного опору $r^* = 1/R_{LD}^*$.

Таблиця 2

Залежність параметру t_{MP}^* від опору r^* для схеми Кука

r^*	0,05	0,1	0,25	0,5	0,8	1
t_{MP}^*	0,19	0,24	0,33	0,41	0,48	0,5
r^*	1,25	2	4	10	20	
t_{MP}^*	0,53	0,58	0,67	0,77	0,84	

На рис. 5 представлено графіки залежності $t_{MP}^* = f(r^*)$ для ІР, схема яких наведена на рис. 1 та рис. 4.

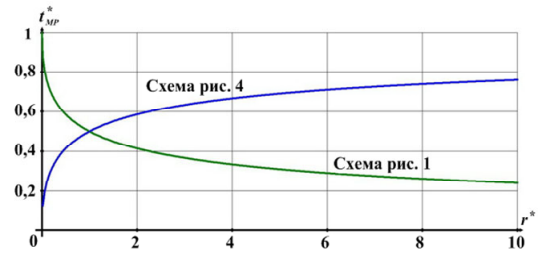


Рис. 5. Залежність параметру t_{MP}^* від опору r^*

Ці графіки є дзеркальним відображенням один одного відносно ліній, що відповідає $t_{MP}^* = 0.5$. На рис. 6 представлено графіки регулювальних характеристик регулятора (рис. 4) для різних значень параметра r^* , які підтверджують результати, представлені в табл. 2.

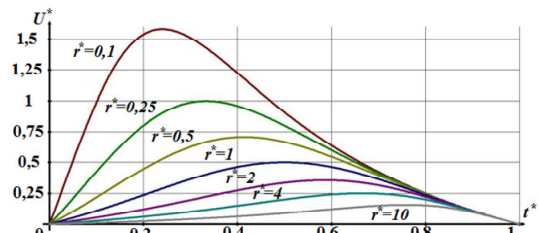


Рис. 6. Регулювальні характеристики схеми Кука

Таким чином, обидві розглянуті схеми забезпечують можливість відбирання максимальної потужності від джерела живлення, теоретично, за будь-якого значення опору навантаження R_{LD} .

Рекомендовані діапазони регулювання. У відповідності з регулювальними характеристиками (рис. 3 та рис. 6), вихідна напруга регуляторів досягає максимального значення U_{max}^* за умови, що $t^* = t_{MP}^*$. Вихідну напругу $U_{out}^* < U_{max}^*$ можна отримати при двох різних значеннях параметра t^* , одне з яких є більшим за t_{MP}^* , а інше – меншим. У таких випадках, як показано в [6], при виборі діапазону регулювання доцільно враховувати коефіцієнт використання електричної енергії джерела електроживлення η .

Якщо джерело живлення є джерелом напруги, з урахуванням (11), залежність $\eta = f(t^*)$ для ІР (рис. 4) матиме вигляд

$$\eta = U^* = U_{in}^* = U_{out}^* \frac{t^*}{1-t^*}. \quad (14)$$

Отже, зі збільшенням параметра t^* , η зростатиме. Тому, у разі живлення від джерела напруги, параметра t^* доцільно змінювати в діапазоні $t_{MP}^* \dots 1$. Якщо ж джерело живлення є джерелом струму, залежність $\eta = f(t^*)$ для цієї ж схеми матиме вигляд

$$\eta = I^* = I_{in}^* = I_{out}^* \frac{1-t^*}{t^*}. \quad (15)$$

Враховуючи, що $I_{out}^* = U_{out}^* / R_{LD}^* = U_{out}^* r^*$, отримаємо, що

$$\eta = U_{out}^* r^* \frac{1-t^*}{t^*}.$$

Таким чином у випадку живлення від джерела струму, параметр t^* доцільно змінювати в діапазоні

$0 \dots t_{MP}^*$. Крім того, ефективність використання енергії джерела збільшуватиметься зі збільшенням r^* , тобто із зменшенням опору навантаження R_{LD} .

Враховуючи дуальність схем розглянутих регуляторів, робимо висновок, що для IP (рис. 1) рекомендації матимуть протилежний характер. Аналіз отриманих результатів, а також результатів наведених в [6], свідчить про те, що для вибору доцільного діапазону регулювання параметра t^* , необхідно врахувати два фактори:

- 1) тип джерела електричної енергії;
- 2) спосіб підключення керованого ключа S в IP, відносно джерела живлення та навантаження.

В табл. 3 наведено рекомендовані діапазони регулювання параметра t^* , у залежності від типу джерела живлення та способу підключення керованого ключа S . Особливістю розглянутих регуляторів підвищувально-понижувального типу є те, що полярність їх вихідної напруги є протилежною до полярності вхідної. При практичному застосуванні це не завжди є зручним. Тому було розроблено варіанти цих схем, у яких полярність вихідної напруги співпадає з полярністю вхідної.

Таблиця 3

Рекомендовані діапазони регулювання параметра t^*

Джерело \ Ключ		
	$0 \dots t_{MP}^*$	$t_{MP}^* \dots 1$
	$t_{MP}^* \dots 1$	$0 \dots t_{MP}^*$

Вони відомі під назвами відповідно ZETA converter (рис. 7) та SEPIC converter (рис. 8) [13, 14].

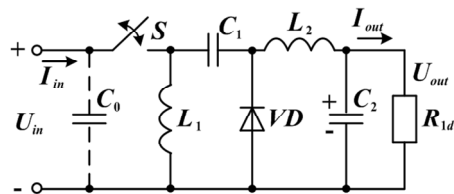


Рис. 7. Регулятор типу ZETA

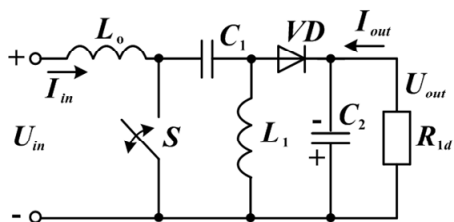


Рис. 8. Регулятор типу SEPIC

Схеми цих регуляторів відрізняються від розглянутих базових схем (рис. 1 та рис. 4) способом побудови вихідного кола, а також наявністю додаткових реактивних елементів. Однак оскільки найважливіші властивості регулятора визначає спосіб побудови його вхідного кола, зокрема спосіб підключення керованого ключа S , результати, які було отримано для регулятора підвищувально-понижувального типу (Buck-

Boost converter) (рис. 1) будуть дійсними для регулятора типу ZETA (рис. 7), а результати, отримані для схеми Кука (Cuk converter) (рис. 4), будуть дійсними для регулятора типу SEPIC (рис. 8). Зокрема, для забезпечення можливості відбирання максимальної потужності від джерела живлення, на вході регулятора типу ZETA повинен бути встановлений конденсатор C_0 достатньої ємності (рис. 7).

Висновки.

1. Схеми IP з послідовним (паралельним) вмиканням керованого ключа S забезпечують можливість відбирання максимальної потужності від джерела живлення лише за умови наявності на їх вході накопичувальної ємності C_0 (індуктивності L_0).

2. IP підвищувально-понижувального типу забезпечують можливість відбирання максимальної потужності від джерела живлення до навантаження майже за будь-якого значення опору навантаження R_{LD} .

3. Доцільний діапазон регулювання параметра t^* обирають з урахуванням типу джерела живлення, а також способу підключення керованого ключа в імпульсному регуляторі.

Конфлікт інтересів. Автори статті заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Севернс Р., Блум Г. Импульсные преобразователи постоянного напряжения для систем вторичного электропитания. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 294 с.
2. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. В 2 т. Том 1. Электрические цепи: учебник для вузов. 12-е изд., испр. и доп. – М.: Издательство Юрайт, 2021. – 831 с.
3. 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>.
4. 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>.
5. Tseng S.-Y., Wang H.-Y. A Photovoltaic Power System Using a High Step-up Converter for DC Load Applications. *Energies*, 2013, vol. 6, pp. 1068-1100. doi: <https://doi.org/10.3390/en6021068>.
6. Батрак Л.М., Ромашко В.Я. Особенности работы импульсных регуляторов в режиме передачи максимальной мощности. *Мікросистеми, Електроніка та Акустика*, 2021, № 26 (1), С. 232833-1. doi: <https://doi.org/10.20535/2523-4455.me.232833>.
7. Dinniyah F.S., Wahab W., Alif M. (2017). 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>.
8. 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, pp. 1862-1862. doi: <https://doi.org/10.22068/IJEEE.17.2.1862>.
9. Гончаров Ю.П., Будьонний О.В., Морозов В.Г., Панасенко М.В., Ромашко В.Я., Руденко В.С. *Перетворювальна техніка. Ч.2*. – Х.: Фоліо, 2000. – 360 с.
10. Romashko V.Y. Регулювальні характеристики імпульсних регуляторів з урахуванням внутрішнього опору джерела електроживлення. *Мікросистеми, Електроніка та Акустика*, 2017, № 22(6), С. 29-34. doi: <https://doi.org/10.20535/2523-4455.2017.22.6.81414>.
11. Garza J.G., Chong B., Zhang L. Control of integrated Cuk converter and photovoltaic modules for maximum power generation. *2012 3rd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)*, 2012, pp. 175-181. doi: <https://doi.org/10.1109/PEDG.2012.6253997>.
12. Khan H.R., Kazmi M., Ashraf H.B., Hashir Bin Khalid M., Hasan A., Qazi S.A. An Isolated Power Factor Corrected Cuk Converter with Integrated Magnetics for Brushless DC Ceiling

Fan Applications. *Electronics*, 2021, vol. 10, no. 14, p. 1720. doi: <https://doi.org/10.3390/electronics10141720>.

13. Soediby, 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>.

14. Fakirrao T. Chavan, Shrikant S. Mopari, Panchayya S. Swami. Performance Analysis Of SEPIC And Zeta Converter For Power Quality Improvement. *International Journal of Scientific & Technology Research*, 2019, vol. 8, no. 12, pp. 1925-1929. Available at: <http://www.ijstr.org/final-print/dec2019/Performance-Analysis-Of-Sepic-And-Zeta-Converter-For-Power-Quality-Improvement.pdf> (Accessed 22.08.2021).

REFERENCES

1. Severns R., Blum G. *Impul'snye preobrazovateli postoiannogo napriazheniia dlia sistem vtorichnogo elektropitaniia* [Switching DC voltage converters for secondary power supply systems]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988. 294 p. (Rus).

2. Bessonov L.A. *Teoreticheskiye osnovy elektrotekhniki. V 2 t. Tom 1. Elektricheskiye tsepi: uchebnyk dlya vuzov* [Theoretical Foundations of Electrical Engineering. In 2 vols. Vol. 1. Electric circuits: textbook for universities]. Moscow, Yurayt Publ. House, 2021. 831 p. (Rus).

3. 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>.

4. 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>.

5. Tseng S.-Y., Wang H.-Y. A Photovoltaic Power System Using a High Step-up Converter for DC Load Applications. *Energies*, 2013, vol. 6, pp. 1068-1100. doi: <https://doi.org/10.3390/en6021068>.

6. 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. doi: <https://doi.org/10.20535/2523-4455.me.232833>. (Ukr).

7. Dinniyah F.S., Wahab W., Alif M. (2017). 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>.

8. 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, pp. 1862-1862. doi: <https://doi.org/10.22068/IJEEE.17.2.1862>.

9. Goncharov Y.P., Budonny O.V., Morozov V.G., Panasenko M.V., Romashko V.Y., Rudenko V.S. *Peretovyvalna technicala. Navchalnyi posibnyk. Chastyna 2* [Power conversion equipment. Text book. Part 2]. Kharkiv, Folio Publ., 2000. 360 p. (Ukr).

10. Romashko V.Y. Regulation characteristics of switching regulators with taking into account the internal resistance of power supply. *Microsystems, Electronics and Acoustics*, 2017, vol. 22, no. 6, p. 29-34. doi: <https://doi.org/10.20535/2523-4455.2017.22.6.81414>. (Ukr).

11. Garza J.G., Chong B., Zhang L. Control of integrated Cuk converter and photovoltaic modules for maximum power generation. *2012 3rd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)*, 2012, pp. 175-181. doi: <https://doi.org/10.1109/PEDG.2012.6253997>.

12. Khan H.R., Kazmi M., Ashraf H.B., Hashir Bin Khalid M., Hasan A., Qazi S.A. An Isolated Power Factor Corrected Cuk Converter with Integrated Magnetics for Brushless DC Ceiling Fan Applications. *Electronics*, 2021, vol. 10, no. 14, p. 1720. doi: <https://doi.org/10.3390/electronics10141720>.

13. Soediby, 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>.

14. Fakirrao T. Chavan, Shrikant S. Mopari, Panchayya S. Swami. Performance Analysis Of SEPIC And Zeta Converter For Power Quality Improvement. *International Journal of Scientific & Technology Research*, 2019, vol. 8, no. 12, pp. 1925-1929. Available at: <http://www.ijstr.org/final-print/dec2019/Performance-Analysis-Of-Sepic-And-Zeta-Converter-For-Power-Quality-Improvement.pdf> (Accessed 22 August 2021).

Надійшла (Received) 23.11.2021
Прийнята (Accepted) 27.12.2021
Опублікована (Published) 20.04.2022

Ромашко Володимир Якович¹, д.т.н., проф.,
Батрак Лариса Миколаївна¹, к.т.н., доц.,
Абакумова Олена Олегівна¹, к.ф.н., доц.
¹ Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
03056, Київ, пр. Перемоги, 37,
e-mail: batrakln5@gmail.com (Corresponding author)

V.Y. Romashko¹, L.M. Batrak¹, O.O. Abakumova¹
¹ National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»,
37, Prospect Peremohy, Kyiv-56, 03056, Ukraine.

Step-up/step-down regulators in maximum power transmission mode.

Introduction. Switching DC voltage regulators are traditionally used to regulate and stabilize the voltage on the load. Due to the widespread use of non-traditional and renewable sources of electricity, there is a need to select from them the maximum possible amount of electricity. As is known, the maximum power from the power supply to the load will be transmitted provided that the output resistance of the source is equal to the load resistance. If this condition is not met, a matching switching regulator is switched on between the power supply and the load. Most often, for the purpose of matching, pulse regulators of step-up or step-down types are used. **Problem.** The operation of regulators in the matching mode has a number of features, in comparison with the modes of regulation and stabilization of the output voltage. Thus, since in the maximum power transmission mode the output resistance of the source and the resistance of the load are values of the same order, in any calculation the internal resistance of the source must be taken into account. There are works in which features of work of regulators of step-up and step-down types in a mode of transfer of the maximum power are analyzed. In addition to these types of pulse regulators, there are regulators of step-up/step-down types, which are relatively rarely used for this purpose. First of all it is connected with insufficiently studied abilities of work of such regulators in the specified mode. **Goal.** The aim of the work is to analyze the features of the operation of pulse regulators of step-up/step-down types in the mode of transmission of maximum power from the power supply to the load, as well as to determine the conditions under which it is possible and appropriate to work in this mode. **Methodology.** In the work, taking into account the internal resistance of the power supply, the regulation characteristics of the basic circuit of the pulse regulator of the step-up/step-down type are analyzed. The conditions under which the transfer of maximum power from the power supply to the load is ensured are determined. **Results.** It is shown that the existing variants of the circuits of regulators of the step-up/step-down type can be obtained from the basic circuit by applying the rules of construction of dual electric circuits. Consequently, the basic calculated relations for such circuits can be obtained from the calculated relations of the basic circuit using the principle of duality. **Originality.** A method for determining and studying the regulation characteristics of pulse regulators, taking into account the internal resistance of the power supply. **Practical value.** The obtained results allow to determine the conditions under which it is possible and expedient to operate different circuits of regulators in the mode of transmission of maximum power from the power supply to the load. Based on these results, recommendations are given for selecting a suitable range for changing the relative time of the closed state of the controlled switch, depending on the type of power supply used, as well as the method of connecting the controlled switch in the regulator circuit. References 14, tables 3, figures 8.

Key words: step-up/step-down regulator, regulation characteristics, maximum power transmission.