

УЗАГАЛЬНЕННЯ ОСНОВНИХ ПОЛОЖЕНЬ ДЕКОМПОЗИЦІЇ ТРАНСФОРМАТОРНО-КЛЮЧОВИХ ВИКОНАВЧИХ СТРУКТУР РЕГУЛЯТОРІВ НАПРУГИ З ДИСКРЕТНО-РАЗОВИМ КЕРУВАННЯМ НАПІВПРОВІДНИКОВИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ

К.О. Липківський*, докт. техн. наук, А.Г. Можаровський**, канд. техн. наук
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна.
E-mail: lypkivskyk@ukr.net; AnatMozhrvsk@ukr.net

Виконавчі структури значної частини регуляторів напруги в системах перетворення параметрів електроенергії базуються на комплексуванні напівпровідникових ключових та трансформуючих елементів (КЕ та ТЕ відповідно). Зокрема це трансформаторно-ключові виконавчі структури (ТКВС), у яких обвитки ТЕ секціоновані певним чином або мають проміжні відводи (taps) з під'єднаними до них ключовими елементами. Дискретно-разове керування (discrete time control) цих КЕ дає змогу реалізовувати роботу ТКВС в множині робочих станів з відповідними коефіцієнтами передачі по напрузі. Мета роботи полягала в узагальненні основних положень вдосконалення ТКВС регуляторів напруги шляхом їхньої декомпозиції (поділу на окремі регульовальні блоки) задля забезпечення високої ефективності використання напівпровідникових приладів та зменшення втрат у них. Проаналізовано особливості декомпозиції ТКВС за регулювання напруги змінного та випрямленого струму. Визначено доцільні глибини декомпозиції. Доведено, що операція переформатування секцій у регульовальних блоках, за умов дотримання оптимальних законів секціонування обвитки, забезпечує необхідну ефективність використання КЕ. Подано рекомендації щодо сфер впровадження регуляторів напруги випрямленого струму. Бібл. 7, табл. 3, рис. 3.

Ключові слова: трансформаторно-ключова виконавча структура, дискретно-разове керування, discrete smart transformer, декомпозиція, регульовальні блоки, ефективність.

Виконавчі структури перетворювачів параметрів електричної енергії (зокрема напруги) значної частини систем живлення електротехнічного та електротехнологічного устаткування базуються на комплексуванні силових ключових елементів – КЕ, зокрема, напівпровідникових (тиристорів, симісторів, діодів, транзисторів) та трансформуючих елементів – ТЕ (трансформаторів, автотрансформаторів, вольтододавчих або бустерних трансформаторів чи їхніх поєднань). Серед останніх можна виділити клас ТЕ, обвитки яких секціоновані певним чином або мають проміжні відводи (taps), до яких під'єднуються КЕ. Введення у дію тих чи інших сполучень КЕ дає змогу цілеспрямовано змінювати стан виконавчої структури та, відповідно, коефіцієнт передачі перетворювача по напрузі. Загальна кількість таких робочих станів визначається як кількістю ключових елементів, так і обраним законом секціонування обвитки (обвиток) трансформуючого елемента.

Зазначені перетворювачі виконують, по-суті, єдину функцію – забезпечення подання споживачеві електроенергії необхідної йому напруги. Проте, розробники, наголошуючи на варіативності перетворювачів, дають їм різні назви. Зокрема: adjuster [Zhiyong Liu etc], compensator [Santilio F.P etc], conditioner [James Clark etc], dynamic voltage restorer [Yafeng Wang etc], power converters [Crane A.D. etc], regulator [Degeneff R.C. etc], static voltage regulator [Kramer W.O. etc], automatic regulator [Shah A.M. etc], step regulators [Attia H.A. etc], stabilizer [Pyone Y.Y. etc], тощо. Таке розмаїття назв певним чином свідчить про широкий діапазон їхнього використання, інформації стосовно цього питання дуже багато, зокрема [1–4].

Задля тлумачення сутності побудови цих перетворювачів також пропонується та використовується множина різноманітних означень. Зокрема: tap switching transformer [Pramod P.A. etc], tapping transformer [Shuting M.A. etc], tapped transformer [Hernandez C., etc], multi-tap transformer [Huang M. etc], multi-tapped transformer [Hoque M.M. etc], tap changing transformer [Ismail A.A. etc], multiple winding transformer [Garcia S.M. etc], intelligent transformer [Gehm A.A. etc], smart transformer [1], digital power transformer [2], discrete smart transformer [3], digitalization of transformer [4], тощо. При формулюванні цих термінів була отримана лише певна їхня компактність, але проігноровано дві важливі обставини. По-перше, такі трансформатори застосовуються, як вже зазначалося вище, виключно у

© Липківський К.О., Можаровський А.Г., 2024
ORCID: * <https://orcid.org/0000-0002-3292-1360> ; ** <https://orcid.org/0000-0001-9801-2728>

комплексі з ключовими напівпровідниковими елементами, про які немає жодної згадки. По-друге, вони можуть отримати відповідні "інтелектуальні" (smart, intelligent) властивості тільки в разі наявності системи управління, яка реалізує ці можливості й необхідне саме у цьому випадку дискретно-разове керування (discrete time control [5]) ключовими елементами. У перетворювачах напруги, що розглядаються, зв'язок між КЕ та ТЕ настільки тісний, що ані для аналізу, ані для моделювання чи експерименту їх не можна розглядати окремо й поділити на два блоки – електромагнітний та напівпровідниковий, оскільки їхнє схемотехнічне рішення не є механічним об'єднанням блоків, а являє собою єдине ціле. Виходячи з цих позицій, у [6] було запропоновано подібне сполучення ключових та трансформаторних елементів трактувати як певну трансформаторно-ключову виконавчу структуру – ТКВС перетворювачів параметрів електроенергії.

Під цим визначенням слід розуміти сукупність стійких зв'язків обвитки чи секцій обвиток одного чи кількох трансформуючих елементів (ТЕ) з ключовими елементами – КЕ (керованими та некерованими напівпровідниковими вентилями), що забезпечує цілісність та тотожність самому собі такого виконавчого органу, тобто збереження його основних властивостей за певних внутрішніх та зовнішніх змін, які не зачіпають власне саму структуру. До внутрішніх входять зміни станів, робочих режимів, алгоритмів роботи, до зовнішніх – зміна типу і способу підключення джерела живлення та споживача. Прийняття такого комплексу змін обумовлює важливу властивість ТКВС – принципову можливість використання однієї і тієї самої структури у перетворювачах різного функціонального призначення.

У цій роботі мова йде виключно про регулятори напруги (РН), у яких реалізується цілеспрямована дискретно-разова зміна робочих станів виконавчої структури, загальна кількість яких становить J , з відповідною зміною коефіцієнту передачі по напрузі. Важливим показником якості РН цього класу є ефективність використання ключових елементів (тиристорів), тобто їхньої кількості N для реалізації певного числа робочих станів у разі зміни рівня вихідної напруги регулятора у діапазоні ΔU_2 з кроком регулювання $U_k = \Delta U_2 / J$ (різницею напруг між двома суміжними рівнями). Основним шляхом підвищення коефіцієнту ефективності використання ключів $K_e = J/N$ є декомпозиція структури РН – поділ її на регульовальні блоки (РБ), який дає змогу використати принцип мультиплікативності робочих станів окремих блоків результатом чого є збільшення загальної кількості робочих станів будь-якої структури [7]. Декомпозиція виконавчої структури різних регуляторів напруги має певні особливості.

Метою роботи є узагальнення основних положень декомпозиції трансформаторно-ключових виконавчих структур регуляторів напруги з дискретно-разовим керуванням, визначення доцільної глибини декомпозиції, тобто кількості регульовальних блоків та їхнього формування.

Регулятори напруги змінного струму (РН ЗС) та регулятори напруги випрямленого струму (РН ВС), що базуються на єдиних принципах дискретно-разової зміни коефіцієнта передачі, мають суттєві особливості під час побудови виконавчої структури. РН ЗС відзначаються різноманітністю варіантів – ланцюгові, комбіновані, секціоновані, які отримуються за декомпозиції ТКВС з єдиною вторинною обвиткою, що має проміжні відводи [6]. Виходячи з найбільшої розповсюдженості останніх, обираємо їх за об'єкт дослідження. Комбінування таких РН ЗС з некерованими випрямлячами дає змогу регулювати напругу випрямленого струму, проте це не потребує окремого додаткового розгляду. Видається доцільним тут зупинитися на більш перспективному рішенні цієї задачі, а саме – на використанні як РН ВС багаторівневих випрямлячів (БРВ), в яких одні й ті ж КЕ реалізують як випрямлення змінного струму, так і регулювання вихідної напруги [7]. У попередніх дослідженнях для регуляторів було запропоновано закони секціонування вторинної обвитки трансформатора, які є оптимальними з позиції ефективності використання напівпровідникових приладів. Тому далі будемо дотримуватися саме такого секціонування.

Обмежимося заради компактності та наочності розгляду спочатку прикладом ТКВС з відносно невеликою кількістю тиристорів $N=16$ (зауважимо, що у багатьох зарубіжних патентах пропонуються рішення, у яких загальна кількість ключів вдвічі й навіть втричі більша), розглянемо РН ЗС з 8 парами зустрічно-паралельних тиристорів (рис. 1, *a*) та РН ВС з 8 стійками – парами послідовно з'єднаних тиристорів (рис. 2, *a*). Оскільки, як зазначалося у [7], кількість витків i -тої секції обвитки пропорційна кількості витків найменшої секції W_k , розрахованої на напругу кроку регулювання U_k , тобто $W_i = a_i W_k$, доцільно оперувати їхніми відносними значеннями $W_i^* = a_i W_k / W_k = a_i$. У структурі РН ЗС всі секції обвитки єдиного регульовального блоку ($b=1$) мають однакову кількість витків $W_i = W_k$, тобто для всіх секцій $W_i^* = 1$, що можна представити наступним чином – $[(1), (1), (1), \dots, (1), (1)]$, де звичайні дужки

обмежують нормоване значення витків окремої секції, а квадратні – групи секцій кожного блоку. Можлива кількість рівнів вихідної напруги й, відповідно, число станів при цьому $J=0,5N=8$, тобто $K_e=0,5$.

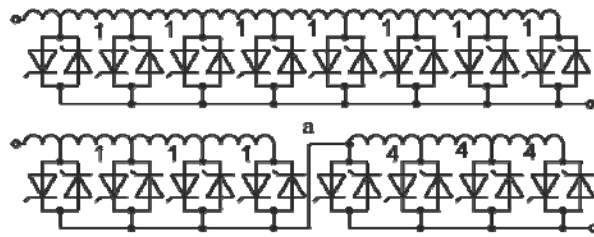


Рис. 1

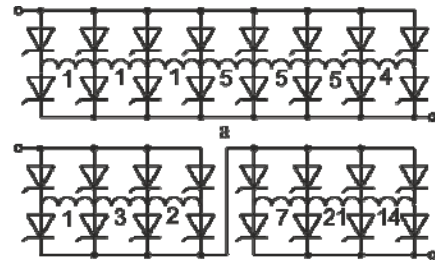


Рис. 2

У структурі РН ВС, завдяки обраному за оптимальним законом секціонування обвитки [7], можна вводити у дію будь-яку окрему секцію чи кілька суміжних секцій, тому максимальна кількість рівнів напруги суттєво вища – $J=22$, тобто $K_e=1,37$. Цю структуру можна представити наступним чином – [(1), (1), (1), (5), (5), (5), (4)]. Зауважимо, що така перевага за рівнем ефективності використання напівпровідникових приладів є притаманною для регулювання випрямленої напруги за будь-якої складності виконавчої структури, тобто за будь-якої кількості ключових елементів.

Наведені у табл. 1 дані ілюструють результати першого кроку декомпозиції вихідних структур з єдиним регулювальним блоком ($b=1$) та

два блоки ($b=2$), що мають однакову кількість ключових елементів (варіант 1). Як видно, загальна кількість можливих рівнів вихідної напруги при цьому значно зростає – у $15/8=1,86$ рази (РН ЗС) та у $48/22=2,8$ рази (РН ВС). Варіанти 2 та 3 поділу на нерівні частини ($N_1=3, N_2=5$ або $N_1=5, N_2=3$) забезпечують дещо (у РН ЗС – $14/15=0,93$) або суттєво (у РН ВС – $39/48=0,81$) менші значення J . Варіативність процесу декомпозиції виявляється і в разі неможливості поділу вихідних структур на рівні частини за кількістю ключових елементів. Так при поділі структур з $N=16$ на три блоки отримуємо по 3 варіанти структури, а результат не змінюється. Це ілюструє табл. 2 (Зауважимо, що такий поділ виявився вдалим для РН ЗС, а для РН ВС поділ на три частини стане доцільним, як буде показано далі, для структур з некрратною трьом кількістю тиристорів, наприклад, з $N=20$ або $N=22$).

Таблиця 1

b	вар	РН ЗС		РН ВС	
1	1	[1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]	$J=8$	[1, 1, 1, 5, 5, 5, 4]	$J=8$
2	1	[1, 1, 1] [4, 4, 4]	$J=15$	[1, 3, 2] [7, 21, 14]	$J=48$
	2	[1, 1] [3, 3, 3, 3]	$J=14$	[1, 2] [4, 4, 16, 12]	$J=39$
	3	[1, 1, 1, 1] [5, 5]		[1, 1, 4, 3] [10, 20]	

Таблиця 2

вар	РН ЗС			РН ВС		
1	[1] [2, 2] [6, 6]	$J=17$	[1] [2, 4] [8, 6]	$J=31$		
2	[1, 1] [3] [6, 6]		[1, 2] [4] [8, 16]			
3	[1, 1] [3, 3]		[1, 2] [4, 8] [16]			

Задля узагальненої оцінки та визначення особливостей таких регуляторів напруги необхідно проаналізувати залежність можливої кількості рівнів вихідної напруги кожного варіанта РН від кількості ключових елементів та глибини декомпозиції – числа окремих регулювальних блоків, на які поділяється вихідна структура ($b=1$). Останнім кроком декомпозиції є поділ на b_{max} елементарних блоків, кожен з яких містить лише одну секцію обвитки трансформатора. Оскільки для введення її у дію або вилучення з контуру струму необхідно чотири КЕ (дві пари зустрічно-паралельно з'єднаних тиристорів у РН ЗС, або дві пари стійок з двох послідовно з'єднаних тиристорів у РН ВС), b_{max} визначається цілою частиною числа ($N/4$). Обмежимося спектром реальних вимог щодо значення J_{max} під час використання прийнятної кількості ключів ($N=12, 14, 16, 18, 20, 24$), виходячи з того, що такі РН не призначені для прецизійного регулювання. Результати розрахунку значень функції $J=f(N, b)$ зведено у табл. 3.

Таблиця 3

b	РН	12	14	16	18	20	22	24
1	ЗС	6	7	8	9	10	11	12
	ВС	13	17	22	27	33	39	46
2	ЗС	8	11	15	19	24	29	35
	ВС	15	27	48	69	99	139	195
3	ЗС	7	11	17	26	35	47	63
	ВС	7	15	31	63	111	195	342
4	ЗС	-	-	15	23	35	55	80
	ВС	-	-	15	31	63	127	255
5	ЗС	-	-	-	-	31	47	71
	ВС	-	-	-	-	31	63	127
6	ЗС	-	-	-	-	-	-	63
	ВС	-	-	-	-	-	-	63

Як видно, за однакових N завжди J буде більшим у РН ВС, й ця перевага зростає зі збільшенням N (за $N=12$ – у 1,9 разу, за $N=24$ – у 4,3 разу). Максимальна кількість рівнів досягається на різних ступенях декомпозиції, тобто за деяких b , що можуть вважатися у цьому сенсі оптимальними: для РН ЗС $b_{\max}=2$ (за $N=12, 14$), 3 (за $N=16, 18, 20$), 4 (за $N=22, 24$); для РН ВС $b_{\max}=2$ (за $N=12, 14, 16, 18$), 3 (за $N=22, 24$). Залежність $J_{\max}=f(N)$ можна апроксимувати виразом: $J_{\max}=0,8e^{0,25N}$, у якого $R^2\approx 0,99$.

На рис. 3 задля наочності наведено залежності $K_e=f(b)$ для трьох значень N – 16, 18, 20 (суцільна лінія – для РН ВС, а пунктирна – для РН ЗС), що найбільше відповідають реальним вимогам споживачів щодо точності регулювання напруги (залучення 22 та 24 тиристорів може бути виправданим лише для РН ЗС). Під час вибору оптимального варіанту РН необхідно брати до уваги те, що зі збільшенням b зростає кількість одночасно працюючих КЕ, тобто зростають втрати на напівпровідникових приладах

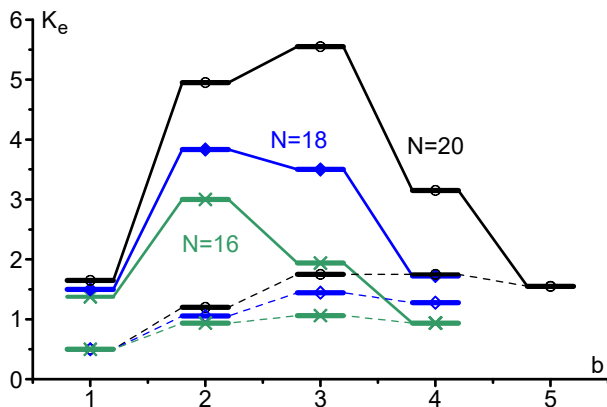


Рис. 3

та, відповідно, вимоги до систем їхнього охолодження. Тому варіанти, отримані за $b > b_{\text{opt}}$, не можна вважати прийнятними. Тому, також, інколи можна обмежитися варіантом $b < b_{\text{opt}}$, якщо при цьому K_e має менше за максимальне, але прийнятне значення. (Так, за $N=24$ можна обрати $b=2 < b_{\text{opt}}$, коли ефективність використання КЕ не набагато менша, ніж за $b=b_{\text{opt}}$). Доцільно звернути увагу на те, що дані табл. 3 засвідчують: найбільш відомий варіант поділу РН ЗС з $N=16$ на 4 групи за так званим двійковим законом – [1] [2] [4] [8] – має таке ж саме значення $K_e=1,25$, як і більш доцільний варіант поділу на два блоки – [(1) (1) (1)] [(4) (4) (4)], а для проміжного варіанту $b=b_{\text{opt}}=3$ маємо $K_e=1,42$.

Отримані результати дають змогу стверджувати, що: регулятори напруги з ТКВС можуть забезпечити необхідну кількість робочих станів структури з відповідними коефіцієнтами передачі по напрузі за прийнятної кількості ключових елементів; РН ВС відзначаються суттєво більшою ефективністю використання КЕ. До того ж, згідно з [7] їм притаманна апріорна відсутність можливості виникнення короткозамкнених контурів секцій обвитки трансформатора при переключеннях, а будь-який збій у роботі КЕ не призведе до аварійної ситуації, при цьому РН просто буде працювати у якомусь незапланованому стані – одному з J унормованих робочих станів, а рівень вихідної напруги не вийде за межі заданого діапазону її регулювання. Це свідчить про доцільність використання саме РН ВС (багаторівневих випрямлячів) у тих випадках, коли навантаження не висуває вимог щодо виду живлячого струму – постійний (випрямлений) чи змінний (печі опору, нагрівачі, тощо).

Таким чином, у роботі виконано узагальнення основних положень декомпозиції ТКВС регуляторів напруги змінного та випрямленого струму, визначено доцільні варіанти поділу структури на окремі регульовальні блоки для різної кількості задіяних ключових елементів, дано певні рекомендації щодо раціонального використання регуляторів напруги випрямленого струму.

Роботу виконано за НДР "Бар'єр-3", розділ "Електромагнітні системи з імпульсними дискретно-разовим принципом керування" (реєстраційний номер 0117U007714), КПКВК 6541030.

1. Vandoorn T.L., De Kooning J.D.M., Meersman B., Guerrero J.M., Vandevelde L. Voltage-based control of a smart transformer in a microgrid. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2011. Vol. 60. Issue 4. Pp. 1291–1305. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2011.2165463>.

2. Willems W., Vandoorn T.L., De Kooning J.D.M., Vandevelde L. Development of a smart transformer to control the power exchange of a microgrid. 4th IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT - Europe 2013). Lyngby, Denmark, 6-9 October 2013. Pp. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISGTEurope.2013.6695300>.

3. GE – Once, Now, Forever. URL: <https://www.ge.com> (дата звернення 25.03.2024).

4. Digitalization of transformers. Control. Regulate. Monitor. URL: <https://www.reinhausen.com/portfolio/transformer-digitalization> (дата звернення 25.03.2024).

5. Bimal K.Bose. Power Electronics – Why the Field is so Exciting. *IEEE Power Electronics Society Newsletter Fourth Quarter*. 2007. Vol. 19. No 4. Pp. 11–20.

6. Липковский К.А. Трансформаторно-ключевые исполнительные структуры преобразователей переменного напряжения. К.: Наукова думка, 1983. 216 с.

7. Липківський К.О., Можаровський А.Г. Особливості декомпозиції багаторівневих випрямлячів за умови заданого обмеження діапазону регулювання вихідної напруги. *Технічна електродинаміка*. 2022. № 2. С. 21–26. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.02.021>.

GENERALIZATION OF THE MAIN PROVISIONS OF THE DECOMPOSITION OF TRANSFORMER-AND-SWITCHES EXECUTIVE STRUCTURES OF VOLTAGE REGULATORS WITH DISCRETE TIME CONTROL OF SEMICONDUCTOR ELEMENTS

K.O. Lypkivskiy, A.G. Mozharovskiy

**Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,
56, Beresteiskiy Ave., Kyiv, 03057, Ukraine.**

E-mail: lypkivskyk@ukr.net; AnatMozhrvsk@ukr.net.

Executive structures of a significant part of voltage regulators in systems of conversion of electricity parameters are based on the integration of semiconductor switch and transforming elements (SE and TE, respectively). In particular, these are transformer-and-switches executive structure (TSES), in which the TE windings are sectioned in a certain way or have intermediate taps with key elements connected to them. Discrete-time control of these KEs makes it possible to realize the operation of TSES in a set of operating states with corresponding voltage transfer coefficients. The purpose of the work was to generalize the main provisions of improving TSES voltage regulators through their decomposition (separation into separate control units) in order to ensure high efficiency of semiconductor devices and reduce their losses. The peculiarities of the decomposition of TSES during the regulation of alternating and rectified current voltage are analyzed. Expedient depths of decomposition are determined. It has been proven the operation of reformatting sections in control units, subject to compliance with the optimal laws of sectioning of the winding, ensures the necessary efficiency of the use of SE. Recommendations are given on the areas of implementation of rectified current voltage regulators. References 7, tables 3, figures 3.

Key words: transformer-and-switches executive structure, discrete-time control, discrete smart transformer, decomposition, adjustment blocks, efficiency.

1. Vandoorn T.L., De Kooning J.D.M., Meersman B., Guerrero J.M., Vandevelde L. Voltage-based control of a smart transformer in a microgrid. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2011. Vol. 60. Issue 4. Pp. 1291–1305. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2011.2165463>.

2. Willems W., Vandoorn T.L., De Kooning J.D.M., Vandevelde L. Development of a smart transformer to control the power exchange of a microgrid. 4th IEEE PES *Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT – Europe 2013)*. Lyngby, Denmark, 6-9 October 2013. Pp. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISGTEurope.2013.6695300>.

3. GE – Once, Now, Forever. URL: <https://www.ge.com> (accessed 25.03.2024).

4. Digitalization of transformers. Control. Regulate. Monitor. URL: <https://www.reinhausen.com/portfolio/transformer-digitalization> (accessed at 25.03.2024).

5. Bimal K. Bose. Power Electronics – Why the Field is so Exciting. *IEEE Power Electronics Society Newsletter Fourth Quarter*. 2007. Vol. 19. No 4. Pp. 11–20.

6. Lypkivskiy K.A. Transformer-and-Switches Executive Structures of Alternating Current Voltage Converters. Kiev: Naukova Dumka, 1983. 216 p. (Rus).

7. Lypkivskiy K.O., Mozharovskiy A.G. Features of decomposition of multilevel rectifiers under conditions of the specific limit of the range of output voltage regulation. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2022. No 2. Pp. 21–26. (Ukr). DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.02.021>.

Надійшла 28.03.2024