

Особливості режиму роботи узгоджувального імпульсного регулятора, що працює на акумулятор

Ромашко В. Я., д.т.н. проф., ORCID [0000-0002-5429-7685](https://orcid.org/0000-0002-5429-7685)

e-mail volodymyr.romashko@gmail.com

Батрак Л. М., к.т.н., ORCID [0000-0001-9327-6863](https://orcid.org/0000-0001-9327-6863)

e-mail batrakln5@gmail.com

Національний технічний університет України

"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" kpi.ua

Київ, Україна

Реферат—Проаналізовано особливості роботи імпульсного регулятора (ІР) напруги на акумулятор, що працює в буферному режимі, з урахуванням внутрішніх опорів джерела напруги та акумулятора. Показано, що за таких умов ІР працюватиме в режимі регулювання струму, а не напруги. На прикладі ІР напруги підвищувального типу визначено регульовальні характеристики для режимів безперервного та переривчастого струму індуктивності. Показано, що для зменшення залежності вихідної напруги від струму заряджання акумулятора, а також зменшення втрат потужності у ньому, необхідно забезпечити певне співвідношення між внутрішніми опорами джерела електричної енергії та акумулятора. Побудовано графіки регульовальних характеристик і визначено умови передавання від джерела енергії до акумулятора максимально можливої потужності. Дано рекомендації щодо застосування режимів безперервного та переривчастого струму індуктивності.

Бібл. 13, рис. 5, табл. 2.

Ключові слова — імпульсний регулятор; акумулятор; внутрішній опір; режим безперервного струму; режим переривчастого струму; регульовальна характеристика.

I. ВСТУП

Імпульсні регулятори (ІР) широко застосовують для регулювання та стабілізації величини постійної напруги та струму [1, 2]. Як правило, потужність, що передається ІР від джерела електричної енергії до навантаження, є значно меншою від номінальної потужності джерела. Тому в багатьох випадках можна вважати, що ІР живиться від ідеального джерела напруги (струму). Якщо відома мінімально допустима величина опору навантаження $R_{n\min}$, силову частину ІР завжди можна спроектувати таким чином, щоб опори втрат елементів ІР були значно меншими від опору $R_{n\min}$. За таких умов допустимо вважати, що ІР живиться від ідеального джерела напруги (струму), а втрати енергії в самому ІР не враховувати. У зв'язку з цим класична теорія ІР постійної напруги [3, 4], в якій проводиться аналіз їх роботи від ідеалізованих джерел енергії без урахування втрат у самих ІР, в багатьох випадках забезпечує достатню для практичного застосування точність отримуваних результатів. За необхідності, втрати у самому ІР завжди можуть бути враховані [3].

У зв'язку із значним поширенням нетрадиційних та відновлюваних джерел електричної енергії постає задача отримання від них максимально можливої кількості електричної енергії. Як відомо [5, 6], для

відбирання від джерела електричної енергії максимальної потужності необхідно, щоб опір навантаження R_n дорівнював вихідному опору джерела $r_{вих}$ (узгоджений режим). В реальних умовах вихідний опір джерела $r_{вих}$ залежить від зовнішніх умов, а опір навантаження R_n - від режиму його роботи. Тому відбирання максимальної потужності від джерела можливе лише при певному режимі роботи навантаження. Для забезпечення можливості відбору від генератора максимальної потужності при зміні зовнішніх умов та режиму роботи навантаження між ними вмикають узгоджувальний пристрій [7]. В якості такого пристрою найчастіше використовують ІР [7, 8]. Очевидно, що в подібних пристроях джерело енергії уже не можна вважати ідеальним і обов'язково необхідно враховувати його внутрішній опір. Регулюючи величину вихідного струму джерела змінюють падіння напруги на його внутрішньому опорі таким чином, щоб робоча точка генератора була виведена в зону його максимальної потужності [9]. Внутрішній опір джерела електричної енергії суттєво впливає на основні параметри та характеристики ІР. В [10] проаналізовано його вплив на регульовальні характеристики ІР постійної напруги та струму.

Особливістю використання ІР як елементів відновлюваних джерел є те, що для забезпечення рівномір-



рного надходження електричної енергії до навантаження, паралельно до нього підключають акумулятор, який працює в буферному режимі [11, 12]. IP також можуть використовуватись для регулювання струму заряджання акумулятора в автономних та резервних джерелах живлення, електромобілях і таке інше. В усіх цих випадках саме акумулятор визначає режим роботи IP. Проаналізуємо особливості визначення регульовальних характеристик узгоджувального IP у випадку, коли на його виході підключено акумулятор.

II. ОСНОВНА ЧАСТИНА

Очевидно, що для відбирання від джерела максимальної кількості електричної енергії, його вихідний струм має бути безперервним. Проаналізуємо особливості роботи IP на акумулятор на прикладі IP напруги підвищувального типу (рис. 1), який широко використовують для відбору максимальної потужності від генератора [7, 11].

Нехай джерело напруги E має внутрішній опір r . Якщо струм індуктивності є безперервним і змінюється за законом, близьким до лінійного, при відключеному акумуляторі E_a умова рівності нулю середнього значення напруги на індуктивності L (умова усталеного режиму) [10] має вигляд

$$(E - Ir)(1 - t^*) = (U + Ir - E)t^*, \quad (1)$$

де t^* - відносний час розімкненого стану ключа $S(t^* = t_{роз}/T)$; I - середнє значення струму через індуктивність.

Отже, вихідна напруга IP пов'язана з напругою джерела E таким співвідношенням

$$U = \frac{E - Ir}{t^*}. \quad (2)$$

Враховуючи, що в усталеному режимі середнє значення струму через ємність $I_c = 0$, струм, що протікає через навантаження $I_R = U/R$. З іншого боку $I_R = I \cdot t^*$. Отже

$$I = \frac{U}{Rt^*}. \quad (3)$$

Підставивши (3) в (2) одержимо регульовальну характеристику схеми (рис.1) у відносних одиницях

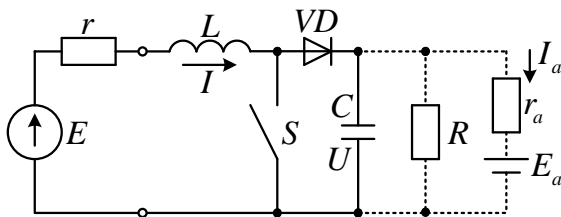


Рис. 1. IP напруги підвищувального типу

$$U^* = \frac{t^*}{t^{*2} + r^*}, \quad (4)$$

де $U^* = \frac{U}{E}$ - відносна вихідна напруга; $r^* = \frac{r}{R}$ - відносний внутрішній опір джерела напруги.

Отже, якщо акумулятор не підключено, відбуватиметься регулювання середнього значення вихідної напруги.

A. Підключення акумулятора

Нехай акумулятор E_a має внутрішній опір r_a , причому він лінійний (рис.1). Струм заряджання акумулятора I_a спричиняє падіння напруги на цьому опорі, що впливатиме на режим роботи індуктивності L . Очевидно, що цей вплив буде максимальним, коли опір навантаження R відключено. Тому проаналізуємо саме цей випадок, для якого умова рівності нулю середнього значення напруги на індуктивності матиме такий вигляд

$$(E - Ir)(1 - t^*) = (E_a + I_a r_a + Ir - E)t^*, \quad (5)$$

або $E - E_a t^* = I_a r_a t^* + Ir$.

Враховуючи, що $I_a = It^*$, отримаємо

$$I = \frac{E - E_a t^*}{r + r_a t^{*2}}. \quad (6)$$

При наявності акумулятора вихідна напруга

$$U = E_a + I_a r_a. \quad (7)$$

Якщо максимальний струм заряджання акумулятора $I_{ам}$ обмежувати таким чином, щоб падіння напруги на його внутрішньому опорі не перевищувало

$$I_{ам} r_a \leq 0,1 E_a, \quad (8)$$

вихідна напруга IP напруги майже не залежатиме від t^* . У таких випадках можна вважати, що вихідна напруга $U \approx E_a$. Враховуючи, що напруга джерела E є фіксованою, відповідно до (6) при змінах t^* буде змінюватись струм I , що споживається від джерела E . Отже, при наявності акумулятора E_a , IP (рис.1) фактично працюватиме не в режимі регулювання вихідної напруги U , а в режимі регулювання вихідного струму I джерела E і $I_a = It^*$. У разі наявності опору навантаження R цей струм перерозподілятиметься між акумулятором та навантаженням.

Відповідно до (6), енергія передаватиметься від джерела напруги E до акумулятора E_a лише за умови, що $I > 0$, тобто $E_a t^* < E$. Отже режим заряджання акумулятора можливий лише якщо

$$t^* < E / E_a. \quad (9)$$

В. Режим переривчастого струму індуктивності

Визначимо умови, за яких в індуктивності L матиме місце режим переривчастого струму.

Струм індуктивності буде безперервним, якщо його постійна складова є більшою від амплітуди змінної складової [4], тобто

$$I \geq \frac{\Delta I}{2} \tag{10}$$

На границі режиму безперервного струму зміна струму в індуктивності L

$$\begin{aligned} \Delta I &= \frac{E}{r} \left(1 - e^{-\frac{t_3}{\tau}} \right) \approx \frac{E}{r} \cdot \frac{t_3}{\tau} = \\ &= \frac{E}{r} \left(\frac{T - t_p}{\tau} \right) = \frac{E}{r} \left(\frac{1 - t^*}{\tau^*} \right) \end{aligned} \tag{11}$$

де $t_{зам}$ та $t_{роз}$ - час замкненого та розімкненого стану ключа; $\tau^* = \frac{\tau}{T} = \frac{L}{rT}$ - відносна стала часу кола заряджання індуктивності L .

Отже, індуктивність L перебуватиме на границі режиму безперервного струму відповідно до (6), (10), (11) за умови

$$\frac{1 - E_a^* t^*}{1 + r_a^* t^{*2}} = \frac{1 - t^*}{2\tau^*} \tag{12}$$

де $E_a^* = \frac{E_a}{E}$; $r_a^* = \frac{r_a}{r}$.

Розв'язавши рівняння (12), визначимо $t^* = t_{кр}^*$, при якому індуктивність L працюватиме на границі режиму безперервного струму. Якщо $t^* < t_{кр}^*$, струм індуктивності буде безперервним. При $t^* > t_{кр}^*$ - переривчатим.

Відповідно до (12) визначення $t_{кр}^*$ зводиться до рішення кубічного рівняння. Враховуючи, що $0 \leq t^* < 1$ графік залежності $t_{кр}^* = f(\tau^*)$ для випадку, коли $E_a^* = 2$, $r_a^* = 1$, наведений на рис. 2. Наприклад, якщо $\tau^* = 3$, для $t^* < 0.45$ струм індуктивності буде безперервним, а його середнє значення I визначається формулою (6).

Якщо ж $t^* > 0.45$, струм індуктивності стає переривчастим. У цьому режимі його середнє значення I також буде > 0 . Із збільшенням t^* струм поступово зменшуватиметься, досягаючи значення $I = 0$ при $t^* = 1$. На рис. 3 наведено графіки зміни струму індуктивності L для випадків $t^* = t_{кр}^*$ (рис. 3а), а також $t^* > t_{кр}^*$ (рис. 3б).

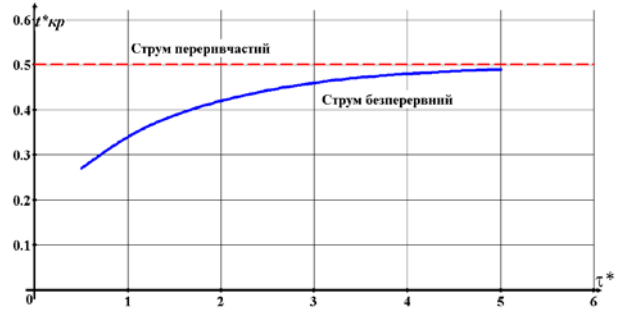


Рис. 2. Графік залежності $t_{кр}^* = f(\tau^*)$ для випадку, коли $E_a^* = 2$, $r_a^* = 1$.

Очевидно, що середнє значення струму індуктивності I пропорційне площі заштрихованих трикутників. Враховуючи, що ці трикутники є подібними, з геометричних міркувань [13] можна стверджувати, що відношення середнього значення струму в режимі переривчастого струму до середнього значення струму граничного режиму дорівнює

$$\frac{I}{I_{кр}} = \frac{I_a}{I_{a\ кр}} = \frac{(1 - t^*)^2}{(1 - t_{кр}^*)^2} \tag{13}$$

Отже, визначивши з (6) середнє значення струму в критичному режимі $I_{кр}$, середнє значення струму в режимі переривчастого струму визначатиметься як

$$I = \frac{I_{кр}}{(1 - t_{кр}^*)^2} \cdot (1 - t^*)^2 \tag{14}$$

Таким чином, після настання переривчастого струму із збільшенням $t^* > t_{кр}^*$, середнє значення струму індуктивності I і, відповідно, середнє значення струму заряджання акумулятора I_a , зменшуватиметься, пропорційно до $(1 - t^*)^2$.

С. Узагальнення отриманих результатів

В режимі безперервного струму індуктивності, регульовальна характеристика IP (6) може бути представлена у відносних одиницях наступним чином

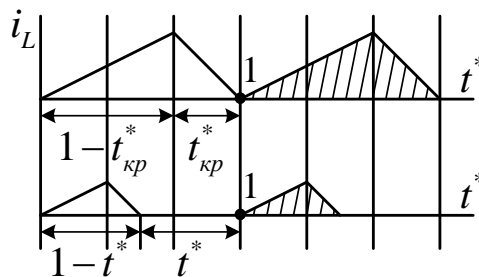


Рис. 3. Графіки зміни струму індуктивності L для випадків $t^* = t_{кр}^*$ (а) та $t^* > t_{кр}^*$ (б)



$$I = \frac{E - E_a t^*}{r + r_a t^{*2}} = \frac{E}{r} \left(\frac{1 - \frac{E_a t^*}{E}}{1 + \frac{r_a t^{*2}}{r}} \right);$$

або

$$I^* = \frac{1 - E_a t^*}{1 + r_a t^{*2}}, \tag{15}$$

де $I^* = I / I_{к.з}$ - відносний струм джерела E ; $I_{к.з} = E / r$ - струм короткого замикання цього джерела.

Відповідно відносний струм заряджання акумулятора

$$I_a^* = I^* t^* \tag{16}$$

Оскільки із збільшенням t^* струм I^* спадатиме, очевидно, що при певному $t^* = t_m^*$ струм заряджання акумулятора I_a досягатиме максимального значення. Визначаємо умову максимуму зарядного струму акумулятора. Для цього продиференціюємо вираз (16) з урахуванням (15) і прирівнюємо його до нуля

$$I_a^* = I^* t^* = \frac{t^* (1 - E_a t^*)}{1 + r_a t^{*2}} = \frac{t^* - E_a t^{*2}}{1 + r_a t^{*2}} \tag{17}$$

$$\frac{dI_a^*}{dt^*} = -t^{*2} r_a^* - t^* 2E_a^* + 1 = 0.$$

Отже визначення t_m^* зводиться до рішення квадратного рівняння

$$r_a^* t^{*2} + 2E_a^* t^* - 1 = 0. \tag{18}$$

Враховуючи, що параметр t^* може змінюватись лише в діапазоні $0 \leq t^* < 1$, робимо висновок, що струм заряджання акумулятора досягатиме максимального значення при

$$t_m^* = \frac{-E_a^* + \sqrt{E_a^{*2} + r_a^*}}{r_a^*} \tag{19}$$

Якщо опір акумулятора $r_a \ll r$, відповідно до (18)

$$t_m^* = \frac{1}{2E_a^*} \tag{20}$$

При використанні подібних джерел електроживлення бажано, щоб вихідна напруга $U \approx E_a$, що буде у випадку виконання умови (8). З урахуванням (6), цю умову можна записати наступним чином

$$I t^* r_a = t^* r_a \frac{(E - E_a t^*)}{(r - r_a t^{*2})} \leq 0,1 E_a, \tag{21}$$

або переходячи до відносних одиниць

$$r_a^* (t^* - 1, 1 E_a^* t^{*2}) \leq 0,1 E_a^*.$$

Отже, $U \approx E_a$ за умови, що

$$r_a^* \leq \frac{0,1 E_a^*}{t_m^* (1 - 1,1 E_a^* t_m^{*2})}. \tag{22}$$

Якщо прийняти, що $t_m^* \approx \frac{1}{2 E_a^*}$, то відповідно до

(22), розраховані значення r_a^* наведені в табл. 1.

З урахуванням одержаних значень r_a^* уточнимо значення t_m^* , при яких струм заряджання акумулятора досягатиме максимального значення. Відповідно до (19), з урахуванням даних табл. 1, розраховані значення t_m^* наведені в табл. 2.

Порівняння табл. 1 та 2 показує, що у разі виконання умови (21) ($U \approx E_a$) параметр t_m^* мало залежить від r_a^* і його можна визначати за спрощеною формулою (20).

На рис. 4а наведено регульовальні характеристики $I^* = f(t^*)$, а на рис. 4б - $I_a^* = f(t^*)$ для двох випадків

- 1) $r_a^* = 0$ - суцільна лінія;
- 2) r_a^* відповідно до табл. 1 – пунктирна лінія.

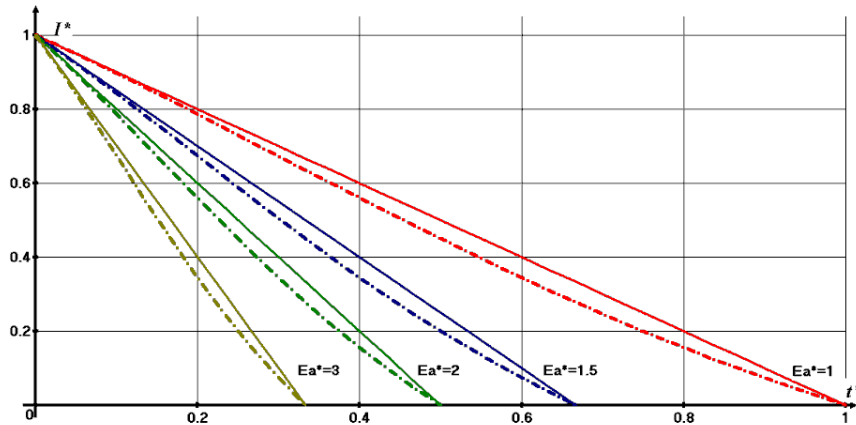
ТАБЛИЦЯ 1 РОЗРАХОВАНІ ЗНАЧЕННЯ r_a^*

| | | | | |
|--------------|------|------|------|------|
| E_a^* | 1 | 1,5 | 2 | 3 |
| t_m^* | 0,5 | 0,33 | 0,25 | 0,17 |
| $r_a^* \leq$ | 0,45 | 1 | 1,8 | 4 |

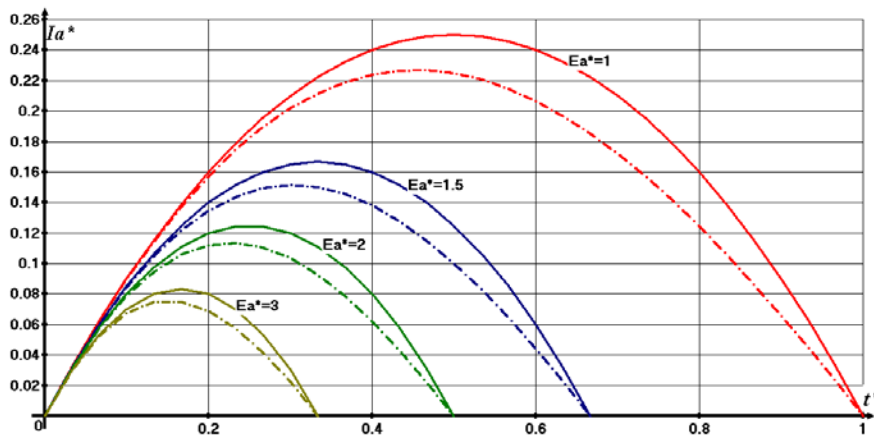
ТАБЛИЦЯ 2 РОЗРАХОВАНІ ЗНАЧЕННЯ t_m^*

| | | | | |
|---------|------|-----|------|------|
| E_a^* | 1 | 1,5 | 2 | 3 |
| r_a^* | 0,45 | 1 | 1,8 | 4 |
| t_m^* | 0,45 | 0,3 | 0,22 | 0,15 |





а)



б)

Рис. 4. Графіки регульовальних характеристик $I^* = f(t^*)$ (а) та $I_a^* = f(t^*)$ (б)

Графіки побудовано без урахування можливості виникнення режиму переривчастого струму в індуктивності.

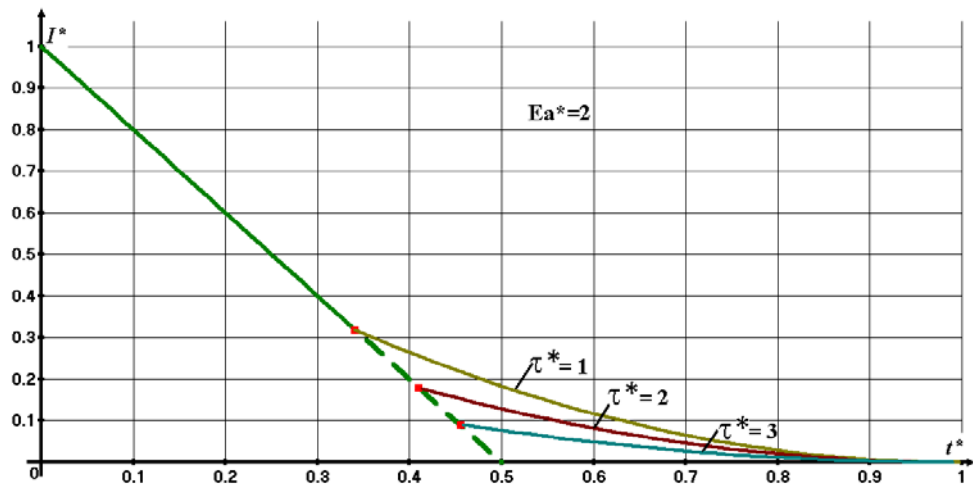
На рис. 5 наведено ці ж графіки для випадку $E_a^* = 2$ з урахуванням можливості виникнення режиму переривчастого струму в індуктивності.

Відповідно до рис. 5б, у загальному випадку, для регулювання струму заряджання акумулятора I_a^* , параметр t^* можна змінювати від 0 до 1. Якщо він змінюється в діапазоні $0 \leq t^* \leq t_m^*$, струм зарядження акумулятора змінюватиметься від 0 до I_{am}^* . У цьому діапазоні регулювання індуктивність L працюватиме в режимі безперервного струму. При $t^* = t_m^*$, від дже-

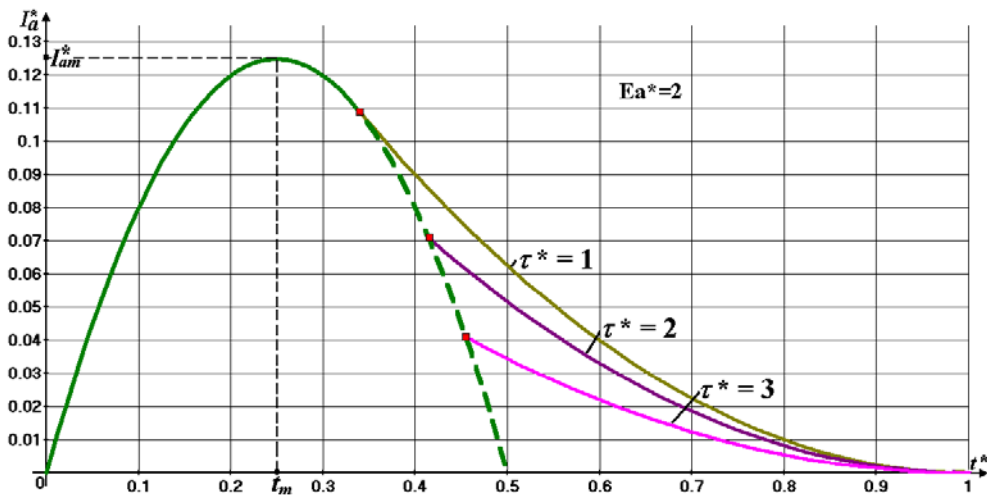
рела E до акумулятора E_a передаватиметься максимальна потужність. Як відомо [5], в такому режимі коефіцієнт використання енергії джерела ($\eta = 50\%$).

Із зменшенням $t^* \leq t_m^*$ режим роботи джерела E наблизатиметься до режиму короткого замикання (рис. 5а), і коефіцієнт використання його енергії зменшуватиметься ($\eta < 50\%$).

Якщо ж параметр t^* змінювати в діапазоні $t_m^* \leq t^* \leq 1$, струм заряджання акумулятора також змінюватиметься в діапазоні від I_{am}^* до 0. У цьому діапазоні регулювання режим роботи джерела E наблизатиметься до режиму холостого ходу (рис. 5а) і ефективність роботи джерела E зростатиме ($\eta > 50\%$).



а)



б)

Рис. 5. Графіки регульовальних характеристик $I^* = f(t^*)$ (а) та $I_a^* = f(t^*)$ (б) з урахуванням можливості виникнення режиму переривчастого струму в індуктивності L

Однак у цьому діапазоні при $t^* > t_{кр}^*$ в індуктивності L виникатиме режим переривчастого струму. Щоб забезпечити режим безперервного струму індуктивності для заданого струму I_a^* , необхідно вибрати відповідну величину індуктивності L (параметр τ^*). Очевидно, що в режимі заряджання акумулятора E_a , доцільно працювати в режимі безперервного струму індуктивності L з $t_m^* \leq t^* \leq t_{кр}^*$. Якщо ж акумулятор повністю зарядився, переходять у режим компенсації струму його саморозряду. Для цього необхідно забезпечити режим переривчастого струму індуктивності L з $t^* > t_{кр}^*$. Конкретну величину t^* вибирають з урахуванням типу акумулятора та його параметрів.

Зауважимо, що у випадку підключення на виході ІР напруги акумулятора, режим роботи перетворювача матиме такі особливості.

- 1) ІР напруги працюватиме в режимі регулювання вхідного струму і, відповідно, струму заряджання акумулятора.
- 2) Регульовальна характеристика $I^* = f(t^*)$ залежатиме від співвідношення напруг акумулятора та джерела вхідної напруги E_a^* .
- 3) Вихідний струм регулятора (струм заряджання акумулятора) досягає максимального значення $I_{ам}^*$ при певному $t^* = t_m^*$, яке залежить від E_a^* .

- 4) Регулювання струму заряджання акумулятора доцільно здійснювати в режимі безперервного струму індуктивності $(t_m^* \leq t^* \leq t_{кр}^*)$.
- 5) Якщо акумулятор повністю зарядився, доцільно забезпечити компенсацію струму його саморозряду. Для цього переходять в режим переривчастого струму індуктивності, для якого $t^* > t_{кр}^*$.

Подібні особливості роботи будуть притаманні і іншим типам IP напруги у разі їх роботи на акумулятор.

ВИСНОВКИ

В статті показано, що при роботі IP напруги на акумулятор відбувається регулювання вихідного струму (струму заряджання акумулятора). Для визначення регулювальної характеристики обов'язково необхідно врахувати внутрішній опір джерела живлення та акумулятора. Без урахування цих опорів регулювальна характеристика IP є невизначеною. В процесі регулювання можливий перехід індуктивності в режим переривчастого струму. Регулювальна характеристика в режимах безперервного та переривчастого струму індуктивності описується різними аналітичними виразами. Вигляд регулювальної характеристики залежатиме від співвідношення напруг та внутрішніх опорів акумулятора та джерела живлення E_a^* та r_a^* .

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] V. S. Moin, Stabilizirovannyye tranzistornyye preobrazovateli [Stabilized transistor converters], Energoatomizdat, 1986, p. 376..
- [2] T. Ninomiya, K. Harada, M. Nakahara, «On the maximum regulation range in boost and buck-boost converters,» в *IEEE Power electronics Specialists conference record*, 1981. DOI: [10.1109/PESC.1981.7083635](https://doi.org/10.1109/PESC.1981.7083635)
- [3] R. Severns, G. Bloom., «Impul'snyye preobrazovateli postoyannogo napryazheniya dlya sistem vtorichnogo elektropitaniya [Switching Converters DC to secondary power systems].» Moscow, 1988. ISBN 5-283-02435-0
- [4] Y. P. Goncharov, O. V. Budonny, V. G. Morozov, M. V. Panasenko, V. Y. Romashko, V. S. Rudenko, Peretovuyvalna technicala. Navchalnyi posibnyk. Chstyna 2 [Power conversion equipment. Text book. Part 2], Kharkiv: Folio, 2000. ISBN 966-03-0697-0.
- [5] L. A. Bessonov, Teoretycheskiye osnovy élektrotekhnky. Élektrycheskiye tsepy [The theory of Electrical Engineering. Electrical circuits: a textbook for bachelors], Moskow: Publishing House Yurayt, 2014, p. 701. ISBN 978-5-9916-3210-2.
- [6] V. Y., Romashko, «Do pitan'ya pro vıdbrı maksimal'noı potuzhnostı v dzherel yelektrichnoı yenergıı [On the selection of the maximum power from the source of electrical energy],» *Electronics and communication*, № 2013, pp. 28-34, 2013. URL: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/5964>
- [7] V. Y., Romashko, «Ustroystva soglasovaniya nagruzki s istochnikom elektricheskoy energii [Matching device load from the source of electrical energy],» *Energy saving. Energy. Energy audit*, vol. 1, no. 8, pp. 67 - 74, 2013. URL: http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/8715/1/EEE_2013_8_T_1_Romashko_Matching.pdf
- [8] Sonia Leva, Dario Zaninelli, Raffaele Contino, «Integrated Renewable Sources for Supplying Remote Power Systems,» *WSEAS TRANSACTIONS on POWER SYSTEMS*, т. 2, № 2, pp. 41 - 48, february 2007. ISSN 1790-5060
- [9] V. Y. Romashko, I. V. Verbitsky, «Osoblivostı poshuku tochki maksimal'noı potuzhnostı sonyachnoı batereı pri vikoristannı uzgodzhuval'nogo Impulsnogo regul'yatora [Features of finding a maximum power point of a solar bat-tery on basis a matching pulse converter],» *Electronics and Communications*, т. 21, № 6, pp. 22-26, 2016. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/eisv_2016_21_6_5.
- [10] V.Y. Romashko, «Rehulyuval'ni kharakterystyky impul'snykh rehulyatoriv z urakhuvannyam vnutrishn'oho oporu dzherela elektrozhylennya [Regulation characteristics of switching regulators with taking into account the internal resistance of power supply],» *Microsystems, electronics and acoustics*, vol. 22, no. 6, pp. 29-34, 2017. DOI: [10.20535/2523-4455.2017.22.6.81414](https://doi.org/10.20535/2523-4455.2017.22.6.81414).
- [11] Luo-Qi Soh, Chee-Chiang Derrick Tiew, «Building of a portable solar ac & dc power supply,» в *Intelligent Systems, Modelling and Simulation*, 204. DOI: [10.1109/ISMS.2014.82](https://doi.org/10.1109/ISMS.2014.82)
- [12] Srinivasa Kishore Babu Y, Tripura Pidikiti, «A DC-DC converter with battery energy storage system for electric vehicles,» *Journal of Control Theory and Applications*, vol. 33, no. 9, pp. 61-69, 2016. URL: <http://www.serialsjournals.com/serialjournal-manager/pdf/1481105441.pdf>
- [13] P. F. Filchakov, Spravochnik po elementarnoy matematike. Geometriya, trigonometriya, vektornaya algebra [Handbook of elementary mathematics. Geometry, trigonometry, vector algebra], Kiev: Naukova Dumka, 1966, p. 442.

Надійшла до редакції 16 травня 2018 р.



УДК 621.3

Особенности режима работы согласующего импульсного регулятора, работающего на аккумулятор

Ромашко В. Я., д.т.н. проф., ORCID [0000-0002-5429-7685](https://orcid.org/0000-0002-5429-7685)

e-mail volodymyr.romashko@gmail.com

Батрак Л. Н., к.т.н., ORCID [0000-0001-9327-6863](https://orcid.org/0000-0001-9327-6863)

e-mail batrakln5@gmail.com

Национальный технический университет Украины

"Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского" kpi.ua

Киев, Украина

Реферат—Проанализированы особенности работы импульсного регулятора (ИР) напряжения на аккумулятор, работающий в буферном режиме, с учетом внутренних сопротивлений источника напряжения и аккумулятора. Показано, что при таких условиях ИР работает в режиме регулирования тока, а не напряжения. На примере ИР напряжения повышающего типа определены регулировочные характеристики для режимов непрерывного и прерывистого тока индуктивности. Показано, что для уменьшения зависимости выходного напряжения от тока зарядки аккумулятора, а также уменьшения потерь мощности в нем, необходимо обеспечить определенное соотношение между внутренними сопротивлениями источника электрической энергии и аккумулятора. Построены графики регулировочных характеристик и определены условия передачи от источника энергии к аккумулятору максимально возможной мощности. Даны рекомендации по использованию режимов непрерывного и прерывистого тока индуктивности в ИР напряжения при его работе на аккумуляторе.

Библ. 13, рис. 5, табл. 2.

Ключевые слова — импульсный регулятор; аккумулятор; внутреннее сопротивление; режим непрерывного тока; режим прерывистого тока; регулировочная характеристика.

UDC 621.3

Features of the Switching Regulator Operation on a Rechargeable Battery

V. Ya. Romashko, Dr.Sc.(Eng) Prof., ORCID [0000-0002-5429-7685](https://orcid.org/0000-0002-5429-7685)

e-mail volodymyr.romashko@gmail.com

L. M. Batrak, PhD, ORCID [0000-0001-9327-6863](https://orcid.org/0000-0001-9327-6863)

e-mail batrakln5@gmail.com

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute" kpi.ua

Kyiv, Ukraine

Abstract—In connection with the widespread distribution of non-traditional and renewable sources of electricity, the task is to obtain from them the maximum possible amount of electric energy. As is known, to select from a power source of maximum power, it is necessary that the load impedance is equal to the output impedance of the source (harmonized mode). Under real conditions, the output resistance of the source depends on the external conditions, and the resistance of the load - from the mode of its operation. Therefore, the selection of maximum power from the source is possible only under a certain operating mode of the load. To enable selection from the generator of maximum power, when changing the external conditions and the mode of operation of the load between them include a matching device. As such, most often use switching regulator of voltage. Obviously, in such devices, the source of energy cannot be considered ideal and it is necessary to take



into account its internal resistance. By adjusting the output current of the source, we will change the voltage drop on its internal resistance so, that the operating point of the generator is output to its maximum power zone. The internal resistance of the source of electric energy is significantly influence on the basis parameters and characteristics of the switching regulator of voltage.

The peculiarity of using switching regulator of voltage as elements of renewable sources is that in order to ensure a even supply of electrical energy to a load, a battery, that works in a buffer mode, is connected in parallel to it. Switching regulator of voltage can also be used to regulate battery charging current in power supplies, electric cars, etc. In all these cases the battery determines the mode of operation of the switching regulator of voltage. Features of the switching regulator of voltage operation on the battery in the buffer mode, taking into account the internal resistances of the voltage source and the battery are analyzed. It is shown that under such conditions, switching regulator of voltage operates in the current regulation mode, but not voltage. Az the example, for switching regulator of voltage of the boost type determined the regulation characteristics for the modes of continuous and intermittent inductor current. It is shown that in order to reduce the dependence of the output voltage on the charging current of the battery, as well as to reduce the power loss therein, it is necessary to provide a certain relationship between the internal resistances of the electric power source and the battery. Graphs of regulation characteristics and the conditions of transmission from the energy source to the battery of the maximum possible power are determined. Recommendations on the application of modes of continuous and intermittent inductor current in the switching regulator of voltage when it operates on the battery are given.

Ref. 13, fig. 5, tabl. 2.

Keywords — pulse regulator; battery; internal resistance; continuous current mode; intermittent current mode; adjustment characteristic.