

## Си́лова електроні́ка

УДК 621.314

DOI: [10.20535/2523-4455.2017.22.6.81414](https://doi.org/10.20535/2523-4455.2017.22.6.81414)

# Регулювальні характеристики імпульсних регуляторів з урахуванням внутрішнього опору джерела електроживлення

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](mailto:volodymyr.romashko@gmail.com)

Національний технічний університет України

"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" [kpi.ua](http://kpi.ua)

Київ, Україна

**Реферат**—Проаналізовано особливості роботи імпульсних регуляторів від джерел постійної напруги та струму. Наведено схеми імпульсних регуляторів постійного струму, дуальні до схем імпульсних регуляторів постійної напруги. Розглянуто їх регулювальні характеристики з врахуванням внутрішнього опору джерела електроживлення. Показано, що оскільки відповідні схеми імпульсних регуляторів напруги та струму є дуальними, аналітичні вирази їх регулювальних характеристик є аналогічними. Як приклад наведено нормовані графіки регулювальних характеристик для імпульсних регуляторів постійної напруги та струму знижувального типу.

Бібл. 11, рис. 4, табл. 1.

**Ключові слова** — імпульсний регулятор постійної напруги; імпульсний регулятор постійного струму; регулювальна характеристика, внутрішній опір.

### I. ВСТУП

Імпульсні регулятори (ІР) широко використовують для регулювання та стабілізації величини постійної напруги та струму [1]–[4]. Оскільки традиційні джерела електричної енергії переважно є джерелами напруги, в технічній літературі проаналізовано особливості роботи імпульсних регуляторів від джерел постійної напруги. В [5] наведено аналітичні вирази регулювальних характеристик для ІР постійної напруги, побудованих на ідеалізованих елементах, джерелом живлення для яких є ідеальне джерело напруги  $E$ .

Реальні ІР побудовано на елементах, що мають певні втрати енергії. Будь-яке джерело електричної енергії має внутрішній опір  $r$ . У зв'язку з цим згадані формули в певних режимах роботи реальних ІР міститимуть значну похибку. В літературі достатньо повно проаналізовано вплив не ідеальності елементів ІР на його параметри та характеристики [3]. В той же час вплив внутрішнього опору джерел електричної енергії на характеристики ІР не проаналізовано.

На сьогодні широке використання мають різні види нетрадиційних та відновлюваних джерел електричної енергії [6]. Частина з них можна вважати джерелами напруги, іншу частину джерелами струму [7]. При використанні таких джерел від них намагаються отримати максимально можливу вихідну потужність, яка залежить від співвідношення між внутрішнім

опором джерела електроживлення  $r$  та опором навантаження  $R$  [8]. При розробці та використанні нетрадиційних та відновлюваних джерел електричної енергії широко використовують ІР для забезпечення відбирання максимальної потужності від них. Такі регулятори працюють не в режимі стабілізації вихідної напруги, а в режимі регулювання вхідного струму, за рахунок чого забезпечується виведення джерела електричної енергії в точку максимальної потужності. Оскільки однією з найважливіших характеристик будь-якого регулятора є його *регулювальна* характеристика [5], [9], [10], доцільно проаналізувати регулювальні характеристики базових схем ІР постійної напруги та струму з урахуванням внутрішнього опору їх джерела електроживлення.

### II. ОСНОВНА ЧАСТИНА

Якщо джерелом живлення є джерело постійної напруги  $E$ , регулювальна характеристика ІР постійної напруги

$$U = f(t^*), \quad (1)$$

де  $U$  – середнє значення напруги на навантаженні (постійна складова вихідної напруги);  $t^*$  – відносний час передавання енергії до кола навантаження [5]. Відповідно, якщо джерелом живлення ІР є джерело постійного струму  $J$ , регулювальна характеристика ІР постійного струму



$$I = f(t^*), \quad (2)$$

де  $I$  – середнє значення струму через навантаження (постійна складова вихідного струму).

Враховуючи, що джерела напруги та струму є *дуальними* елементами електричного кола [11], схеми ІР постійного струму можна одержати, використовуючи принципи побудови дуальних електричних кіл, із схем ІР постійної напруги. В [9] наведено базові схеми ІР постійного струму, які є дуальними до базових схем ІР постійної напруги.

Для виведення формул регульовальних характеристик ІР напруги та струму з урахуванням внутрішнього опору їх джерела електроживлення будемо використовувати ті самі припущення, які використано при виведенні формул в [5], [9] (активний опір елементів ІР є значно меншим від опору навантаження  $R$ , струм через індуктивність  $L$  (напруга на ємності  $C$ ) є безперервними. Крім того, вважатимемо, що внутрішній опір джерела електроживлення  $r$  є лінійним. Реальні струми та напруги на елементах ІР є пульсуючими, тобто містять постійну та змінну складові. Оскільки для ІР постійної напруги та струму корисною є саме постійна складова вихідної напруги (струму), далі, більш детально аналізуватимемо саме постійну складову.

Зауважимо, що в усталеному режимі роботи ІР, середнє значення напруги на індуктивності  $U_{Lcp}$  (постійна складова), а також середнє значення струму через ємність  $I_{Ccp}$  (постійна складова) дорівнює нулю.

### III. ІМПУЛЬСНИЙ РЕГУЛЯТОР ПОСТІЙНОЇ НАПРУГИ

Проаналізуємо вплив внутрішнього опору джерела напруги на регульовальні характеристики на прикладі схеми ІР знижувального типу (Рис. 1).

Оскільки в усталеному режимі роботи середнє значення напруги на індуктивності  $L$  дорівнює нулю, це означає, що середнє значення напруги при замкненому ключі  $S$ , дорівнює середньому значенню напруги при розімкненому ключі  $S$ .

Якщо вважати, що струм через індуктивність  $L$  змінюється за законом, близьким до лінійного, а напруга на ємності  $C$  має невелику пульсацію, вказану умову можна записати наступним чином

$$(E - Ir - U)t^* = U(1 - t^*), \quad (3)$$

або

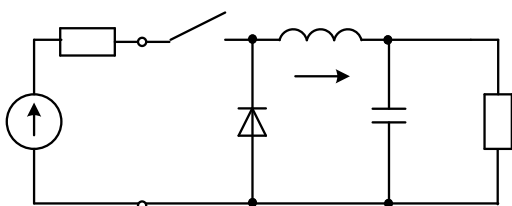


Рис. 1 Схема імпульсного регулятора постійної напруги

$$Et^* = U + I \cdot r \cdot t^*.$$

Враховуючи, що  $I = U/R$ , отримуємо

$$Et^* = U + U \frac{r}{R} t^* = U(1 + r^* t^*),$$

де  $r^* = \frac{r}{R}$  відносний внутрішній опір джерела напруги.

Ввівши відносну напругу  $U^* = \frac{U}{E}$  отримаємо регульовальну характеристику ІР постійної напруги у відносних одиницях

$$U^* = \frac{t^*}{1 + r^* t^*}. \quad (4)$$

Якщо регулювання здійснюватиметься у повному діапазоні ( $t^* = 0 \dots 1$ ) умова безперервності струму в індуктивності [5], [9].

$$L \geq \frac{R}{2} T. \quad (5)$$

Струм через індуктивність  $L$  змінюватиметься за законом, близьким до лінійного, якщо  $L/r \geq 3T$ , тобто

$$L \geq 3rT. \quad (6)$$

При ідеальному джерелі напруги ( $r = 0$ ) струм через індуктивність  $L$  буде лінійним. Тому для вибору величини індуктивності  $L$  необхідно використовувати умову (5). В режимі відбирання максимальної потужності від джерела ( $R = r$ ) для вибору величини індуктивності  $L$  необхідно використовувати умову (6). При певному співвідношенні опорів  $r/R = r^*$  необхідна величина індуктивності, визначена з формул (5) та (6) буде однаковою, тобто

$$\frac{R}{2} T = 3rT,$$

звідки

$$\frac{r}{R} = r^* = \frac{1}{6} \approx 0,17. \quad (7)$$

Отже, для  $r^* \leq 0,17$  величину індуктивності  $L$  необхідно визначати з (5), а для  $r^* \geq 0,17$  - з (6).

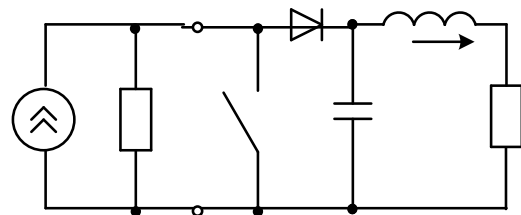


Рис. 2 Схема імпульсного регулятора постійного струму

Якщо умови (5), (6) не будуть виконані, то у випадку переривчастого струму через індуктивність  $L$  вихідна напруга  $IP$  буде більшою, ніж обчислена за формулою (4). Якщо ж струм через індуктивність буде безперервним, але змінюватиметься за законом, що значно відрізняється від лінійного, вихідна напруга  $IP$  буде меншою, ніж обчислена за формулою (4).

IV. ІМПУЛЬСНИЙ РЕГУЛЯТОР ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

При аналізі схеми  $IP$  струму знижувального типу (рис. 2), враховуватимемо, що в усталеному режимі роботи середнє значення струму через ємність  $C$  дорівнює нулю.

Отже, середнє значення цього струму при розімкненому ключі дорівнює середньому значенню при замкненому. Якщо вважати, що напруга на ємності  $C$  змінюється за законом, близьким до лінійного, а струм через індуктивність  $L$  має невелику пульсацію, вказану умову можна записати наступним чином

$$\left( J - \frac{U}{r} - I \right) t^* = I(1 - t^*). \quad (8)$$

Враховуючи, що  $U = IR$

$$Jt^* = I + I \frac{R}{r} t^* = I(1 + R^* t^*),$$

де  $R^* = \frac{R}{r}$  відносний опір навантаження.

Ввівши відносний струм  $I^* = \frac{I}{J}$  отримаємо регульовальну характеристику схеми  $IP$  постійного струму

$$I^* = \frac{t^*}{1 + R^* t^*}. \quad (9)$$

Очевидно, що з урахуванням дуальності відповідних схем  $IP$  напруги та струму, формули (4) та (9)

є аналогічними, отже, умова безперервності напруги на ємності  $C$

$$C \geq \frac{T}{2R}, \quad (10)$$

а умова зміни її напруги за законом, близьким до лінійного

$$C \geq \frac{3T}{r}. \quad (11)$$

Тому, при  $R^* \leq 0,17$  для визначення ємності  $C$  необхідно використовувати формулу (10), а для  $R^* \geq 0,17$  - формулу (11). Для ідеальних джерел напруги (струму)  $r^* (R^*)$  дорівнює нулю. У цьому випадку з (4) та (9) отримуємо регульовальні характеристики, наведені в [5].

Аналогічно аналізуючи схеми  $IP$  постійної напруги (струму) інших типів можна отримати формули, що описують їх регульовальні характеристики. Використовуючи ті самі припущення, що і для розглянутих схем, умову рівності нулю середнього значення напруги на індуктивності (середнього значення струму через ємність) для схем підвищувального типу можна записати наступним чином

$$(E - Ir)(1 - t^*) = (U + Ir - E)t^*; \quad (12)$$

$$\left( J - \frac{U}{r} \right) (1 - t^*) = \left( J + \frac{U}{r} - J \right) t^*, \quad (13)$$

а для схем полярно-інвертувального типу відповідно

$$(E - Ir)t^* = U(1 - t^*); \quad (14)$$

$$\left( J - \frac{U}{r} \right) t^* = I(1 - t^*). \quad (15)$$

ТАБЛИЦЯ 1 РЕГУЛЬОВАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ІМПУЛЬСНИХ РЕГУЛЯТОРІВ

№ п/п	$IP$ постійної напруги	Вихідна напруга	$IP$ постійного струму	Вихідний струм
1.		$U^* = \frac{t^*}{1 + t^* R^*}$		$I^* = \frac{t^*}{1 + t^* R^*}$
2.		$U^* = \frac{t^*}{t^{*2} + R^*}$		$I^* = \frac{t^*}{t^{*2} + R^*}$
3.		$U^* = \frac{t^*(1 - t^*)}{(1 - t^*)^2 + t^* R^*}$		$I^* = \frac{t^*(1 - t^*)}{(1 - t^*)^2 + t^* R^*}$

Здійснивши аналіз, подібний до аналізу розглянутих схем, отримаємо їх регульовальні характеристики. В табл. 1 наведено базові схеми ІР постійної напруги та струму та їх регульовальні характеристики з урахуванням внутрішнього опору джерела електроживлення.

Зауважимо, що для схем з *послідовним* вмиканням ключа  $S$  відносно джерела енергії та навантаження  $t^*$  відповідає відносній тривалості *замкненого* стану ключа, а для схем з *паралельним* ввімкненням ключа  $S$  відносно джерела енергії та навантаження.  $t^*$  відповідає відносній тривалості *розімкненого* стану ключа.

Одержані формули підтверджують, що відповідні схеми ІР постійної напруги та струму є дуальними.

#### V. ГРАФІКИ РЕГУЛЬОВАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Вихідна напруга (струм) ІР, що живляться від ідеального джерела напруги (струму) залежить лише від регульованого параметра (відносної тривалості замкненого (розімкненого) стану ключа  $t^*$ ). Відповідно до формул, наведених в табл. 1 вихідна напруга (струм) ІР, що живляться від реальних джерел живлення є функцією двох змінних: відносної тривалості замкненого (розімкненого) стану ключа  $t^*$  та відносного внутрішнього опору  $r^*$  (відносного опору навантаження  $R^*$ ). Використовуючи представлені в табл. 1 формули можна побудувати два сімейства вихідних характеристик для розглянутих схем:

- 1) регульовальні характеристики  $U^* = f(t^*)$ ,  $I^* = f(t^*)$  для декількох фіксованих значень внутрішнього опору  $r^*$  (опору навантаження  $R^*$ ).

- 2) навантажувальні характеристики  $U^* = f(t^*)$ ,  $I^* = f(t^*)$  для декількох фіксованих значень  $t^*$ .

Зауважимо, що ці характеристики для відповідних схем ІР напруги та струму будуть однаковими, що можна пояснити наступним чином. Як видно з табл. 1 в формулах для ІР напруги використовується відносний внутрішній опір джерела напруги  $r^* = r/R$ . Для ідеального джерела напруги  $r = r^* = 0$ . Як відомо, для реальних джерел напруги виконується умова:  $r \ll R$ . Якщо  $r \cong R$ , вважають, що джерело електричної енергії працює не в режимі джерела напруги, а в режимі джерела потужності. Тому формули, отримані для ІР постійної напруги доцільно використовувати при  $r^* = (0...1)$ .

Якщо  $r \gg R$ , то джерело енергії є джерелом струму. Для ідеального джерела струму  $r = \infty$ . Отже відносний опір навантаження  $R^* = R/r = 0$ . Якщо ж  $r = R$ ,  $R^* = 1$ . Тому, для реальних джерел струму при переході від ідеального джерела струму до джерела потужності відносний опір навантаження також змінюватиметься в діапазоні  $R^* = (0...1)$ . Тому відповідні характеристики для ІР постійної напруги та струму будуть аналогічними. Як приклад, на рис. 3 наведено графіки регульовальних характеристик ІР постійної напруги та струму (схема 1) для фіксованих значень відносного опору 0; 0,1; 0,5; 1, а на рис. 4 – їх навантажувальні характеристики для фіксованих значень  $t^* = 0,3; 0,5; 0,8; 1$ .

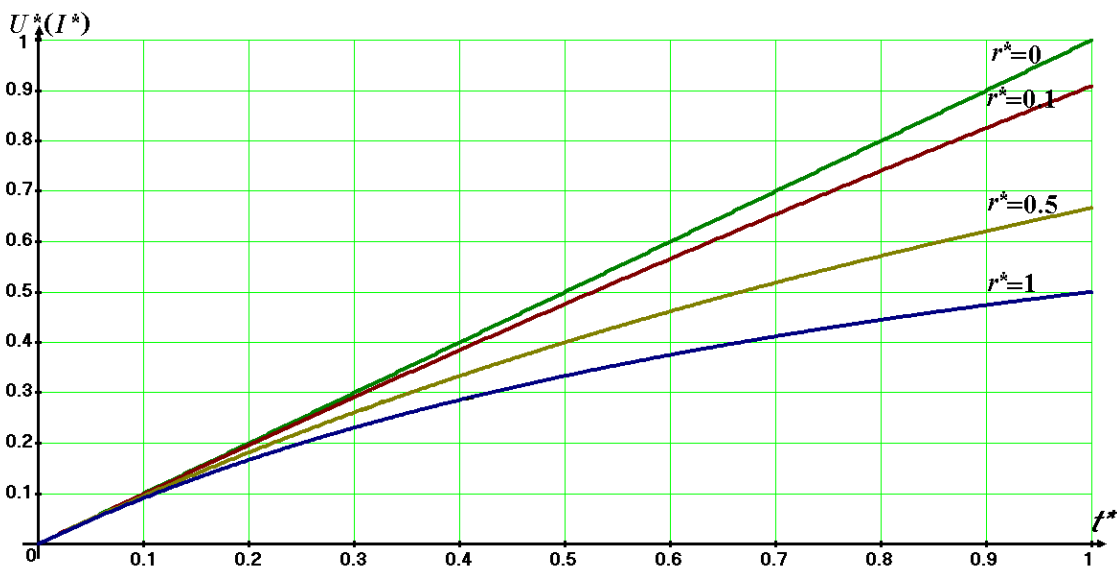


Рис. 3 Регульовальні характеристики імпульсних регуляторів постійної напруги та струму



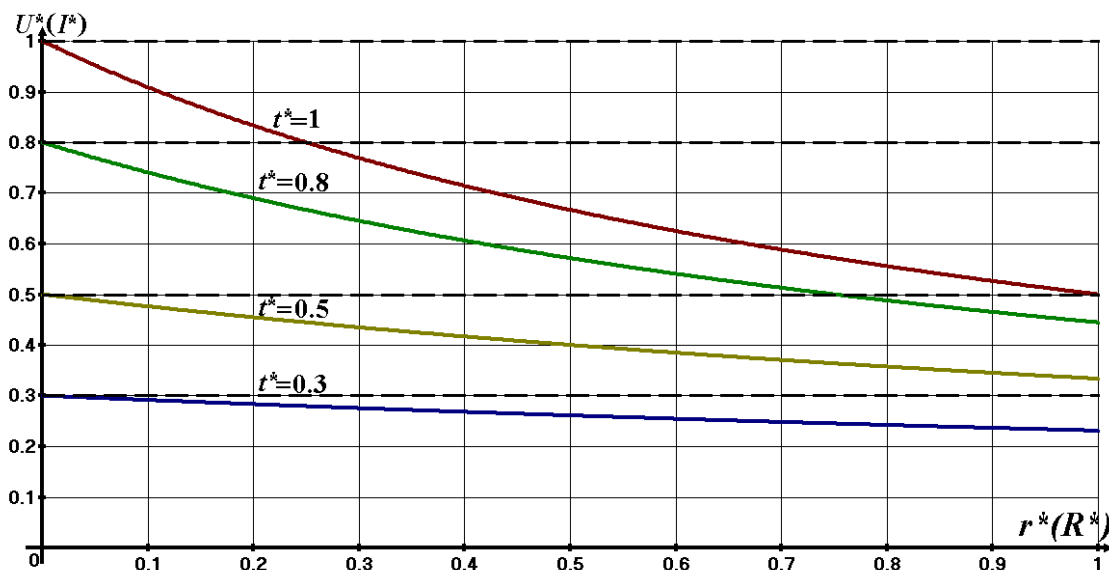


Рис. 4 Навантажувальні характеристики імпульсних регуляторів постійної напруги та струму

На рис. 3 графік при  $r^* = 0$  відповідає ідеальному джерелу електричної енергії (регульовальна характеристика ідеального ІР). У цьому випадку навантажувальні характеристики (рис. 4) не залежать від  $r^*$  і являтимуть собою прями лінії, паралельні до осі  $r^*$  (показані пунктирною лінією). З графіків випливає, що при зменшенні відносної тривалості  $t^*$  зменшується відмінність відповідних характеристик реальних джерел електричної енергії від характеристик ідеальних джерел. Це пов'язано з тим, що при зменшенні  $t^*$  зменшуються відносні втрати напруги (струму) на внутрішньому опорі джерела живлення  $r$ .

#### ВИСНОВКИ

На основі запропонованої методики визначено регульовальні характеристики ІР з урахуванням внутрішнього опору їх джерела електроживлення. Одержано уточнені формули регульовальних характеристик для базових схем ІР, напруги та струму. Отримані результати, при їх практичному застосуванні, сприятимуть більш точному визначено режимів роботи ІР, особливо за необхідності відбирання від джерела максимально можливої кількості енергії, а також в режимах, коли відносна тривалість передавання енергії від джерела до навантаження  $t^*$  змінюється у широких межах. Наприклад, для ІР підвищувального типу, що живиться від ідеального джерела напруги ( $r^* = 0$ ), відповідно до табл. 1 п. 2 для  $t^* \rightarrow 0$  вихідна напруга необмежено зростатиме ( $U^* \rightarrow \infty$ ). Насправді, з урахуванням внутрішнього опору  $r^* \neq 0$ , вихідна напруга також зменшуватиметься ( $U^* \rightarrow 0$ ), що відповідає дійсності.

Надійшла до редакції 27 жовтня 2016 р.

#### ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] L. Rensink, "Switching regulator configurations and circuit realizations," California Institute of Technology, 1980. URL: [http://thesis.library.caltech.edu/4017/1/Rensink\\_1\\_1980.pdf](http://thesis.library.caltech.edu/4017/1/Rensink_1_1980.pdf)
- [2] H. Matsuo and K. Harada, "New DC-DC converters with an energy storage reactor," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 13, no. 5, pp. 1211–1213, Sep. 1977. DOI: [10.1109/TMAG.1977.1059535](https://doi.org/10.1109/TMAG.1977.1059535)
- [3] G. I. Cardwell and W. O. Neel, "Bilateral power conditioner," in *1973 IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 1973, pp. 214–221. DOI: [10.1109/PESC.1973.7065191](https://doi.org/10.1109/PESC.1973.7065191)
- [4] R. D. Middlebrook, S. Cuk, and W. Behn, "A new battery charger/discharger converter," in *1978 IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 1978, pp. 251–255. DOI: [10.1109/PESC.1978.7072361](https://doi.org/10.1109/PESC.1978.7072361)
- [5] Y. P. Goncharov, O. V. Budonny, V. G. Morozov, M. V. Panasenko, V. Y. Romashko, and V. S. Rudenko, *Peretovuyvalna technicala. Navchalnyi posibnyk. Chstyna 2 [Power conversion equipment. Text book. Part 2]*. Kharkiv: Folio, 2000.
- [6] S. Leva, D. Zaninelli, and R. Contino, "Integrated renewable sources for supplying remote power systems," *WSEAS Trans. Power Syst.*, vol. 2, no. 2, pp. 41–48, 2007.
- [7] R. Faranda and S. Leva, "Energy Comparison of MPPT Techniques for PV Systems," *WSEAS Trans. power Syst.*, vol. 3, no. 5, pp. 446–455, 2008. URL: <http://www.wseas.us/e-library/transactions/power/2008/27-545.pdf>
- [8] R. D. Middlebrook and S. Cuk, "A general unified approach to modelling switching-converter power stages," in *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 1976, pp. 18–34. DOI: [10.1109/PESC.1976.7072895](https://doi.org/10.1109/PESC.1976.7072895)
- [9] R. Severns and G. Bloom, *Impul'snyye preobrazovateli postoyannogo napryazheniya dlya sistem vtorichnogo elektropitaniya [Switching Converters DC to secondary power systems]*. Moscow: Energoatomisdat, 1988.
- [10] T. Ninomiya, K. Harada, and M. Nakahara, "On the maximum regulation range in boost and buck-boost converters," in *1981 IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 1981, pp. 146–153. DOI: [10.1109/PESC.1981.7083635](https://doi.org/10.1109/PESC.1981.7083635)
- [11] V. P. Sigorsky and A. I. Petrenko, *Osnovy teorii elektronnykh skhem [Fundamentals of the theory of electronic circuits]*. Kyiv: Vyshecha Shkola, 1971.

УДК 621.314

# Регулировочные характеристики импульсных регуляторов с учетом внутреннего сопротивления источника электропитания

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](mailto:volodymyr.romashko@gmail.com)

Национальный технический университет Украины  
"Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского" [kpi.ua](http://kpi.ua)  
Киев, Украина

*Реферат*—Проанализированы особенности работы импульсных регуляторов от источников постоянного напряжения и тока. Представлены схемы импульсных регуляторов постоянного тока, дуальные схемам импульсных регуляторов постоянного напряжения. Рассмотрены их регулировочные характеристики с учетом внутреннего сопротивления источника электропитания. Показано, что поскольку соответствующие схемы импульсных регуляторов напряжения и тока являются дуальными, аналитические выражения их регулировочных характеристик будут аналогичными. Приведены нормированные графики регулировочных характеристик для импульсных регуляторов постоянного напряжения и тока понижающего типа.

Библ. 11, рис. 4, табл. 1.

*Ключевые слова* — импульсный регулятор постоянного напряжения; импульсный регулятор постоянного тока; регулировочная характеристика, внутреннее сопротивление.

UDC 621.314

# Regulation characteristics of switching regulators with taking into account the internal resistance of power supply

V. Ya. Romashko, Dr.Sc.(Eng), проф., ORCID [0000-0002-5429-7685](https://orcid.org/0000-0002-5429-7685)  
e-mail [volodymyr.romashko@gmail.com](mailto:volodymyr.romashko@gmail.com)

National technical university of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv polytechnic institute" [kpi.ua](http://kpi.ua)  
Kyiv, Ukraine

*Abstract*—Features of operation of the switching regulators from the sources of voltage and current are analyzed. Presented schemes of switching regulators of direct current, dual to the switching regulators of direct voltage. The features of the operation of switching regulators when supply them from real voltage and current sources are analyzed. Regulation characteristics, when supply them from the ideal source of voltage and current and taking into account the internal resistance of the source, are considered. It is shown, that since the corresponding schemes of switching regulators of voltage and current are dual, the analytic expressions of their regulation characteristics are analogous. For step-down regulators of voltage and current formulas, for determination the value of the inductance and capacity, taking into account the internal resistance of the power supply source, are proposed.

As an example, the normalized graphs of regulation characteristics for switching step-down regulators of a direct voltage and current are presented. The limitations, by doing of which, presented characteristics, with sufficient accuracy for practical application, describe the properties of real regulators, are indicated.

Ref. 11, fig. 4, tabl. 1.

*Keywords* — switching regulator of direct voltage; switching regulator of direct current; regulation characteristics, internal resistance.

