

## ОСОБЛИВОСТІ РЕАЛІЗАЦІЇ ФУНКЦІЇ ПЕРЕТВОРЕННЯ ТРАНСФОРМАТОРНО-КЛЮЧОВОЇ ВИКОНАВЧОЇ СТРУКТУРИ РЕГУЛЯТОРА-СТАБІЛІЗАТОРА НАПРУГИ ЗМІННОГО СТРУМУ

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

*Пристрої перетворювальної техніки з трансформаторно-ключовими виконавчими структурами (ТКВС) призначені для реалізації дуальних видів цілеспрямованої зміни величини вхідної напруги  $U_1$  – регулювання та стабілізації вихідної напруги  $U_2$  на будь-якому необхідному її рівні. Для зручності аналізу процесів, що відбуваються при цьому, введено визначення "поля перетворення" (ПП) – зони на площині  $U_1U_2$ , в межах якої знаходиться множина робочих точок перетворювача. Метою роботи є визначення особливостей формування ПП та масиву коефіцієнтів передачі дискретного перетворювача напруги змінного струму. Запропоновано розглядати поле перетворення як сукупність чарунків, у кожному з яких ТКВС діє як звичайний двохобвитковий трансформуючий елемент з притаманним йому коефіцієнтом передачі за напругою. Задачу вирішено в узагальненому вигляді при будь-яких діапазонах стабілізації та регулювання. Визначено залежності кількості коефіцієнтів передачі та їхніх значень від параметрів ПП та припустимої похибки встановлення необхідного значення напруги. Наведено приклади варіантів реконфігурації поля перетворення. Бібл. 10, рис. 5.*

**Ключові слова:** трансформаторно-ключова виконавча структура, tap changing, tap switching, коефіцієнт передачі, регулятор, стабілізатор, поле перетворення, реконфігурація.

Цілеспрямовану зміну величини напруги без спотворення її форми та генерації будь-яких гармонік у мережу живлення доцільно реалізовувати високоефективними пристроями перетворювальної техніки з трансформаторно-ключовими виконавчими структурами – ТКВС [2]. Неодмінною складовою цих структур є трансформуючі елементи (ТЕ) з секціонуванням обвиток (так звані tap changing [5, 7, 10], tap switching [8, 9] або smart transformers [6]), комутацією яких за допомогою напівпровідникових ключових елементів (КЕ) змінного струму [3] з дискретно-разовим керуванням [4] досягається у визначені моменти необхідна зміна коефіцієнта передачі ТКВС за напругою –  $K = U_2/U_1$ .

На основі ТКВС будуються пристрої дуальних видів функціонального перетворення напруги – або її регулювання при незмінній напрузі живлення, або її стабілізації при можливій зміні вхідної напруги у певних межах. Зрозуміло, що внаслідок дискретності керування ці перетворення відбуваються з припустимою відносною похибкою  $\delta$  ( $\delta = (U_{2max} - U_{2min})/U_{2н}$ ), яка задається на етапі проектування пристрою.

Розрахунок та виконання секціонованих трансформуючих елементів (трансформаторів, автотрансформаторів, вольтодавачих трансформаторів або їхньої комбінації) для різних видів перетворення мають свої особливості, які необхідно до того ж врахувати в процесі створення певного "універсального" перетворювача рівня напруги – "регулятора-стабілізатора". Крім того, такий пристрій зможе реалізовувати більш складні види перетворення, а саме – регулювання, в разі потреби, рівня напруги, що стабілізується, або виконання необхідного регулювання вихідної напруги при можливих відхиленнях напруги живлення.

Як було доведено раніше (зокрема, у [1]), доцільним рішенням є варіант побудови такого перетворювача з єдиним автотрансформатором (АТ) та двома комутаторами  $K_{m1}$  та  $K_{m2}$  з  $(N_1 + N_2)$  напівпровідниковими ключовими елементами, що розміщені, відповідно, у первинному та вторинному колі ТКВС (рис. 1). Передбачалося, що вхідний комутатор  $K_{m1}$  повинен реагувати на зміну вхідної напруги і реалізовувати стабілізацію вхідної напруги, а вихідний  $K_{m2}$  – її регулювання [1]. Подальші дослідження дозволили при тій самій кількості можливих станів  $J=N_1 \times N_2$  запропонувати таке алгоритмічне рішення

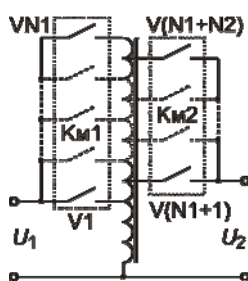


Рис. 1

процесу перетворення (при коригуванні закону секціонування обвиток), за яким ключі обох комутаторів формують коефіцієнти передачі за напругою з єдиної множини  $K_j$  ( $j = \overline{1, J}$ ), члени якої обираються за законом геометричної прогресії  $K_j = K_1 \cdot \gamma^{1-j}$ , де  $K_1 = K_{max}$  ( $K_J = K_{min} = K_{max} \cdot \gamma^{1-J}$ ), а  $\gamma = (1 + \delta)/(1 - \delta)$  [2]. Тобто ключові елементи обох комутаторів не "спеціалізовані", а беруть участь у всіх видах перетворення напруги.

Задля наочності представлення процесів цілеспрямованої зміни вихідної напруги у пристроях цього типу було введено термін "поля перетворення" (ПП) – зони на площині координат  $U_1 U_2$ , у межах якої може знаходитися робоча точка на одній із залежностей вихідної напруги від значення вхідної напруги та завдання регулювання. ПП має у загальному випадку форму прямокутника, обмеженого по горизонталі заданими мінімальними  $U_{ПП min}$  та максимальними  $U_{ПП max}$  значеннями вхідної напруги, нормованими за номінальною її величиною  $U_n$  (відповідно  $\mu = U_{ПП max}/U_n$  та  $\rho = U_{ПП min}/U_n$ ), а по вертикалі – бажаними відносними значеннями мінімальної та максимальної вихідної напруги ( $M = U_{2ПП min}/U_n$  та  $R = U_{2ПП max}/U_n$ ). На рис. 2 крім ПП представлено також відрізки променів, що виходять з нульового значення осей координат, нахили яких відповідають  $J$  значенням коефіцієнтів передачі за напругою, зокрема  $K_1 = \text{tg}\alpha$ ,  $K_J = \text{tg}\beta$ .

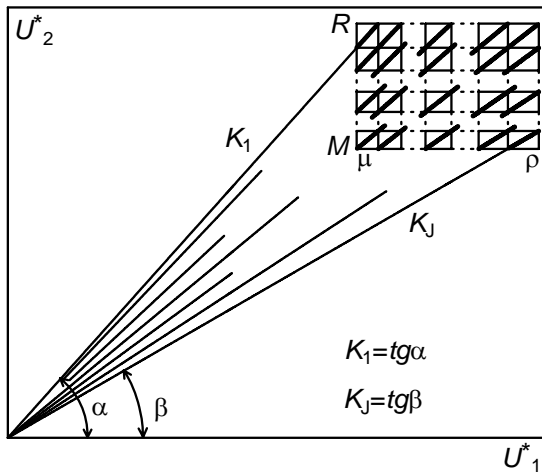


Рис. 2

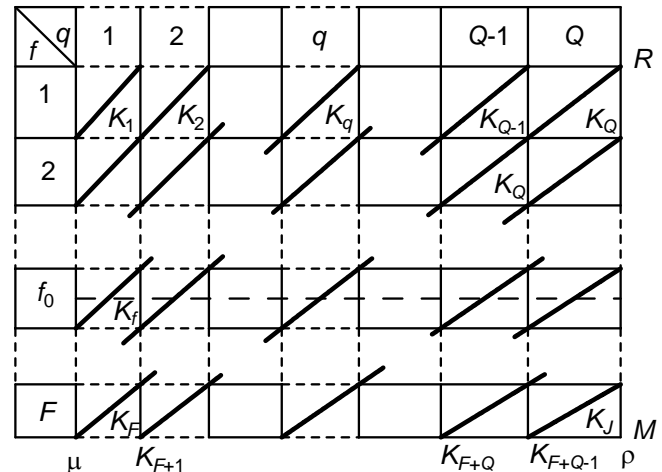


Рис. 3

Мета роботи – визначення особливостей формування поля перетворення та масиву коефіцієнтів передачі трансформаторно-ключової виконавчої структури дискретного стабілізатора напруги змінного струму з плавним регулюванням рівня напруги, що стабілізується.

Зображене у збільшеному масштабі на рис. 3 поле перетворення для зручності аналізу поділене на  $Q$  піддіапазонів стабілізації та  $F$  піддіапазонів (рівнів) регулювання, що попарно межують між собою (тобто найменша та найбільша можливі напруги  $f$ -го рівня співпадають, відповідно з найбільшою напругою  $(f+1)$ -го рівня та найменшою напругою  $(f-1)$ -го рівня). Ще раз наголосимо, що крім вказаних  $F$  рівнів стабілізації, які названі нами "базовими" (розрахунковими), є можливість стабілізувати напругу з тією самою похибкою  $\delta$  на будь-якому іншому рівні, який можна змінювати плавно попри власне дискретний принцип регулювання.

Таким чином, ПП поділяється на  $Q \times F$  окремих чарунків, у кожному з яких ТКВС діє як звичайний двохобвитковий трансформатор з відповідним коефіцієнтом передачі. Нумеруючи (для зручності дослідження) зазначені чарунки, логічним було б обрати за перший чарунок з найбільшим коефіцієнтом передачі  $K_1 = K_{max}$  (для нього  $f=1$ ,  $q=1$ ), а за останній – чарунок з найменшим коефіцієнтом передачі –  $K_q = K_{min}$  (для нього  $f=F$ ,  $q=Q$ ). При цьому множина нетотожних коефіцієнтів передачі, необхідних для виконання всіх функціональних перетворень у межах ПП, дорівнюватиме  $J = F + Q - 1$ . (Зауважимо, що ці чарунки не є тотожними – їхня ширина збільшується у  $\gamma$  разів з кожним кроком зростання параметра  $q$ , а висота, навпаки, зменшується у  $\gamma$  разів з кожним кроком зростання  $f$ . Тобто при  $q=1$  та  $f=F$  маємо найменший за площею чарунок, а при  $q=Q$  та  $f=1$  – найбільший).

Слід підкреслити, що ТКВС має один і той самий коефіцієнт передачі  $K_j$ , одну й ту саму конфігурацію та одну й ту саму пару працюючих КЕ у всіх  $fq$  чарунках, у яких  $(f+q)=j+1$ . Наприклад, якщо  $j=3$ , то це чарунки, для яких  $f=1, q=3$  або  $f=2, q=2$  або  $f=3, q=1$ .

На рис. 3 через  $f_0$  позначено рівень, що відповідає номінальній напрузі  $U_n$ , по якій нормуються всі напруги у ТКВС. У загальному випадку положення  $f_0$  у множині  $f(1, F)$  визначається розташуванням поля перетворення на площині  $U_1 U_2$ .

Поле перетворення характеризується наступними залежностями між введеними коефіцієнтами  $R=M\gamma^F, \rho=\mu\gamma^Q$ , через які знаходять коефіцієнти передачі  $K_1=R/\mu\gamma, K_j=R/\mu\gamma^j, K_J=M\gamma/\rho$ . Залежності цих коефіцієнтів тільки від  $\gamma$  та  $j$  визначаються розміщенням  $f_0$  у множині  $f(1, F)$ , оскільки  $R=\gamma^{f_0-1} + \delta = \gamma^{f_0-1} + (\gamma-1)/(\gamma+1)$ . Так, якщо регулювання рівня напруги, що стабілізується, відбувається тільки у бік зниження, тобто  $f_0=1$ , то  $R=2\gamma/(\gamma+1)$ , а якщо тільки у бік збільшення, то  $R=\gamma^{F-1} + (\gamma-1)/(\gamma+1)$ . Частка найбільшого і найменшого коефіцієнтів передачі, навпаки, не залежить від значення  $f_0$  і дорівнює  $K_1/K_J = R\rho/M\mu\gamma^2$ . Згідно з задекларованим законом зміни коефіцієнтів передачі  $K_1/K_J = \gamma^{J-1}$ , маємо  $R\rho/M\mu\gamma^2 = \gamma^{J-1}$ , звідки знаходимо, що кількість коефіцієнтів передачі  $J$  (нагадаємо  $J=N_1 \times N_2$ ), яка забезпечує підтримання у полі перетворення з параметрами  $R, M, \rho, \mu$  необхідної напруги з похибкою  $\pm\delta$ , дорівнює

$$J = \ln [R\rho(1-\delta)/M\mu(1+\delta)] / \ln [(1+\delta)/(1-\delta)] = \ln(R\rho/M\mu) / \ln[(1+\delta)/(1-\delta)] - 1.$$

Якщо значення  $J$  задається, наприклад, наявними  $N_1$  та  $N_2$ , то можна знайти величину похибки за тих самих параметрів поля перетворення

$$\delta = \left( \sqrt[J+1]{R\rho/M\mu} - 1 \right) / \left( \sqrt[J+1]{R\rho/M\mu} + 1 \right).$$

Ці міркування щодо особливостей формування множини коефіцієнтів передачі та поля перетворення дозволяють перейти до питання можливості його реконфігурації.

Розглянемо конкретний випадок ТКВС – АТ з трьома КЕ у первинному комутаторі Км1 (V1, V2, V3) та трьома КЕ (V4, V5, V6) у вторинному Км2 (тобто  $N_1=N_2=3, J=3 \times 3=9$ ) при регулюванні рівня напруги, що стабілізується, у бік зменшення від номінального значення ( $f_0=1$ ). Припустимо, що діапазони зміни вхідної та вихідної напруг майже не відрізняються. Оберемо ПП з параметрами  $R, M, \rho, \mu$  й однаковими значеннями  $Q$  та  $F$ . З виразу  $J=F+Q-1$  знаходимо  $F=Q=5$  (див. рис. 4, на якому штриховою лінією позначено нормовану номінальну напругу ( $U_n^*=1$ )). Перший (найбільший) коефіцієнт передачі  $K_1$  реалізується при ввімкненні ключів V1 та V6, другий  $K_2$  – ключів V1 та V5,  $K_3$  – V1 та V4,  $K_4$  – V2 та V6,  $K_5$  – V2 та V5,  $K_6$  – V2 та V4,  $K_7$  – V3 та V6,  $K_8$  – V3 та V5,  $K_9$  – V3 та V4.

Для цього ТКВС можна (за необхідності) змінити форму ПП шляхом відповідного коригування співвідношення  $Q$  та  $F$  при незмінній їхній сумі (тобто за тієї самої кількості тих самих коефіцієнтів передачі й тих самих співвідношеннях витків секцій АТ).

Якщо, наприклад, виникає необхідність стабілізації у більш широкому діапазоні зміни вхідної напруги, це можна зробити шляхом збільшення  $\rho$  до  $\rho'=\rho\gamma$  (при цьому  $Q=6$ ) за рахунок звуження діапазону регулювання рівня вихідної напруги шляхом підвищення  $M$  до  $M'$  (при цьому  $F=4$ ).

Аналогічно можна збільшити діапазон регулювання рівня вихідної напруги шляхом зменшення  $M$  до  $M''=M/\gamma$  (при цьому  $F=6$ ) за рахунок зменшення діапазону можливої зміни вхідної напруги шляхом зменшення  $\rho$  до  $\rho''=\rho/\gamma$  (при цьому  $Q=4$ ).

Як видно, в обох випадках зберігається співвідношення  $R\rho/M\mu = R\rho'/M'\mu = R\rho''/M''\mu$ , що підтверджує задекларовану вище незмінність при цих процедурах кількості і значень коефіцієнтів передачі та похибки встановлення напруги.

$f \backslash q$	1	2	3	4	5	$\delta$	$R$
1	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$K_5$		
2					$K_6$		
3					$K_7$		
4					$K_8$		$M'$
5					$K_9$	$M$	$\rho'$
$\delta$					$M''$	$\rho$	$\mu$

Рис. 4

$f \backslash q$	1	2	3	4	5	6
1	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$K_5$	$K_6$
2						$K_7$
3						$K_8$
4						$K_9$
	$\mu$					$\rho$

Рис. 5

в'язані з обраною спочатку множиною коефіцієнтів передачі, то ці переміщення завжди будуть відбуватися вздовж похилих ліній (променів), які їх визначають. Наприклад, якщо у ПП (рис. 4) понизити  $M$  до  $M''=M/\gamma$ , а найвищий рівень напруги з  $R$  до  $R''=R/\gamma$ , то треба зменшити у  $\gamma$  разів  $\rho$  (до  $\rho''=\rho/\gamma$ ) та  $\mu$  (до  $\mu''=\mu/\gamma$ ). При цьому  $R'\rho''/M''\mu'=R\rho/M\mu$ , тобто похибка регулювання залишиться такою самою, як до переміщення.

Отримані результати, які ще раз свідчать про багатоваріантність побудови трансформаторно-ключових виконавчих структур, дозволять цілеспрямовано підходити до розрахунку трансформуючого елемента у ТКВС перетворювачів напруги змінного струму.

**Висновки.** Поле перетворення на площині  $U_1U_2$ , в якому відбувається регулювання або стабілізація напруги на потрібному рівні, доцільно розглядати як сукупність нетотожних чарунків, у кожному з яких ТКВС перетворювача напруги змінного струму діє як звичайний двохобвитковий трансформуючий елемент з певним коефіцієнтом передачі. Можливість реконфігурації поля перетворення, в разі необхідності, є багатоваріантною.

1. Липківський К.О. Особливості регулювання рівня напруги, що стабілізується, за допомогою перетворювача з трансформаторно-ключовою виконавчою структурою // Техн. електродинаміка. – 2012. – № 1. – С. 23–26.
2. Липковський К.А. Трансформаторно-ключевые исполнительные структуры преобразователей переменного напряжения. – Киев: Наук. думка, 1983. – 216 с.
3. Халіков В.А. Обзор stanu та возможностей улучшения организации коммутационных процессов в силовых трансформаторно-ключевых узлах // Техн. електродинаміка. – 2012. – № 5. – С. 28–37.
4. 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.
5. Huang M. Research on the Differential Protection Algorithm of Multi-Tap Special Transformer // Journal of Power and Energy Engineering. – 2014. – Vol. 2. – No 9. – Pp. 98–105.
6. Willems W. Development of a smart transformer to control the power exchange of a microgrid // IEEE PES ISGT Europe 2013. – 2013. – Pp. 1–5.
7. Peter Hammond. Hybrid tap-changing transformer with full range of control and high resolution. Patent US 6472851 B2, G05F1/147, 29.10.2002.
8. James W. Kronberg. Digitally-controlled AC voltage stabilizer. Patent US 6417651 B1, G05F1/14, 2002.
9. Electronic Tap Switching Voltage Regulator. Available at: <http://www.ustpower.com/comparing-automatic-voltage-regulation-technologies/avr-guide-electronic-tap-switching-voltage-regulator/> (accessed 07.12.2016).
10. Engineering articles. Tap changing transformers. Available at: <http://top10electrical.blogspot.com/> (accessed 07.12.2016).

УДК 621.314

## ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ФУНКЦИИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРНО-КЛЮЧЕВОЙ ИСПОЛНИТЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ РЕГУЛЯТОРА-СТАБИЛИЗАТОРА НАПРЯЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

К.А. Липковський, докт.техн.наук, А.Г. Можаровський, канд.техн.наук

Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина.

E-mail: [lypkivskyk@ukr.net](mailto:lypkivskyk@ukr.net); [AnatMozhrvsk@ukr.net](mailto:AnatMozhrvsk@ukr.net)

Устройства преобразовательной техники с трансформаторно-ключевыми исполнительными структурами (ТКВС) предназначены для реализации дуальных видов целенаправленного изменения величины входного напряжения  $U_1$  – регулирования и стабилизации выходного напряжения  $U_2$  на любом необходимом ее уровне. Для

удобства анализа процессов, происходящих при этом, введено определение "поле преобразования" (ПП) – зоны на плоскости  $U_1U_2$ , в пределах которой находится множество рабочих точек преобразователя. Целью работы является определение особенностей формирования ПП и массива коэффициентов передачи дискретного преобразователя напряжения переменного тока. Предложено рассматривать поле преобразования как совокупность ячеек, в каждой из которых ТКВС действует как обычный двухобмоточный трансформирующий элемент с присущим ему коэффициентом передачи по напряжению. Задачу решено в общем виде при любых диапазонах стабилизации и регулирования. Определены зависимости количества коэффициентов передачи и их значений от параметров ПП и допустимой погрешности установки требуемого значения напряжения. Приведены примеры вариантов реконфигурации поля преобразования. Библ. 10, рис. 5.

**Ключевые слова:** трансформаторно-ключевая исполнительная структура, tap chancing, tap switching, коэффициент передачи, регулятор, стабилизатор, поле преобразования, реконфигурация.

## IMPLEMENTATION FEATURES OF THE TRANSFER FUNCTION OF THE TRANSFORMER-AND-SWITCHES EXECUTIVE STRUCTURE OF THE AC VOLTAGE REGULATOR-STABILIZER

K.O. Lypkivskyi, A.G. Mozharovskiy

Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine

pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine.

e-mail: [lypkivskyk@ukr.net](mailto:lypkivskyk@ukr.net); [AnatMozhrvsk@ukr.net](mailto:AnatMozhrvsk@ukr.net)

*Devices of the converter equipment with transformer-and-switches executive structures (TSES) intended for implementation of dual types of purposeful changes in the magnitude of the input voltage  $U_1$ , regulation and stabilization of the output voltage  $U_2$  at any required level. To facilitate the analysis of the processes occurring at the same time, it was introduced the definition of a zone on the  $U_1U_2$  plane as "conversion field", within which there is a plurality of operating points of the converter. The aim of this work is to determine the characteristics of the formation of the conversion field and an array of transfer coefficients of the AC voltage discrete converter. It was proposed to consider the conversion field as a set of cells, in each of which the transformer-and-switches executive structure acts as a conventional two-winding transforming element with inherent voltage transmission coefficient. The problem has been solved in a general form in all ranges of the stabilization and regulation. Dependencies of the number of transfer coefficients and their values from the parameters of the conversion field and the allowable error of the desired voltage value have been determined. Examples of options for the reconfiguration of the conversion field have been presented.*

References 10, figures 5.

**Key words:** transformer-and-switches executive structure, tap chancing, tap switching, transfer factor, regulator, stabilizer, converting field, reconfiguration.

1. Lypkivskyi K.O. Features of regulation of stabilized voltage level by means of converter with transformer-and-switches executive structure // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2012. – No 1. – Pp. 23–26. (Ukr)
2. Lypkivskyi K.O. Transformer-and-Switches Executive Structures of Alternating Current Voltage Converters. – Kiev: Naukova Dumka, 1983. – 216 p. (Rus)
3. Khalikov V.A. Review of the status and opportunities to improve the organization of switching processes in the power transformer and the switches nodes // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2012. – No 5. – Pp. 28–37. (Ukr)
4. 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.
5. Huang M. Research on the Differential Protection Algorithm of Multi-Tap Special Transformer // Journal of Power and Energy Engineering. – 2014. – Vol. 2. – No 9. – Pp. 98–105.
6. Willems W. Development of a smart transformer to control the power exchange of a microgrid // IEEE PES ISGT Europe 2013. – 2013. – Pp. 1–5.
7. Peter Hammond. Hybrid tap-changing transformer with full range of control and high resolution. Patent US 6472851 B2, G05F1/147, 29.10.2002.
8. James W. Kronberg. Digitally-controlled AC voltage stabilizer. Patent US 6417651 B1, G05F1/14, 2002.
9. Electronic Tap Switching Voltage Regulator. Available at: <http://www.ustpower.com/comparing-automatic-voltage-regulation-technologies/avr-guide-electronic-tap-switching-voltage-regulator/> (accessed 07.12.2016).
10. Engineering articles. Tap chancing transformers. Available at: <http://top10electrical.blogspot.com/> (accessed 07.12.2016).

Надійшла 09.12.2016  
Остаточний варіант 12.12.2016