

Особливості роботи імпульсних регуляторів в режимі передавання максимальної потужності

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» ROR [00syn5v21](https://orcid.org/00syn5v21)
Київ, Україна

Анотація—В роботі проаналізовано особливості роботи імпульсних регуляторів у режимі передавання максимальної потужності від джерела живлення до навантаження. Оскільки у такому режимі роботи внутрішній опір джерела та опір навантаження є величинами одного порядку, при визначенні регулювальних характеристик регулятора його необхідно враховувати. На прикладі імпульсних регуляторів підвищувального та понижувального типів проаналізовано регулювальні характеристики цих регуляторів та особливості їх роботи в режимі відбирання максимальної потужності від джерела. Визначено умови, за яких можлива і доцільна їх робота у такому режимі. Показано, що кожна з розглянутих схем може забезпечити виведення джерела живлення в точку максимальної потужності лише в певному діапазоні зміни опору навантаження.

Ключові слова — імпульсний регулятор; внутрішній опір; регулювальна характеристика; максимальна потужність.

І. ВСТУП

На відміну від ідеальних, реальні джерела електричної енергії мають обмежену потужність, що пов'язано з наявністю у них внутрішнього опору r . Реальне джерело напруги може видати у зовнішнє коло максимальний струм $I_{\text{кз}} = E/r$, а джерело струму — максимальну напругу $U_{\text{хх}} = Ir$. Однак в режимах холостого ходу та короткого замикання вихідна потужність, що передається у зовнішнє коло, дорівнює нулю. У певному режимі роботи, який знаходиться між режимами холостого ходу та короткого замикання, вихідна потужність джерела досягає максимального значення. Робоча точка на вихідній характеристиці джерела, яка відповідає цьому режиму, називається точкою максимальної потужності (ТМП) [1]. Для одержання від джерела максимальної кількості електричної енергії, бажано відбирати від нього максимально можливу потужність. Однак при роботі джерела в ТМП коефіцієнт використання його електричної енергії $\eta = P_{\text{max}}/P$, як правило, є невисоким.

В традиційних джерелах електричну енергію отримують шляхом використання певних видів енергоносіїв. Тому робота таких джерел в ТМП не практикується у зв'язку з неефективним використанням енергоносія [2]. Як правило, традиційні джерела електричної енергії є джерелами напруги. Найчастіше їх використовують у режимах, близьких до режиму холостого ходу, у якому $\eta \geq 90\%$.

На сьогодні широке застосування мають різні види нетрадиційних та відновлювальних джерел е-

лектричної енергії, а також малопотужні споживачі енергії — такі як LED драйвери та LED освітлення. Якщо енергоносієм таких джерел є безкоштовним, у процесі роботи від них доцільно відбирати максимально можливу потужність, навіть не зважаючи на те, що коефіцієнт використання електричної енергії джерела при цьому може бути порівняно невисоким [3, 4, 5].

Щоб отримати від джерела максимальну кількість електричної енергії, необхідне виконання двох умов:

- 1) джерело електричної енергії має працювати в його ТМП;
- 2) енергія від джерела має відбиратись безперервно.

Як відомо [2], для виведення джерела в ТМП необхідно, щоб опір його навантаження дорівнював вихідному опору джерела ($R_{\text{н}} = r$). За інших умов від джерела відбиратиметься потужність, менша за максимально можливу. Тому у випадках, коли $R_{\text{н}} \neq r$, для узгодження вихідного опору джерела з опором навантаження, між джерелом живлення та навантаження вмикають узгоджувальний імпульсний регулятор (ІР) [6, 7, 8]. У такому випадку навантаженням джерела буде вхідний опір ІР $R_{\text{ІР}}$. Цей опір залежить від опору навантаження регулятора, а також відносного часу t^* замкненого (розімкненого) стану керованого ключа S імпульсного регулятора $R_{\text{ІР}} = f(R_{\text{н}}, t^*)$. Таким чином, впливаючи на параметр t^* , можна забезпечити виконання умови $R_{\text{ІР}} = r$ для різних величин опору навантаження $R_{\text{н}}$. Зауважимо, що у такому випадку до



навантаження, незалежно від значення його опору, передаватиметься максимально можлива вихідна потужність джерела.

Залежність вихідних параметрів ІР від параметра t^* описують його регульовальні характеристики. Оскільки в режимі передавання максимальної потужності внутрішній опір джерела та опір навантаження є величинами одного порядку, за визначення регульовальних характеристик ІР його обов'язково необхідно враховувати.

Метою роботи є аналіз регульовальних характеристик ІР, що працює в режимі передавання максимальної потужності від джерела до навантаження, і визначення умов, за яких можлива і доцільна його робота в такому режимі.

II. ОСНОВНА ЧАСТИНА

Проаналізуємо зазначені питання на прикладі використання двох найбільш поширених схем ІР:

- ІР знижувального типу (рис. 1);
- ІР підвищувального типу (рис. 2).

Для спрощення вважатимемо, що внутрішній опір джерела є лінійним, а втрати в елементах ІР є незначними. Щоб отримувати результати були зручними для використання і мали загальний характер, користуватимемося відносними величинами [9, 10]. Нормована вихідна характеристика джерела з лінійним внутрішнім опором r , представлена на рис. 3.

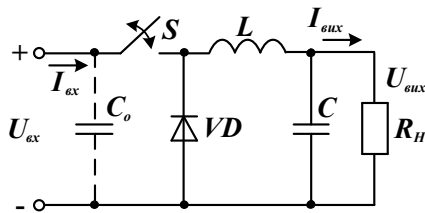


Рис. 1. ІР понижувального типу

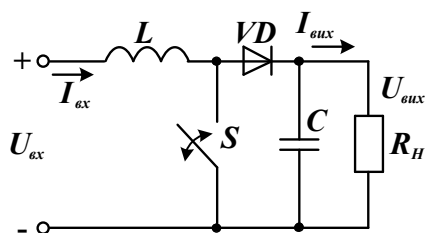


Рис.2. ІР підвищувального типу

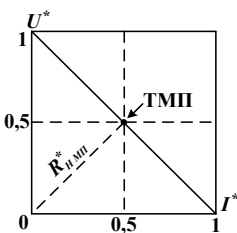


Рис.3. Нормована вихідна характеристика джерела з лінійним внутрішнім опором r

Нормування здійснене по напрузі холостого ходу і струму короткого замикання джерела

$$U^* = U/U_{xx}; I^* = I/I_{кз}; \quad (1)$$

З урахуванням цього відносний опір навантаження джерела

$$R^* = \frac{U^*}{I^*} = \frac{U \cdot I_{кз}}{I \cdot U_{xx}} = \frac{R}{r}. \quad (2)$$

Як відомо [2], у випадку лінійного внутрішнього опору, ТМП джерела має координати $U_{МП}^* = 0,5$; $I_{МП}^* = 0,5$. Отже, для виведення джерела у цю роботу точку, відносний опір навантаження джерела має бути

$$R_{МП}^* = U_{МП}^* / I_{МП}^* = 1. \quad (3)$$

Порівняємо схеми ІР (рис. 1 та 2) на предмет їх можливостей відбирання від джерела максимальної кількості електричної енергії. За цією ознакою ці схеми суттєво відрізняються між собою. В ІР понижувального типу (рис. 1) енергія від джерела відбирається дискретними порціями. Тому до її навантаження максимальна потужність може бути передана лише за умови, що $R_H^* = R_{МП}^* = 1$. При цьому ІР має працювати з параметром $t^* = 1$. На відміну від ІР знижувального типу, в регуляторі підвищувального типу (рис. 2) енергія від джерела відбирається безперервно. Отже, у випадку роботи джерела в ТМП, максимальна потужність може бути передана до навантаження для різних значень його опору. Для цього лише необхідно забезпечити певне значення параметра $t^* = t_{МП}^*$. Для того, щоб ІР (рис.1) мав такі самі можливості, необхідно забезпечити в ньому безперервне відбирання енергії від джерела. Для цього на його вході вмикають ємність C_0 достатньої величини.

Найважливішою характеристикою будь — якого регулятора напруги є його регульовальна характеристика $U_{вих}^* = f(t^*)$ [9]. В [10] одержано регульовальні характеристики досліджуваних схем для випадку лінійного внутрішнього опору їх джерела електроживлення. Проаналізуємо ці характеристики. Почнемо з ІР підвищувального типу, який забезпечує широкі можливості відбирання максимальної потужності від джерела. Відповідно до [10], його регульовальну характеристику описує такий вираз

$$U_{вих}^* = \frac{t^*}{t^{*2} + r^*}. \quad (4)$$

де $r^* = r/R_H = 1/R_H^*$; $t^* = t_p/T$, t_p – тривалість розімкненого стану ключа на періоді T .

На рис. 4 представлений графік сімейства регульовальних характеристик для кількох значень відносного опору r^* .

На цьому ж графіку представлено регульовальну характеристику для випадку ідеального джерела напруги ($r^* = 0$). Аналіз наведених графіків свідчить про таке.

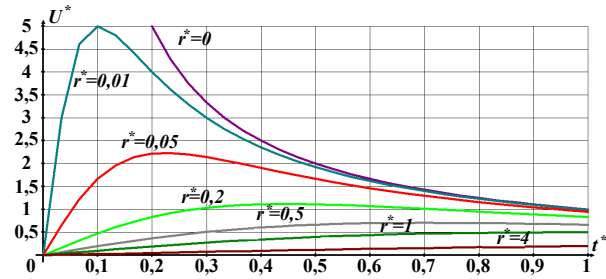


Рис.4. Семейство регуловальних характеристик для кількох значень відносного опору r^* .

- 1) Неврахування внутрішнього опору джерела може привести до значної похибки при визначенні вихідної напруги IP.
- 2) Похибка буде тим більшою, чим більшим є значення відносного опору r^* і чим меншим є чисельне значення параметра t^* .
- 3) За певного значення параметра $t^* = t_{МП}^*$ вихідна напруга (а отже і потужність) досягає максимального значення, що відповідатиме перебуванню джерела в ТМП. Оскільки за умови, що $t^* = t_{МП}^*$ вихідна напруга регулятора досягає максимального значення, для визначення параметра $t_{МП}^*$ продиференціюємо вираз (4) і прирівняємо його до нуля

$$\frac{dU_{вих}^*}{dt^*} = t^* \cdot 2t^* - t^{*2} - r^* = 0 \quad (5)$$

Звідки

$$t_{МП}^* = \sqrt{r^*} \quad (6)$$

Отже, з урахуванням фізичного смислу параметра t^* можемо стверджувати, що максимальна потужність від джерела до навантаження може бути передана лише за умови, що $r^* \leq 1$, тобто коли опір навантаження є більшим від внутрішнього опору джерела

$$R_H \geq r \quad (7)$$

На рис. 5 наведено графік залежності $t_{МП}^* = f(r^*)$, який підтверджує результати, представлені на рис.4.

Аналіз отриманих графіків свідчить про те, що зі зменшенням $R_{МП}^*$ (збільшенням r^*) максимальне значення вихідної напруги зменшується, а цей максимум стає усе більш розмитим. Однак при цьому вихідна потужність залишається постійною і дорівнює

$$P_{МП}^* = U_{МП}^{*2} / R_H^* = U_{МП}^{*2} \cdot r^* = 0,25 \quad (8)$$

Регуловальні характеристики IP понижувального типу (рис. 1), відповідно до [10], за відсутності накопичувальної ємності C_o описуються виразом

$$U_{вих}^* = \frac{t^*}{1+r^* t^*} \quad (9)$$

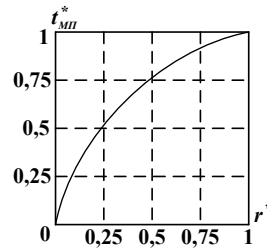
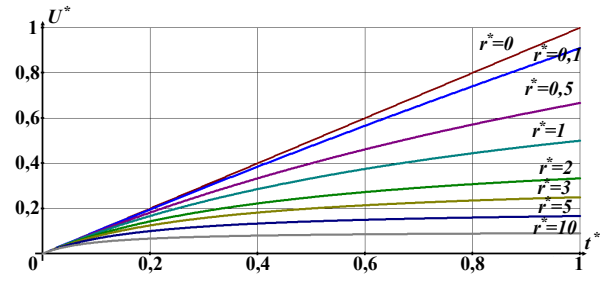
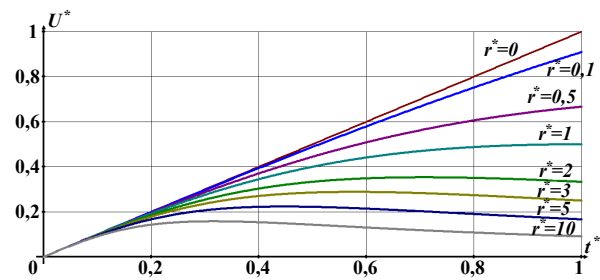


Рис.5. Графік залежності $t_{МП}^* = f(r^*)$



а)



б)

Рис. 6. Графіки регуловальних характеристик для кількох значень відносного опору r^*

а за її наявності

$$U_{вих}^* = \frac{t^*}{1+r^* t^{*2}} \quad (10)$$

де $t^* = t_3/T$.

На рис. 6 представлено графіки регуловальних характеристик для кількох значень відносного опору r^* , за відсутності ємності C_o (рис. 6 а) та за її наявності (рис.6 б). На цих же графіках представлено регуловальну характеристику для випадку $r^* = 0$.

Аналіз представлених графіків свідчить про таке.

- 1) На відміну від лінійної регуловальної характеристики при ідеальному джерелі напруги ($r^* = 0$), регуловальні характеристики, у разі живлення від реальних джерел, стають нелінійними.
- 2) Введення накопичувальної ємності C_o , за однакових інших умов, збільшує вихідну напругу, а отже і потужність регулятора.

- 3) За певного значення параметра $t^* = t_{МП}^*$ вхідна напруга (потужність) регулятора з накопичувальною ємністю C_0 досягає максимального значення, що відповідає роботі джерела в ТМП.

Для визначення параметра $t_{МП}^*$ продиференціюємо (10) і прирівняємо до нуля чисельник одержаного виразу

$$\frac{dU_{вих}^*}{dt^*} = t^* \cdot 2r^* t^* - 1 - r^* t^{*2} = 0, \quad (11)$$

звідки

$$t_{МП}^* = \sqrt{1/r^*} \quad (12)$$

Враховуючи, що параметр t^* може змінюватись у діапазоні (0...1), приходимо до висновку, що IP понижувального типу (рис.1) дає можливість відібрати від джерела максимальну потужність лише за умови, що $r^* \geq 1$, тобто коли опір навантаження R_H є меншим, або дорівнює внутрішньому опору джерела r .

На рис. 7 показано графік залежності $t_{МП}^* = f(r^*)$ для випадку, коли на вході IP присутня накопичувальна ємність C_0 .

Таким чином, IP понижувального типу (рис. 1) може бути використаний для відбирання від джерела максимальної потужності лише за виконання двох умов:

- 1) наявність на вході IP накопичувальної ємності C_0 ;
- 2) опір навантаження R_H має бути не більшим, від внутрішнього опору джерела живлення r , тобто $r^* \geq 1$.

Аналіз представлених регульовальних характеристик свідчить про те, що ту саму вихідну напругу $U_{вих}^*$ можна отримати при двох різних значеннях параметра t^* , одне з яких є більшим за $t_{МП}^*$, а інше меншим. Проаналізуємо більш детально цей факт.

При застосуванні нетрадиційних та відновлювальних джерел електричної енергії, дуже часто є допустимим використовувати повний діапазон зміни навантаження джерела від режиму холостого ходу до короткого замикання. Тому, з точки зору процесів у навантаженні, не має значення у якому діапазоні зміни параметра t^* доцільно працювати, щоб отримати задане значення вихідної напруги $U_{вих}^*$. Однак з точки зору процесів у самому джерелі, це відіграє важливе значення. Вибір доцільного діапазону регулювання буде залежати від того, що фізично являє собою джерело електричної енергії: джерело напруги чи струму. Як відомо [2], коефіцієнт використання електричної енергії η джерела напруги зростає від нуля, у режимі короткого замикання, наближаючись до одиниці у режимах близьких до холостого ходу. Для джерела струму навпаки: у режимі холос-

того ходу цей коефіцієнт дорівнює нулю. При наближенні до режиму короткого замикання $\eta \rightarrow 1$. Якщо джерело електричної енергії є джерелом напруги, його коефіцієнт використання електричної енергії

$$\eta = \frac{P_{вих}}{P} = \frac{U_{вих} I_{вих}}{U_{xx} I_{вих}} = U^* \quad (13)$$

Якщо ж джерело електричної енергії є джерелом струму

$$\eta = \frac{P_{вих}}{P} = \frac{U_{вих} I_{вих}}{U_{вих} I_{кз}} = I^* \quad (14)$$

Отже, у випадку роботи джерела з лінійним внутрішнім опором в ТМП, для джерела напруги та струму цей коефіцієнт є однаковим і дорівнює $\eta=0,5$. Проаналізуємо як залежатиме η від параметра t^* для різних схем IP.

Для IP понижувального типу (рис. 1), вхідна та вихідна напруга пов'язані співвідношенням

$$U_{вих}^* = U_{ex}^* \cdot t^* \quad (15)$$

Враховуючи, що вхідна напруга регулятора одночасно є вихідною напругою джерела $U_{ex}^* = U^*$, з урахуванням (13) одержуємо, що

$$\eta = U_{вих}^* / t^* \quad (16)$$

Отже, у випадку його живлення від джерела напруги, зі збільшенням t^* , η зменшуватиметься. Тому, при живленні від джерела напруги, параметр t^* доцільно регулювати в діапазоні (0... $t_{МП}^*$).

Вхідний та вихідний струм цього регулятора пов'язані співвідношенням

$$I_{вих}^* = I_{ex}^* \cdot t^* \quad (17)$$

Враховуючи, що $I_{ex}^* = I^*$, з урахуванням (14) отримуємо, що

$$\eta = I_{вих}^* \cdot t^* \quad (18)$$

Вихідний струм IP можна виразити через його вихідну напругу та опір навантаження

$$I_{вих}^* = U_{вих}^* / R_H^* = U_{вих}^* \cdot r^* \quad (19)$$

Отже, у випадку живлення IP понижувального типу від джерела струму

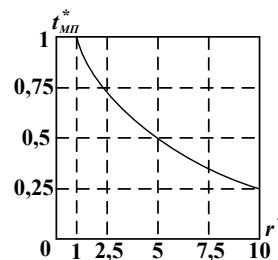


Рис. 7. Графік залежності $t_{МП}^* = f(r^*)$ для випадку, коли на вході IP є C_0 .

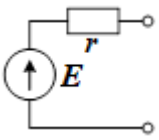
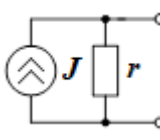
$$\eta = U_{вих}^* t^* r^* \quad (20)$$

Таким чином, при однаковій вихідній напрузі $U_{вих}^*$ η джерела буде вищим, при більших значеннях параметра t^* . Тому, у випадку живлення цього регулятора від джерела струму, параметр t^* доцільно змінювати в діапазоні $(t_{МП}^* \dots 1)$.

Враховуючи, що для ІР підвищувального типу (рис. 2) співвідношення між вхідною та вихідною напругами та струмами є протилежними, робимо висновок, що залежність $\eta = f(t^*)$ також матиме протилежний характер. З урахуванням того, що вихідна напруга регуляторів $U_{вих}^*$ у свою чергу також залежить від параметра t^* (див. (4) та (10)), залежність $\eta = f(t^*)$, насправді, матиме більш складний характер, ніж показують формули (16) та (20). В табл. 1 наведено формули, що описують цю залежність для розглянутих схем. Також у цій таблиці для кожного випадку зазначено доцільний діапазон зміни параметра t^* при регулюванні.

Аналіз та порівняння схем ІР рис. 1 та рис. 2 свідчить про те, що будь-яка з цих схем може бути одержана з іншої, шляхом застосування до неї принципів побудови дуальних електричних кіл [2]. З урахуванням того, що для дуальних схем аналогом параметра r^* є параметр $R_H^* = 1/r^*$, пояснюється подібність властивостей цих схем. Зокрема те, що їх коефіцієнти передавання струму, співпадають відповідно з коефіцієнтом передавання напруги. Це спрощує дослідження властивостей подібних схем.

ТАБЛИЦЯ 1 ЗАЛЕЖНІСТЬ ЕФЕКТИВНОСТІ ПЕРЕТВОРЮВАЧА ВІД ПАРАМЕТРУ T^*

Джерело енергії \ Регулятор		
ІР понижувального типу (рис. 1)	$\eta = \frac{1}{1+r^*t^*}$ $t^* = (0 \dots t_{МП}^*)$	$\eta = \frac{t^{*2}r^*}{1+t^{*2}r^*}$ $t^* = (t_{МП}^* \dots 1)$
ІР підвищувального типу (рис. 2)	$\eta = \frac{t^{*2}}{t^{*2}+r^*}$ $t^* = (t_{МП}^* \dots 1)$	$\eta = \frac{r^*}{t^{*2}+r^*}$ $t^* = (0 \dots t_{МП}^*)$

ВИСНОВКИ

Кожна з проаналізованих схем ІР може забезпечити виведення джерела живлення в ТМП лише у певному діапазоні зміни опору навантаження R_H .

Використання ІР понижувального типу з метою відбирання МП від джерела живлення можливе лише у випадку, коли $R_H \leq r$ та за наявності на вході регулятора накопичувальної ємності C_o . Якщо джерело живлення є джерелом напруги, для найбільш ефекти-

вного використання його енергії, параметр t^* доцільно змінювати в діапазоні $(0 \dots t_{МП}^*)$. Якщо ж джерело енергії є джерелом струму, параметр t^* доцільно змінювати в діапазоні $(t_{МП}^* \dots 1)$, де $t_{МП}^* = \sqrt{1/r^*}$

Можливість використання ІР підвищувального типу для відбирання МП від джерела живлення забезпечується наявністю на його вході накопичувальної індуктивності L . Ця можливість існуватиме лише у випадку, коли $R_H \geq r$. Якщо джерело живлення є джерелом напруги, для найбільш ефективного використання його енергії параметр t^* доцільно змінювати в діапазоні $(t_{МП}^* \dots 1)$. Якщо ж джерело енергії є джерелом струму, параметр t^* доцільно змінювати в діапазоні $(0 \dots t_{МП}^*)$, де $t_{МП}^* = \sqrt{r^*}$.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] Cabal, C., Martínez-Salamero, L., Séguier, L., et al.: Maximum power point tracking based on sliding-mode control for output-series connected converters in photovoltaic systems, IET Power Electron., 2013, № 7 (4), pp. 914–923. DOI: [10.1049/iet-pel.2013.0348](https://doi.org/10.1049/iet-pel.2013.0348).
- [2] Bessonov, L. A. Teoreticheskiye osnovy elektrotekhniki. V 2t. Tom 1. Elektricheskiye tsepi: uchebnik dlya vuzov [Theoretical Foundations of Electrical Engineering. In 2 volumes. Volume 1. Electric circuits: textbook for universities], 12th ed., Rev. and add. Moscow: Yurayt Publishing House, 2020. 831 p. ISBN 978-5-534-10731-9.
- [3] Ali, A. N. A., Saied, M. H., Mostafa, M. Z. and Abdel-Moneim, T. M. A Survey of Maximum PPT Techniques of PV Systems. IEEE Energytech, Cleveland, 29-31 May 2012, 1-17. DOI: [10.1109/EnergyTech.2012.6304652](https://doi.org/10.1109/EnergyTech.2012.6304652)
- [4] Elgendy, M. A., Zahawi, B. and Atkinson, D. J. Assessment of Perturb and Observe MPPT Algorithm Implementation Techniques for PV Pumping Applications. IEEE Transactions on Sustainable Energy, Volume 3(1), 2012, 21-33. DOI: [10.1109/TSTE.2011.2168245](https://doi.org/10.1109/TSTE.2011.2168245)
- [5] Subudhi, B. and Pradhan, R. A Comparative Study on Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Power Systems. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 4, 89-98. DOI: [10.1109/TSTE.2012.2202294](https://doi.org/10.1109/TSTE.2012.2202294)
- [6] Romashko V. YA. Ustroystva soglasovaniya nagruzki s istochnikom elektricheskoy energii [Devices for matching the load with a source of electrical energy], Energoberezhnie. Energy. Energy audit. Vol. 1 No. 8, 2013 pp. 67-74. URL: <http://eee.khpi.edu.ua/article/view/113919>
- [7] Olalla, C., Clement, D., Rodriguez, M., et al. ‘Architectures and control of submodule integrated dedc converters for photovoltaic applications’, IEEE Trans. Power Electron., 2013, 28, (6), pp. 2980–2997 DOI: [10.1109/TPEL.2012.2219073](https://doi.org/10.1109/TPEL.2012.2219073)
- [8] Garza, J. G., Chong, B., Zhang, L. ‘Control of integrated Cuk converter and photovoltaic modules for maximum power generation’. Third IEEE Int. Symp. on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), June 2012, pp. 175–181 DOI: [10.1109/PEDG.2012.6253997](https://doi.org/10.1109/PEDG.2012.6253997)
- [9] 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.
- [10] Romashko, V. J. «Rehulyuval’ni kharakterystyky IR z urakhuvannyam vnutrishn’oho oporu dzherela elektrozhyvlennya [Regulation characteristics of switching regulators with taking into account the internal resistance of



- power supply], MikrosistElektronAkust, 2017, vol. 22, no. 6, p 29 – 34, DOI: [10.20535/2523-4455.2017.22.6.81414](https://doi.org/10.20535/2523-4455.2017.22.6.81414).
- [11] Reisi, A. R.; Moradi, M. H.; Jamasb, S. Classification and comparison of maximum power point tracking techniques for photovoltaic system: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2013, 19, 433–443. DOI: [10.1016/j.rser.2012.11.052](https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.052)
- [12] Ram, J. P.; Babu, T. S.; Rajasekar, N. A comprehensive review on solar PV maximum power point tracking techniques. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2017, 67, 826–847. DOI: [10.1016/j.rser.2016.09.076](https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.076)
- [13] Shebani, M. M.; Iqbal, T.; Quaicoe, J. E. Comparing bisection numerical algorithm with fractional short circuit current and open circuit voltage methods for MPPT photovoltaic systems. In Proceedings of the 2016 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC), Ottawa, ON, Canada, 12–14 October 2016; pp. 1–5. DOI: [10.1109/EPEC.2016.7771689](https://doi.org/10.1109/EPEC.2016.7771689)
- [14] 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. In Proceedings of the 2015 2nd International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering (ICITACEE), Semarang, Indonesia, 16–18 October 2015; pp. 327–332. DOI: [10.1109/ICITACEE.2015.7437823](https://doi.org/10.1109/ICITACEE.2015.7437823)
- [15] Park, M.; Yu, I. A. Study on the optimal voltage for MPPT obtained by surface temperature of solar cell. In Proceedings of the 30th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, Busan, South Korea, 2–6 November 2004; Volume 30, pp. 2040–2045. DOI: [10.1109/IECON.2004.1432110](https://doi.org/10.1109/IECON.2004.1432110)
- [16] Subudhi, B.; Pradhan, R. A Comparative Study on Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Power Systems. *IEEE Trans. Sustain. Energy* 2013, 4, 89–98. DOI: [10.1109/TSTE.2012.2202294](https://doi.org/10.1109/TSTE.2012.2202294)
- [17] Rezk, H.; Eltamaly, A. M. A comprehensive comparison of different MPPT techniques for photovoltaic systems. *Sol. Energy* 2015, 112, 1–11. DOI: [10.1016/j.solener.2014.11.010](https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.11.010)
- [18] Tousi, S. M. R.; Moradi, M. H.; Basir, N. S.; Nemati, M. A functionbased maximum power point tracking method for photovoltaic systems. *IEEE Trans. Power Electron.* 2016, 31, 2120–2128. DOI: [10.1109/TPEL.2015.2426652](https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2426652)
- [19] Verma, D.; Nema, S.; Shandilya, A.; Dash, S. K. Maximum power point tracking (MPPT) techniques: Recapitulation in solar photovoltaic systems. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2016, 54, 1018–1034. DOI: [10.1016/j.rser.2015.10.068](https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.068)
- [20] Bhatnagar, P.; Nema, R. Maximum power point tracking control techniques: State-of-the-art in photovoltaic applications. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2013, 23, 224–241. DOI: [10.1016/j.rser.2013.02.011](https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.011)
- [21] Reisi, A. R.; Moradi, M. H.; Jamasb, S. Classification and comparison of maximum power point tracking techniques for photovoltaic system: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2013, 19, 433–443. DOI: [10.1016/j.rser.2012.11.052](https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.052)
- [22] Kamarzaman, N. A.; Tan, C. W. A comprehensive review of maximum power point tracking algorithms for photovoltaic systems. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2014, 37, 585–598. DOI: [10.1016/j.rser.2014.05.045](https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.045)
- [23] Koutroulis, E.; Blaabjerg, F. Overview of Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Energy Production Systems. *Electr. Power Components Syst.* 2015, 43, 1329–1351. DOI: [10.1080/15325008.2015.1030517](https://doi.org/10.1080/15325008.2015.1030517)
- [24] Ahmad, R.; Murtaza, A. F.; Sher, H. A. Power tracking techniques for efficient operation of photovoltaic array in solar applications — A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2019, 101, 82–102. DOI: [10.1016/j.rser.2018.10.015](https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.10.015)
- [25] Belhachat, F.; Larbes, C. Comprehensive review on global maximum power point tracking techniques for PV systems subjected to partial shading conditions. *Sol. Energy* 2019, 183, 476–500. DOI: [10.1016/j.solener.2019.03.045](https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.03.045)
- [26] Ishaque, K.; Chin, V. J. A review of maximum power point tracking techniques of PV system for uniform insolation and partial shading condition. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2013, 19, 475–488. DOI: [10.1016/j.rser.2012.11.032](https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.032)
- [27] Bastidas-Rodríguez, J. D.; Spagnuolo, G.; Franco, E.; Ramos-Paja, C. A.; Petrone, G. Maximum power point tracking architectures for photovoltaic systems in mismatching conditions: A review. *IET Power Electron.* 2014, 7, 1396–1413. DOI: [10.1049/iet-pel.2013.0406](https://doi.org/10.1049/iet-pel.2013.0406)
- [28] Liu, Y.-H.; Chen, J.-H.; Huang, J.-W. A review of maximum power point tracking techniques for use in partially shaded conditions. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2015, 41, 436–453. DOI: [10.1016/j.rser.2014.08.038](https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.038)
- [29] Liu, L.; Meng, X.; Liu, C. A review of maximum power point tracking methods of PV power system at uniform and partial shading. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2016, 53, 1500–1507. DOI: [10.1016/j.rser.2015.09.065](https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.065)
- [30] Chauhan, U.; Rani, A.; Singh, V.; Kumar, B. A Modified Incremental Conductance Maximum Power Point Technique for Standalone PV System. In Proceedings of the 2020 7th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN); Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE): Piscataway, NJ, USA, 2020; pp. 61–64. DOI: [10.1109/SPIN48934.2020.9071156](https://doi.org/10.1109/SPIN48934.2020.9071156)

Надійшла до редакції 28 березня 2021 р

Прийнята до друку 15 квітня 2021 р.



Switching Regulators Features in the Matching Mode Operation

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 Kyiv Polytechnic Institute" ROR [00syn5v21](https://ror.org/00syn5v21)
Kyiv, Ukraine

Abstract—Currently, various types of non-traditional and renewable sources of electrical energy are widely used. If the energy carrier of such sources is free, in the process of operation it is advisable to select the maximum possible power from them, regardless of the fact that the utilization factor of the source's electrical energy in this case may be relatively low. To obtain the maximum amount of electrical energy from the source, two conditions must be met: 1) the source must be brought to the maximum power point (MPP); 2) energy from the source must be taken continuously. As you know, to bring the source into the MPP, it is necessary that the load resistance be equal to the output resistance of the source. Otherwise, the power will be taken from the source, which is less than the maximum possible. Therefore, in cases where the load resistance differs from the output resistance of the source, a matching switching regulator is turned on between the source and the load to match the output resistance of the source with the load resistance. In this case, the input impedance of the switching regulator will be the load of the source. This resistance depends on the load resistance of the regulator, as well as on the relative time of the closed (open) state of the controlled switch S of the regulator t^* . Thus, by adjusting the parameter t^* , it is possible to ensure the fulfillment of the condition for removing the source into the MPP at various values of the load resistance. In this case, the maximum possible power of the source will be transferred to the load, regardless of the value of its resistance.

The dependence of the output parameters of the switching regulator on the parameter t^* describe its regulation characteristics. Since, when operating in the maximum power transmission mode, the internal resistance of the source and the load resistance are of the same order of magnitude, when determining the regulating characteristics of the regulator, the internal resistance of the source must be taken into account.

The aim of the work is to analyze the control characteristics of the regulator, which operates in the mode of transferring maximum power from the source of electrical energy to the load, as well as to determine the conditions under which it is possible and advisable to operate in this mode. These issues were analyzed using the example of the two most common switching regulator circuits — step-down and step-up regulators. It is shown in the work that, in contrast to the up-type switching regulator, in the down-type regulator, the energy from the power source is taken in discrete portions. Therefore, it can ensure the selection of maximum power from the source only in the $t^* = 1$ mode at a certain value of the load resistance. To ensure continuous extraction of energy from the source, at the input of the switching regulator of the step-down type, it is necessary to install a capacitance of sufficient value. In this case, the circuit can provide maximum power transfer from the source at different load resistances. The paper presents the adjusting characteristics of the analyzed circuits for the case of their operation in the mode of transferring maximum power from the power source to the load, which makes it possible to determine the parameter t^* at which the power source is output to the MPP. It is shown that each of the considered circuits can provide the output of the power supply to the MPP only in a certain range of variation of the load resistance of the regulator. For each regulator, an appropriate range of variation of the t^* parameter is indicated, depending on whether the power source is a voltage source or a current source.

Keywords — *switching regulator; internal resistance; regulation characteristic; maximum power.*

