

УДК 621.314

doi:10.20998/2413-4295.2024.02.08

ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ ІМПУЛЬСНОГО РЕГУЛЯТОРА ПОНИЖУВАЛЬНОГО ТИПУ НА АКУМУЛЯТОР

В. Я. РОМАШКО, Л. М. БАТРАК*

кафедра електронних пристроїв та систем, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, УКРАЇНА

*e-mail: batrakln5@gmail.com

АНОТАЦІЯ Проаналізовано особливості роботи імпульсних регуляторів на акумулятор. Такі регулятори часто використовують для узгодження вихідного опору джерела живлення з опором навантаження. Це необхідно для забезпечення можливості відбирання максимальної потужності від джерела при змінах величини опору навантаження. У випадку використання нетрадиційних та відновлюваних джерел електричної енергії, для більш рівномірного надходження енергії до навантаження, на виході регулятора вмикають акумулятор, який працює в буферному режимі. У таких випадках навантаженням регулятора буде акумулятор, а роль навантаження джерела виконуватиме вхідний опір імпульсного регулятора. Для підвищення надійності роботи акумулятора, треба мати можливість регулювання його зарядного та розрядного струму за допомогою імпульсного регулятора. Для забезпечення виконання зазначених функцій, треба знати регульовальні характеристики регулятора. В роботі проаналізовано особливості роботи імпульсного регулятора понижувального типу на акумулятор, а також визначено умови для забезпечення передачі максимальної потужності від джерела до навантаження. З цією метою було отримано і проаналізовано регульовальні характеристики регулятора, з урахуванням наявності акумулятора на його виході. Оскільки в режимі відбирання максимальної потужності вихідний опір джерела та опір навантаження повинні мати величину одного порядку, при визначенні регульовальних характеристик необхідно враховувати внутрішній опір джерела живлення. Показано, що за наявності акумулятора на виході регулятора, він працюватиме у режимі регулювання струму. При цьому діапазон регулювання буде обмеженим і залежатиме від величини напруги на акумуляторі. Визначено умови, за яких забезпечується відбирання максимальної потужності від джерела живлення. Вказано рекомендовану величину відносної напруги на акумуляторі, за якої забезпечується можливість відбирання максимальної потужності, а також плавне регулювання струму заряду акумулятора в широкому діапазоні.

Ключові слова: імпульсний регулятор понижувального типу; робота на акумулятор; відбирання максимальної потужності; внутрішній опір джерела

OPERATING FEATURES OF STEP-DOWN TYPE PULSE REGULATOR ON BATTERY

V. ROMASHKO, L. BATRAK

Department of Electronic Devices and Systems, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, UKRAINE

ABSTRACT The peculiarities of the operation of pulse regulators on the battery have been analyzed. Such regulators are often used to match the output resistance of the power source with the load resistance. This is necessary to ensure the possibility of taking the maximum power from the source when the load resistance changes. In the case of using non-traditional and renewable sources of electrical energy, for a more uniform supply of energy to the load, a battery that works in buffer mode is turned on at the output of the regulator. In such cases, the load of the regulator will be the battery, and the input resistance of the pulse regulator will perform the role of the source load. To increase the reliability of the battery, it is necessary to be able to adjust its charging and discharging current using a pulse regulator. To ensure the performance of the specified functions, it is necessary to know the regulatory characteristics of the regulator. The article analyzes the features of the operation of the step-down type pulse regulator on the battery, and defines the conditions for ensuring the transfer of maximum power from the source to the load. For this purpose, the regulatory characteristics of the regulator were obtained and analyzed, taking into account the presence of a battery at its output. Since in the maximum power sampling mode, the output resistance of the source and the load resistance must be of the same order, the internal resistance of the power source must be taken into account when determining the regulatory characteristics. It is shown that if there is a battery at the output of the regulator, it will work in the current regulation mode. At the same time, regulation range will be limited and will depend on the voltage on the battery. The conditions under which the maximum power is taken from the power source are ensured. The recommended value of the relative voltage on the battery is indicated, at which it is possible to draw the maximum power, as well as smooth regulation of the battery charge current in a wide range.

Keywords: step-down type pulse regulators; battery operation; maximum power selection; internal resistance of the source

Вступ

Імпульсні регулятори (ІР) мають широке застосування для регулювання величини постійної напруги та струму у навантаженні. В класичній теорії

імпульсних регуляторів припускають, що потужність джерела живлення є значно більшою від потужності навантаження. Тому, при визначенні регульовальних характеристик регулятора, внутрішній опір джерела r не враховують, вважаючи, що $r = 0$ [1]. На сьогодні, у

зв'язку зі значним поширенням нетрадиційних та відновлюваних джерел електричної енергії, часто буває, що потужність навантаження є співмірною з потужністю джерела. Крім того, від таких джерел прагнуть отримати максимально можливу кількість електричної енергії. Для цього робоча точка джерела має перебувати в точці максимальної потужності (ТМП) його вихідної характеристики. Як відомо [2,3], це є можливим у випадку, коли опір навантаження R має таку саму величину, що і внутрішній опір джерела r . Якщо ж вони відрізняються, навантаження до джерела підключають через ІР, який узгоджує опір навантаження з вихідним опором джерела [4-8]. У таких випадках роль опору навантаження для джерела виконуватиме вхідний опір регулятора, який є функцією $R_{ex} = f(R; t^*)$, де R - опір навантаження регулятора, $t^* = t_3/T$ - відносний час замкненого стану ключа регулятора на періоді T . Змінюючи режим роботи регулятора (параметр t^*), можна забезпечити виконання умови $R_{ex} = r$, тобто умову відбирання МП від джерела, для різних величин опору навантаження R .

Особливістю використання нетрадиційних та відновлюваних джерел електричної енергії є те, що дуже часто кількість виробленої ними електричної енергії залежить від зовнішніх умов. Тому, для забезпечення постійного потоку енергії до споживачів, на виході ІР вмикають акумулятор, що працює в буферному режимі [6,9,10]. У таких випадках роль навантаження регулятора виконуватиме акумулятор, а навантаженням джерела буде вхідний опір регулятора.

Мета роботи

Метою статті є аналіз особливостей роботи імпульсних регуляторів на акумулятор та визначення умов, за яких від джерела живлення до акумулятора передаватиметься максимальна потужність.

Виклад основного матеріалу

Визначимо та проаналізуємо на прикладі ІР понижувального типу відповідні регулювальні характеристики регулятора.

Досліджувана схема ІР понижувального типу представлена на рис. 1. Залежність між вхідними та вихідними параметрами такого регулятора у режимі безперервного струму індуктивності L має вигляд [1].

$$U_{вых} = U_{ex} t^*; I_{вых} = I_{ex} / t^* . \quad (1)$$

За наявності акумулятора на виході ІР, можемо вважати, що вихідна напруга регулятора залишається практично постійною і дорівнює $U_{вых} = E_a$, де E_a - напруга акумулятора. При цьому, відповідно до (1), вхідна напруга регулятора має бути рівною

$$U_{ex} = U_{вых} / t^* = E_a / t^* . \quad (2)$$

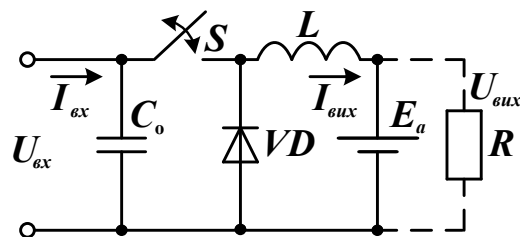


Рис. 1 – Імпульсний регулятор понижувального типу

Якщо вважати, що джерело вхідної напруги є ідеальним ($r = 0$), вхідна напруга регулятора залишатиметься незмінною при змінах струму, що споживається і дорівнюватиме $U_{ex} = E$, де E – електрорушійна сила (ЕРС) джерела напруги. Отже система може перебувати у стані рівноваги лише за певної величини параметра t^*

$$t^* = t_p^* = E_a / E . \quad (3)$$

У випадку $t^* > t_p^*$ струм індуктивності L необмежено зростатиме, а при $t^* < t_p^*$ струм спадатиме, поки ІР не перейде у режим переривчастого струму індуктивності L .

Реальні джерела живлення мають певний внутрішній опір ($r \neq 0$). Тому, при змінах струму, що споживається, вихідна напруга джерела (вхідна напруга ІР U_{ex}) буде змінюватись і залежатиме від вхідного струму ІР I_{ex} . Цю залежність описує вихідна характеристика джерела. Так, у випадку лінійного внутрішнього опору, вихідна характеристика джерела має вигляд [1,11]

$$U = E - I_{ex} r . \quad (4)$$

Отже, система перебуватиме у стані рівноваги, якщо одночасно виконуються обидві умови (2) та (4)

$$E - I_{ex} r = E_a / t^* , \quad (5)$$

або у відносних одиницях

$$1 - I_{ex}^* = E_a^* / t^* , \quad (6)$$

де $E_a^* = E_a / E$; $E = U_{xx}$ - напруга холостого ходу джерела; $I_{ex}^* = I_{ex} / I_{кз}$; $I_{кз} = U_{xx} / r$ - струм короткого замикання джерела.

Враховуючи, що напруга акумулятора E_a та напруга холостого ходу джерела E є фіксованими величинами, можна зробити висновок, що зі зміною параметра t^* змінюватиметься струм, що споживається від джерела (вхідний струм регулятора I_{ex})

$$I_{ex}^* = 1 - E_a^*/t^* , \tag{7}$$

і, відповідно до (1), вихідний струм регулятора (струм заряджання акумулятора $I_{вих}$)

$$I_{вих}^* = I_{ex}^*/t^* = [1 - E_a^*/t^*]1/t^* . \tag{8}$$

Отже, (7) та (8) і є регульовальними характеристиками регулятора (рис.1), за наявності акумулятора на його виході.

Графіки цих характеристик представлено відповідно на рис. 2а та 2б. Проаналізуємо отримані результати.

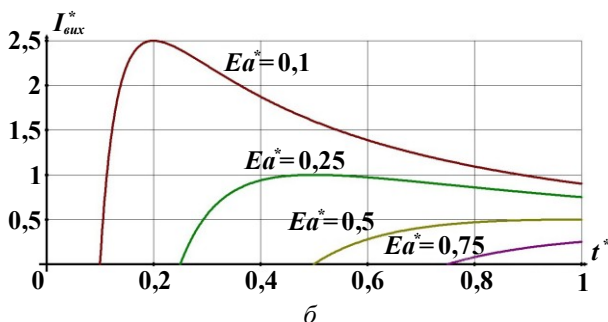
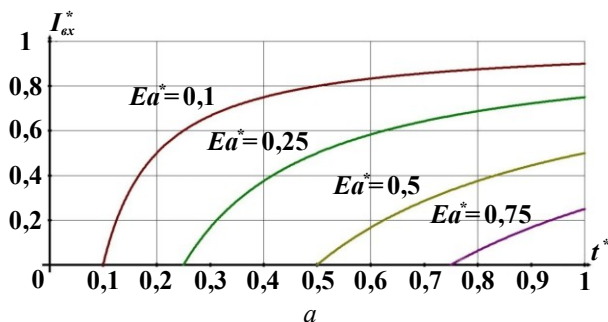


Рис. 2 – Регульовальні характеристики регулятора

Обговорення результатів

Оскільки на виході регулятора стоїть акумулятор, ЕРС якого направлено зустрічно до вхідної напруги, енергія від джерела живлення до акумулятора передаватиметься лише за умови, що $I_{ex} > 0$, або з урахуванням (7)

$$1 - E_a^*/t^* > 0 . \tag{9}$$

Отже, ця умова буде виконана лише у випадку, коли

$$t^* > E_a^* . \tag{10}$$

Оскільки параметр t^* змінюється у діапазоні [0 ... 1], робимо висновок, що за наявності акумулятора на виході, діапазон регулювання параметра t^* в ІР

буде обмеженим і залежатиме від відносної величини напруги акумулятора E_a

$$t^* = [E_a^* \dots 1] . \tag{11}$$

Чим меншою буде величина відносної напруги на акумуляторі, тим ширшим буде допустимий діапазон регулювання параметру t^* .

У випадку лінійного внутрішнього опору джерела живлення, точка максимальної потужності на його вихідній характеристиці має координати $U^* = 0,5, I^* = 0,5$ [2,3].

Зважаючи на те, що вихідний струм джерела одночасно є вхідним струмом регулятора ($I = I_{ex}$), з урахуванням (7) умова виведення джерела в ТМП буде такою

$$1 - E_a^*/t^* = 0,5 . \tag{12}$$

Отже, максимальна потужність передаватиметься від джерела до акумулятора лише за певного значення параметра $t^* = t_{МП}^*$. З урахуванням (12)

$$t_{МП}^* = 2E_a^* . \tag{13}$$

Таким чином, для схеми, що розглядаємо, напруга акумулятора не може бути більшою за ЕРС джерела ($E_a^* \leq 1$). Для забезпечення можливості відбирання від джерела МП, напруга акумулятора не повинна перевищувати. $E_a \leq 0,5$.

Для підвищення надійності роботи акумуляторів у процесі їх експлуатації, необхідно забезпечувати відповідні режими їх заряджання та розряджання [9,12,13]. Зокрема, у процесі заряджання акумулятора необхідно мати можливість плавно регулювати величину його зарядного струму в широкому діапазоні. Очевидно, що ІР може також виконувати цю функцію. Проаналізуємо з цієї точки зору одержані регульовальні характеристики (рис. 2б).

У випадку $E_a^* < 0,5$ регульовальні характеристики, відносно ТМП, складаються з двох ділянок. Ділянки зліва від ТМП забезпечують регулювання струму заряджання акумулятора в широкому діапазоні, однак мають вузький діапазон зміни параметру t^* , внаслідок чого важко забезпечити плавне регулювання струму. Ділянки справа від ТМП дають можливість забезпечити плавне регулювання струму, однак в обмеженому діапазоні.

У випадку $E_a^* > 0,5$ неможливо забезпечити передавання МП від джерела до акумулятора за будь-якого значення параметра t^* . Однак, у цьому випадку регульовальні характеристики складаються з однієї ділянки і дають можливість плавно регулювати струм заряджання акумулятора від нуля до деякого

максимального значення, яке збільшується зі зменшенням E_a^* .

У випадку $E_a^* \approx 0.5$ ще забезпечується можливість відбирання максимальної потужності від джерела, при цьому діапазон регулювання величини струму та параметра t^* є достатньо широким, а регульовальна характеристика струму заряджання акумулятора складається з однієї ділянки, яка близька до лінійної.

Отже, для забезпечення можливості відбирання МП від джерела, а також плавного регулювання струму заряджання акумулятора в широкому діапазоні, доцільно вибирати напругу акумулятора такою, щоб виконувалась умова $E_a^* \approx 0.5$.

Таким чином, одержані регульовальні характеристики дають можливість обрати найбільш сприятливий режим роботи регулятора у випадку його використання з метою відбирання максимальної потужності від джерела, а також для забезпечення оптимальних режимів заряджання акумулятора. Аналогічно можна проаналізувати особливості роботи імпульсних регуляторів інших типів.

Висновки

У випадку підключення акумулятора на виході, ІР працюватиме у режимі регулювання струму заряджання акумулятора.

При роботі ІР на акумулятор, робочий діапазон зміни параметра t^* є обмеженим.

Робота регулятора в режимі відбирання МП від джерела можлива в певному діапазоні зміни напруги акумулятора.

Для забезпечення можливості відбирання МП від джерела, а також плавного регулювання величини струму заряджання акумулятора, для ІР понижувального типу відносно напругу акумулятора доцільно вибирати величиною $E_a^* \approx 0.5$.

Список літератури

1. Гончаров Ю. П., Будьонний О. В., Морозов В. Г., Панасенко М. В., Ромашко В. Я., Руденко В. С. *Перетворювальна техніка: підручник*. Ч. 2. Харків: Фоліо, 2000. 360 с.
2. Панченко С. В., Ананьєва О. М., Бабаєв М. М., Блиндюк В. С., Давиденко М. Г., Карпенко Н. П. *Теорія електричних і магнітних кіл: підручник*. Харків: УкрДУЗТ, 2020. 247 с.
3. Louarem S., Kebbab F.Z., Salhi H., Nouri H. A comparative study of maximum power point tracking techniques for a photovoltaic grid-connected system. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2022. no. 4. P. 27-33. doi: 10.20998/2074-272X.2022.4.04.
4. Twaha S., Zhu J., Yan Y., Li B., and Huang K. Performance analysis of thermoelectric generator using DC-DC converter with incremental conductance based maximum power point tracking. *Energy for Sustainable Development*. 2017. vol. 37. P. 86-98. doi: 10.1016/j.esd.2017.01.003.

5. Olalla C., Clement D., Rodriguez M., et al. Architectures and control of submodule integrated DC-DC converters for photo-voltaic applications. *IEEE Trans. Power Electron.* 2013. 28 (6). P. 2980-2997. doi: 10.1109/TPEL.2012.2219073.
6. Anandhil T. S., Prem Kumar S. Application of DC-DC boost con-verter 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.
7. 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.
8. Ромашко В. Я. Устройства согласования нагрузки с источником электрической энергии. *Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит*. 2013. № 8. С. 67-74. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/8715>.
9. Krieger E. M., Arnold C. B. Effects of undercharge and inter-nal loss on the rate dependence of battery charge storage efficien-cy. *Journal of Power Sources*. 2012. vol. 210. P. 286-291. doi: 10.1016/j.jpowsour.2012.03.029.
10. Vieira J. A. B, Mota A. M. Implementation of a stand-alone photovoltaic lighting system with MPPT battery charging and LED current control. *2010 IEEE International Conference on Control Applications*. 2010. P. 185-190. doi: 10.1109/CCA.2010.5611257.
11. Ромашко В. Я. Регульовальні характеристики імпульсних регуляторів з урахуванням внутрішнього опору джерела електроживлення. *Мікросистеми, Електроніка та Акустика*. 2017. т. 22, вип. 6. С. 29-34. doi: 10.20535/2523-4455.2017.22.6.81414.
12. Srinivasa Kishore Babu Y., Tripura Pidikiti Srinivasa, Kishore Babu Y. A DC-DC converter with battery energy storage system for electric vehicles. *Journal of Control Theory and Applications*. 2016. vol. 33. № 9. P. 61-69. URL: https://serialsjournals.com/abstract/16767_article-7.pdf.
13. Jeff Falin, Li Wang Falin. A boost-topology battery charger powered from a solar panel. *Analog Applications Journal*. 2011. vol. 30. P. 17-20. URL: <https://www.eeweb.com/wp-content/uploads/articles-app-notes-files-a-boost-topology-battery-charger-powered-from-a-solar-panel-1339781150.pdf>.

References (transliterated)

1. Goncharov Y. P., Budonny O. V., Morozov V. G., Panasenko M. V., Romashko V. Y., Rudenko V. S. *Peretovuyvalna technicala. Navchalnyi posibnyk [Power conversion equipment. Textbook]*. Part 2. Kharkiv. Folio Publ., 2000. 360 p.
2. Panchenko S. V., Ananieva O. M., Babaev M. M., etc. *Teoriya elektrychnykh i mahnitnykh kil: Pidruchnyk [Theory of electric and magnetic circuits: Textbook]*. 2nd ed. Kharkiv. UkrDUZT, 2020. 246 p.
3. Louarem S., Kebbab F.Z., Salhi H., Nouri H. A comparative study of maximum power point tracking techniques for a photovoltaic grid-connected system. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2022, no. 4, pp. 27-33, doi: 10.20998/2074-272X.2022.4.04.
4. Twaha S., Zhu J., Yan Y., Li B., and Huang K. Performance analysis of thermoelectric generator using DC-DC converter with incremental conductance based maximum power point tracking. *Energy for Sustainable Development*, 2017, vol. 37, pp. 86-98, doi: 10.1016/j.esd.2017.01.003.
5. Olalla, C., Clement, D., Rodriguez, M., et al. Architectures and control of submodule integrated DC-DC converters for

- photo-voltaic applications. *IEEE Trans. Power Electron.*, 2013, 28 (6), pp. 2980–2997, doi: 10.1109/TPEL.2012.2219073.
6. Anandhil T. S., Prem Kumar S. Application of DC-DC boost con-verter 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.
 7. Sheng-Yu Tseng. A photovoltaic power system using a high step-up converter for DC load application. *Energies*, 2013, vol. 6, pp. 1068-1100, doi: 10.3390/en6021068.
 8. Romashko V. Ya. Ustroystva soglasovaniya nagruzki s istochnikom elektricheskoy energii [Devices for matching the load with a source of electrical energy]. *Energy saving. Power engineering. Energy audit*, 2013, Vol. 1, No. 8, pp. 67-74. Available at: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/8715>.
 9. Krieger E. M., Arnold C. B. Effects of undercharge and inter-nal loss on the rate dependence of battery charge storage efficiency. *Journal of Power Sources*, 2012, vol. 210, pp. 286-291, doi: 10.1016/j.jpowsour.2012.03.029.
 10. Vieira J. A. B, Mota A. M. Implementation of a stand-alone photovoltaic lighting system with MPPT battery charging and LED current control. *2010 IEEE International Conference on Control Applications*, 2010, pp. 185-190, doi: 10.1109/CCA.2010.5611257.
 11. Romashko V. J. Rehuliuvalni kharakterystyky impulsnykh rehuliatoriv z urakhuvanniam vnutrishnoho oporu dzhherela elektrozhyvlennia [Regulation characteristics of switching regulators with taking into account the internal resistance of power supply]. *MikrosistElektronAkust*, 2017, vol. 22, no. 6, pp. 29 – 34, doi: 10.20535/2523-4455.2017.22.6.81414.
 12. Srinivasa Kishore Babu Y., Tripura Pidikiti Srinivasa, Kishore Babu Y. A DC-DC converter with battery energy storage system for electric vehicles. *Journal of Control Theory and Applications*, 2016, vol. 33, № 9, pp. 61-69. Available at: https://serialsjournals.com/abstract/16767_article-7.pdf.
 13. Jeff Falin, Li Wang Falin. A boost-topology battery charger powered from a solar panel. *Analog Applications Journal*, 2011, vol. 30, pp. 17-20. Available at: <https://www.eeweb.com/wp-content/uploads/articles-app-notes-files-a-boost-topology-battery-charger-powered-from-a-solar-panel-1339781150.pdf>.

Відомості про авторів (About authors)

Ромашко Володимир Якович – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», професор кафедри електронних пристроїв та систем; м. Київ, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5429-7685>; e-mail: vy90593-eds@iit.kpi.ua.

Romashko Volodymyr – Doctor of Technical Sciences (DSc), Professor, Professor, Department of electronic devices and systems, National Technical University of Ukraine "Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5429-7685>; e-mail: vy90593-eds@iit.kpi.ua.

Батрак Лариса Миколаївна – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», доцент кафедри електронних пристроїв та систем; м. Київ, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9327-6863>; e-mail: batrakln5@gmail.com.

Batrak Larysa – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Associate Professor, Department of electronic devices and systems, National Technical University of Ukraine "Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9327-6863>; e-mail: batrakln5@gmail.com.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Ромашко В. Я., Батрак Л. М. Особливості роботи імпульсного регулятора понижувального типу на акумулятор. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». 2024. № 2 (20). С. 52-56. doi:10.20998/2413-4295.2024.02.08.

Please cite this article as:

Romashko V., Batrak L. Peculiarities of operation of a step-down type pulse regulator on a battery. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2024, no. 2(20), pp. 52-56, doi:10.20998/2413-4295.2024.02.08.

*Надійшла (received) 02.05.2024
Прийнята (accepted) 17.06.2024*