

# Регулювальні характеристики імпульсного регулятора з урахуванням нелінійності внутрішнього опору джерела живлення

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" [kpi.ua](http://kpi.ua)  
Київ, Україна

**Анотація**—В роботі розглянуто підходи до визначення регулювальних характеристик імпульсних регуляторів з урахуванням внутрішнього опору їх джерела електроживлення. Запропоновано нелінійність внутрішнього опору джерела враховувати за допомогою його вихідної характеристики. Робоча точка на цій характеристиці визначається опором навантаження. Якщо до джерела живлення підключено імпульсний регулятор, навантаженням джерела буде еквівалентний вхідний опір регулятора, який залежить від опору навантаження, а також відносного часу замкненого (розімкненого) стану ключа. На основі цього запропоновано методику визначення регулювальних характеристик імпульсних регуляторів з урахуванням нелінійності внутрішнього опору їх джерела живлення. На прикладі імпульсного регулятора напруги понижувального типу, з використанням розробленої методики, було визначено та проаналізовано сімейство регулювальних характеристик для різних значень опору навантаження регулятора. Проаналізовано умови забезпечення передавання максимальної потужності від джерела живлення до навантаження. Одержані характеристики є дійсними для режиму безперервного струму в індуктивності регулятора. Розглянуто методику визначення індуктивності реактора регулятора, при якій у ньому забезпечується режим безперервного струму в усьому діапазоні регулювання.

**Ключові слова** — імпульсний регулятор; регулювальна характеристика; джерело живлення; нелінійний внутрішній опір.

## I. ВСТУП

Імпульсні регулятори (ІР) постійної напруги широко застосовують в різних галузях для регулювання середнього значення постійної напруги на навантаженні. Найважливішою характеристикою будь-якого регулятора є його регулювальна характеристика [1]. У випадку живлення від традиційних джерел електричної енергії часто припускають, що опір навантаження є значно більшим від внутрішнього опору джерела. Тому при розрахунках його не враховують, вважаючи, що  $r = 0$ . У випадку використання нетрадиційних та відновлювальних джерел електричної енергії, які мають обмежену потужність, внутрішній опір джерела та опір навантаження є величинами одного порядку. У таких випадках внутрішній опір джерела суттєво впливатиме на вид регулювальної характеристики, і його обов'язково необхідно врахувати. В літературі [1, 2, 3] докладно проаналізовано регулювальні характеристики різних типів ІР для випадку, коли  $r = 0$ . В [4] аналізуються регулювальні характеристики окремих типів ІР з урахуванням внутрішнього опору джерела для випадку, коли цей опір є лінійним. Однак внутрішній опір нетрадиційних та відновлювальних джерел електричної енергії найчастіше є суттєво нелінійним [5, 6].

Метою роботи є розробка методики визначення регулювальних характеристик ІР з урахуванням

нелінійності внутрішнього опору його джерела електроживлення та аналіз одержаних характеристик.

## II. ОСНОВНА ЧАСТИНА

Нелінійність внутрішнього опору джерела електроживлення найзручніше враховувати за допомогою вихідної (навантажувальної) характеристики джерела [7, 8]. Робочу точку на цій характеристиці визначатиме опір навантаження  $R_n$ . Оскільки вихідна характеристика джерела є нелінійною, його вихідний опір  $r_{вих}$  залежатиме від робочої точки на вихідній характеристиці (в подальшому позначено літерою 0). Якщо до джерела живлення підключено ІР, навантаженням джерела буде еквівалентний вхідний опір регулятора  $R_{не}$ , який залежатиме від опору навантаження  $R_n$ , а також відносного часу замкненого (розімкненого) стану ключа  $t^*$ . Як відомо [9], ІР можна розглядати як трансформатор постійних складових напруги та струму. Отже, опір навантаження  $R_n$  може бути перерахований до входу ІР, а його величина  $R_{не}$  залежатиме від параметра  $t^*$ .

У загальному випадку регулювальні характеристики ІР можна визначати аналітично. Однак, враховуючи, що реальні вихідні характеристики нетрадиційних джерел електричної енергії є нелінійними, і найчастіше їх визначають експериментально, побудову регулювальних характеристик доцільно здійснювати



графоаналітичним методом. Розглянемо можливу методику визначення регулювальних характеристик на прикладі ІР напруги понижувального типу.

III. РОЗРОБКА МЕТОДИКИ.

Нехай ІР напруги понижувального типу (рис. 1) підключено до джерела живлення, внутрішній опір якого є суттєво нелінійним. Послідовність дій при визначенні його регулювальних характеристик може бути такою.

- 1) Експериментально визначаємо вихідну характеристику джерела. Для цього, змінюючи опір навантаження, встановлюємо взаємозв'язок між вихідною напругою та струмом  $U_{вих} = f(I_{вих})$ . В процесі вимірювань заповнюємо табл. 1.

Для кожної робочої точки можна обчислити еквівалентний опір навантаження  $R_{не}$ , а також розрахувати величину вихідної потужності джерела. За цими даними можна визначити точку максимальної потужності (ТМП) джерела, а також еквівалентний опір навантаження, який виводить джерело в ТМП  $R_{неТМП}$  [10].

- 2) З метою забезпечення найбільш загального характеру отримуваних результатів, вихідну характеристику джерела доцільно представляти у нормованому вигляді. На рис. 2 наведено приклад нормованої вихідної характеристики джерела з нелінійним внутрішнім опором.
- 3) Для заданого опору навантаження ІР  $R_n$  обчислюємо його нормоване значення  $R_n^*$  за формулою

$$R_n^* = \frac{U_n^*}{I_n^*} = \frac{U_n}{I_n} \cdot \frac{I_{кз}}{U_{xx}} = R_n / r_{ст.кз} \quad (1)$$

де  $r_{ст.кз}$  – статичний внутрішній опір джерела живлення у режимі короткого замкнення.

- 4) На нормованій вихідній характеристиці джерела (див. рис.2) визначаємо робочу точку **0**, яка відповідає обраному опору навантаження  $R_n^*$ . Очевидно, що ця робоча точка відповідає режиму роботи ІР з постійно замкненим ключем  $S(t^* = 1)$ .
- 5) Відкладаємо  $n$  точок на вихідній характеристиці джерела і для кожної з них визначаємо еквівалентний опір навантаження

$$R_{нек}^* = \frac{U_k^*}{I_k^*} \quad (2)$$

- 6) Для ІР напруги понижувального типу в режимі безперервного струму індуктивності є дійсними співвідношення [1]

$$U_{вих}^* = U_{ex}^* \cdot t^*; I_{вих}^* = I_{ex}^* / t^* \quad (3)$$

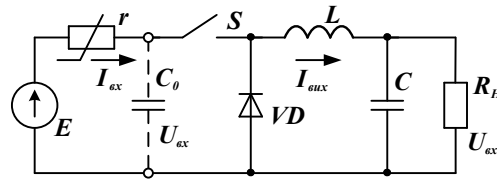


Рис. 1 Імпульсний регулятор напруги понижувального типу

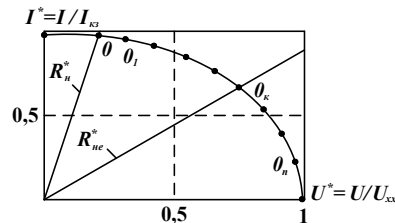


Рис. 2 Приклад нормованої вихідної характеристики джерела з нелінійним внутрішнім опором

ТАБЛИЦЯ 1. РЕЗУЛЬТАТИ ВИМІРЮВАНЬ

$U_{вих}$	$U_1$	$U_2$	$\dots$	$U_k$	$\dots$	$U_n$
$I_{вих}$	$I_1$	$I_2$	$\dots$	$I_k$	$\dots$	$I_n$
$R_{не} = \frac{U_{вих}}{I_{вих}}$	$\frac{U_1}{I_1}$	$\frac{U_2}{I_2}$	$\dots$	$\frac{U_k}{I_k}$	$\dots$	$\frac{U_n}{I_n}$
$P_{вих} = U_{вих} \cdot I_{вих}$	$U_1 I_1$	$U_2 I_2$	$\dots$	$U_k I_k$	$\dots$	$U_n I_n$

Враховуючи, що  $R_{не}^* = U_{ex}^* / I_{ex}^*$ ,  $R_n^* = U_{вих}^* / I_{вих}^*$ , з використанням співвідношень (3) можна визначити еквівалентний опір навантаження, як функцію від параметра  $t^*$

$$R_{не}^* = R_n^* / t^{*2} \quad (4)$$

Оскільки початкова робоча точка **0** відповідає режиму роботи, у якому  $t^* = 1$ , інші  $n$  точок на вихідній характеристиці необхідно брати справа від точки **0** (для  $t^* < 1$ ) (рис.2).

- 7) Визначаємо чисельні значення параметра  $t^*$ , які відповідають роботі джерела в кожній з  $n$  обраних точок. З урахуванням (4) його можна визначати за формулою

$$t_k^* = \sqrt{R_n^* / R_{нек}^*} \quad (5)$$

Одержані результати визначатимуть залежність вихідної напруги джерела (вихідної напруги ІР), від відносного часу замкненого стану ключа  $t^*$ .

За цими даними може бути побудований графік залежності  $U_{ex}^* = f(t^*)$  для обраного опору навантаження  $R_n^*$ .

- 8) Використовуючи результати, отримані в п. 7, за допомогою (3) визначаємо чисельні значення вихідної напруги для різних значень  $t^*$ . За цими даними будемо регульовальну



характеристику IP  $U_{вих}^* = f(t^*)$ , джерело живлення якого має вихідну характеристику, наведену на рис.2, для випадку, коли опір навантаження IP дорівнює  $R_H^*$ .

На основі застосування розробленої методики було проаналізовано регульовальні характеристики IP (див. рис.1) для випадку, коли джерело живлення має вихідну характеристику, наведену на рис.3.

Будемо вважати, що ця характеристика одержана експериментально. Результати вимірювань наведено в табл. 2.

У табл. 3 представлено результати обчислень, здійснені відповідно до розглянутої методики для випадку  $R_H^* = 0,2$ .

Відповідно до одержаних результатів на рис. 4 побудовано графіки залежності вхідної та вихідної напруги IP від відносного часу  $t^*$ . Також було проаналізовано регульовальні характеристики для інших значень відносного опору навантаження ( $R_H^* = 0,5; 1; 2; 5$ ).

Сімейство цих характеристик представлено на рис. 5. На цьому ж графіку пунктиром показано регульовальну характеристику IP для випадку живлення від ідеального джерела напруги ( $r = 0$ ) за умов відсутності втрат в елементах IP.

Аналіз одержаних результатів свідчить про наступне.

- 1) Одержані регульовальні характеристики є нелінійними і суттєво залежать від опору навантаження  $R_H^*$ .

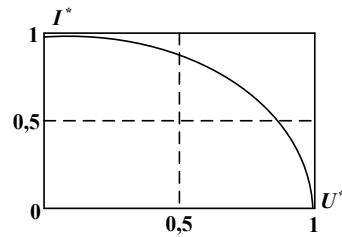


Рис. 3 Вихідна характеристика джерела

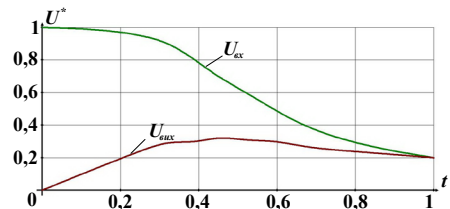


Рис. 4 Характеристики  $U_{ex}^*(t^*)$  та  $U_{вих}^*(t^*)$  для випадку  $R_H^* = 0,2$

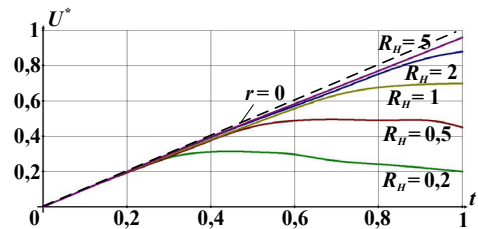


Рис. 5 Сімейство регульовальних характеристик для різних значень опору навантаження  $R_H^*$

ТАБЛИЦЯ 2. РЕЗУЛЬТАТИ ВИМІРЮВАНЬ

$U_{ex}^*$	0	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95	1
$I_{ex}^*$	1	0,999	0,99	0,98	0,95	0,92	0,87	0,8	0,71	0,6	0,44	0,31	0
$R_{He}^* = \frac{U_{ex}^*}{I_{ex}^*}$	0	0,05	0,1	0,2	0,32	0,44	0,58	0,75	0,99	1,3	2	3,1	$\infty$
$P_H^* = U^* \cdot I^*$	0	0,05	0,1	0,2	0,29	0,37	0,44	0,48	0,5	0,48	0,4	0,29	0

ТАБЛИЦЯ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ВИМІРЮВАНЬ

$U_{ex}^*$	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,71	0,8	0,9	0,95	1
$I_{ex}^*$	0,98	0,95	0,92	0,87	0,8	0,71	0,6	0,44	0,31	
$R_{He}^* = U_{ex}^*/I_{ex}^*$	0,2	0,32	0,44	0,58	0,75	1	1,3	2	3,1	
$t^* = \sqrt{R_H^*/R_{He}^*}$	1	0,79	0,67	0,59	0,52	0,45	0,39	0,32	0,25	0
$U_{вих}^* = U_{ex}^* \cdot t^*$	0,2	0,24	0,27	0,3	0,31	0,32	0,31	0,29	0,24	0

2) Максимальна потужність передаватиметься до навантаження при роботі джерела живлення в точці максимальної потужності (ТМП). Відповідно до табл. 1, для обраного джерела живлення ТМП відповідає еквівалентному опору навантаження  $R_{неМП}^* = 1$ .

3) Якщо опір навантаження  $R_n^* \neq R_{неМП}^*$ , то для виведення джерела живлення в ТМП, відносний час замкненого стану ключа ІР повинен дорівнювати

$$t^* = t_{МП}^* = \sqrt{R_n^* / R_{неМП}^*}. \quad (6)$$

4) Відповідно до (6), ІР може вивести джерело живлення в ТМП лише за умови, що  $R_n^* \leq R_{неМП}^*$ .

5) Якщо  $R_n^* > R_{неМП}^*$ , джерело живлення не може бути виведене в ТМП за будь якого значення  $t^*$ . Отже, за таких умов від джерела до навантаження не може бути передана максимально можлива потужність.

6) Незалежно від джерела живлення, у режимі безперервного струму індуктивності  $L$  для ІР (див. рис. 1) співвідношення (3) залишаються дійсними.

На рис. 6 наведено графік залежності  $t_{МП}^* = f(R_n^*)$ .

Визначимо умови, за яких забезпечується режим безперервного струму індуктивності для випадку, що розглядаємо. Як відомо [1], загальна умова цього режиму є такою:

$$I_L \geq \Delta I_L / 2. \quad (7)$$

Враховуючи, що  $I_L = I_{вих} = U_{вих} / R_n$ , а

$$\Delta I_L = \frac{U_{вих} \cdot T}{L} (1 - t^*),$$

після підстановки в (7) отримаємо умову забезпечення безперервного струму в індуктивності ІР

$$t_{кр}^* \geq 1 - 2\tau^*. \quad (8)$$

де  $\tau = L / R_n$ , а  $\tau^* = \tau / T$ .

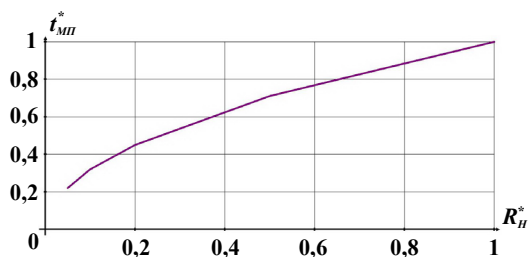


Рис. 6. Залежність  $t_{МП}^*$  від опору навантаження  $R_n^*$

Таким чином, відповідно до (8), за умови, що  $\tau^* \geq 0,5$ , ІР працюватиме в режимі безперервного струму індуктивності  $L$  в усьому діапазоні регулювання за будь-якого  $t^* > 0$ . Оскільки  $\tau^*$  приймає мінімальне значення при максимальному опорі навантаження, умову

$$\tau^* > 0,5 \quad (9)$$

необхідно забезпечити для максимального опору навантаження  $R_{n\max}$ .

Перейдемо до нормованих значень опору навантаження. Враховуючи, що  $R_n = R_n^* \cdot r$ , параметр  $\tau^*$  може бути представлений наступним чином

$$\tau^* = \frac{L}{R_n^* \cdot rT} = \frac{L}{rT} \cdot \frac{1}{R_n^*} = \tau_r^* \cdot \frac{1}{R_n^*}, \quad (10)$$

де  $\tau_r^* = \frac{L}{rT}$  для обраного джерела живлення є сталою величиною, яка не залежить від опору навантаження  $R_n$ .

З урахуванням цього умова (9) приймає вигляд

$$\tau_r^* \cdot \frac{1}{R_n^*} > 0,5. \quad (11)$$

Отже, для забезпечення режиму безперервного струму індуктивності в усьому діапазоні регулювання, індуктивність  $L$  має бути не меншою, ніж

$$L > 0,5 R_{n\max}^* \cdot rT. \quad (12)$$

Якщо ж режим переривчастого струму індуктивності матиме місце, то відповідно до [1] при  $t^* < t_{кр}^*$  вихідна напруга регулятора буде більшою, ніж визначає регульовальна характеристика. Конкретна величина залежатиме від опору навантаження  $R_n$ .

## ВИСНОВКИ

Режим роботи ІР взаємопов'язаний з режимом роботи його джерела електроживлення, оскільки вхідною напругою регулятора є вихідна напруга джерела. Оскільки ця напруга залежить від його внутрішнього опору, при будь-яких розрахунках внутрішній опір джерела обов'язково необхідно враховувати. Якщо цей опір є нелінійним, його найзручніше враховувати за допомогою вихідної (зовнішньої) характеристики джерела. Розроблена методика дає можливість визначити регульовальні характеристики ІР з урахуванням нелінійності внутрішнього опору його джерела електроживлення.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Y. P. Goncharov, O. V. Budonny, V. G. Morozov, M. V. Panasenko, V. Y. Romashko and V. S. Rudenko, Peretvoryuval'na tekhnika Navchalnyi posibnyk. Chastyna 2 [Power conversion equipment. Text book. Part 2]. Kharkiv: Folio, 2000, 360 p. ISBN 966-03-0697-0.



- DOI: [10.20535/2523-4455.me.207253](https://doi.org/10.20535/2523-4455.me.207253)
2. Severns R., Blum G. Impul'snyye preobrazovateli postoyannogo napryazheniya [Pulsed DC-DC Converters]. M.: Energoatomizdat, 1988. 294 p.
  3. Moin V.S. Stabilizirovannyye tranzistornyye preobrazovateli [Stabilized transistor converters]. M. Energoatomizdat, 1986. 376 p.
  4. Romashko, V. J. Rehulyuval'ni kharakterystyky IR z urakhuvannyyam vnutrishn'oho oporu dzhherela elektrozhivlennya [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).
  5. S. Leva, D. Zaninelli, R. Contino, "Integrated Renewable Sources for Supplying Remote Power Systems" *WSEAS TRANSACTIONS on POWER SYSTEMS*, vol. 2, no. 2, pp. 41 - 48, February 2007. ISSN 1790-5060.
  6. R. Bayindir, S. Demirbas, E. Irmak, U. Cetinkaya, A. Ova, M. Yesil "Effects of Renewable Energy Sources on the Power System" in *2016 IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC)* September 2016, DOI: [10.1109/EPEPEMC.2016.7752029](https://doi.org/10.1109/EPEPEMC.2016.7752029)
  7. T. S. Anandhil, S. Prem Kumar "Application of DC-DC boost converter for solar powered traffic light with battery backup" *Indian Journal of Science and Technology*. 2015. Vol. 8(32). DOI: [10.17485/ijst/2015/v8i32/84408](https://doi.org/10.17485/ijst/2015/v8i32/84408).
  8. Sheng-Yu, Tseng. "A photovoltaic power system using a high step-up converter for DC load application" *Energies*. 2013. vol. 6. p. 1068-1100. DOI: [10.3390/en6021068](https://doi.org/10.3390/en6021068) [Energies](https://doi.org/10.3390/en6021068).
  9. Romashko V. YA. "Ustroystva soglasovaniya nagruzki s istochnikom elektricheskoy energii [Matching device load from the source of electrical energy]" *Energoberezeniye, energetika, energoaudit*, 2013, vol.1, no. 8 (114) pp. 67-74. ISSN 2218-1849
  10. Arash Shafiei, Ahmadreza Momeni and Sheldon S. Williamson "A Novel Photovoltaic Maximum Power Point Tracker for Battery Charging Applications" in *25th IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)*, Montreal, QC, Canada, 2012, DOI: [10.1109/CCECE.2012.6335050](https://doi.org/10.1109/CCECE.2012.6335050)

Надійшла до редакції 03 травня 2020 року



# Regulating Characteristics of the Pulse Regulator Taking into Account the Nonlinearity of the Internal Resistance of the Power Source

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” [kpi.ua](http://kpi.ua)  
Kyiv, Ukraine

**Abstract**—Switching DC voltage regulators are widely used to regulate the average value of DC voltage at a load. The most important characteristic of any regulator is its regulating characteristic. In the case of power from traditional sources of electricity, it is often assumed that the load resistance is much greater than the internal resistance of the source. Therefore, it is not taken into account in the calculations, assuming that the resistance is zero. In the case of the use of non-traditional and renewable energy sources, which have limited power, the internal resistance of the source and the load resistance are values of the same order. In such cases, the internal resistance of the source significantly affects the type of regulatory characteristic and must be taken into account. In the literature, the regulatory characteristics of various types of pulse regulators are analyzed in detail for the case when the resistance is zero. There are works in which the regulatory characteristics of individual types of pulse regulators are analyzed taking into account the internal resistance of the power source for the case when this resistance is linear. However, the internal resistance of alternative and renewable sources of electricity is often substantially non-linear. The aim of the work is to develop a methodology for determining the regulatory characteristics of pulse regulators taking into account the nonlinearity of the internal resistance of its power sources and analysis of the obtained characteristics. The paper considers approaches to determining the regulatory characteristics of pulse regulators, taking into account the internal resistance of their power sources. It is proposed that the nonlinearity of the internal resistance of the source be taken into account using its output characteristic. The operating point on this characteristic is determined by the load resistance. If a pulse regulator is connected to the power source, the load of the source will be the input resistance of the regulation, which depends on the load resistance, as well as the relative time of the closed (open) state of the switch. A pulse regulator can be considered as a transformer of constant voltage and current. Therefore, the load resistance can be assigned to the input of the pulse regulator, and its value will depend on the duty cycle of the pulses. Based on this, a methodology for determining the regulatory characteristics of pulse regulators is proposed taking into account the nonlinearity of the internal resistance of their power source. Using as an example of a step-down voltage regulator, using the developed methodology, we determined and analyzed a family of regulating characteristics for various values of the regulator load resistance. The conditions for ensuring the transfer of maximum power from the power source to the load are analyzed. The obtained characteristics are valid for the continuous current mode in the inductance of the regulation. A method for determining the inductance of the reactor of the regulator, in which it provides a continuous current mode in the entire control range is considered.

**Keywords** — pulse regulator; regulating characteristic; power supply; nonlinear internal resistance.

