

РОЗДІЛ IV. ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

DOI: 10.25140/2411-5363-2022-3(29)-136-143

УДК 621.314

Валерій Кирик¹, Володимир Халіков², Анатолій Жерносеков³, Олександр Шатан⁴

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

E-mail: ykyryk@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. Є. 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. Є. О. Патона Національної академії наук (Київ, Україна)

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

ОРГАНІЗАЦІЯ АСИНХРОННОЇ КОМУТАЦІЇ ТРАНСФОРМАТОРА З УРАХУВАННЯМ ІНЕРЦІЙНОСТІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ

У роботі розглянуто алгебраїчні, графічні та імітаційно-візуальні аспекти аналізу процесів, що виникають при комутації силового трансформатора. Показано, що повторне увімкнення трансформатора може привести до суттєво більшого сплеску струму в первинній обмотці в порівнянні з першим увімкненням, а причиною цього явища є величина магнітного потоку на момент повторної комутації. Показано, що значення потоку та його зміна залежить від величини навантаження вторинної обмотки, а меншим значенням навантаження відповідають більші значення швидкості спаду магнітного потоку осердя трансформатора й навпаки. Рекомендовано такий алгоритм комутації трансформатора, при якому кожне його наступне увімкнення буде починатися з близького до нуля значення потоку магнітопроводу.

Ключові слова: трансформатор; магнітний потік; насичення магнітопроводу; ключ; комутація; організація комутації; перехідний процес; моделювання.

Рис.: 5. Бібл.: 10.

Актуальність теми дослідження. Трансформатор у більш-менш визначеній та установленій формі своєї техніко-технологічної реалізації має близько 140 років історії використання. Тобто в такому його виді з ним мало справу вже не одне покоління електротехніків. Враховуючи те, що трансформатор – це часто незамінний компонент різного роду електричних кіл, були напрацьовані різні варіанти реалізації його комутації. При цьому трансформатор розглядався і як окрема електрична машина, так і частина або компонент різних систем, пристроїв, мереж тощо. Зрозуміло, що на виконання операції комутації трансформатора накладаються обмеження, викликані функціональним призначенням систем, їх конфігурацією, параметрами та характеристиками наявних чи доступних для використання комутаційних компонентів чи пристроїв і основне та найбільш очевидне, супутніми перехідними процесами. У більшості випадках комутації розглядаються питання про порядок увімкнення трансформатора та його вимкнення [1].

Постановка проблеми. Відомо, що при асинхронному увімкненні силового трансформатора, сплески струму в його первинній обмотці, в тому числі й у режимах, близьких до мінімуму навантаження, можуть перевищувати в кілька разів її номінальний струм. Такі процеси є небажаними з погляду енергоефективності, електромагнітної сумісності, надійності трансформатора, функціонування систем захисту тощо.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Незважаючи на широке застосування в останні десятиліття інверторної техніки, використання трансформаторів залишається достатньою широким у різних галузях промисловості, зокрема в устаткуванні для зварювання [2; 3]. Проблема якості живлячої мережі та її спотворення вищими гармоніками струму досить актуальна сьогодні [4; 5]. Трансформаторні джерела живлення зварювальної дуги генерують у живлячу мережу менший рівень вищих гармонік струму, ніж інверторні джерела, вони значно простіше в обслуговуванні й більш надійні, а режими комутації трансформаторних джерел залишаються предметом дослідження [6; 7].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Варіанти вирішення щодо аналізу процесів, які виникають при комутації силового трансформатора, для окремого випадку сформульовані в теорії електричних машин [8]. Згідно з ним, при нульовому залишковому магнітному потоці осердя ($\Phi_3 = 0$), тобто при повному його розмагнічуванні, найбільш сприятливим для увімкнення є момент часу t , чи фазовому куті φ , при яких синусоїдальна напруга, що прикладається до первинної обмотки трансформатора, досягає свого амплітудного значення (U_m).

У такому випадку після увімкнення амплітудне значення потоку Φ_m осердя трансформатора, при достатньому наближенні його до ідеального, визначається формулою: $\Phi_m = U_1 / (4,44 f w_1)$. При цьому фаза φ магнітного потоку завжди відстає на чверть періоду від фази прикладеної напруги, тобто при $u_1 = U_{1m} \sin \omega t$, маємо $\Phi = \Phi_m \sin (\omega t - \pi/2)$, де U_{1m} – амплітуда напруги u_1 , а величина потоку є функцією вольтсекундної площі u_1 , тобто її інтегралом: $\Phi = (U_{1m} / w_1) \int \sin (\omega t - \pi) dt$. Амплітуда струму намагнічування I_{0m} , що утворює в осерді трансформатора магнітний потік Φ , або іншими словами – реактивна складова струму холостого ходу – буде дорівнювати: $I_{0m} = (\Phi_m / w_1) R_m$.

І навпаки, за тих же початкових умов ($\Phi_3 = 0$) найбільш несприятливим стає момент увімкнення первинної обмотки трансформатора при нульовому рівні синусоїдальної напруги, на яку вмикається первинна обмотка. При цьому в магнітному потоці осердя з'явиться суттєва, спадаюча в часі, експоненціальна складова, яку відповідно теорії перехідних процесів іменують перехідною. Проте такому лінійно-алгебраїчному відображенню процесу комутації властиві суттєві невідповідності.

Більш наочним є графічна інтерпретація процесу увімкнення, що на відміну від алгебраїчного представлення процесів, досить просто відображає їх нелінійну суть (рис. 1) [8]. При цьому величина магнітного опору осердя трансформатора R_m визначається кривою намагнічування у координатах I_0, U_1 (рис. 1, б).

У такому випадку середньому круто падаючому відрізку (ab) кривої відповідає найбільше значення R_m , а нахил пологих крайніх відрізків щодо нахилу середнього показує, наскільки зменшується величина R_m при переході потоком точок перегину (a – при позитивних значеннях Φ , коли $\Phi = +\Phi_m = I$; b – при негативному Φ , коли $\Phi = -\Phi_m = -I$) кривої намагнічування.

При увімкненні первинної обмотки трансформатора в момент позитивного фронту управляючого параметра U_y (рис. 1, а), тобто фазовому куті $\varphi = \pi/2$, першій позитивній чверті періоду ($t = 0,005 \dots 0,01$ с) напруги u_1 після підключення буде зіставний вектор ($o-a$) степені насичення магнітопроводу на кривій його перемагнічування (рис. 1, б). У такому разі моменту часу $t = 0,01$ с відповідає нульове значення $u_1 = 0$ і максимальна позитивна величина намагнічування ($+\Phi_m$) осердя (точка “а”) на відрізку (ab).

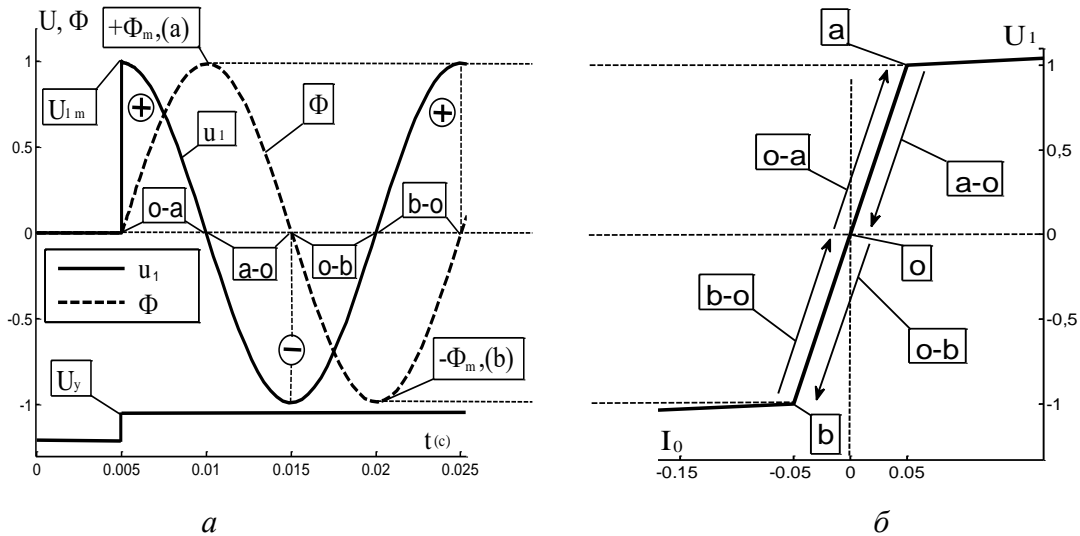


Рис. 1. Геометрична інтерпретація процесу увімкнення трансформатора

Перехід u_1 в область від’ємних значень призводить до зменшення магнітного потоку, який досягне нульової величини за амплітуди напруги U_{1m} ($t = 0,015$ с). При цьому напрямком зміни ступені намагнічування осердя на рис. 1, б показано вектором $(a-o)$. Повний цикл перемагнічування осердя, із поверненням магнітного потоку з області його від’ємних значень у початкову точку із значенням $\Phi = 0$ буде завершено при $t = 0,025$ с, тобто в позитивному максимумі напруги u_1 , що і відображено векторами кривої намагнічування та виділеними їм відповідними чвертями періоду вхідної напруги.

Такий випадок комутації є найбільш сприятливим для трансформатора, оскільки він відразу виходить на усталений (стаціонарний) режим роботи, тобто без струмових екстремальних коливань. У такому режимі за відповідного розрахунку, перемагнічування осердя, відбувається на відрізку (ab) при максимальному значенні магнітного опору й мінімальному струмі I_0 .

Зміщення моменту комутації від середини півперіоду ($t = 0,005$ с) вхідної напруги в той чи інший бік призводить до перехідного процесу, під час якого струм намагнічування I_0 різко зростає. Це пов’язано з появою асиметрії в кривій магнітного потоку, оскільки він є функцією вольтсекундної площі напруги, і виходу його амплітуди за межі, визначені точками перегину (a, b) , тобто в область низьких значень магнітного опору R_m осердя трансформатора.

Задача визначення I_{0m} у геометричній інтерпретації вирішується шляхом проєкції потоку на криву намагнічування. У найбільш несприятливих випадках комутації (наприклад при $t = 0,01$ с або $t = 0,02$ с) значення I_0 буде суттєво більшим за номінальний струм $I_{ном}$ первинної обмотки.

Графічний аналіз процесу комутації трансформатора надає доступне й наочне уявлення про природу появи сплесків струму у вхідних колах трансформатора, проте кількісно дає можливість оцінити амплітуду лише першого сплеску.

Метою дослідження є така організації комутації трансформатора, при якій досягається його вихід на усталений режим роботи з мінімальними амплітудою вхідного струму та тривалістю перехідного процесу, без екстремальних проявів у процесі комутації.

Виклад основного матеріалу. Подальше вирішення питань аналізу подібного роду електромагнітних процесів стало можливим, лише за використання методів чисельного обчислення з подальшим розвитком методології та технологій дослідження в частині комп’ютерного моделювання. У цьому напрямку, найбільш доцільним, є застосування програмного пакета MATLAB/Simulink, тобто апарату об’єктноорієнтованого імітаційного візуального моделювання [9]. Реалізацію моделі трансформатора в такому середовищі, для випадку комутації його первинної обмотки, наведено на рис. 2.

На вкладці параметрів імітаційної моделі трансформатора T1 можна апроксимувати криву намагнічування осердя. Наприклад, для характеристики намагнічування наведеної на рис. 1, б її параметри повинні бути представлені в моделі трансформатора наступним чином: Saturation characteristic [0,0; 0.05, 1.0; 1.0, 1.05]. Відповідно струм I_{w1} первинної обмотки із приєднанням її до мережі живлення може мати, в залежності від фаз напруги на момент ввімкнення, суттєво різний вид. На рис. 3 показано форми струму при різних фазах напруги на момент ввімкнення (штрихова лінія відповідає найбільш прийнятній кривій вхідного струму I_{w1} , а неперервна – у її найбільш неприйнятній формі).

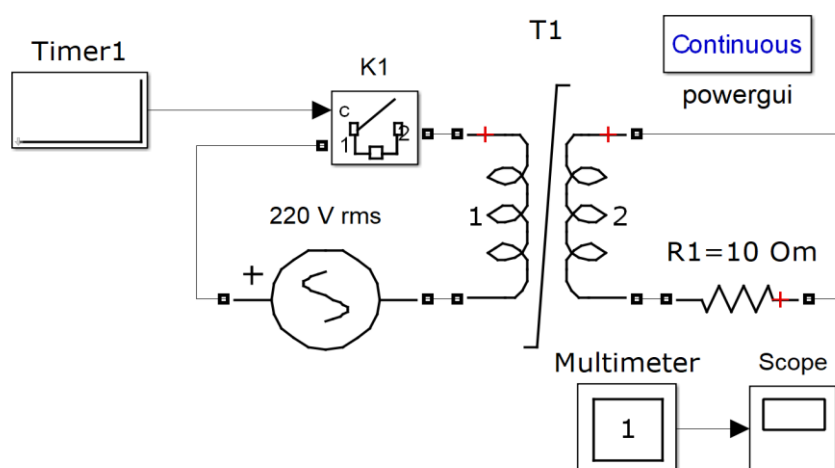


Рис. 2. Модель комутації трансформатора

Проте і при такому гранично спрощеному представленні параметрів (Saturation Characteristic) моделі трансформатора (рис. 2) результати моделювання будуть, навіть з першого погляду, не тільки наочними, але й достатньо якісними.

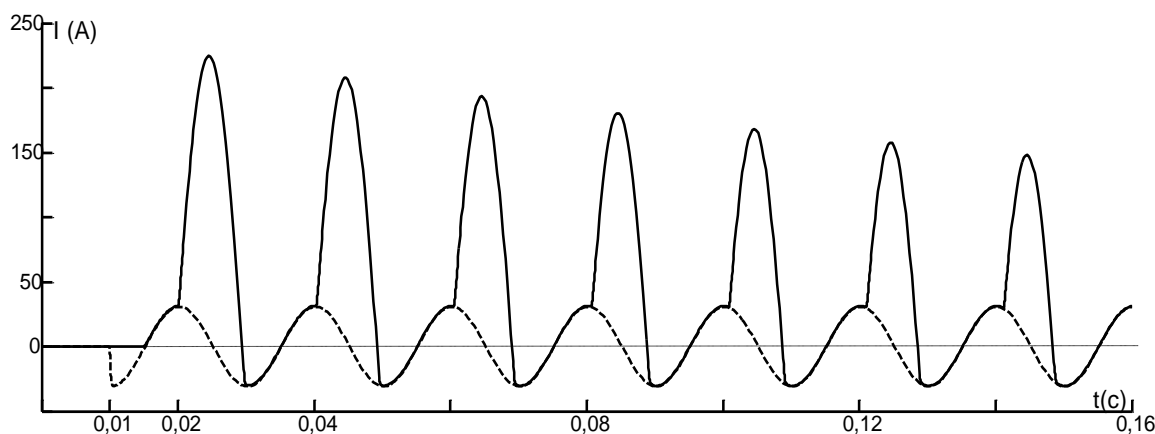


Рис. 3. Результати моделювання комутації трансформатора

Для прикладу, взято серійний трансформатор ОСМ1-2,5У3 [10] із напругою первинної обмотки 220 В та номінальною потужністю 2,5 кВА за його номінального активного навантаження. Кількісний аналіз результатів вимірювання та моделювання показав, що різниця в відсотках між ними по діючому значенню сплеску струму одразу після комутації складає лише 0,43 %, із наростанням при кожному наступному сплеску струму, але не перевищує 0,76 %. Ці ж результати відповідно для миттєвих значень, дещо більші, але не перевищують 1,6 %. Тобто похибки обчислень при моделюванні знаходяться на одному рівні із похибками вимірювання.

На рис. 3 показано характер зміни вхідного струму I_{w1} при найбільш несприятливому для трансформатора моменті комутації. При цьому штрихова лінія ілюструє хід процесу I_{w1} в первинній обмотці трансформатора починаючи з найбільш бажаного моменту комутації. Зі зменшенням величини навантаження трансформатора, характер струму намагнічування буде виражено більш явно. Безумовно, що такого роду екстремальний характер процесів неможливо ігнорувати. Досить тривалий і по своєму характеру аперіодичний перехідний процес супроводжується несинусоїдальним споживанням струму, генеруванням вищих гармонік у мережу, що загалом погіршує якість електроенергії та електромагнітну сумісність пристроїв.

Очевидно, що одержати прийнятний хід процесу комутації, як і впливає з рис. 3, можна належною синхронізацією моменту увімкнення із напругою мережі живлення, що доступно, і може бути реалізовано, наприклад, комутаторами на базі тиристорів. Проте необхідно враховувати, що протягом півперіоду струму кратність перевантаження такого напівпровідникового комутатора не перевищує семи при достатньо значному падінні напруги і відповідно виділенні тепла на ньому. Електромеханічний контакт, а це основа різного роду пускачів, контакторів, вимикачів, відповідно має значення кратності перевантаження 100...400, відносно мале падіння напруги на ньому, проте про якогось роду фазову синхронізацію не може бути мови.

Разом із тим наведені (рис. 3) екстремальні сплески струму, у багатьох випадках можуть бути значно перевищені. І це стосується як напівпровідникових, так і електромеханічних комутаторів. На рис. 4 показано струм первинної обмотки I_{w1} при повторному увімкненні (при $t = 0,115$ с) трансформатора після короткочасного його вимкнення.

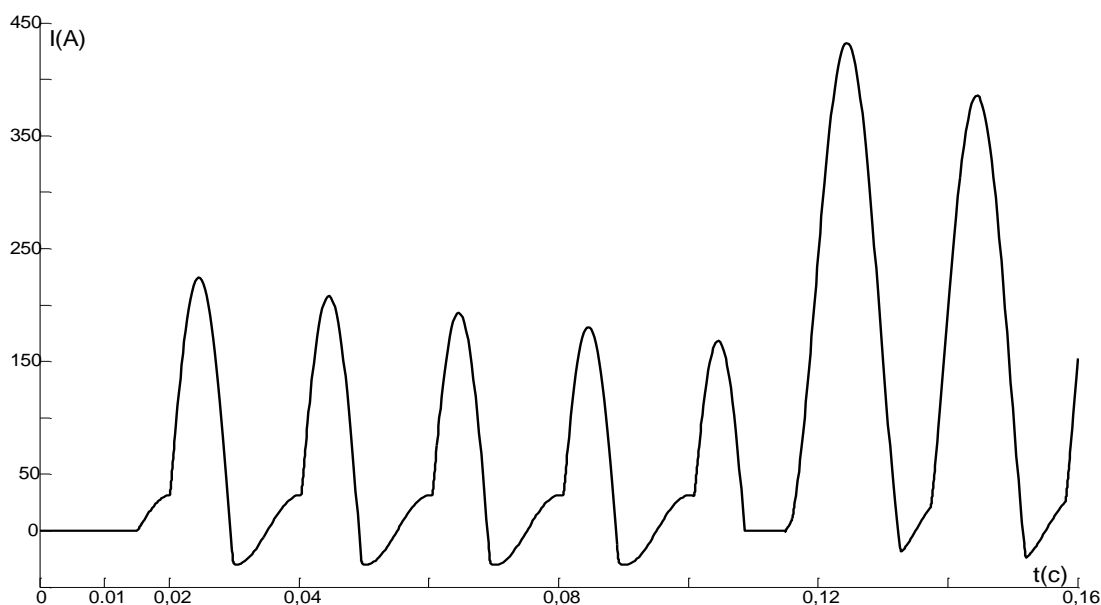


Рис. 4. Струм первинної обмотки при повторному увімкненні трансформатора

Як видно з рис. 4, перший сплеск струму первинної обмотки трансформатора при повторному увімкненні, по амплітуді в два рази перевищує значення амплітуди струму при його першому увімкненні. При цьому кратність його середнього значення є ще більш значущою, що очевидно навіть із візуального порівняння амперсекундних площ відповідних сплесків струму. Можна показати, що причиною такого ефекту є увімкнення трансформатора за таких фази і полярності вхідної напруги, при яких буде спостерігатися подальше збільшення насичення магнітопроводу осердя трансформатора. Іншими словами, за час безструмової паузи для первинної обмотки не відбулося повернення магнітопроводу до нульових початкових умов по магнітному потоку, які були наявні при першому увімкненні.

Якщо не враховувати асинхронізм комутації трансформатора (рис. 3), то необхідно обмежити сплески струму й запобігти суттєвому їх збільшенню, для випадків повторного увімкнення, ілюстрація одного із яких наведена на рис. 4. Шлях до цього можна виявити прослідкувавши зміну магнітного потоку осердя після вимкнення первинної обмотки трансформатора від джерела живлення, що повністю дозволяє модель рис. 2. На рис. 5 показано, як змінюється значення магнітного потоку осердя трансформатора при його вимкненні від джерела живлення за досить значних варіацій навантаження.

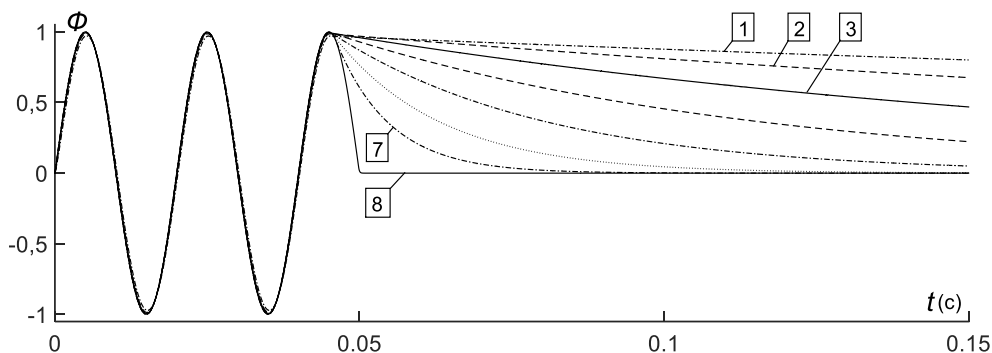


Рис. 5. Магнітний потік при варіаціях навантаження

При цьому крива 1 відповідає чотирикратному перевантаженню трансформатора, крива 2 – його двократній величині, графік 3 – номінальній потужності навантаження. Інші залежності в відсотках від номінального навантаження, в порядку своєї послідовності (номерів), представлені на рис. 5 та відповідають значенням у 50 %, 25 %, 12,5 %, 6,25 %, і завершуючи режимом неробочого (холостого) ходу трансформатора (крива 8).

З наведеного сімейства кривих випливає, що струм навантаження вторинної обмотки I_n відіграє в електромагнітних процесах при комутації трансформатора, свого роду роль, яка має в механічних системах маса, тобто параметр, що визначає інерційність процесу, в даному випадку – спаду потоку Φ . Таким чином, більшим значенням I_n відповідає як найменша швидкість спаду магнітного потоку (криві 1, 2, рис. 5) і навпаки, меншим значенням I_n відповідає найбільша швидкість спаду потоку (криві 7, 8, рис. 5). Тобто при $I_n = 0$ швидкість спаду потоку буде максимальною і він досягне свого нульового значення за чверть періоду напруги (крива 8, рис. 5).

Дослідженнями встановлено, що наведені результати для комутації однофазних трансформаторів, справедливі і для трифазних трансформаторів. Але додатково, для трифазних трансформаторів характерною особливістю електромагнітних комутаційних процесів стає розгалуженість магнітного потоку осердя таких трансформаторів.

Висновки. Таким чином, при необхідності найшвидшого досягнення нульових початкових умов для магнітопроводу ($\Phi = 0$), необхідно перед вимкненням трансформатора від'єднати його навантаження. Із цього випливає цілком практичний результат, що для увімкнення трансформатора на напругу і її зняття з нього завжди бажано мати два комутатори – один на стороні первинної обмотки, а інший – на вторинній. Алгоритм вимкнення трансформатора полягає спочатку у знятті навантаження на вторинній обмотці, а потім його обезструмлення на первинній. Увімкнення в роботу виконується в зворотному порядку.

Список використаних джерел

1. Кондахчан В. С. Эксплуатация трансформаторов / В. С. Кондахчан. – М. : Госэнергоиздат, 1950. – 256 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. Разработка высокоэффективных способов дуговой сварки и их применение / И. Кидзи, К. Кобаяси, Д. Исии, Х. Ямаока // Автоматическая сварка. – 2003. – № 10-11. – С. 59-63.

4. Пентегов И. В. Устройства подавления высших гармоник тока / И. В. Пентегов, И. В. Волков, М. Левин // *Технічна електродинаміка: Тем. випуск. Проблеми сучасної електротехніки.* – 2002. – Ч. 1. – С. 13-22.
5. International Electrotechnical Commission 61000-3-2:2014 Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3-2: Limits – Limits for harmonic current emissions (equipment input current ≤ 16 A per phase). – 69 p.
6. Андрианов А. А. Оптимизация режимов стабилизации сварочной дуги переменного тока / А. А. Андрианов, В. Н. Сидорев // *Електротехніка і електромеханіка.* – 2009. – № 2. – С. 5-8.
7. 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.
8. Петров Г. Н. Электрические машины: Введение. Трансформаторы / Г. Н. Петров. – М.: Энергия, 1974. – Ч. 1. – 240 с.
9. Липківський К. О. Процеси та організація комутації трансформаторів / К. О. Липківський, В. А. Халіков // *Технічна електродинаміка.* – 2010. – № 5. – С. 22-30.
10. Офіційний сайт Мінського електротехнічного заводу ім. В. І. Козлова [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://metz.by>.

References

1. Kondakhchan, V.S. (1950). *Ekspluatatsiya transformatorov [Operation of transformers]*. Gosenergoizdat.
2. Zaruba, I.I., Andreev, V.V., & Dymenko, V.V. (2001). *Uovershenstvovaniye transformatorov dlya ruchnoy dugovoy svarki [Improvement of transformers for manual arc welding]*. *Avtomaticheskaya svarka – Automatic welding*, (3), 45-48.
3. Kiji, I., Kobayashi, K., Ishii, D., & Yamaoka, H. (2003). *Razrabotka vysokoeffektivnykh sposobov dugovoy svarki i ikh primeneniye [Development of highly efficient arc welding methods and their application]*. *Avtomaticheskaya svarka – Automatic welding*, (10-11), 59-63.
4. Pentegov, I.V., Volkov, I.V., Levin, M. (2002). *Ustroystva podavleniya vysshikh garmonik toka [Devices for suppressing higher current harmonics]*. *Tekhnichna elektrodinamika. Tem. vipusk. Problemy suchasnoi elektrotekhniki – Technical Electrodynamics, Tem. release. Current problems electrical engineering*, 1, 13-22.
5. Mezhdunarodnaia elektrotekhnicheskaya komissiya 61000-3-2:2014 *Elektromagnitnyye sovместimost' (EMS) – Chast 3-2: Ogranicheniia. Ogranicheniia na emissiiu garmonicheskikh tokov (vkhodnoy tok oborudovaniya ≤ 16 A na fazu) [International Electrotechnical Commission 61000-3-2:2014 Electromagnetic compatibility (EMC)] - Part 3-2: Limits – Limits for harmonic current emissions (equipment input current ≤ 16 A per phase)*.
6. Andrianov, A.A., & Sidorets V.N. (2009). *Optimizatsiya rezhimov stabilizatsii svarochnoy dugi peremennogo toka [Optimization of welding stabilization modes AC arcs]*. *Yeletrotekhnika i elektromekhanika – Electrical engineering and electromechanics*, (2), 5-8.
7. Andreev, V.V., Efremenko, E.M., & Moskovich, G.N. (2011). *Imitatsionnoye modelirovaniye elektricheskikh skhem kak etap razrabotki spetsializirovannykh istochnikov pitaniya s upravlyayemoy formoy peremennogo toka [Simulation of electrical circuits as a stage in the development of specialized power sources with a controlled form of alternating current]*. *Avtomaticheskaya svarka – Automatic welding*, (2), 9-12. http://nbuv.gov.ua/UJRN/as_2011_2_3.
8. Petrov, G.N. (1974). *Elektricheskiye mashiny [Electric machines]. Vvedenie. Transformatory – Energiia Introduction. Transformers (Vol. 1)*.
9. Lypkivskiy, K.O., & Khalikov, V.A. (2010). *Protsesy ta orhanizatsiya komutatsiyi transformatoriv [Processes and organization of switching transformers]*. *Tekhnichna elektrodinamika – Technical electrodynamics*, (5), 22-30.
10. Ofitsiynyy sayt Minskoho elektrotekhnichnogo zavodu im. V. I. Kozlova [The official website of the Minsk Electrotechnical Plant named after V.I. Kozlova]. <https://metz.by>.

Отримано 11.09.2022

Valery Kyryk¹, Volodymyr Khalikov², Anatoly Zhernosekov³, Oleksandr Shatan⁴

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

E-mail: ykyryk@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](https://orcid.org/0000-0003-1691-5005)

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](https://orcid.org/0000-0002-6404-2221)

⁴Scientific Researcher, Paton Electric Welding Institute NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

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

ORGANIZATION OF ASYNCHRONOUS TRANSIENT RESPONSE OF TRANSFORMER TAKING INTO ACCOUNT THE INERTIA OF ELECTROMAGNETIC PROCESSES

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. The purpose of the study is to organize the switching of the transformer in such a way that it achieves its output to a stable mode of operation with a minimum amplitude of the input current and the duration of the transition process, without extreme manifestations in the switching process.

Algebraic, graphic, and simulation-visual aspects of the analysis of the processes occurring during power transformer commutation are considered in the work. It is shown that the repeated switching on of the transformer can lead to a significantly larger current surge in the primary winding compared to the first switching on, and the reason for this phenomenon is the magnitude of the magnetic flux at the time of repeated commutation. It is shown that the value of the flux and its change depends on the amount of load on the secondary winding, and lower values of the load correspond to higher values of the rate of decline of the magnetic flux of the transformer core and vice versa. The following switching algorithm of the transformer is recommended, in which each subsequent switching on of the transformer will start with a close to zero value of the magnetic field flux.

Key words: transformer, magnetic flux, magnetic field saturation, switch, commutation, organization of commutation, transient process, modeling.

Fig.: 5. References: 10.