

**Володимир Акнафович Халіков¹, Анатолій Максимович Жерносеков²,
Олександр Федорович Шатан³**

¹доктор технічних наук, старший науковий співробітник, старший викладач кафедри електричних мереж та систем
Національний технічний університет України «КПІ ім. І. Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: xvavlad@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1691-5005>

²доктор технічних наук, старший науковий співробітник, завідувач відділу імпульсних процесів
і технологій дугового зварювання

Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України (Київ, Україна)

E-mail: zhernosekov@paton.kiev.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6404-2221>

³науковий співробітник

Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона Національної академії наук України (Київ, Україна)

E-mail: shatanaf57@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6553-7421>

ВПЛИВ ВНУТРІШНЬОГО ОПОРУ НА ФУНКЦІОНУВАННЯ ТРАНСФОРМАТОРНО-КЛЮЧОВОГО РЕГУЛЯТОРА НАПРУГИ

Виконано аналіз впливу внутрішнього опору трансформаторно-ключового регулятора напруги, що функціонує на принципі дискретно-разового керування ключами. Показано, що вплив внутрішнього опору кожної наступної ступені регулювання трансформаторно-ключового пристрою на задіяний коефіцієнт трансформації повинен бути таким, щоб відношення значень попереднього коефіцієнта до наступного не перевищувало ту саму величину, що є характерною для режиму холостого ходу пристрою. Виконання цієї умови забезпечує незмінність похибки регулювання у процесі роботи при зміні величини чи характеру навантаження.

Ключові слова: трансформатор; ключ; комутація; регулювання напруги; моделювання; Simulink.

Рис.: 8. Бібл.: 8.

Актуальність теми дослідження. Дискретно-ступінчасте або дискретно-разове регулювання напруги шляхом комутації належних відводів силового трансформатора, тобто відповідною зміною коефіцієнта його трансформації, є найпоширенішим способом досягнення необхідних результатів [1-3]. Проте, при цьому не висвітлюються питання впливу внутрішнього опору компонентів силового пристрою в частині збільшення похибки регулювання. Тому актуальними є дослідження щодо поліпшення ефективності функціонування такого роду пристроїв.

Постановка проблеми. Сьогодення характеризується широким використанням цифрових систем управління та регулювання. Тенденції до функціонального та апаратного ускладнення такого роду електротехнічних установок вимагають належного комп'ютерного моделювання систем управління і їхніх вузлів, а також силових вузлів такого роду установок. Використання програмних середовищ візуального об'єктно-орієнтовного моделювання дозволяє одержати нові достовірні та наочні результати, що загалом спрощує аналіз та сприяє їх більш ґрунтовному осмисленню. Це передусім також стосується використання поширеного і постійно оновлюваного пакета MatLab/Simulink.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Дослідження виконавчих вузлів регулювання напруги, що реалізуються у вигляді комбінаційного поєднання багатообмоткових трансформаторів та ключів широко висвітлюється у наукових публікаціях [4-8]. Основним завданням, що вирішується при цьому, є формування бажаної форми регульовальної характеристики шляхом вибору необхідних виткових співвідношень трансформаторів і відповідного увімкнення до виводів тих чи інших обмоток, комутаційних компонентів. При цьому ставляться задачі по мінімізації кількості обмоток, ключів, трансформаторів, зменшення струмів, що комутуються тощо.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Здебільшого такі завдання вирішуються за умов незмінності навантаження чи нехтування його впливом, що може бути неприйнятним, але завжди є першим етапом вибору схеми силового регулятора. Природно, що при регулюванні його внутрішній опір змінюється, оскільки зміна напруги реалізується в процесі послідовних переходів від одного коефіцієнта трансформації до

іншого. Тому залишається необхідність подальших досліджень щодо розширення таких завдань у частині визначення прийнятних умов впливу внутрішнього опору трансформаторно-ключового регулятора напруги (ТКРН).

Метою дослідження є визначення прийнятних умов впливу внутрішнього опору ТКРН, що змінюється у процесі регулювання, за яких би забезпечувалася одна і та ж похибка регулювання.

Виклад основного матеріалу. Проаналізуємо проблему регулювання напруги на прикладі виконання трьохключового силового ТКРН, що забезпечує підтримку рівня вихідної напруги U_2 (рис. 1) у межах від $U_{2.1}$ до $U_{2.2}$ в діапазоні вхідної напруги U_1 у межах від $U_{1.1}$ і до $U_{1.4}$ (рис. 2).

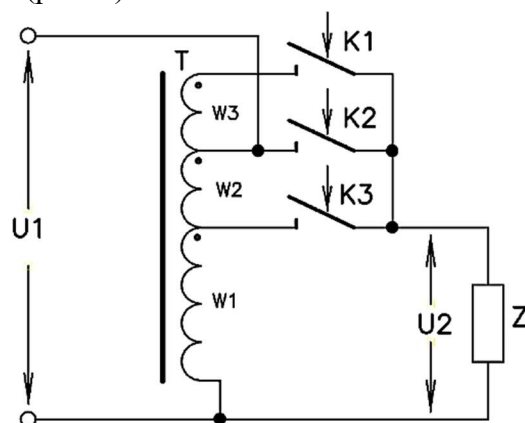


Рис. 1. Трьохключовий регулятор напруги

Виходячи з геометричних положень, значення коефіцієнтів трансформації K_t дорівнюють величині тангенса кута нахилу відповідної прямої до осі вхідної напруги U_1 . Сама величина вихідної напруги U_2 визначається витковими співвідношеннями автотрансформатора та одним із трьох увімкнених ключів ($K_1 \dots K_3$, рис. 1). Тобто піддіапазони вхідної напруги $U_{1.1} - U_{1.2}$, $U_{1.2} - U_{1.3}$, $U_{1.3} - U_{1.4}$ (рис. 2) відповідають увімкненому стану відповідно ключів K_1 , K_2 , K_3 .

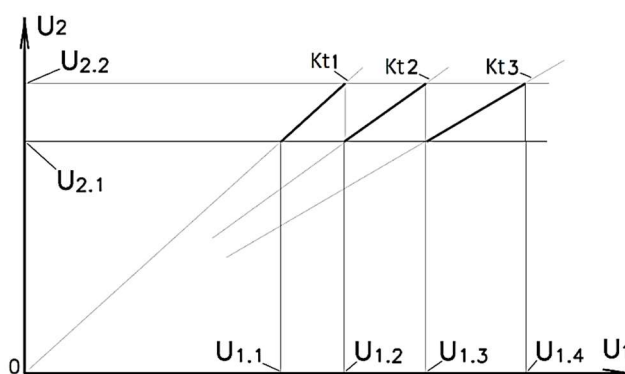


Рис. 2. Графічна діаграма роботи трансформаторно-ключового регулятора напруги

З рис. 2 випливає, що $K_{t1} = U_{2.2}/U_{1.2}$, а $K_{t2} = U_{2.1}/U_{1.2}$. Враховуючи відношення цих виразів один до іншого, одержимо: $K_{t1}/K_{t2} = U_{2.2}/U_{2.1}$. Ці співвідношення пов'язують необхідні значення K_t і похибку регулювання системи, що визначається різницею $U_{2.2} - U_{2.1}$. Якщо позначити: $\gamma = K_{t1}/K_{t2} = U_{2.2}/U_{2.1}$, то очевидно, що кожен наступний коефіцієнт трансформації, який повинен бути використаний на черговому ступені регулювання повинен бути більший або менший на ту ж саму величину – γ . Власне дотри-

мання цієї умови стоїть в основі комбінаційного синтезу ТКРН регулювання змінної напруги. Для спрощення, як правило, такий аналіз виконується при нехтуванні внутрішнім опором обмоток трансформаторів та ключових компонентів схеми, тобто відповідає режиму холостого ходу (XX) пристрою.

Конкретнішим та наочнішим є використання середовища *MatLab/Simulink*. У такому разі, для схеми (рис. 1) за умов, що $U_{2.1} = 210\text{В}$ і $U_{2.2} = 230\text{В}$ розрахункові співвідношення можуть мати вигляд, як на рис. 3

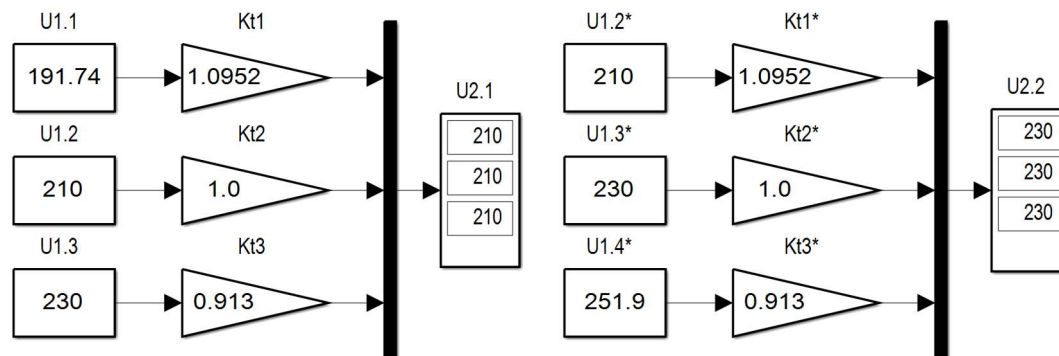


Рис. 3. Обчислювальна модель для схеми рис. 1

При цьому графічна діаграма роботи ТКРН (рис. 2) прийме вид більш конкретний вид, що наведений на рис. 4.

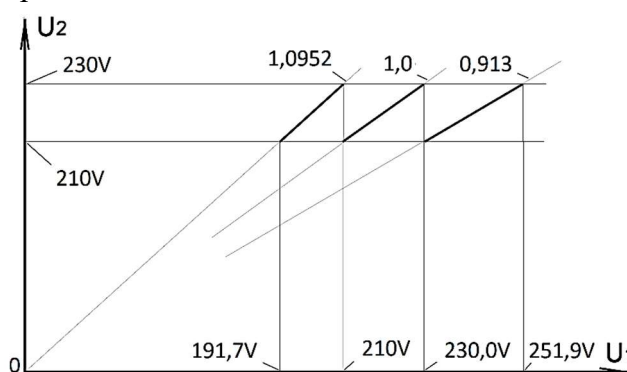


Рис. 4. Графічна діаграма роботи трансформаторно-ключового регулятора напруги

Для реалізації обчислювальної моделі ТКРН (рис. 3) достатньо кількості компонентів базової бібліотеки *MatLab/Simulink*. Це: Constant – для задання характерних значень вхідної напруги $U_{1.1}$, $U_{1.2}$, $U_{1.3}$, $U_{1.4}$ та Gain – представлення відповідного коефіцієнта трансформації (K_{tn}). Інші компоненти візуальної моделі обчислень виконують функцію виведення одержаних результатів.

Для цього конкретного випадку (рис. 3, рис. 4) $\gamma = U_{2.2}/U_{2.1} = 230/210 = 1,0952$, тобто при коефіцієнті трансформації $K_{t2} = 1,0$ (при увімкненому ключі K_2 , рис. 1) суміжні коефіцієнти повинні мати значення $K_{t1} = K_{t2} \times \gamma = 1,0952$, а $K_{t3} = K_{t2}/\gamma = 0,913$. Подібним чином визначаються і значення $U_{1.1} \dots U_{1.4}$, а різниця (рис. 4) $U_{1.4} - U_{1.1} = 251,9 - 191,7 = 60,2\text{ В}$ відповідає величині діапазону вхідної напруги U_1 .

Проте очевидно, що кожен індуктивний компонент ТКРН має свій внутрішній опір, в цьому випадку активно-індуктивного характеру, що можна представити як варіації цього опору в процесі зміни конфігурації ТКРН в процесі регулювання. Заналом з варіацією навантаження Z (рис. 1) це приводить до синхронних змін коефіцієнтів трансформації, вихідної напруги тощо.

Проаналізуємо схему, наведену на рис. 1. Увімкненому стану ключа K2 відповідає нульове значення внутрішнього опору ТКРН (при нехтуванні падінням напруги на ключах), а в інших станах (при увімкнених K1, або K3) його величина уже буде визначатися активним опором та індуктивністю розсіювання відповідних обмоток. Таким чином, це призводить до зменшення значень K_{t1} , K_{t3} за незмінної величини K_{t2} . Якщо допустити зменшення на K_{t1} і K_{t3} на 5 %, то розрахункова модель (рис. 5) та діаграма роботи ТКРН (рис. 6) дещо модифікуються та матимуть суттєво інший вигляд.

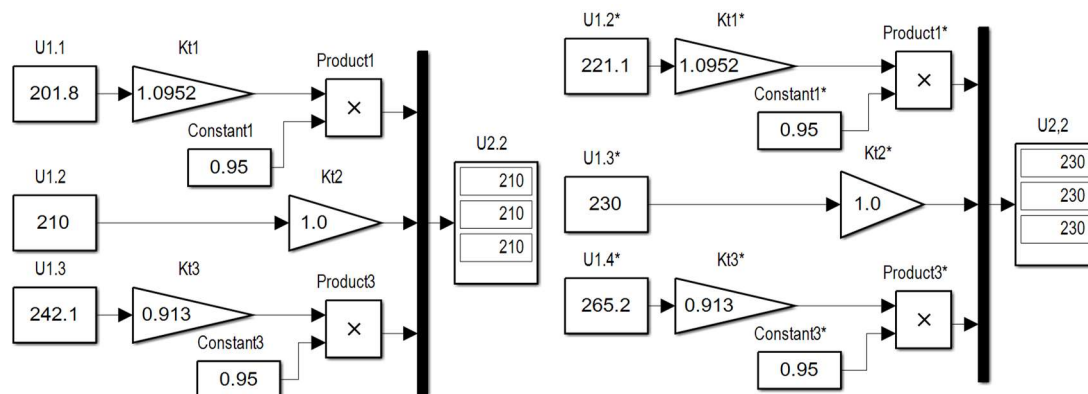


Рис. 5. Обчислювальна модель з урахуванням активного опору та індуктивності

Із порівняння рис. 4 та рис. 6 видно, що дещо збільшилось значення нижньої межі (201,8 В) діапазону вхідної напруги, проте більш суттєвим є розрив графічної діаграми роботи регулятора (230–242,1 В) при заданих межах U_2 (210–230 В). Це призводить до втрати працездатності системи шляхом переходу до стану автоколивальності в межах такого розриву. Відновлення функціональності можливо при зниженні значення $U_{2.1}$ до значення, меншого за величину проекції точки «а» (рис. 6) на вісь U_2 , проте це рівноцінно суттєвому збільшенню похибки регулювання.

Очевидно, що, як варіант, відновити якісні показники системи можна увімкнувши послідовно з ключем K2 (рис. 1) індуктивність, з характером повного опору, аналогічному еквівалентному опору автотрансформатора (Т) при його задіяній тій чи іншій секції (W2 або W3). Відповідно і розрахункова схема (рис. 5) повинна бути модифікована шляхом увімкнення двох додаткових компонентів (блоки перемноження – Product і відображення зменшення значення K_t – Constant), що виконують функцію зменшення задіяних у ТКРН відповідних коефіцієнтів трансформації. Після цього та у разі спрощення конфігурації розрахункової моделі (рис. 5) вона буде мати вигляд, наведений на рис. 7.

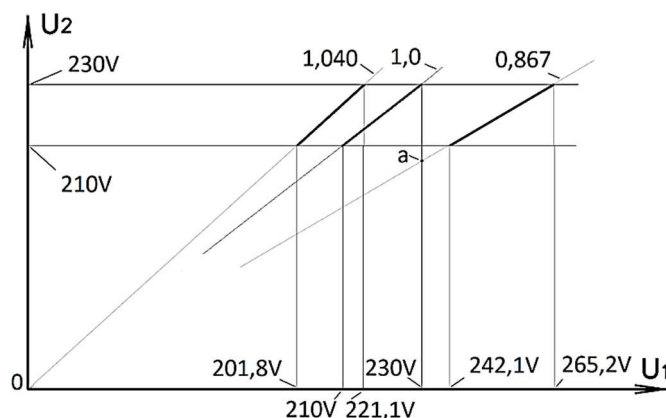


Рис. 6. Графічна діаграма роботи трансформаторно-ключового регулятора напруги по моделі рис. 5

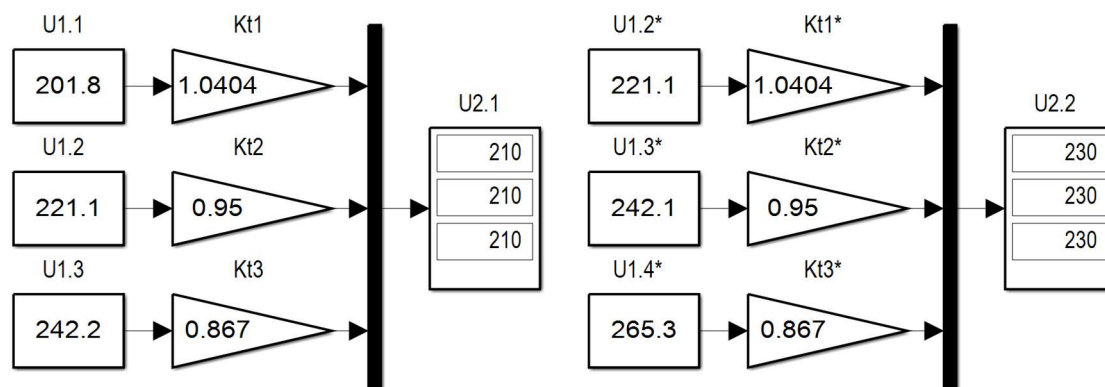


Рис. 7. Обчислювальна модель з урахуванням незмінності похибки регулювання

Цій розрахунковій моделі відповідає графічна діаграма роботи ТКРН, яка наведена на рис. 8.

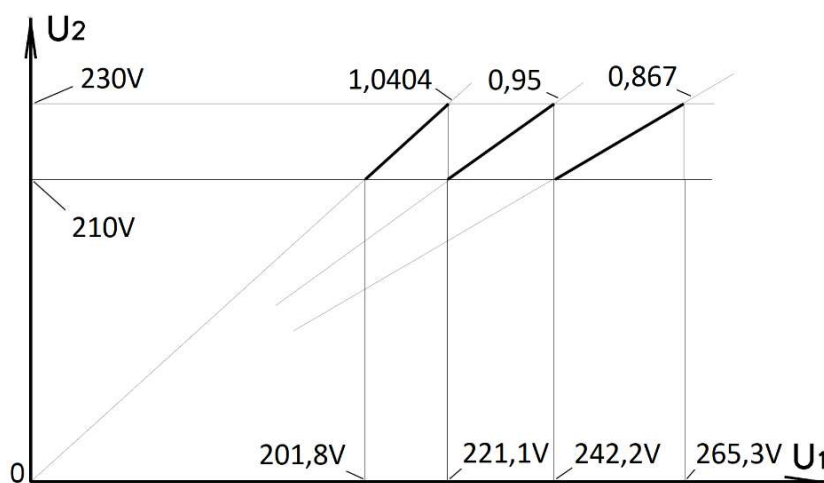


Рис. 8. Графічна діаграма роботи трансформаторно-ключового регулятора з незмінністю похибки регулювання

Якщо порівняти діаграму рис. 8 з аналогічною, характерною для режиму ХХ ТКРН, наведеною на рис. 4, то видно їх аналогічність по формі. Тобто таким способом виконано відновлення функціональності ТКРН при таких же значеннях у межах похибки регулювання ($U_{2\max} - U_{2\min} = 230 - 210$ В), як і при режимі ХХ.

Висновки. Таким чином, щоб забезпечити незмінність похибки регулювання у процесі роботи при зміні навантаження, вплив внутрішнього опору кожної наступної ступені регулювання трансформаторно-ключового пристрою на задіяний коефіцієнт трансформації K_t повинен бути таким, щоб відношення значень попереднього коефіцієнта $K_{t(n-1)}$ до наступного K_{tn} не перевищувало величину $\gamma = K_{t(n-1)}/K_{tn}$, що є характерним для режиму холостого ходу пристрою. При цьому робочий діапазон вхідної напруги відповідно зміститься, але форма діаграми роботи відносно вихідної напруги залишиться в тих самих межах.

Список використаних джерел

1. Vandoorn, T. L., De Kooning, J. D. M., Meersman, B., Guerrero, J. M., & Vandevelde, L. (2013). Voltage-Based control of a smart transformer in a microgrid. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60(4), 1291-1305. <https://doi.org/10.1109/tie.2011.2165463>.
2. Липківський, К. О., Халіков, В. А., & Мажаровський, А. Г. (2012). Пристрій для регулювання величини напруги змінного струму (Патент № 67805, Україна). *Промислова власність*, (5).

3. Willems, W., Vandoorn, T. L., De Kooning, J. D. M., & Vandevelde, L. (2013b). Development of a smart transformer to control the power exchange of a microgrid. *У 2013 4th IEEE/PES innovative smart grid technologies europe (ISGT EUROPE)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/isgteurope.2013.6695300>.

4. Huang, M., Dong, L., Zhang, J., Wang, J., & Hao, Z. (2014). Research on the differential protection algorithm of multi-tap special transformer. *Journal of Power and Energy Engineering*, 02(09), 98-105. <https://doi.org/10.4236/jpee.2014.29014>.

5. Adasur, M. P. P., & Chougule, D. G. (2016). *A review of power transformer tap switching using semiconductor devices*. *JournalNX – A Multidisciplinary Peer Reviewed Journal*, 2(6), 16-18. <https://repo.journalnx.com/index.php/nx/article/view/1025>.

6. Trentini, A. (2018). *The use of smart transformer in the presence of dispersed generation* (Master's thesis, Politecnico di Torino). Politecnico di Torino Institutional Repository.

7. Singh, D. K., Singh, J., & Ravela, R. R. (2020). Design and performance study of cost effective smart servo controlled automatic voltage stabilizer. *У 2020 international conference on electrical and electronics engineering (ICE3)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ice348803.2020.9122815>.

8. Липківський, К., & Можаровський, А. (2024). Узагальнення основних положень декомпозиції трансформаторно-ключових виконавчих структур регуляторів напруги з дискретно-разовим керуванням напівпровідниковими елементами. *Технічна електродинаміка*, (3), 036. <https://doi.org/10.15407/techned2024.03.036>.

References

1. Vandoorn, T. L., De Kooning, J. D. M., Meersman, B., Guerrero, J. M., & Vandevelde, L. (2013). Voltage-Based control of a smart transformer in a microgrid. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60(4), 1291-1305. <https://doi.org/10.1109/tie.2011.2165463>.

2. Lypkivskyi, K. O., Khalikov, V. A., & Mozharovskyi, A. H. (2012). Prystrii dlia rehuliuвання velychyny napruhy zminnoho strumu. Patent. № 67805 na korysnu model vid 12.03.2012 r. (Ukraine).[Device for regulating the magnitude of alternating current voltage (Patent No. 67805, Ukraine)]. *Promyslova vlasnist – Industrial Property*, (5).

3. Willems, W., Vandoorn, T. L., De Kooning, J. D. M., & Vandevelde, L. (6-9 October 2013). 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)* (pp. 1-5). Lyngby, Denmark. <https://doi.org/10.1109/ISGTEurope.2013.6695300>.

4. Huang, M., Dong, L., Zhang, J., Wang, J., & Hao, Z. (2014). Research on the Differential Protection Algorithm of Multi-Tap Special Transformer. *Journal of Power and Energy Engineering*, 2(9), 98-105. <https://doi.org/10.4236/jpee.2014.29014>.

5. Adasur, Mr Pramod Prakash, & D. G. (2016). Chougule. A review of power transformer tap switching using semiconductor devices. *Journal NX*, 2(6), 16-18. <https://repo.journalnx.com/index.php/nx/article/view/1025>.

6. Trentini, A. (2018). *The use of smart transformer in the presence of dispersed generation* [Diss. Politecnico di Torino].

7. Singh, D.K., Singh, J., & Ravela, R.R. (2020). Design and Performance Study of Cost Effective Smart Servo Controlled Automatic Voltage Stabilizer. *International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICE3)* (pp. 211-215). <https://doi.org/10.1109/ICE348803.2020.9122815>.

8. Lipkivskyi, K., & Mozharovskyi, A. (2024). Uzahalennia osnovnykh polozhen dekompozitsiyi transformatorno-klyuchovykh vykonavchykh struktur rehulyatoriv napruhy z dyskretno-razovym keruvanniam napivprovodnikovymy elementamy [Generalisation of the main provisions of the decomposition of transformer-key executive structures of voltage regulators with discrete single-shot control by semiconductor elements]. *Tekhnichna elektrodynamika – Technical electrodynamic*, (3), 36-40. <https://doi.org/10.15407/techned2024.03.036>.

Отримано 10.08.2025

Volodymyr Khalikov¹, Anatolii Zhernosekov², Alexander Shatan³

¹Doctor of Technical Sciences, Senior Research Fellow, Senior Lecturer of Electrical Networks and Systems Department
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky KPI» (Kyiv, Ukraine)

E-mail: xvavlad@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1691-5005>

²Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher,
Head of Department of Impulse Processes and Arc Welding Technologies E. O. Paton Electric Welding Institute (PWI) (Kyiv, Ukraine)

E-mail: zhernosekov@paton.kiev.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-6404-2221>

³Scientific Researcher

E. O. Paton Electric Welding Institute (PWI) (Kyiv, Ukraine)

E-mail: shatanaf57@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-6553-7421>

VOLTAGE REGULATION OF THE TRANSFORMER-SWITCHED DEVICE

Discrete-one-time voltage regulation by switching the appropriate taps of the power transformer and correspondingly changing its transformation ratio is the most common and obvious way to achieve the desired results. The synthesis of such voltage regulation actuators is based on a combination of multi-winding transformers and switches. The effect of the internal resistance of the transformer windings is often not taken into account. This affects the accuracy of maintaining the required voltage at the device output. The paper shows that this leads to a violation of the visual integrity of the graphic diagram of the operation of the regulating body, which can lead to a disruption of the operation of the control system, or the need to significantly increase the regulation error. Using graphical tools and MatLab/Simulink, it is shown that it is possible to avoid this problem by simple means. Understanding the problem is shown on a simple example of implementing a three-key power transformer-key voltage regulator, which must ensure that the output voltage level is maintained within specified limits during variations in the input voltage and load magnitude.

To ensure that the control error remains constant during operation when the load changes, the effect of the internal resistance of each subsequent control stage of the transformer-switch device on the transformation ratio involved must be such that the ratio of the values of the previous coefficient to the next does not exceed the same value. For such discrete-time voltage regulators, this value should be the same as for the idle mode. In general, this ratio also determines the regulation error of the system.

Keywords: transformer; switch; switching; voltage regulation; simulation; Simulink.

Fig.: 8. **References:** 8.