

УДК 621.314

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2019.53.060>

ВПЛИВ РОЗПОДІЛУ ВТРАТ ЕНЕРГІЇ В ЕЛЕМЕНТАХ АВТОТРАНСФОРМАТОРА ТРАНСФОРМАТОРНО-КЛЮЧОВОЇ ВИКОНАВЧОЇ СТРУКТУРИ СТАБІЛІЗАТОРА НАПРУГИ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ЙОГО ВСТАНОВЛЕНОЇ ПОТУЖНОСТІ

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, AnatMozhrvsk@ukr.net

Масогабаритні характеристики трансформаторно-ключової виконавчої структури (ТКВС) стабілізатора напруги змінного струму визначаються виключно ефективністю використання встановленої потужності обраного автотрансформатора (АТ). Збільшення цього показника за умови обмеження максимальної температури елементів АТ, яка залежить від сумарних втрат енергії в них, пов'язано зі зміною величини та співвідношень втрат у осерді магнітопроводу та секціях обвитки АТ. Досліджено ступінь впливу переходу на електротехнічну сталь для магнітопроводу з меншими втратами та/або підвищення розрахункового значення робочої індукції. Тепловий стан елементів АТ для чотирьох варіантів співвідношення втрат у них проілюстровано на 3D моделях об'єкту. Бібл. 11, рис. 2, таблиця 1.

Ключові слова: трансформаторно-ключова виконавча структура, discrete smart transformer, стабілізатор напруги змінної струму, автотрансформатор, секція обвитки, ефективність використання.

Трансформаторно-ключові виконавчі структури – ТКВС (discrete smart transformer, intelligent transformer [1, 2]) з реалізацією дискретно-разової зміни станів та, відповідно, коефіцієнтів передачі (discrete-time control [3]) шляхом комутації ключових елементів (КЕ) здійснюють необхідне перетворення напруги змінного струму (регулювання, стабілізацію) за ап'рорі високого рівня електромагнітної сумісності з мережею живлення та споживачем [4]. Трансформуючі елементи цих ТКВС мають обвитку з виокремленими гальванічно регульовальними секціями або з регульовальними секціями, що утворилися між додатковими відводами єдиної обвитки (tap-changing, tap switching winding [5, 6]). Для коректного розрахунку таких ТЕ розроблено методику, яка враховує неоднаковість струмового завантаження окремих секцій обвитки в процесі перетворення напруги [7]. Вона полягає в попередньому розрахунку напруг і струмів у секціях обвитки ТЕ та втрат енергії в його елементах для всіх можливих робочих станів ТКВС, а також для певного гіпотетичного стану (що не існує на практиці, але саме за яким зазвичай розраховуються ТЕ) та наступним "обваженням" (шляхом збільшення густини струму в секціях обвитки) робочого стану з найбільшим сумарним струмовим завантаженням обвитки до досягнення теплового режиму АТ (зокрема максимальної температури t_{\max}), що відповідає зазначеному гіпотетичному стану. Ця методика дозволяє досягти максимально можливої ефективності використання встановленої потужності ТЕ (P_{TE} , яка дорівнює напівсумі добутків максимальних значень напруг і струмів усіх секцій обвитки), або за обраного типорозміру магнітопроводу забезпечити живлення споживача більшої потужності, або для заданої номінальної потужності споживача P_H обмежитися якомога меншим магнітопроводом. Водночас для коректного порівняння різних варіантів приймається, що вікно магнітопроводу використовується повністю. Коефіцієнт заповнення вікна міддю обвитки обирається стандартним для ТЕ певної потужності (у нашому випадку за потужностей ТЕ на рівні одиниць кіловат $K_{zn} = 0,35$ [8]). Оскільки під час проектування трансформуючого елемента ТКВС обмежується максимальна температура його елементів на певному обраному рівні t_{\max} , що спричинює сумарні втрати енергії в них, досягти підвищення одного з найважливіших показників якості трансформуючого елемента – коефіцієнта ефективності використання

встановленої потужності $K_e = P_{TE}/P_n$ – простим збільшенням щільності струму в секціях обвитки не можна. Видається доцільним розглянути інші шляхи покращення цього показника, що визначає масогабаритні характеристики ТКВС.

Метою роботи є підвищення ефективності використання встановленої потужності автотрансформатора трансформаторно-ключової виконавчої структури стабілізатора напруги змінного струму шляхом перерозподілу втрат енергії в його елементах за зміни магнітної індукції та/або матеріалу осердя магнітопроводу.

За зазначеною в [9] методикою досліджено залежність встановленої потужності автотрансформатора ТКВС стабілізатора напруги від зміни її конфігурації за варіювання діапазону первинної напруги U_1 , у межах якого стабілізується вихідна напруга U_2 . Розглянемо особливості перерозподілу втрат енергії в елементах ТЕ однієї з цих конфігурацій ТКВС (рис. 1) у першому режимі (стані) з найбільшим сумарним струмовим завантаженням секцій обвитки (ввімкнені ключі V1 та V4).

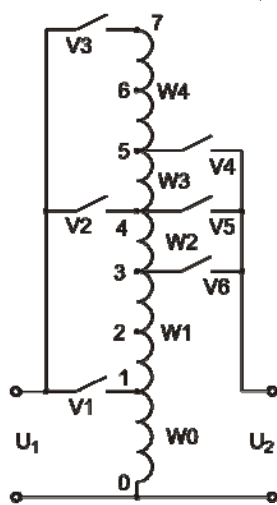


Рис. 1

У цій структурі при шести ключових елементах (по три у вхідному та вихідному комутаторах) забезпечується робота ТКВС у дев'яти станах, що мають коефіцієнти передачі по напрузі, які змінюються за законом $K_j = U_{2j}/U_{1j} = K_1 \cdot \gamma^{j-1}$, де K_1 – перший (найбільший) коефіцієнт передачі, γ – коефіцієнт, що визначається похибкою регулювання δ , $\gamma = (1 + \delta)/(1 - \delta)$, $\delta = (U_{2max} - U_{2min})/2U_n$, де U_{2max} , U_{2min} , U_n – відповідно максимальна, мінімальна та номінальна напруги. Обвитка такого автотрансформатора, крім кінцевих виводів 0 та 7, має шість проміжних структуроутворюючих відводів (у конфігурації задіяно чотири з них – 1, 3, 4, 5). Між кінцевими відводами утворюються одна базова W_0 (конструктивно розміщена найближче до стрижня) та чотири регульовальні секції – W_1 , W_2 , W_3 , W_4 , які розміщені послідовно за W_0 .

Така ТКВС, трансформуючий елемент якої розраховано за зазначеною методикою, реалізує стабілізацію напруги на рівні $U_n = 220$ В з похибкою $\delta = \pm 3\%$ за відхилень вхідної напруги в діапазоні $\Delta U_1 = 168 \div 288$ В. У [9] для дослідження було обрано автотрансформатор (АТ) з магнітопроводом ШЛ40Х80 (маса 7,54 кг) з електротехнічної сталі 3411, який за магнітної індукції $B = 1,2$ Тл (питомі втрати 1,12 Вт/кг [10]), густини струму в обвитках $j_{обв} = 1,73$ А/мм² та обмеження значення температури в елементах АТ на максимальному рівні $t_{max} = 81^\circ\text{C}$ дає змогу живити споживача потужністю 2,72 кВт. Водночас максимальні напруги на секціях обвитки АТ та, відповідно, кількості їхніх витків W_i складають: $U_0 = U_i \cdot \gamma^{-2} = 204$ В ($W_0 = 273$); $U_{W1} = U_i \cdot \gamma^{-2}(\gamma^2 - 1) = 25,03$ В ($W_1 = 35$); $U_{W2} = U_i(\gamma - 1) = 14,02$ В ($W_2 = 19$); $U_{W3} = U_i \cdot \gamma(\gamma - 1) = 14,88$ В ($W_3 = 20$); $U_{W4} = U_i \cdot \gamma^2(\gamma^2 - 1) = 32,59$ В ($W_4 = 44$), а значення струмів у них становлять $I_{W0} = I_n(\gamma^4 - 1) = 2,91$ А, $I_{W1} = I_{W2} = I_{W3} = I_n = 10,72$ А, $I_{W4} = 0$, де I_n – вихідний струм.

Було обчислено втрати енергії в осерді ΔP_{Fe} , у всіх секціях обвитки ΔP_{Cu} та максимальні сумарні втрати в цьому визначальному (з найбільшим струмовим завантаженням обвитки) режимі роботи ТКВС, які внесено у відповідні чарунки таблиці.

В (Тл)	1,2					1,5				
	ΔP_{Fe} (Вт)	ΔP_{Cu} (Вт)	ΔP_{Σ} (Вт)	$\Delta P'_{\Sigma}$ (%)	P_n (кВт)	ΔP_{Fe} (Вт)	ΔP_{Cu} (Вт)	ΔP_{Σ} (Вт)	$\Delta P'_{\Sigma}$ (%)	P_n (кВт)
3411	7,49	25,74	33,23	1,22	2,72	11,70	21,81	33,51	1,06	3,18
3413	5,55	27,48	33,03	1,17	2,82	8,69	24,64	33,33	0,99	3,38

Виконання магнітопроводу АТ зі сталі з меншими втратами, наприклад, сталі 3413 (питомі втрати 0,83 Вт/кг) з $\Delta P_{Fe} = 5,55$ Вт дещо зменшує обмеження на втрати в міді. Завдяки цьому можна обрати більшу густину струму $j = 1,79$ А/мм², збільшити струми в 1,037 раза та, відповідно, підвищити величину припустимої максимальної потужності навантаження до 2,82 кВт ($\delta P_{Fe} = 2,82/2,72 = 1,037$). Отриманий мало вагомий результат пояснюється тим, що

втрати в сталі осердя магнітопроводу АТ значно (приблизно в 3 рази) менші, ніж у міді обвитки, і їх зменшення в 1,35 раза дозволило збільшити втрати в міді лише в 1,069 раза (див. таблицю).

Перехід до підвищеної індукції $B=1,5$ Тл без зміни марки сталі осердя, що використовується, дозволяє (див. таблицю) отримати більш суттєве підвищення максимальної потужності навантаження – $P_n=3,18$ кВт ($\delta P_B=3,18/2,72=1,169$). Це є наслідком того, що за тих же самих напруг на секціях обвитки в разі збільшення індукції в 1,25 раза, на стільки ж зменшується необхідна кількість їхніх витків ($W_0=215$; $W_1=27$; $W_2=15$; $W_3=16$; $W_4=35$) та, відповідно, збільшується площа поперечного перерізу проводів (реально досягається збільшення не в 1,25, а в 1,267 раза внаслідок того, що кількість витків секцій має округлюватися до найближчого цілого значення).

Якщо обирається індукція 1,5 Тл у разі використання електротехнічної сталі 3413, то максимально припустиме значення потужності навантаження досягає 3,38 кВт (див. таблицю), тобто ефективність використання встановленої потужності АТ зростає в 1,24 раза (що дещо більше, ніж очікуване $\delta P_{Fe} \cdot \delta P_B=1,21$).

З таблиці видно також, що, по-перше, втрати енергії в елементах АТ за даної обраної максимальної температури є невеликими відносно P_n (знаходяться в межах, характерних для трансформаторів такої потужності), причому підвищення якості сталі осердя та збільшення індукції призводять до певного зменшення цих втрат, нормованих по відповідних потужностях навантаження $\Delta P'_\Sigma = \Delta P_\Sigma / P_n$ (у 1,16 раза для сталі 3411 та в 1,19 раза для сталі 3413). По-друге, визначати можливий ступінь підвищення ефективності використання встановленої потужності АТ треба не за величиною максимальних загальних втрат енергії, а за досягненням найвищої температури його елементів обраного максимального значення.

З метою визначення і порівняння особливостей розподілу температури в елементах автотрансформатора виконано 3D моделювання теплового стану всіх чотирьох варіантів його реалізації з застосуванням програми COMSOL Multiphysics [11]. До складу обраної моделі АТ входять: осердя магнітопроводу, каркас котушки та п'ять розміщених на ньому секцій обвитки W_0, W_1, W_2, W_3, W_4 . Водночас між усіма його конструктивними елементами відсутні будь-які повітряні проміжки. Каркас котушки виконано з текстоліту товщиною 1мм. Для спрощення властивості всіх складових вважаються ізотропними, й їх теплопровідності становлять: осердя – $\lambda_{оср}=4$ Вт/(м×К), котушки – $\lambda_{кми}=0,2$ Вт/(м×К), а всі секції обвитки мають однакову величину – $\lambda_{обв}=2$ Вт/(м×К). Тепловіддача з усіх поверхонь АТ є незмінною, а її коефіцієнт для розрахунку становить $\alpha=11,77$ Вт/(м²×К). Температура зовнішнього середовища приймається рівною 50 °С. Оскільки конструкція автотрансформатора вважається симетричною в усіх трьох площинах координат відносно центра мас, ми маємо змогу розглянути лише 1/8 частину від його повної моделі.

Результати виконаного моделювання ілюструють рис. 2, а (сталь 3411, $B=1,2$ Тл), рис. 2, б (сталь 3411, $B=1,5$ Тл), рис. 2, в (сталь 3413, $B=1,2$ Тл), рис. 2, г (сталь 3413, $B=1,5$ Тл), на яких зображено ізотерми, що відповідають температурам $t=80$ °С (1) та $t=78$ °С (2). Найбільш гаряча область у діапазоні температур 80,7 – 81 °С виділена темним кольором. З рисунків видно, що за однакової максимальної температури ($t_{max}=81$ °С) температурне поле в чотирьох розглянутих варіантах виконання автотрансформатора відрізняється внаслідок зміни величин та перерозподілу втрат енергії (джерел тепла) в його елементах.

Найбільш гаряча область зосереджена майже виключно на внутрішній (базовій) обвитці W_0 . З підвищенням магнітної індукції в 1,25 раза ця область дещо зменшується, а градієнт температур $\Delta t=81$ °С– t_{max} , навпаки, збільшується в 1,046 раза (для сталі 3411) та в 1,023 раза (для сталі 3413). Прогнозовано область більшого нагріву осердя припадає на варіант з максимальними втратами в сталі (рис 2, б), а найбільш холодним осердя залишається за мінімальних втрат у ньому.

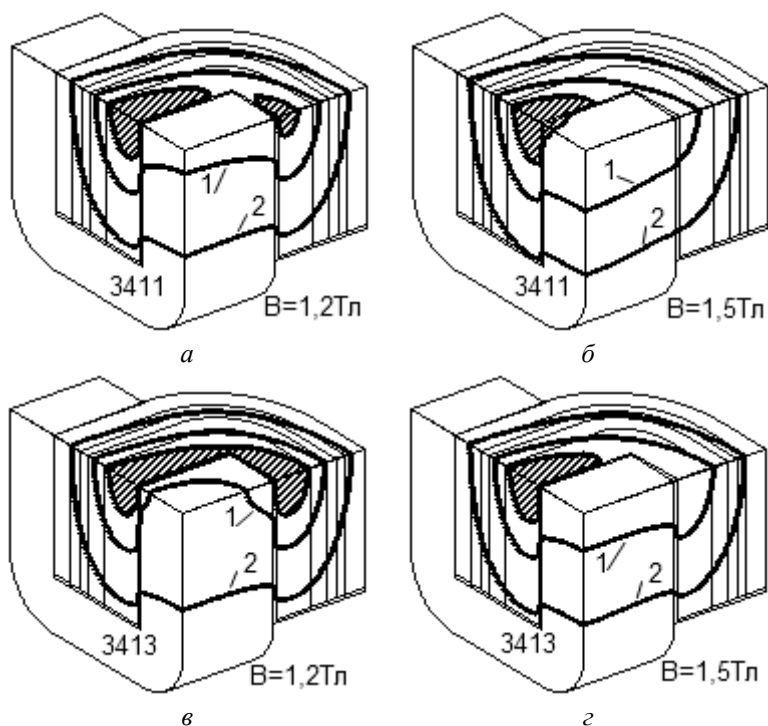


Рис. 2

має загальний характер і може бути використаний під час проектування трансформуючих елементів для ТКВС з іншими типами осердя, зокрема стрижньовими, іншими обмежуючими параметрами: максимальної температури, значення магнітної індукції (в межах лінійного діапазону робочої характеристики) тощо.

Фінансується за держбюджетною темою «Розвиток та узагальнення теорії трансформаторно-ключових виконавчих структур (ТЛВС) перетворювачів напруги з урахуванням багатоваріантності схемотехнічних рішень та мультифізичності процесів» (шифр «Рестан»), що виконується за Постановою Бюро ВФПІЕ 18.11.2014 р., протокол № 16. Державний реєстраційний номер роботи 0115U002579.

1. Willems W., Vandoorn T.L., De Kooning, J. D., Vandeveldel L., Development of a smart transformer to control the power exchange of a microgrid. 4th International Conf. *Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe* (ISGT Europe 2013). 6 – 9 Oct. 2013, At Lyngby, Denmark. Pp. 1 – 5.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ISGTEurope.2013.6695300>
2. Gehm, A. A., Quevedo, J. D. O., Mallmann, E. A., Fricke, L. A., Martins, M. L. D. S., & Beltrame, R. C. Development of a supervisory system for an intelligent transformer. *In Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference* (COBEP/SPEC). 2015 IEEE 13th Brazilian. Pp. 1 – 6.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/COBEP.2015.7420242>
3. 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.
4. Липковський К.А. Трансформаторно-ключевые исполнительные структуры преобразователей переменного напряжения. Киев: Наук. думка, 1983. 216 с.
5. Huang M., Dong L., Zhang J., Wang J., Hao Z. Research on the Differential Protection Algorithm of Multi-Tap Special Transformer. *Journal of Power and Energy Engineering*. 2014. Vol. 2. No 09. Pp. 98 – 105.
DOI: <http://dx.doi.org/10.4236/jpee.2014.29014>
6. Electronic Tap Switching Voltage Regulator. URL: <http://www.ustpower.com/comparing-automatic-voltage-regulation-technologies/avr-guide-electronic-tap-switching-voltage-regulator/> (accessed 28.03.2019).
7. Липківський К.О., Можаровський А.Г. Моделювання трансформуючих елементів з секціонуванням обвиток у складі перетворювачів напруги змінного струму. *Техн. електродинаміка*. 2016. №3. С. 39 – 44. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.03.039>
8. Белопольский И.И., Каретникова Е.И., Пикалова Л.Г. Расчет трансформаторов и дросселей малой мощности. М.: Энергия, 1973. 400 с.
9. Липківський К.О., Можаровський А.Г. Визначення впливу зміни меж діапазону вхідної напруги на потужність трансформуючого елемента стабілізатора напруги з трансформаторно-ключовою виконавчою структурою. *Техн. електродинаміка*. 2019. № 3. С. 46 – 54.
DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.03.046>
10. ГОСТ 27427.1-83 Сталь электротехническая тонколистовая.
11. COMSOL Multiphysics URL: <http://www.comsol.com>.

Проаналізувавши результати моделювання, можна припустити вірогідність певного зменшення нерівномірності нагріву елементів АТ шляхом перерозподілу внесків джерел тепла в картину теплового стану об'єкта варіюванням густини струму в окремих секціях обвитки.

Висновки. Таким чином, у роботі визначено особливості варіантів підвищення ефективності використання встановленої потужності автотрансформатора в складі ТКВС стабілізатора напруги змінного струму шляхом перерозподілу втрат у його елементах та проаналізовано якісну зміну теплового стану об'єкта в разі обмеження максимальної температури на заданому рівні. Розглянутий підхід

УДК 621.314

ВЛИЯНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕМЕНТАХ АВТОТРАНСФОРМАТОРА ТРАНСФОРМАТОРНО-КЛЮЧЕВОЙ ИСПОЛНИТЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ СТАБИЛИЗАТОРА НАПРЯЖЕНИЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЕГО УСТАНОВЛЕННОЙ МОЩНОСТИ**К.А. Липковский**, докт. техн. наук, **А.Г. Можаровский**, канд. техн. наук

Институт электродинамики НАН Украины, пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина

Массогабаритные характеристики трансформаторно-ключевой исполнительной структуры (ТКВС) стабилизатора напряжения переменного тока определяются исключительно эффективностью использования установленной мощности выбранного автотрансформатора (АТ). Увеличение этого показателя при условии ограничения максимальной температуры элементов АТ, которая зависит от суммарных потерь энергии в них, связано с изменением величины и соотношения потерь в сердечнике магнитопровода и секциях обмотки АТ. Исследована степень влияния перехода на электротехническую сталь для магнитопровода с меньшими потерями и/или повышения расчетного значения рабочей индукции. Тепловое состояние элементов АТ для четырех вариантов соотношения потерь в них проиллюстрировано на 3D моделях объекта. Библ. 11, рис. 2, табл.1.

Ключевые слова: трансформаторно-ключевая исполнительная структура, discrete smart transformer, стабилизатор напряжения переменного тока, автотрансформатор, секция обмотки, эффективность использования.

INFLUENCE OF DISTRIBUTION OF ENERGY LOSSES IN THE ELEMENTS OF THE AUTOTRANSFORMER OF THE TRANSFORMER-AND-SWITCHES EXECUTIVE STRUCTURE OF THE VOLTAGE STABILIZER ON THE EFFICIENCY OF USING ITS INSTALLED POWER**K.O. Lypkivskyi, A.G. Mozharovskyi**

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine

The mass-wide characteristics of the transformer-and-switches executive structure (TSES) of the AC voltage stabilizer are determined exclusively by the efficiency of using the installed power of the selected autotransformer (AT). The increase of this parameter, subject to the limitation of the maximum temperature of the elements of AT, which depends on the total energy losses in them, is associated with a change in the magnitude and ratio of losses in the core of the magnetic core and sections of the AT winding. The degree of influence of the transition to electrotechnical steel for a magnetic core with less losses and/or an increase in the calculated value of worker induction is studied. The thermal state of the AT elements for the four variants of the ratio of losses in them is illustrated on the 3D models of the object. References 11, figures 2, table 1.

Key words: transformer-and-switches executive structure, discrete smart transformer, AC voltage stabilizer, autotransformer, winding section, efficiency of use.

1. Willems W., Vandoom T.L., De Kooning, J. D., Vandeveld L., Development of a smart transformer to control the power exchange of a microgrid. 4th International Conf. *Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe* (ISGT Europe 2013). 6–9 Oct. 2013. At Lyngby, Denmark. Pp. 1–5. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ISGTEurope.2013.6695300>
2. Gehm, A.A., Quevedo, J.D.O., Mallmann, E.A., Fricke, L.A., Martins, M.L.D.S., & Beltrame, R.C. Development of a supervisory system for an intelligent transformer. In *Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference* (COBEP/SPEC). 2015 IEEE 13th Brazilian. Pp. 1–6. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/COBEP.2015.7420242>
3. 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.
4. Lypkivskyi K.O. Transformer-and-Switches Executive Structures of Alternating Current Voltage Converters. Kiev: *Naukova Dumka*, 1983. 216 p. (Rus).
5. Huang M., Dong L., Zhang J., Wang J., Hao Z. Research on the Differential Protection Algorithm of Multi-Tap Special Transformer. *Journal of Power and Energy Engineering*. 2014. Vol. 2. No 09. Pp. 98–105. DOI: <http://dx.doi.org/10.4236/jpee.2014.29014>
6. Electronic Tap Switching Voltage Regulator. Available at: <http://www.ustpower.com/comparing-automatic-voltage-regulation-technologies/avr-guide-electronic-tap-switching-voltage-regulator/> (accessed 28.03.2019).
7. Lypkivskyi K.O., Mozharovskyi A.G. Simulation of the transformative elements with sectioning of the windings as part of AC voltage source converters. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2016. No 3. Pp. 39–44. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.03.039>
8. Belopolskyi I.I., Karetnikova E.I., Pikalova L.G. Calculation of low-power transformers and reactors. Moskva: *Energiia*, 1973. 400 p. (Rus)
9. Lypkivskyi K.O., Mozharovskyi A.G. Determination of the power of transforming elements in the reconfiguration of the transformer-and-switches executive structures of AC voltage stabilizers. Analysis of influence factors. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2018. No 3. Pp. 48–55. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.03.048>
10. GOST 27427.1-83 Rolled Electrical Steel. (Rus)
11. COMSOL Multiphysics – <http://www.comsol.com>.