

Валерій Кирик¹, Володимир Халіков², Анатолій Жерносков³, Олександр Шатан⁴

¹доктор технічних наук, професор кафедри електричних мереж та систем
Національний технічний університет України «КПІ ім. І. Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: vkuryk@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-0419-8934>

²доктор 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>. **Scopus Author ID:** [55327787500](https://orcid.org/0000-0003-1691-5005)

³ доктор технічних наук, старший науковий співробітник,
завідувач відділу імпульсних процесів і технологій дугового зварювання
Інститут електрозварювання ім. С. О. Патона НАН України (Київ, Україна)
E-mail: zhernosekov@paton.kiev.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-6404-2221>. **Scopus Author ID:** [6506774085](https://orcid.org/0000-0002-6404-2221)

⁴науковий співробітник
Інститут електрозварювання ім. С. О. Патона Національної академії наук (Київ, Україна)
E-mail: shatanaf57@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-6553-7421>

**КОМУТАЦІЙНИЙ СТРУМ ПЕРВИННОЇ ОБМОТКИ ТРАНСФОРМАТОРА
ПРИ ВАРІАЦІЯХ СТРУМУ ЙОГО ХОЛОСТОГО ХОДУ**

У роботі розглянуто аспекти перехідних процесів, що виникають при комутації силових трансформаторів. Показано, що увімкнення трансформатора супроводжується суттєво значимими, проте в подальшому спадними в часі сплесками струму в первинній обмотці. При цьому більшим значенням сплесків струму відповідають менші величини холостого ходу трансформатора і навпаки, його значні величини сприяють пропорційальному зменшенню такого роду комутаційних проявів у вхідному струмі трансформатора. Наголошено, що при повторно-короткочасному режимі комутації трансформатора, збільшення величини струму холостого ходу трансформатора, яке у зварювальних установках спрямовується на стабілізацію горіння дуги змінного струму, також спричиняє ще один позитивний ефект – пропорційальне зменшення сплесків струму намагнічування в його первинній обмотці.

Ключові слова: трансформатор; магнітний потік; насичення магнітопроводу; холостий хід; ключ; комутація; перехідний процес; моделювання.

Рис.: 5. Табл.: 1. Бібл.: 11.

Актуальність теми дослідження. Одним із проблемних режимів електротехнічних установок значної потужності електроенергетичного або технологічного призначення, є комутація трансформаторів. Цим часто визначається функціональність такого роду установок чи пристроїв. Але комутаціям, незалежно від їх фазності, притаманні екстремальні перехідні процеси, у першу чергу в формі сплесків струму споживання, що спричиняються насиченням магнітопроводу в момент увімкнення первинної обмотки wI трансформатора до мережі живлення [1]. Для однофазних трансформаторів (ОФТ) такого роду перехідних процесів можна уникнути, наприклад, при нульовому залишковому магнітному потоці осердя ($\Phi_z = 0$) і в такому разі найбільш сприятливим для увімкнення ОФТ є момент досягнення напругою амплітуди (umI). І навпаки, через виникаюче максимальне значення струму намагнічування, при $umI = 0$, момент увімкнення ОФТ є найбільш не сприятливим. Проте залежно від різного роду обставин ці процеси мають свою специфіку. Наприклад, при розгляді процесів у трифазних трансформаторах, як правило, підкреслюється [1], що при їх увімкненні завжди необхідно очікувати сплески струмів намагнічування, оскільки хоча б в одній із трьох фаз напруга в момент увімкнення все ж буде досить близькою до нуля. Тобто умови для увімкнення обмотки трансформатора на цю фазу будуть несприятливі і т. п. Проте зменшення екстремальних сплесків струму в первинній обмотці трансформатора і пом'якшення їх негативного впливу можна досягти й іншими засобами.

Постановка проблеми. При синхронному й асинхронному увімкненні ОФТ, сплески струму в його первинних обмотках і, в тому числі й у режимах, близьких до мінімуму навантаження, можуть перевищувати в кілька разів їхній номінальний струм. Такі про-

цеси є небажаними з погляду енергоефективності, електромагнітної сумісності, надійності трансформатора, функціонування систем захисту тощо. Проте не достатньо виясненими залишаються питання взаємозв'язку їх величини із магнітними властивостями осердя трансформатора. Останні можуть залежати, як від властивостей матеріалу осердя, так і від його конструктивного виконання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Використання трансформаторів на частоті струму мережі живлення залишається превалюючим у сфері в електроенергетики і достатньою широким в інших галузях промисловості, зокрема і в устаткуванні призначеному для зварювання металів [2-5]. Тут наявна низка переваг, наприклад, трансформаторні джерела живлення зварювальної дуги генерують у мережу менший рівень вищих гармонік струму, чим інверторні джерела, вони суттєво простіші в обслуговуванні, більш надійні, у т. ч. завдяки меншій кількості силових компонентів. Однак, як і в електроенергетиці, режими комутації, трансформаторних джерел струму залишаються предметом досліджень [6-8].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Відомо, що величина магнітного опору осердя трансформатора R_m визначається кривою намагнічування у координатах I_0 , (неробочого струму або холостого ходу обмотки) Φ (магнітного потоку осердя), що показано у відносних одиницях на рис. 1. При цьому середньому, круто падаючому відрізку (ab), апроксимуючому відрізку для кривої намагнічування відповідає найбільше значення R_m , і таким чином найменшій величині I_0 . Нахил пологих крайніх відрізків (ac , bd), щодо нахилу середнього показує, наскільки зменшується величина R_m при переході потоком точок перегину (a – при позитивних значеннях Φ , коли $\Phi = +\Phi_m = 1$; b – при негативному Φ , коли $\Phi = -\Phi_m = -1$) кривої намагнічування. При такому спрощеному виді апроксимації не враховується вплив залишкового магнітного потоку Φ_z і реальної нелінійності вказаного прямого відрізка ab кривої намагнічування, на перехідні процеси. Проте цього спрощеного представлення достатньо для того, щоб оцінити характер процесів при зменшенні R_m , тобто збільшенні величини I_0 , а графічна ілюстрація такого прикладу збільшення I_0 відображена на рис. 1 штриховою лінією.

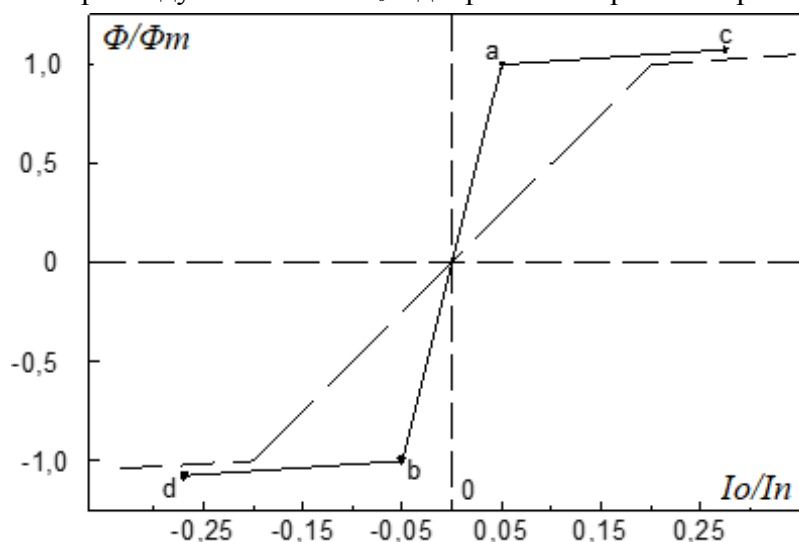


Рис. 1. Варіація апроксимованої кривої намагнічування осердя трансформатора

Належний аналіз подібного роду електромагнітних процесів став можливим, лише за використання методів чисельного обчислення з подальшим розвитком методології дослідження в частині комп'ютерного моделювання. Досвід, у тому числі й авторів, у цьому напрямку показав, що найбільш доцільним є застосування програмного пакета

MATLAB/Simulink, тобто апарату об'єктно-орієнтованого імітаційного візуального моделювання [9-11]. Реалізацію моделі трансформатора в такому середовищі, для випадку комутації його первинної обмотки, наведено на рис. 2.

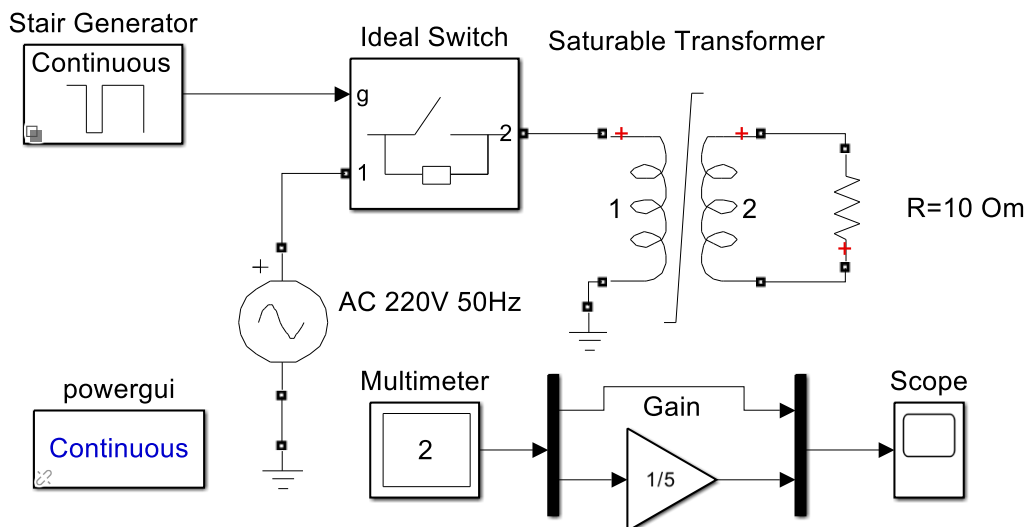
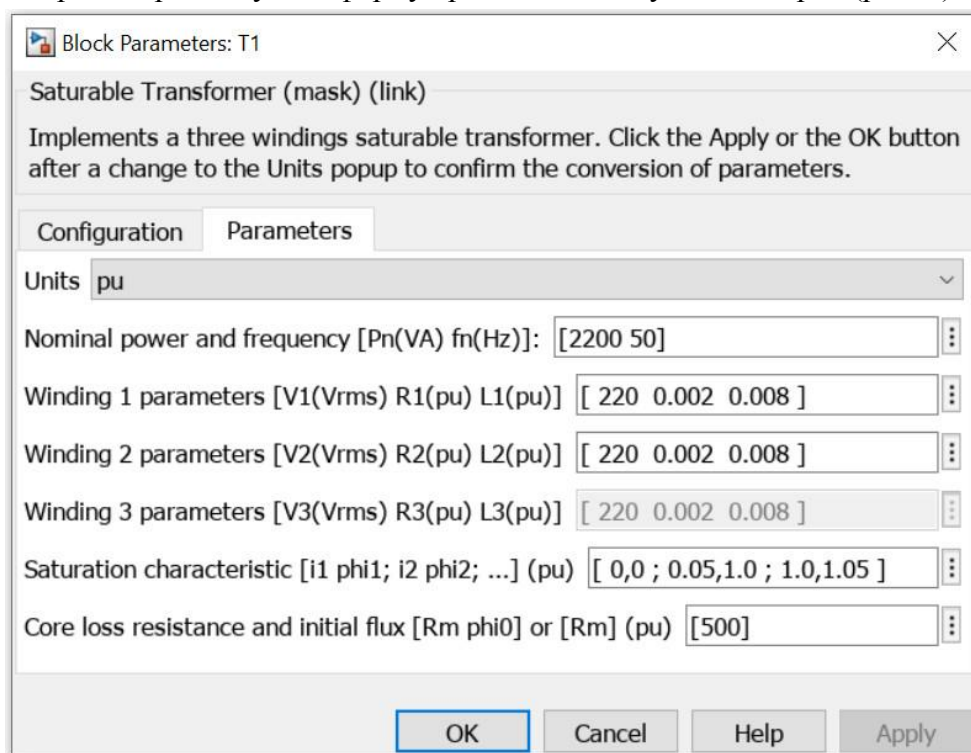
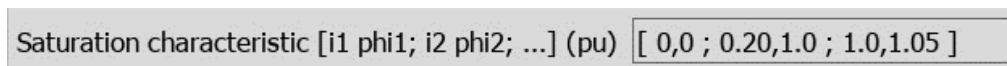


Рис. 2. Модель комутації трансформатора

На вкладці Block Parameters імітаційної моделі трансформатора можна задати належні параметри й апроксимувати форму кривої намагнічування осердя (рис. 3).



а



б

Рис. 3. Параметри імітаційної моделі трансформатора

а – вікно зміни параметрів; б – варіант задання характеристики намагнічування

Наприклад, для характеристики намагнічування наведеної на рис. 1 неперервную лінією, її параметри можуть бути представлені в моделі трансформатора наступним чином: Saturation characteristic [0,0; 0.05, 1.0; 1.0, 1.05] (рис. 3, а) при відношенні I_0 до номінального струму I_n , первинної обмотки $I_0/I_n \approx 2,5\%$ [11].

Графічно, збільшення I_0 до 20% від I_n , одержують належним нахилом основного функціонального відрізка $a-b$ (рис. 1), який і визначає форму кривої намагнічування осердя, що показано штриховою лінією. Для реалізації такого роду варіації, досить зміни лише одного значення ($i_2, \phi_2 - 0,2, 1,0$) у вікні Saturation characteristic, як показано на рис. 3, б.

Для силових трансформаторів електроенергетичного призначення 0,66...500 кВ відношення I_0/I_n , як правило складає 0,35...7%, при стійкій тенденції до зменшення його значення із підвищенням їх потужності та збереженні конструктивної однотипності. Для трансформаторів технологічного призначення і особливо зварювального обладнання часто є характерним збільшене відношення I_0/I_n , що виконується, наприклад, для підвищення стійкості горіння дуги, або поліпшення її запалення на початковому етапі технологічного процесу.

Метою статті є аналіз екстремальності комутаційних сплесків струму первинної обмотки трансформатора і їх залежності від відносного значення струму холостого ходу обмотки, який своєю чергою залежить від нахилу основного функціонального відрізка кривої намагнічування осердя трансформатора відповідного його стаціонарному режиму роботи.

Виклад основного матеріалу. Для одержання необхідних даних щодо процесів комутації використаємо модель (рис. 2). Очевидно, що в ній комутатором виступає ідеальний ключ (*Ideal Switch*), його керуючим елементом є блок *Stair Generator*, що в сумі дозволяє одержати належну синхронізацію моменту увімкнення із напругою мережі U_1 , одержану з блоку *AC 220V 50Hz*. Часові параметри функціонування комутатора на фоні кривої напруги мережі живлення u_1 видно із рис. 4, де перше відключення первинної обмотки $w1$ відбувається в момент t_1 досягнення напругою амплітудного значення (0,02 с), чим забезпечується нульове значення магнітного потоку осердя на момент t_2 наступного приєднання обмотки $w1$. Як видно з рис. 2 графічне виведення форми процесів реалізовано за допомогою блоків *Multimeter* і *Scope* і лише для двох параметрів ($i_{1(t)}$, $u(t)$). Останній параметр промасштабовано у відношенні 1 до 5.

Там же (рис. 4) показано струм первинної обмотки $i_{1(t)}$ при повторному увімкненні (при $t_1=0,35$ с) трансформатора після короткочасного його вимкненого стану.

Такий випадок комутації є найбільш несприятливим для трансформатора, оскільки він за нульового значення залишкового магнітного потоку характеризується екстремумом наступного сплеску струму $i_{m(n)}$. Відхилення моменту комутації в ту чи іншу сторону призводить до зменшення величини сплеску струму намагнічування. Тому для передбачуваності (за наявності нульового значення магнітного потоку осердя), вибрано саме такий момент часу (t_2) комутації. В табл. 1 наведені дані результатів моделювання процесів комутації, при варіаціях I_0 і відповідних їх змінах значення параметра (i_2, ϕ_2) налаштувань кривої намагнічування трансформатора.

Як видно з рис. 4, перший сплеск струму $i_{m(1)}$ первинної обмотки трансформатора при повторному увімкненні, по амплітуді (231A) суттєво перевищує стаціонарне значення амплітуди струму властиве його першому увімкненню. При цьому кратність його середнього значення є ще більш значущою, що очевидно при візуальному порівнянні з ампер-секундою площею відповідного стаціонарного півперіоду струму. В наступному позитивному півперіоді напруги буде спостерігатися сплеск струму $i_{m2(1)}$ (217A) уже меншої інтенсивності, відповідно до перехідної складової в даному процесі.

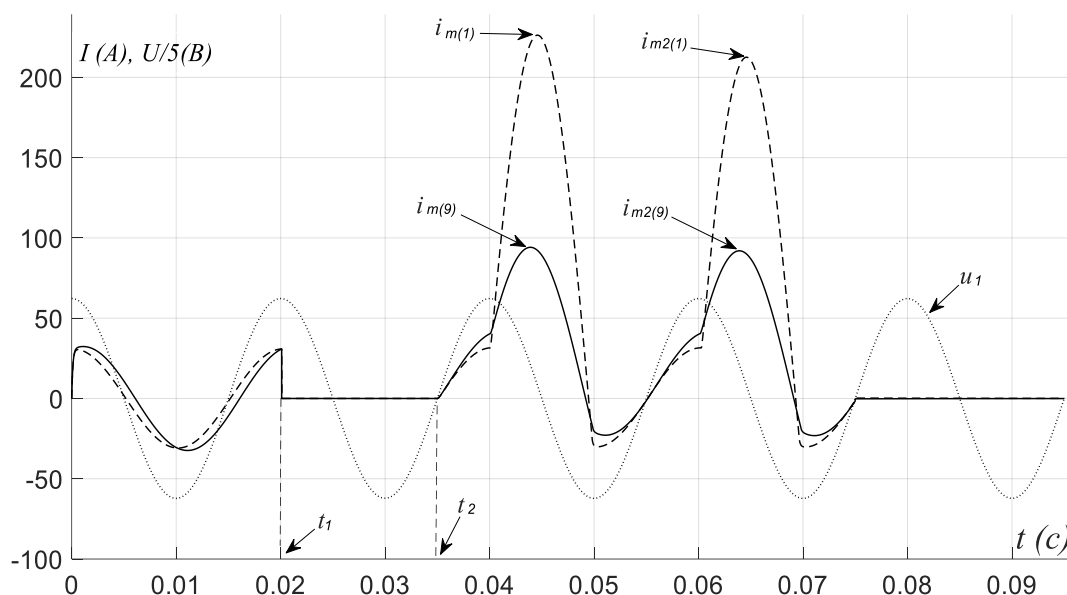


Рис. 4. Комутація при різних I_0 трансформатора і зміни його вхідного струму

Різниця між цими значеннями $i_{m(n)} - i_{m2(n)}$ для даного випадку складає $14A$ і з наростанням I_0 така різниця, як видно з табл. 1 буде зменшуватися. Це наочно видно з наведеного графічного представлення даних (рис. 5), наведених у табл. 1.

Таблиця 1 – Результати моделювання комутації при варіаціях I_0

№ з/н	I_0/I_n (%)	I_0 (A)	i_2, ϕ_2	$i_{m(n)}$ (A)	$i_{m2(n)}$ (A)	$(i_{m(n)} - i_{m2(n)})$	di_{max}
	1	2	3	4	5	6	7
1	1,2	0,26	0.025, 1.0	231	217	14	0
2	2,5	0,55	0.055, 1.0	225	212	13	6
3	5	1,1	0.110, 1.0	215	203	12	16
4	10	2,2	0.220, 1.0	194	184	10	37
5	15	3,3	0.330, 1.0	172	164	8	59
6	20	4,4	0.442, 1.0	150	143	7	81
7	25	5,5	0.552, 1.0	126	122	4	105
8	30	6,6	0.663, 1.0	102	100	2	129
9	35	7,7	0.775, 1.0	78	77	1	153
10	40	8,8	0.886, 1.0	56	56	0	175

Як видно з рис. 5, значення як першого i_m так і наступного i_{m2} комутаційних сплесків струму зменшуються прямо пропорційне зростанню величини I_0/I_n (%), при чому якщо значення I_0/I_n досягає 35 ... 40 %, то прямі, відповідні i_m і i_{m2} , фактично зливаються. Окрім того, якщо взяти різницю di_{max} між максимальним значенням сплеску $i_{m(1)}$ (231A) і кожним наступним $(n+1)$ після відповідного приросту I_0 (див. колонки 5 і 7, табл. 1), то при $I_0/I_n = 40\%$ $di_{max} = i_{m(1)} - i_{m(10)} = 175A$.

Таким чином відношення значення цього спаду комутаційного сплеску струму (175A) до максимального значення такого ж роду сплеску (231A), але властивого мінімальному значенні I_0 має суттєву величину і в процентах становить:

$$di_{max}/i_{m(1)}(\%) = 100 \cdot 175 / 231 = 76\%.$$

Характер поведінки різниці di_{max} між максимальним значенням сплеску $i_{m(1)}$ (231A) і кожним наступним подібним значенням, проте після відповідного чергового приросту I_0 , показано на рис. 5 пунктирною лінією.

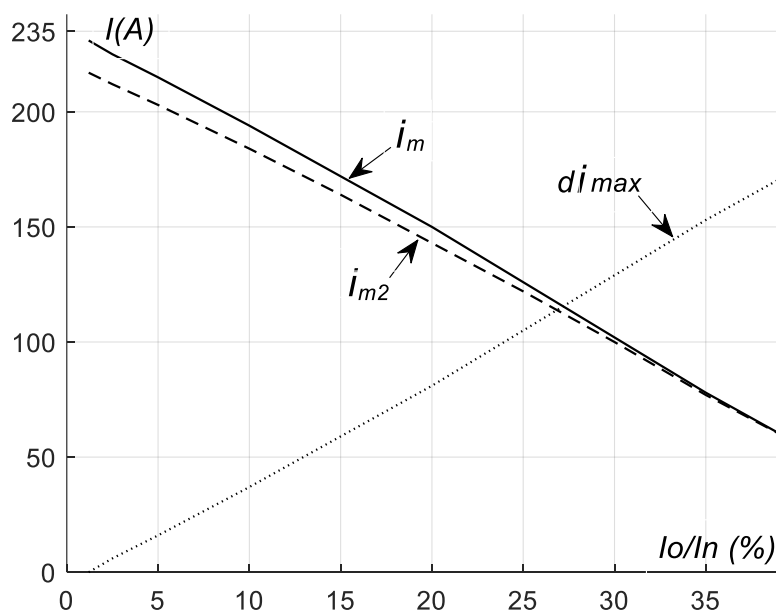


Рис. 5. Залежності величини сплесків струму первинної обмотки від відносного значення струму його холостого ходу

Наведені табличні і графічні результати впливу величини струму холостого ходу на процеси комутації однофазних трансформаторів можна поширити й на трифазні трансформатори. Але в таких випадках, необхідно враховувати вплив розгалуженості магнітного потоку осердя таких трансформаторів.

Висновок. Таким чином, збільшення величини струму холостого ходу трансформатора, яке часто спрямоване на стабілізацію горіння дуги змінного струму, спричиняє ще один позитивний ефект, це суттєве пропорціональне зменшення сплесків струму намагнічування в його первинній обмотці. В першу чергу це необхідно враховувати при повторно-короткочасному режимі комутації трансформатора та належному виборі комутуючих компонентів такої електротехнічної системи.

Список використаних джерел

1. Осташевський М. О. Електричні машини і трансформатори / М. О. Осташевський, О. Ю. Юр'єва ; за ред. проф. В. І. Міліх. – Київ : Каравела, 2022. – 452 с.
2. Заруба И. И. Усовершенствование трансформаторов для ручной дуговой сварки / И. И. Заруба, В. В. Андреев, В. В. Дыменко // Автоматическая сварка. – 2001. – № 3. – С. 45-48.
3. Андреев В. В. Имитационное моделирование электрических схем как этап разработки специализированных источников питания с управляемой формой переменного тока [Электронный ресурс] / В. В. Андреев, Е. М. Ефременко, Г. Н. Москович // Автоматическая сварка. – 2011. – № 2. – С. 9-12. – Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/as_2011_2_3.
4. Коротинський, О. Є. Високоєфективні джерела для дугового зварювання на основі ємнісних накопичувачів електричної енергії / О. Є. Коротинський, М. І. Скопюк, І. В. Вертецька // Автоматичне зварювання. – 2021. – № 3. – С. 47-53. DOI: <http://doi.org/10.37434/as2021.03.08>.
5. Бурлака, В. В. Стабілізатор дуги змінного струму для зварювальних трансформаторів / В. В. Бурлака, С. В. Гулаков, С. К. Поднебенна // Автоматическая сварка. – 2018. – № 3. – С. 48-51. DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/as2018.03.09>.
6. Сегеда, М. С. Математичне моделювання розподілу напруги вздовж обвитки трансформатора під час імпульсних перенапруг / М. С. Сегеда, Є. В. Черемних, І. В. Хімюк, Т. А. Мазур, О. М. Курулишин // Технічна електродинаміка. – 2015. – № 6. – С. 8-11.
7. Bontidean Gabriel Silviu. Simulations and experimental tests on the distribution of over-voltage within transformer windings / Silviu Gabriel Bontidean, Mihai Bădic, Mihai Iordache, Neculai Galan // U.P.B. Sci. Bull., Series C. – 2015. – Vol. 77, Is. 3. – Pp. 181-200.

8. Pivnyak, G. G. Transients in Electric Power Supply Systems. Textbook for institutions of higher education: under the editorship of G.G.Pivnyak / G. G. Pivnyak, I. V. Zhezhelenko, Y. A. Papaika // Education and Science of Ukrainian, National Mining University. – 5-th edition, revised and expanded: Translation from Ukrainian. – Switzerland : Trans Tech Publications Ltd, 2016. – 382 p.

9. Asadi, F. Simulation of Power Electronics Circuits with MATLAB/Simulink : Design, Analyze, and Prototype Power Electronics / F. Asadi. – Istanbul : Maltepe University Istanbul, – 2022. – 541 p.

10. Липківський, К. О. Процеси та організація комутації трансформаторів / К. О. Липківський, В. А. Халіков // Технічна електродинаміка. – 2010. – № 5. – С. 22-30.

11. Організація асинхронної комутації трансформатора з урахуванням інерційності електромагнітних процесів / В. В. Кирик, В. А. Халіков, А. М. Жерносково, О. Ф. Шатан // Технічні науки та технології. – 2022. – № 3(29). – С. 136-143. DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-3\(29\)-136-143](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-3(29)-136-143).

References

1. Ostashevskiy, M.O., & Yurieva O.Iu., Milykh, V.I. (Ed.) (2022). *Elektrychni mashyny i transformatory [Electric machines and transformers]*. Karavela.

2. Zaruba, I.I., Andreev, V.V., & Dymenko, V.V. (2001). Uovershenstvovanye transformatorov dlia ruchnoi duhovoї svarky [Improvement of transformers for manual arc welding]. *Avtomatycheskaia svarka – Automatic welding*, 3, 45-48.

3. Andreev, V.V., Efremenko, E.M., & Moskovich, G.N. (2011). Imitatsionnoe modelirovanie elektricheskikh skhem kak etap razrabotki spetsializirovannykh istochnikov pitaniia s upravliaemoi formoi peremennoho toka [Simulation of electrical circuits as a stage in the development of specialized power sources with a controlled form of alternating current]. *Avtomatycheskaia svarka – Automatic welding*, 2, 9-12. http://nbuv.gov.ua/UJRN/as_2011_2_3.

4. Korotynskiy, O.Ye., Skopiuk, M.I., & Vertetska, I.V. (2021). Vysokoeffektivni dzherela dlia duhovoho zvariuvannia na osnovi yemnisnykh nakopychuvachiv elektrychnoi enerhii [Highly efficient sources for arc welding based on capacitive storage of electrical energy]. *Avtomatycheskaia svarka – Automatic welding*, (3), 47-53. <http://doi.org/10.37434/as2021.03.08>.

5. Burlaka, V. V., Hulakov, S. V., & Podnebenna, S. K. (2018). Stabilizator duhy zminnoho strumu dlia zvariuvalnykh transformatoriv [AC arc stabilizer for welding transformers]. *Avtomatycheskaia svarka – Automatic welding*, 3, 48-51. <http://dx.doi.org/10.15407/as2018.03.09>.

6. Sehed, M. S., Cheremnykh, Ye. V., Khimiuk, I. V., Mazur, T. A. Kurulyshyn, O. M. (2015). Matematychno modeliuвання rozpodilu napruhy vzdovzh obvytky transformatora pid chas impulsnykh perenapruh [Mathematical modeling of the voltage distribution along the winding of the transformer during impulse overvoltages]. *Tekhnichna elektrodynamika – Technical electrodynamics*, 6, 8-11.

7. Bontidean, S. G., Bădic, M., Iordache, M., & Galan, N. (2015). Simulations and experimental tests on the distribution of over-voltage within transformer windings. *U.P.B. Sci. Bull., Series C*, 3, 77, 181-200.

8. Pivnyak, G.G., Zhezhelenko, I.V., & Papaika, Y.A. (2016). Transients in Electric Power Supply Systems. (5-th ed., revised and expanded). Translation from Ukrainian. Trans Tech Publications Ltd, Switzerland.

9. Farzin, A. (2022). *Simulation of Power Electronics Circuits with MATLAB/Simulink. Design, Analyze, and Prototype Power Electronics*. Istanbul, Turkey: Maltepe University Istanbul.

10. Lypkivskiy, K.O., & Khalikov, V.A. (2010). Protsesy ta orhanizatsiia komutatsii transformatoriv [Processes and organization of switching transformers]. *Tekhnichna elektrodynamika – Technical electrodynamics*, 5, 22-30.

11. Kyryk, V.V., Khalikov, V.A., Zhernosiekov, A.M., & Shatan, O. F. (2022). Orhanizatsiia asynkhronnoi komutatsii transformatora z urakhuvanniam inertsiinosti elektromahnitnykh protsesiv [Organization of asynchronous switching of the transformer taking into account the inertia of electromagnetic processes]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical sciences and technologies*, 3(29), 136-143. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-3\(29\)-136-143](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-3(29)-136-143).

Отримано 16.02.2024

Valery Kyryk¹, Volodymyr Khalikov², Anatoly Zhernosekov³, Oleksandr Shatan⁴

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

E-mail: vkryrk@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-0419-8934>

²Doctor 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>. **Scopus Author ID:** 55327787500

³Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Head of Department of Pulsed Processes and Technology of Arc Welding
Paton Electric Welding Institute NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

E-mail: zhernosekov@paton.kiev.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-6404-2221>. **Scopus Author ID:** 6506774085

⁴Scientific Researcher

Paton Electric Welding Institute NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

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

SWITCHING CURRENT OF THE PRIMARY WINDING OF THE TRANSFORMER WITH VARIATIONS IN ITS NO-LOAD CURRENT

Transformers are an indispensable component of various types of electrical circuits. Various restrictions are imposed on the transformer switching operation, which are caused by the functional purpose of the systems, their configuration, parameters and characteristics of existing or available switching components or devices and associated transient processes. When the power transformer is switched on asynchronously, current surges in its primary winding, including in modes close to the minimum load, may exceed its nominal current by several times. Such processes are undesirable from the point of view of energy efficiency, electromagnetic compatibility, transformer reliability and the functioning of protection systems. Proper analysis of electromagnetic processes was performed by numerical calculation methods followed by computer modeling using the MATLAB/Simulink software package. The purpose of the study is to highlight the extreme nature of switching current surges of the primary transformer and their dependence on the relative value of the no-load current of the winding. This current, in turn, depends on the slope of the main functional segment of the magnetization curve of the transformer core corresponding to its stationary mode of operation. The research shows that the increase in the idle speed of the transformer causes a directly proportional decrease in the switching current surges of the primary winding of the transformer. At the same time, the difference between the amplitude values of adjacent semi-periodic current surges decreases. It is noted that an increase in the value of the transformer's no-load current is often aimed at stabilizing the burning of the alternating current arc in electric welding installations. They are characterized by a repeated short-term mode of switching, and therefore the determination of the magnitude of switching current surges is relevant here.

Key words: transformer; magnetic flux; magnetic field saturation; idle; switch, commutation; transient process; modeling.

Fig.: 5. Table: 1. References: 11.