

УДК 621.314

doi:10.20998/2413-4295.2019.10.04

РЕГУЛЮВАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ІМПУЛЬСНОГО РЕГУЛЯТОРА  
ПОНИЖУВАЛЬНОГО ТИПУ, ЩО ПРАЦЮЄ НА АКУМУЛЯТОР

В. Я. РОМАШКО, Л. М. БАТРАК\*

*кафедра промислової електроніки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, УКРАЇНА**\*e-mail: batrakln5@gmail.com*

**АНОТАЦІЯ** Метою роботи є дослідження особливостей роботи імпульсного регулятора постійної напруги понижувального типу у випадку, коли на його виході підключено акумулятор, що працює в буферному режимі. Проведено аналіз його регулювальних характеристик при наявності та відсутності конденсатора достатньо великої ємності на вході регулятора. Відзначено, що при наявності акумулятора на виході регулятора напруги, останній працюватиме в режимі регулювання вихідного струму (струму заряджання акумулятора). Показано, що для забезпечення можливості передавання від джерела електричної енергії до акумулятора максимально можливої енергії, необхідно встановлювати на вході імпульсного регулятора конденсатор з достатньо великою ємністю. Регулювальні характеристики отримано для різних значень співвідношення напруг акумулятора та джерела живлення. Визначено умови, за яких від джерела електричної енергії до акумулятора передаватиметься максимально можлива потужність. Показано, що за певних умов, струм заряджання акумулятора може перевищувати струм короткого замикання джерела електричної енергії. Визначено умови, за яких в індуктивності регулятора виникатиме режим переривчастого струму. З урахуванням можливості виникнення такого режиму проведено уточнення одержаних регулювальних характеристик. Регулювальні характеристики побудовано з урахуванням необхідності обмеження втрат електричної енергії в акумуляторі. Для цього визначалося максимально допустима величина відносного внутрішнього опору акумулятора. За необхідності обмеження втрат енергії в джерелі електроживлення, вигляд одержаних регулювальних характеристик залишатиметься незмінним. Однак, у цьому випадку, необхідно буде використовувати обмежену ділянку цих характеристик. Зроблено висновок, що при роботі імпульсного регулятора на акумулятор, для визначення його регулювальної характеристики обов'язково необхідно враховувати внутрішній опір джерела електроживлення. Без урахування цього опору регулювальна характеристика імпульсного регулятора є невизначеною.

**Ключові слова:** імпульсний регулятор; акумулятор; регулювальна характеристика; режим переривчастого струму; відбір максимальної потужності; внутрішній опір.

REGULATION CHARACTERISTICS OF THE STEP-DOWN SWITCHING REGULATOR  
WHICH OPERATES ON A RECHARGEABLE BATTERY

V. ROMASHKO, L. BATRAK

*Department of Industrial Electronics, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, UKRAINE*

**ABSTRACT** The aim of the work is to study the peculiarities of the operation of a step-down switching regulator in the case, when a battery operating in a buffer mode is connected to its output. The analysis of its regulating characteristics in the case of presence and absence of a capacitor of a large capacity at the input of the regulator was carried out. It is noted that in the presence of a battery at the output of the voltage regulator, the latter will operate in the mode of regulating the output current (battery charging current). It is shown that in order to ensure the maximum possible energy transferred from a source of electrical energy to a battery, a capacitor with a sufficiently large capacitance must be installed on the input of the switching regulator. The regulation characteristics are obtained for different values of the ratio of the battery voltage and the power source. The conditions under which the maximum possible power is transmitted from the source of electrical energy to the battery are determined. It is shown that under certain conditions, the battery charging current may exceed the short circuit current of the source of electrical energy. The conditions under which a discontinuous current mode occurs in the inductance of the regulator are determined. Taking into account the possibility of such regime, the adjustment of the obtained regulation characteristics was carried out. The regulation characteristics are based on the need to limit the loss of electrical energy in the battery. For this, the maximum permissible value of the relative internal resistance of the battery was determined. If it is necessary to limit energy losses in the power supply, the type of the obtained regulation characteristics remains unchanged. However, in this case, it will be necessary to use a limited portion of these characteristics. It was concluded that when a pulse regulator is operating on a battery, to determine its regulating characteristic, it is necessary to take into account the internal resistance of the power supply. Without taking this resistance into account, the regulating characteristic of the switching regulator are uncertain.

**Keywords:** switching regulator; battery; regulation characteristic; intermittent current mode; selection of maximum power; internal resistance.

**Вступ**

Нетрадиційні та відновлювані джерела електричної енергії з кожним роком знаходять усе

більш широке застосування. Якщо енергоносії таких джерел є безкоштовним, від них доцільно відбирати максимально можливу потужність, навіть не зважаючи на те, що коефіцієнт використання

електричної енергії джерела при цьому може бути порівняно невисоким. Режим передавання максимальної потужності до навантаження можливий лише в узгодженому режимі, для якого вихідний опір джерела електричної енергії дорівнює опору навантаження ( $r_{\text{в\ddot{e}}\text{д}} = R_i$ ) [1]. Оскільки кількість виробленої електричної енергії в подібних джерелах часто залежить від зовнішніх умов, для забезпечення більш рівномірного надходження електричної енергії до навантаження, на виході подібних джерел часто ставлять акумулятор  $E_a$ , що працює в буферному режимі [2,3]. У таких випадках еквівалентний опір навантаження в значній мірі залежатиме від акумулятора і у процесі роботи, змінюватиметься. Для забезпечення можливості передавання до навантаження максимальної потужності в різних режимах його роботи між джерелом електричної енергії  $E$  та акумулятором  $E_a$  ставлять узгоджувальний пристрій [4]. В якості таких пристроїв найчастіше використовують імпульсні регулятори (ІР) [5,6].

Максимально можливу кількість електричної енергії від джерела можна отримати лише у випадку *безперервного* відбирання цієї енергії. Тому в якості узгоджувального найчастіше використовують ІР підвищувального типу, вхідний струм якого є *безперервним* [7,8]. У роботі [9] проаналізовано регульовальні характеристики подібних регуляторів у разі їх роботи на акумулятор і визначено умови передавання до навантаження максимальної потужності.

Однак використання ІР підвищувального типу не завжди є зручним, оскільки у цьому випадку напруга акумулятора  $E_a$  має бути принаймні в 2 рази більшою, від напруги джерела електричної енергії  $E$  [10]. При використанні у якості узгоджувального ІР понижувального типу, напруга акумулятора  $E_a$  може бути в 2 рази меншою від напруги джерела  $E$ . Однак такі регулятори споживають від джерела електричної енергії імпульсний струм (енергія споживається імпульсами).

### Мета роботи

Метою роботи є дослідження особливостей роботи ІР понижувального типу на акумулятор і визначення умов, за яких від джерела електричної енергії до акумулятора передаватиметься максимальна кількість електричної енергії.

### Виклад основного матеріалу

Визначимо регульовальну характеристику ІР напруги понижувального типу для випадку, коли на його виході стоїть акумулятор  $E_a$  (рис. 1).

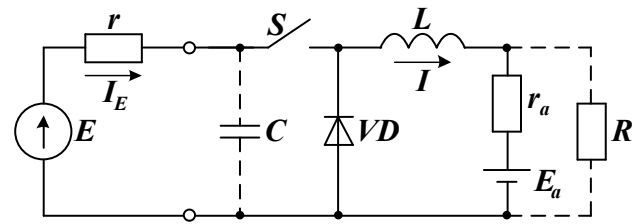


Рис. 1 – Схема ІР напруги понижувального типу

Якщо струм реактора  $L$  є безперервним і змінюється за законом, близьким до лінійного, умову рівності нулю середнього значення напруги на індуктивності  $U_L = 0$  (умову усталеного режиму), відповідно до [9] можна записати наступним чином

$$(E - I_E r - I r_a - E_a) t^* = (E_a + I r_a) (1 - t^*), \quad (1)$$

де  $t^* = t_3/T$  - відносний час замкненого стану ключа  $S$ .

Після відповідних скорочень матимемо

$$E t^* - E_a = I r_a + I_E r t^*. \quad (2)$$

Якщо конденсатор  $C$  відсутній ( $C = 0$ ),  $I_E = I$ . Враховуючи, що напруга джерела  $E$  та акумулятора  $E_a$  є фіксованою, ІР напруги (рис. 1) працюватиме у режимі регулювання вихідного струму (струму заряджання акумулятора)

$$I = \frac{E t^* - E_a}{r_a + r t^*}. \quad (3)$$

Відповідно до (3), енергія передаватиметься від джерела  $E$  до акумулятора  $E_a$  лише за умови, що  $I > 0$ , тобто при  $E t^* > E_a$ . Отже, при регулюванні має виконуватись умова

$$t^* > \frac{E_a}{E} = E_a^*, \quad (4)$$

де  $E_a^*$  - відносна напруга акумулятора.

Для більш загального характеру отримуваних результатів представимо регульовальну характеристику у відносних одиницях

$$I^* = \frac{t^* - E_a^*}{r_a^* + t^*}, \quad (5)$$

де  $r_a^* = r_a/r$  - відносний опір акумулятора;

$$I^* = I/I_{\text{в\ddot{e}}\text{д}},$$

де  $I_{зс} = E/r$  - струм короткого замикання джерела  $E$ .

Формула (5) описує сімейство регулювальних характеристик ІР (рис. 1), вигляд яких залежатиме від величини  $E_a^*$  та  $r_a^*$ .

Для зменшення втрат енергії в акумуляторі при його заряджанні, а також послабленні залежності вихідної напруги від струму заряджання акумулятора необхідно, щоб в усьому робочому діапазоні регулювання виконувалась умова [9]

$$I_m r_a < 0,1 E_a, \quad (6)$$

де  $I_m$  - максимально допустиме середнє значення струму заряджання акумулятора.

Очевидно, що максимальний струм заряджання акумулятора буде у випадку, коли навантаження  $R$  відключене. Якщо ж навантаження підключене, вихідний струм ІР  $I$  перерозподілятиметься між акумулятором  $E_a$  та навантаженням  $R$ . Представимо умову (6) у відносних одиницях, для чого розділимо її праву та ліву частину на  $r$

$$r_a^* < 0,1 \frac{E_a^*}{I_m^*}. \quad (7)$$

Відповідно до (5), струм заряджання акумулятора досягатиме максимального значення за умови, що  $t^* = 1$ , тобто

$$I_m^* = \frac{1 - E_a^*}{r_a^* + 1}, \quad (8)$$

Підставивши (8) в (7) отримаємо максимально допустиму величину відносного опору акумулятора

$$r_{am}^* < \frac{0,1 E_a^*}{1 - 1,1 E_a^*}. \quad (9)$$

Оскільки, відповідно до (8) при збільшенні  $E_a^*$  струм  $I_m^*$  зменшуватиметься, допустима величина  $r_{am}^*$ , з урахуванням (7), зростатиме. В табл. 1 наведено максимально допустимі значення  $r_{am}^*$  при різних значеннях  $E_a^*$ .

На рис. 2 побудовано графіки сімейства регулювальних характеристик ІР (рис. 1) для різних значень  $E_a^*$  за умови, що  $r_a^* \ll 1$  (суцільна лінія) і для  $r_a^* = r_{am}^*$  відповідно до табл. 1 (пунктирна лінія).

Аналіз цих графіків показує, що максимальний струм (максимальна енергія) передаватиметься до акумулятора з заданою напругою  $E_a^*$  при  $t^* = 1$ , тобто в *нерегульованому* режимі. Відомо, що точка максимальної потужності (ТМП) для джерела напруги

$E$  з лінійним внутрішнім опором  $r$  має координати  $I^* = 0,5$ ;  $U^* = 0,5$  [1]. Відповідно до графіків (рис. 2), тільки у випадку  $E_a^* = 0,5$  та  $t^* = 1$  джерело вхідної напруги  $E$  працюватиме в ТМП і до акумулятора  $E_a$  надходитиме максимально можлива потужність  $P_{max}^* = I^* E^* = 0,5 \cdot 0,5 = 0,25$ . При інших значеннях  $E_a^*$  енергія, що надходить до акумулятора, завжди буде меншою від максимально можливої. На рис. 3 наведено графік  $P_a^* = f(E_a^*)$  для випадку  $t^* = 1$  (суцільна лінія).

Таблиця 1 – Максимально допустимі значення  $r_{am}^*$  для різних значень  $E_a^*$

| N  | $E_a^*$ | $r_{am}^* < (C = 0)$ | $r_{am}^* < (C > 0)$ |
|----|---------|----------------------|----------------------|
| 1  | 0,1     | 0,011                | 0,004                |
| 2  | 0,2     | 0,026                | 0,016                |
| 3  | 0,3     | 0,045                | 0,036                |
| 4  | 0,4     | 0,072                | 0,064                |
| 5  | 0,5     | 0,11                 | 0,1                  |
| 6  | 0,6     | 0,18                 | 0,18                 |
| 7  | 0,7     | 0,3                  | 0,3                  |
| 8  | 0,8     | 0,67                 | 0,67                 |
| 9  | 0,82    | 0,82                 | 0,82                 |
| 10 | 0,84    | 1,12                 | 1,12                 |
| 11 | 0,86    | 1,72                 | 1,72                 |
| 12 | 0,88    | 2,9                  | 2,9                  |
| 13 | 0,9     | 9                    | 9                    |

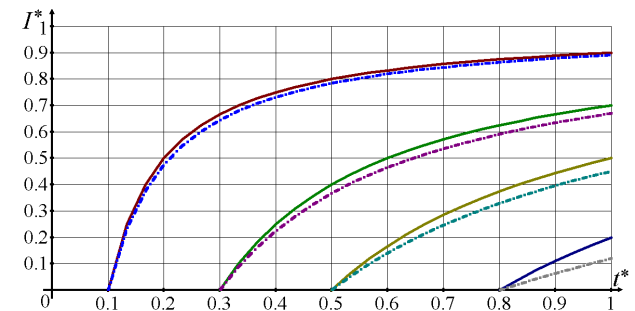


Рис. 2 – Регулювальні характеристики ІР при відсутності конденсатора  $C$

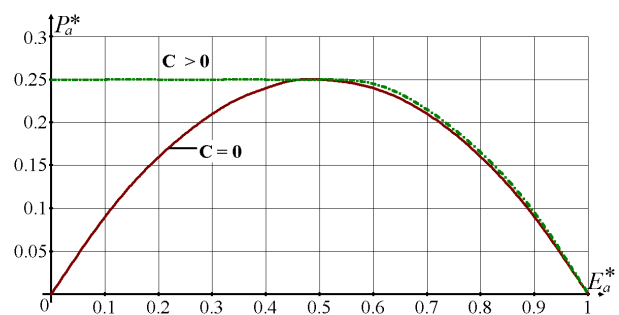


Рис. 3 – Максимальна вихідна потужність  $P_a^*$  для різних значень  $E_a^*$

Якщо ж  $t^* < 1$  (в режимі регулювання) енергія, що надходить до акумулятора, буде ще меншою. Це пов'язано з тим, що в режимі регулювання струм, що споживається від джерела  $E$ , має імпульсний характер. Чим меншою є тривалість замкнутого стану ключа  $t^*$ , тим меншою буде енергія, що відбирається від джерела  $i$ , відповідно, надходить до акумулятора. Отже, для того, щоб від джерела  $E$  до акумулятора  $E_a$  передати максимально можливу кількість енергії, відносна напруга акумулятора має бути  $E_a^* = 0,5$ , а ІР повинен працювати в нерегульованому режимі ( $t^* = 1$ ). В усіх інших випадках кількість енергії, переданої до акумулятора, буде меншою.

### Підключення конденсатора $C$ на виході джерела $E$

Для передавання до акумулятора максимально можливої кількості енергії при різних значеннях  $E_a^*$ , необхідно забезпечити безперервне відбирання струму від джерела  $E$ . З цією метою на його виході підключають конденсатор  $C \neq 0$  достатньо великої ємності (на рис. 1 показаний пунктиром). За такої умови, навіть при розімкненому ключі  $S$ , від джерела  $E$  буде споживатись струм, який йтиме на зарядження конденсатора. Коли ж ключ  $S$  перебуватиме у замкнутому стані, до кола навантаження надходитиме струм, що дорівнює сумі струмів джерела  $E$  та розрядного струму конденсатора  $C$ . Таким чином до акумулятора надходитиме більша кількість енергії. Проаналізуємо регульовальні характеристики цього варіанту схеми (рис. 1).

В усталеному режимі роботи ІР середнє значення напруги на індуктивності, а також середнє значення струму через ємність дорівнюють нулю

$$U_L = I_C = 0. \quad (10)$$

Тому струм  $I_E = It^*$ . З урахуванням цього з рівняння (1) отримаємо наступне співвідношення

$$Et^* - E_a = Ir_a + Irt^{*2},$$

звідки

$$I = \frac{Et^* - E_a}{r_a + rt^{*2}}. \quad (11)$$

Таким чином, при наявності конденсатора  $C$ , регульовальна характеристика ІР (рис. 1) у відносних одиницях матиме вигляд

$$I^* = \frac{t^* - E_a^*}{r_a^* + t^{*2}}. \quad (12)$$

Очевидно, що струм зарядження акумулятора  $I^*$  буде найбільшим при виконанні умови  $r_a^* \ll t^{*2}$ . Саме для такої умови на рис. 4 наведено графік сімейства регульовальних характеристик ІР з конденсатором  $C$  для різних значень  $E_a^*$ . Відповідно до цих графіків вихідний струм  $I^*$  (струм зарядження акумулятора) досягає максимального значення  $I_m^*$  при певному значенні  $t^* = t_m^*$ . Визначимо це значення. Для цього прирівняємо до нуля похідну  $dI^*/dt^*$ .

$$\frac{dI^*}{dt^*} = t^{*2} - 2t^{*2} + 2t^*E_a^* = 0,$$

Або

$$t^*(2E_a^* - t^*) = 0. \quad (13)$$

З двох коренів цього рівняння дійсним буде корінь

$$t_m^* = 2E_a^*, \quad (14)$$

оскільки відповідно до (4)  $E_a^* < t^* < 1$ , причому для  $E_a^* \geq 0,5$ ,  $t_m^* = 1$ , що узгоджується з результатами, наведеними на рис. 4.

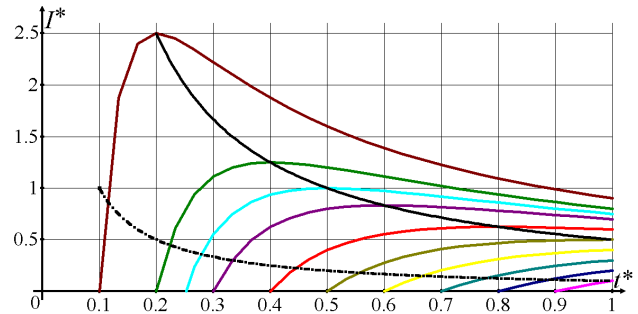


Рис. 4 – Регульовальні характеристики ІР при підключенні конденсатора  $C$

Підставивши (14) в (12), з урахуванням вказаних вище обмежень, отримаємо залежність  $I_m^* = f(E_a^*)$ . В табл. 2 наведено чисельні значення  $I_m^*$  для різних значень  $E_a^*$  за умови, що  $t^* = t_m^*$

Одержані результати показують, що за умови  $t^* = t_m^*$  для  $E_a^* \leq 0,5$  джерело вхідної напруги  $E$  працюватиме в ТМП і до акумулятора надходитиме максимально можлива потужність  $P_m^* = E_a^* I_m^* = 0,25$ . Якщо ж  $E_a^* > 0,5$ , забезпечити роботу джерела вхідної напруги  $E$  в ТМП неможливо. У таких випадках максимальна енергія надходитиме до акумулятора в нерегульованому режимі ( $t^* = 1$ ),

причому із збільшенням  $E_a^*$  потужність, що передається, зменшуватиметься. На рис. 3 пунктирною лінією наведено графік залежності  $P_m^* = f(E_a^*)$  для ІР з конденсатором ( $C > 0$ ).

Таблиця 2 – Максимальні значення струму заряджання акумулятора  $I_m^*$

| N  | $E_a^*$ | $t_m^*$ | $I_m^*$ | $P_m^*$ |
|----|---------|---------|---------|---------|
| 1  | 0,1     | 0,2     | 2,5     | 0,25    |
| 2  | 0,2     | 0,4     | 1,25    | 0,25    |
| 3  | 0,25    | 0,5     | 1       | 0,25    |
| 4  | 0,3     | 0,6     | 0,83    | 0,25    |
| 5  | 0,4     | 0,8     | 0,63    | 0,25    |
| 6  | 0,5     | 1       | 0,5     | 0,25    |
| 7  | 0,6     | 1       | 0,4     | 0,24    |
| 8  | 0,7     | 1       | 0,3     | 0,21    |
| 9  | 0,8     | 1       | 0,2     | 0,16    |
| 10 | 0,9     | 1       | 0,1     | 0,09    |

З табл. 2 слідує, що у випадку  $E_a^* = 0,25$  максимальне значення зарядного струму акумулятора чисельно дорівнює струму короткого замикання джерела  $E$  ( $I_m^* = 1$ ), а для  $E_a^* < 0,25$  навіть перевищує цей струм. Це пояснюється тим, що при малих значеннях  $t^*$  конденсатор  $C$  працюватиме в режимі, близькому до режиму роботи ємнісних накопичувачів енергії. У моменти замикання ключа  $S$  конденсатор  $C$  віддаватиме в коло навантаження значний струм, який може перевищувати струм короткого замикання джерела напруги  $E$ .

Зауважимо, що вказані в табл. 2 максимальні значення зарядного струму  $I_m^*$  можуть бути отримані лише за умови, що  $r_a^* < 0,4E_a^{*2}$ , або з урахуванням (14)

$$r_a^* < 0,4E_a^{*2}. \quad (15)$$

Якщо ж  $E_a^* > 0,5$ ,  $t_m^* = 1$  і не залежить від  $E_a^*$ . У цьому випадку  $r_a^*$  вибирають так само, як і для ІР без конденсатора  $C$ . В табл. 1 наведено максимально допустимі значення  $r_a^*$  для ІР без конденсатора ( $\tilde{N} = 0$ ) і з конденсатором ( $\tilde{N} > 0$ ).

### Режим переривчастого струму реактора

Одержані регульовальні характеристики (5) та (12) є дійсними для випадку, коли реактор  $L$  працює в режимі *безперервного* струму. Відповідно до цих формул струм  $I$  може протікати як від джерела  $E$  до акумулятора  $E_a$ , так і у зворотному напрямку. Однак оскільки в реальній схемі (рис. 1) послідовно з реактором  $L$  ввімкнено діод  $VD$ , струм через неї може протікати лише в одному напрямку. Тому при певних умовах, струм через реактор  $L$  ставатиме

переривчастим і формули (5) та (12) будуть недійсними. Визначимо умови, за яких ІР переходить в режим переривчастого струму реактора  $L$ .

Як відомо [11], струм через реактор буде безперервним доти, поки постійна складова цього струму  $I$  є більшою від амплітуди змінної складової

$$I \geq \Delta I / 2, \quad (16)$$

де  $\Delta I = I_{\max} - I_{\min}$  - пульсація струму в реакторі.

Якщо виконується умова (6), пульсацію струму реактора *на границі* режиму безперервного струму можна визначити як

$$\Delta I \cong \frac{E_a}{L}(T - t_3) = \frac{E_a T}{L}(1 - t^*),$$

або у відносних одиницях

$$\Delta I^* = \frac{E_a^*}{\tau^*}(1 - t^*), \quad (17)$$

де  $\tau^* = \frac{L}{rT}$  - відносна стала часу.

З урахуванням (5), (12) та (17) умова безперервного струму реактора для ІР без конденсатора ( $\tilde{N} = 0$ ) матиме вигляд

$$\frac{t^* - E_a^*}{r_a^* + t^*} \geq \frac{E_a^*}{2\tau^*}(1 - t^*), \quad (18)$$

а для ІР з конденсатором ( $\tilde{N} > 0$ )

$$\frac{t^* - E_a^*}{r_a^* + t^{*2}} \geq \frac{E_a^*}{2\tau^*}(1 - t^*). \quad (19)$$

Після відповідних перетворень отримаємо рівняння, з яких можна визначити  $t^* = t_{\text{ед}}^*$  - відносний час замкненого стану ключа  $S$ , при якому реактор  $L$  працюватиме на *границі* режиму безперервного струму. Для схеми без конденсатора це буде квадратне рівняння, а для схеми з конденсатором - кубічне. З урахуванням фізичного смислу параметра  $t^*$ ,  $t_{\text{ед}}^*$  може перебувати в діапазоні  $E_a^* < t_{\text{ед}}^* < 1$ . Тому рішення вказаних рівнянь доцільно шукати чисельними методами. У табл. 3 наведено розраховані чисельні значення параметра  $t_{\text{ед}}^*$  для різних значень  $E_a^*$  та  $\tau^*$  за умови, що  $r_a^*$  не перевищує значення, наведені в табл. 1.

У режимі безперервного струму ( $t^* > t_{\text{ед}}^*$ ), для визначення середнього значення струму реактора  $I^*$ , можна користуватись формулами (5) та (12). У

граничному режимі ( $t^* = t_{\text{ед}}^*$ ), відповідно до цих формул, середнє значення струму  $I^*(t_{\text{ед}}^*) = I_{\text{ед}}^*$ . У режимі переривчастого струму ( $t^* < t_{\text{ед}}^*$ ) середнє значення струму індуктивності  $I^*$  буде зменшуватись відносно  $I_{\text{ед}}^*$  пропорційно до зменшення  $t^{*2}$  [9]

$$\frac{I^*}{I_{\text{ед}}^*} = \frac{t^{*2}}{t_{\text{ед}}^{*2}},$$

звідки

$$I^* = \frac{I_{\text{ед}}^*}{t_{\text{ед}}^{*2}} \cdot t^{*2}. \quad (20)$$

Таблиця 3 – Значення  $t_{\text{ед}}^*$  для  $E_a^*$  та  $\tau^*$

| $E_a^*$ | $C$     | $\tau^* = 1$ | $\tau^* = 3$ | $\tau^* = 5$ |
|---------|---------|--------------|--------------|--------------|
| 0,3     | $C = 0$ | 0,336        | 0,312        | 0,308        |
|         | $C > 0$ | 0,315        | 0,305        | 0,303        |
| 0,5     | $C = 0$ | 0,56         | 0,52         | 0,515        |
|         | $C > 0$ | 0,536        | 0,512        | 0,508        |
| 0,8     | $C = 0$ | 0,86         | 0,82         | 0,81         |
|         | $C > 0$ | 0,85         | 0,82         | 0,81         |

На рис. 5, як приклад, наведено графік регулювальних характеристик для ІР з конденсатором ( $\tilde{N} > 0$ ) з урахуванням можливості виникнення режиму переривчастого струму в реакторі для випадків  $E_a^* = 0,25; 0,5$  та  $0,75$  для  $\tau^* = 1$ .

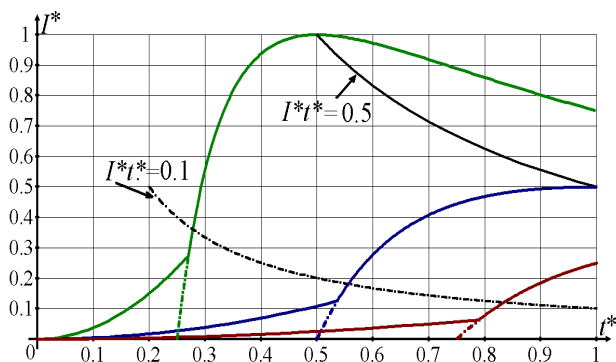


Рис. 5 – Регулювальні характеристики ІР з конденсатором з урахуванням режиму переривчастого струму індуктивності

Наведені графіки регулювальних характеристик (рис. 4 та 5) побудовано з урахуванням умови (6), яка обмежує втрати потужності в акумуляторі при його заряджанні.

Якщо джерело енергії  $E$  є відновлюваним, від нього доцільно відбирати максимально можливу

потужність, не зважаючи на втрати енергії у самому джерелі. Якщо ж джерело живлення є традиційним, втрати потужності у ньому також необхідно обмежувати, наприклад шляхом обмеження величини струму  $I_E$ , що споживається [12]. Найчастіше використовують обмеження, аналогічне до обмеження, що використане для акумулятора (6), тобто  $I_E \cdot r < 0,1 E$ , або  $I_E < 0,1 E / r = 0,1 I_{\text{ед}}$ . У відносних одиницях ця умова матиме вигляд

$$I_E^* < 0,1. \quad (21)$$

Враховуючи, що для схеми без конденсатора ( $\tilde{N} = 0$ )  $I_E = I$ , а для схеми з конденсатором ( $\tilde{N} > 0$ )  $I_E = I^*$ , ці обмеження відповідно матимуть вигляд

$$I^* < 0,1; \quad (22)$$

$$I^* < 0,1/t^*. \quad (23)$$

Для забезпечення можливості роботи джерела  $E$  в ТМП в схемі з конденсатором ( $\tilde{N} > 0$ ), вказане обмеження повинне мати вигляд

$$I^* < 0,5/t^*. \quad (24)$$

За необхідності можуть бути використані і інші обмеження. Не зважаючи на вказані обмеження, загальний вигляд одержаних регулювальних характеристик не зміниться. Однак у цьому випадку необхідно бути використовувати їх обмежену ділянку. На рис. 4 та 5 пунктиром показано границю робочих ділянок характеристик при використанні умови (23) і суцільною лінією при виконанні умови (24).

### Висновки

У статті показано, що при роботі ІР напруги понижувального типу на акумулятор, відбирання від джерела електричної енергії максимальної потужності можливе лише у випадку встановлення на вході ІР конденсатора достатньо великої ємності. Відповідно до одержаних регулювальних характеристик, струм заряджання акумулятора, при певних умовах, може перевищувати струм короткого замикання джерела електричної енергії. Регулювальні характеристики побудовано за умови обмеження втрат енергії в акумуляторі. За необхідності обмеження втрат енергії в джерелі електроживлення вигляд одержаних характеристик не змінюватиметься, однак у цьому випадку використовуватиметься їх обмежена ділянка.

## Список літератури

## References (transliterated)

1. **Бессонов, Л. А.** Теоретические основы электротехники. В 2 т. Том 1. Электрические цепи: учебник для академического бакалавриата / **Л. А. Бессонов** – Москва: Издательство Юрайт. – 2019. – 831 с.
2. **Soh, Luo-Qi.** Building of a portable solar ac & dc power supply / **Luo-Qi Soh, Chee-Chiang Derrick Tiew** // *Intelligent Systems, Modelling and Simulation*. – 2014. – doi: 10.1109/ISMS.2014.82.
3. **Srinivasa, Kishore Babu Y.** A DC-DC converter with battery energy storage system for electric vehicles / **Srinivasa Kishore Babu Y, Tripura Pidikiti** // *Journal of Control Theory and Applications*. – 2016. – Т. 33. – № 9. – P. 61-69.
4. **Ромашко, В. Я.** Устройства согласования нагрузки с источником электрической энергии / **В. Я. Ромашко** // *Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит*. – 2013. – № 8 – Т. 1. – С. 67-74.
5. **Falin, Jeff.** A boost-topology battery charger powered from a solar panel / **Jeff Falin, Li Wang** // *Analog Applications Journal*. – 2011. – 30. – P. 17-20.
6. **Yasaswini, Shirisha S.** Design and implementation of efficient solar powered DC-DC boost converter for loads / **S. Yasaswini Shirisha, V. Uttej, Y. Lakshmi Pravallika** // *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. – 2016. – Vol. 3. – Iss. 09. – P. 1013-1020.
7. **Anandhil, T. S.** Application of DC-DC boost converter for solar powered traffic light with battery backup / **T. S. Anandhil, S. Prem Kumar** // *Indian Journal of Science and Technology*. – 2015. – Vol. 8(32). – doi: 10.17485/ijst/2015/v8i32/84408.
8. **Sheng-Yu, Tseng.** A photovoltaic power system using a high step-up converter for DC load application / **Sheng-Yu Tseng, Hung-Yuan Wang** // *Energies*. – 2013. – 6. – P. 1068-1100. – doi: 10.3390/en6021068 Energies.
9. **Ромашко, В. Я.** Особливості режиму роботи узгоджувального імпульсного регулятора, що працює на акумулятор / **В. Я. Ромашко, Л. М. Батрак** // *Мікросистеми, Електроніка та Акустика*. – 2018. – № 4. – Т. 23. – С. 22-30. – doi: 10.20535/2523-4455.2018.23.4.131272.
10. **Pui-Weng, Chan.** DC-DC Boost Converter with Constant Output Voltage for Grid Connected Photovoltaic Application System / **Pui-Weng Chan**. URL: <https://ccore.ac.uk/download/pdf/12342408.pdf>.
11. **Гончаров, Ю. П.** Перетворювальна техніка. Підручник. Ч. 2 / **Ю. П. Гончаров, О. В. Будьонний, В. Г. Морозов, М. В. Панасенко, В. Я. Ромашко, В. С. Руденко**. – Харків: Фоліо, 2000. – 360 с.
12. **Иванов, А. А.** Справочник по электротехнике / **А. А. Иванов** – Киев: Вища школа, 1984. – 350 с.
1. **Bessonov, L. A.** Teoretycheskiye osnovy élektrotekhniky. Élektrycheskiye tsepy: uchebnik dlya akademicheskogo bakalavriata [The theory of Electrical Engineering. Electrical circuits: a textbook for bachelors]. Moscow: Publishing House Yurayt, 2019, 831.
2. **Luo-Qi Soh, Chee-Chiang Derrick Tiew.** Building of a portable solar ac & dc power supply. *Intelligent Systems, Modelling and Simulation*, 2014, doi: 10.1109/ISMS.2014.82.
3. **Srinivasa, Kishore Babu Y., Tripura, Pidikiti.** A DC-DC converter with battery energy storage system for electric vehicles. *Journal of Control Theory and Applications*, **33**, 9, 61-69, 2016.
4. **Romashko, V. Y.** Ustroystva soglasovaniya nagruzki s istochnikom elektricheskoy energii [Matching device load from the source of electrical energy]. *Energy saving. Energy. Energy audit*, 2013, **1**, 8, 67-74.
5. **Falin, Jeff, Wang, Li.** A boost-topology battery charger powered from a solar panel. *Analog Applications Journal*, 2011, **30**, 17-20.
6. **Yasaswini, Shirisha S., Uttej, V., Lakshmi, Pravallika Y.** Design and implementation of efficient solar powered DC-DC boost converter for loads. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 2016, **03**, 09, 1013-1020.
7. **Anandhil, T. S., Prem, Kumar S.** Application of DC-DC boost converter for solar powered traffic light with battery backup. *Indian Journal of Science and Technology*, 2015, **8**(32), doi: 10.17485/ijst/2015/v8i32/84408.
8. **Sheng-Yu, Tseng, Hung-Yuan, Wang.** A photovoltaic power system using a high step-up converter for DC load applications. *Energies*, 2013, **6**, 1068-1100, doi: 10.3390/en6021068 Energies.
9. **Romashko, V. Y., Batrak, L. M.** Osoblyvosti rezhymu roboty uzgodzhuval'noho impul'snoho rehulyatora, shcho pratsuyue na akumulyator [Features of the switching regulator operation on a rechargeable battery]. *Mikrosystemy, Elektronika ta Akustyka [Microsystems, Electronics and Acoustics]*, 2018, **4**, 23, 22-30, doi: 10.20535/2523-4455.2018.23.4.131272.
10. **Pui-Weng, Chan.** DC-DC Boost Converter with Constant Output Voltage for Grid Connected Photovoltaic Application System. Available at: <https://ccore.ac.uk/download/pdf/12342408.pdf>.
11. **Goncharov, Yu. P., Budonii, O. V., Morozov, V. G., Panasenko, M. V., Romashko, V. Ya, Rudenko, V. S.** Peretvoryuvalna tehnik. Pidruchnik [Converting technique. Textbook]. Part 2. Kharkiv: Folio, 2000, 360.
12. **Ivanov, A. A.** Spravochnik po elektrotekhnike. [Handbook of Electrical Engineering]. Kiev: Vishcha shkola, 1984, 350.

## Сведения об авторах (About authors)

**Ромашко Володимир Якович** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», професор кафедри промислової електроніки, м. Київ, Україна; ORCID: 0000-0002-5429-7685; e-mail [volodymyr.romashko@gmail.com](mailto:volodymyr.romashko@gmail.com).

**Volodymyr Romashko** – Dr. Sc., Professor, Professor of Department of Industrial Electronics; National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-5429-7685; e-mail [volodymyr.romashko@gmail.com](mailto:volodymyr.romashko@gmail.com).

**Батрак Лариса Миколаївна** – кандидат технічних наук, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», доцент кафедри промислової електроніки, Київ, Україна; ORCID: 0000-0001-9327-6863, e-mail [batrakln5@gmail.com](mailto:batrakln5@gmail.com).

**Larysa Batrak** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Associate Professor of the Department of Industrial Electronics, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine; ORCID 0000-0001-9327-6863, e-mail batrakln5@gmail.com.

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

**Ромашко, В. Я.** Регулювальні характеристики імпульсного регулятора понижувального типу, що працює на акумулятор / **В. Я. Ромашко, Л. М. Батрак** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 10 (1335). – С. 30-37. – doi:10.20998/2413-4295.2019.10.04.

*Please cite this article as:*

**Romashko, V., Batrak, L. M.** Regulation characteristics of the step-down switching regulator which operates on a rechargeable battery. *Bulletin of NTU "KhPI." Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, **10** (1335), 30-37, doi:10.20998/2413-4295.2019.10.04.

*Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Ромашко, В. Я.** Регулировочные характеристики импульсного регулятора понижающего типа, работающего на аккумуляторе / **В. Я. Ромашко, Л. М. Батрак** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 10 (1335). – С. 30-37. – doi:10.20998/2413-4295.2019.10.04.

**АННОТАЦИЯ** Целью работы является исследование особенностей работы импульсного регулятора постоянного напряжения понижающего типа для случая, когда на его выходе подключен аккумулятор, работающий в буферном режиме. Проведен анализ его регулировочных характеристик при наличии и отсутствии конденсатора достаточно большой емкости на входе регулятора. Отмечено, что при наличии аккумулятора на выходе регулятора напряжения, последний будет работать в режиме регулирования выходного тока (тока зарядки аккумулятора). Показано, что для обеспечения возможности передачи от источника электрической энергии к аккумулятору максимально возможной энергии, необходимо устанавливать на входе импульсного регулятора конденсатор с достаточно большой емкостью. Регулировочные характеристики получены для различных значений соотношения напряжений аккумулятора и источника питания. Определены условия, при которых от источника электрической энергии к аккумулятору передается максимально возможная мощность. Показано, что при определенных условиях, ток зарядки аккумулятора может превышать ток короткого замыкания источника электрической энергии. Определены условия, при которых в индуктивности регулятора возникает режим прерывистого тока. С учетом возможности возникновения такого режима проведено уточнение полученных регулировочных характеристик. Регулировочные характеристики построены с учетом необходимости ограничения потерь электрической энергии в аккумуляторе. Для этого определялась максимально допустимая величина относительного внутреннего сопротивления аккумулятора. При необходимости ограничения потерь энергии в источнике электропитания, вид полученных регулировочных характеристик остается неизменным. Однако, в этом случае, необходимо будет использовать ограниченный участок этих характеристик. Сделан вывод, что при работе импульсного регулятора на аккумулятор, для определения его регулировочной характеристики обязательно необходимо учитывать внутреннее сопротивление источника электропитания. Без учета этого сопротивления регулировочная характеристика импульсного регулятора является неопределенной.

**Ключевые слова:** импульсный регулятор; аккумулятор; регулировочная характеристика; режим прерывистого тока; отбор максимальной мощности; внутреннее сопротивление.

*Поступила (received) 26.04.2019*