

О.В. Новосельцев, д-р техн. наук, чл.кор. НАН України,  
Інститут технічної теплофізики НАН України,  
В.В. Кирик, д-р техн. наук, проф.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ТИРИСТОРНА КОМУТАЦІЯ ТРИФАЗНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ, ЯК ЗАСІБ УНИКНЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ЕКСТРЕМАЛЬНИХ РЕЖИМІВ

*В роботі розглянуто проблему, пов'язану із виникнення аперіодичних сплесків струмів при комутації трифазних трансформаторів внаслідок насичення їх магнітопроводів. Представлено можливості уникнення екстремальних струмів в обмотках трансформатора засобами перетворювальної техніки за рахунок синфазного почергового включення ключів тиристорного комутатора і як наслідок, усунення негативних проявів в цілому і на мережу живлення зокрема. Наведено модель системи управління комутацією із автоматичним вибором моментів комутації трансформатора.*

**Ключові слова:** силовий трансформатор, ключ, комутація, крива намагнічування, насичення магнітопроводу, перехідний процес.

Екстремальні перехідні процеси в момент підключення до мережі живлення первинних обмоток трифазних трансформаторів (ТФТ) є достатньо актуальною проблемою [1]. Вони спричиняються насиченням їх магнітопроводів, і, в залежності від типоміналу трансформатора, сплески струму первинної обмотки можуть перевищувати в 5–7 разів її номінальний струм. Часто характер перехідних процесів, пов'язаний із насиченням магнітної системи, ігнорується чи недооцінюється. На практиці, як правило, вибираються необхідні запаси ресурсів комутаційних елементів, обмоток і т. ін. в залежності від струму, що в них протікає, тобто враховується екстремальний характер перехідних процесів за рахунок певних матеріальних затрат. Це не сприяє режиму економії електроенергії, її якості в мережі живлення; при цьому виникають електромеханічні напруження в обмотках, викликані комутаційними струмами, відбувається їх перегрів. Як наслідок, прискорюється старіння ізоляції обмоток, знижується надійність трансформаторів тощо.

Для однофазних трансформаторів такого роду ексцесів можна уникнути, в одному окремому випадку, при нульовому залишковому магнітному потоці осердя ( $\Phi_z = 0$ ), тобто при повному його розмагніченні. В такому разі найбільш сприятливим для включення завжди є момент амплітуди ( $U_{Im}$ ) синусоїдальної напруги, що прикладається до первинної обмотки трансформатора [2]. При цьому трансформатор відразу виходить на режим усталеного магнітного потоку  $\Phi$ , тобто його циркуляція буде відбуватися в рамках відрізка кривої намагнічування, для якого характерне велике значення магнітного опору. І навпаки, найбільш несприятливим часом для включення трансформатора є момент переходу напруги мережі живлення через нульове значення.

Для ТФТ, як правило, підкреслюється, що при їх включенні завжди необхідно очікувати сплесків струмів намагнічування, оскільки хоча б в одній із трьох фаз напруга в момент включення буде близькою до нуля [2]. Природно, що такий стан речей не міг бути сприйнятним, що нашло своє відображення при реалізації комутації способом послідовного почергового підключення відповідних фаз [1, 3, 4]. В даному разі осмислення та вирішення проблеми, як правило, знаходиться в руслі застосування програми Matlab/Simulink/SimPowerSystems.

Тут очевидно, що проблема вирішується не в загальному вигляді, а для окремих систем включення обмоток ТФТ та мереж живлення (з нульовим проводом чи без нього і т. ін.), для чисто синусоїдальної форми вхідної напруги, також неочевидним є вплив розгалуженості магнітної системи на комутаційні процеси, який не властивий для однофазних трансформаторів. Тому в проблематику усунення негативних наслідків у комутаційних колах, пов'язаних із насиченням магнітопроводів трансформаторів, необхідно внести елементи ясності і систематики.

Наприклад, при моделюванні включення ТФТ при конфігурації його обмоток  $\Delta/Y$  імітаційна модель, буде мати вигляд, представлений на рис. 1, тиристорний комутатор буде складатися лише із двох ключів ( $K1, K2$ ), а зображення моделі фактично повторює принципову схему [5]. В ній вмикання ключа  $K1$  необхідно виконувати, аналогічно комутації однофазного трансформатора. Це повинен бути момент досягнення амплітуди, проте не фазною напругою  $U1(A)$ , а лінійною –  $U1(AB)$ . При виборі параметра

блоку Timer1 в тому ж нульовому початковому відліку значення фазового кута для напруги фази “А” необхідно зважувати на те, що точка досягнення абсолютного максимуму  $U_{1m}(AB)$  відносно найближчого  $U_{1m}(A)$  зміщена на  $30^\circ$  у бік випередження. Сприятливий момент часу вмикання ключа K2 визначається його варіацією відносно параметру блоку Timer1 в сторону збільшення при одночасному відслідковуванні за значеннями струму споживання від мережі живлення Three-Phase Source.

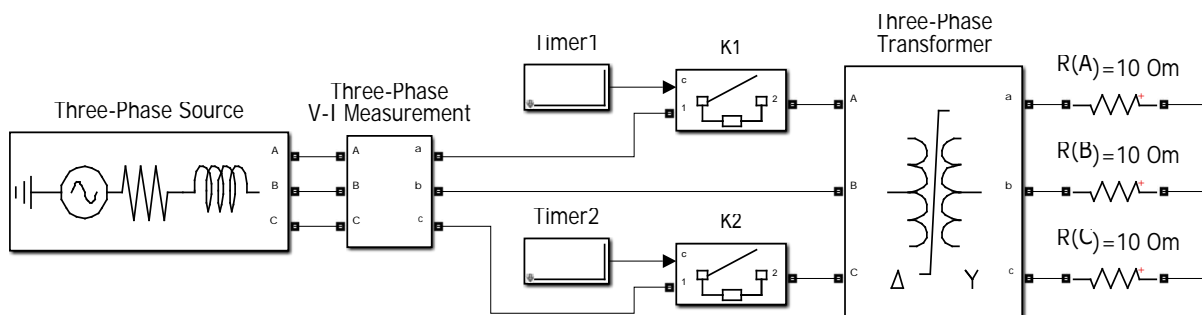


Рисунок 1 – Модель включення ТФТ із конфігурацією обмоток Δ/Y

Очевидно, що одночасне підключення обмоток ТФТ до джерела струму ключами K1, K2 (рис.1) в момент часу досягнення лінійною напругою амплітудного значення –  $U_m(AB)$ , наприклад, при  $t_3 = 23,33$  мс (рис.2, а), спричинить незадовільний результат (рис.2, б). Якщо виконати варіацію моменту вмикання K2 в сторону збільшення, взявши за точку відліку  $t_3$ , то при  $t_4 = 28,33$  мс (через проміжок часу, відповідний фазовому куту  $\pi/2$ ), що співпадає із переходом лінійною напругою свого нульового значення, одержимо цілком задовільний результат (рис.2, в). Змінюючи момент вмикання ключа K2 із дискретністю у півперіод відносно  $t_4$ , тобто у кожний наступний перехід  $U(AB)$  через нуль, можна впевнитися у задовільному ході комутації. Це видно із рис.2, г, де замикання K2 виконується при  $t_5 = 38,33$  мс.

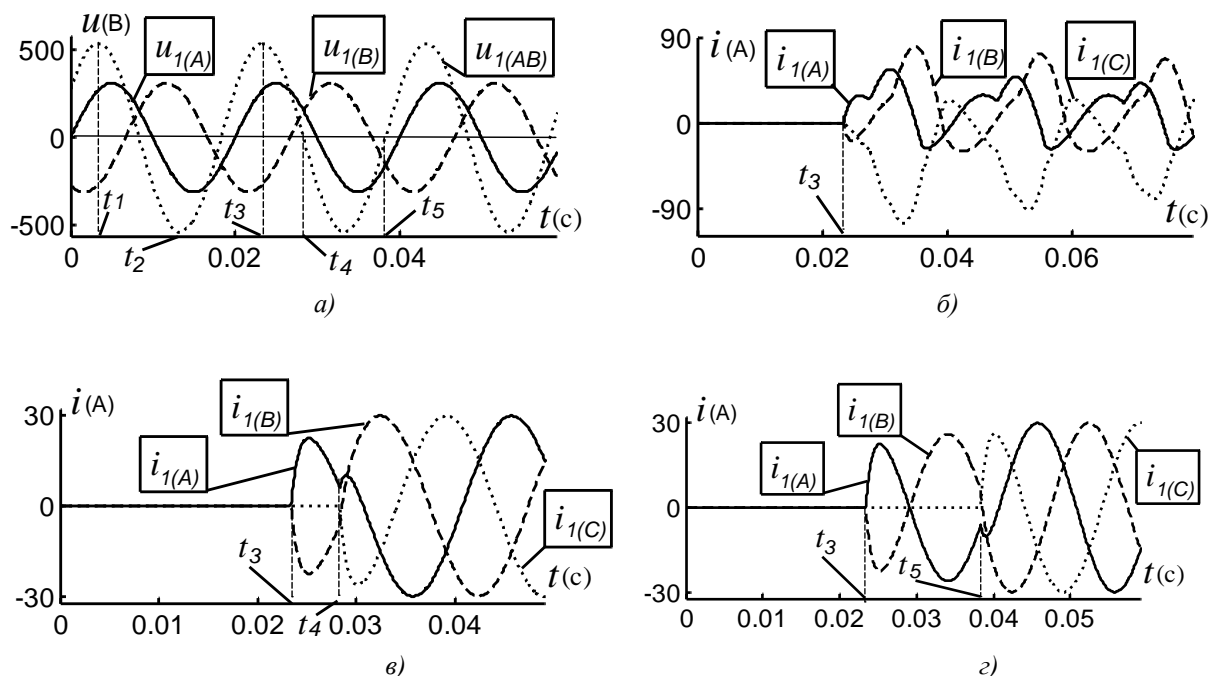


Рисунок 2 – Перехідний процес: при одночасній (а, б) та рознесеній комутації ключів (в, г)

Із співставлення рис.2, а, в, г випливає, що **при з'єднанні первинних обмоток ТФТ трикутником комутація першого ключа (підключення двох фаз) повинна виконуватися в максимумі лінійної напруги, що подається першою, а підключення третьої фази – при нульовому значенні тієї самої напруги.** Дане формулювання є варіантом інших [3, 4] і пов'язане із фазовими кутами напруг (рис.2, а) за умов їх відносної стабільності і в якому ніяк не відображено процеси циркуляції потоку в магнітопроводі

та нелінійні властивості останнього. Проте основне, про що, як правило не згадують, це є необхідність нульових початкових умов для магнітопроводу, тобто умова забезпечення нульового значення залишкового магнітного потоку осердя ( $\Phi_{\Sigma} = 0$ ) на момент комутації.

Для інших систем з'єднанням обмоток ТФТ можна виконати аналогічні перебори варіантів комутації ключів (як для К2 - Рис.1) та сформулювати інші подібні алгоритми комутації для даного конкретно вибраного трансформатора за умови дотримання згаданих умов. Проте очевидно, що незважаючи на прямий зв'язок між напругами на обмотках і магнітними потоками:  $\Phi = (U_{1m}/w \sin(\omega t - \varphi))dt$ , де:  $w$  – кількість витків відповідної обмотки, оскільки причина виникнення сплесків струму, подібних до наведених на рис.2, б, є стан магнітної системи, то необхідно оперувати не формою та значеннями напруг прикладених до обмоток, а належними параметрами відповідних потоків.

Для прикладу наведемо характер поведінки потоків при комутації ТФТ із первинними обмотками, включеними “зіркою” із нульовим проводом –  $Y_n$  (рис.3), за відсутності сплесків струму намагнічування, тобто випадку задовільного ходу процесів.

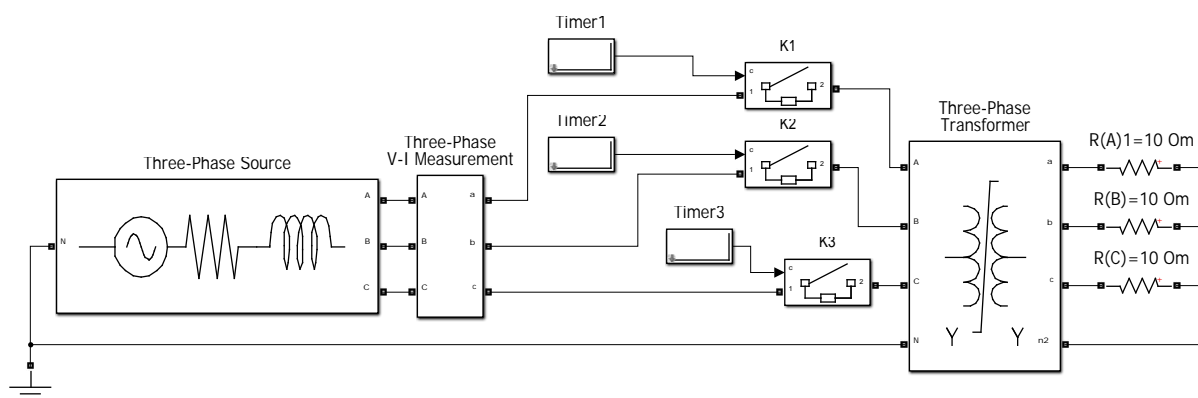


Рисунок 3 – Модель включення ТФТ із конфігурацією обмоток  $Y_n/Y_n$

На рис.4 показано, як змінюються потоки в стрижнях кожної фази трансформатора у відносних величинах, приведених до номінального значення усталеного магнітного потоку. Із рис.3, а, б, в видно, що від моменту комутації фази “А” ( $t_1$ ) і до часу ( $t_2$ ) підключення обмотки фази “В” потоки в стрижнях магнітопроводу для всіх трьох фаз співпадають. Це пояснюється тим, що потік функціонально пов'язаний із напругою, а кількість витків всіх обмоток однакова. При цьому стан магнітопроводу визначається лише однією прикладеною фазною напругою  $U_1(A)$ .

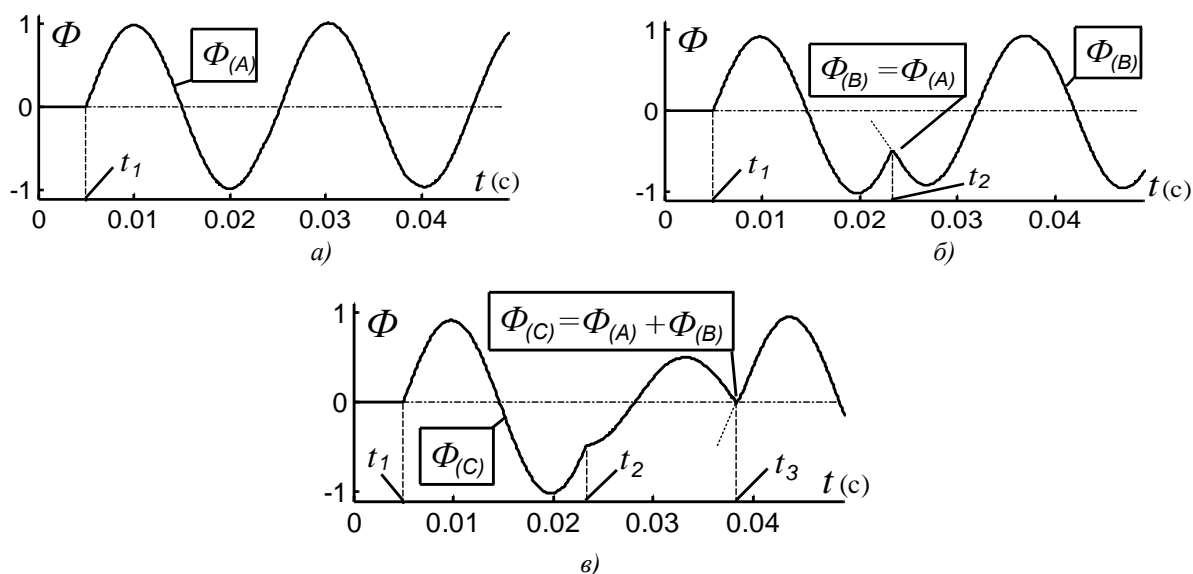


Рисунок 4 – Характер магнітних потоків при включенні ТФТ із системою обмоток  $Y_n/Y_n$

При цьому циркуляція потоку фази "А" –  $\Phi(A)$  відбувається в межах  $+1 \dots -1$  (рис. 3, а) і не відрізняється за величиною і формою від свого усталеного режиму.

На рис. 4, б показано характер поведінки  $\Phi(B)$ , у якому можна виділити два інтервали: до моменту комутації фази "В" ( $t_1 \dots t_2$ ), коли потік визначається лише напругою фази "А", і після комутації ( $t_2 \dots$ ), коли його поведінку визначає вже підключена до джерела струму напруга фази "В". Як видно із рис. 4, б, для цього стрижня магнітопроводу точка прийнятної комутації ( $t_2$ ), припадає на момент зрівняння поточного значення  $\Phi(B)$ , для якого до моменту  $t_2$  справедливе твердження:  $\Phi(B) = \Phi(A)$ , із усталеним магнітним потоком  $\Phi_y(B)$ , значення якого відповідає фазовому куту, співвідносному із  $t_2$ . В такому разі в подальшому (після точки  $t_2$ )  $\Phi(B)$  ідентично повторюватиме поведінку  $\Phi_y(B)$ , тобто в стані магнітопроводу не буде причин для виникнення аперіодичних проявів тієї чи іншої форми.

Для стрижня фази "С" хід процесу складніший (рис. 4, в), оскільки в інтервалі часу ( $t_2 \dots t_3$ ), тобто до моменту комутації для цієї фази,  $\Phi(C)$  визначається не лише напругою, прикладеною до обмотки фази "А", а і напругою фази "В". Таким чином,  $\Phi(C)$  буде являти собою векторну суму  $\Phi(A)$  та  $\Phi(B)$ , завдяки чому його амплітуда зменшиться вдвічі. Із рис. 4, в також випливає, що точка прийнятної комутації ( $t_3$ ) припадає аналогічно на момент зрівняння поточного магнітного потоку  $\Phi(C)$ , який в інтервалі  $t_1 \dots t_3$ , визначався геометричною сумою  $\Phi(A) + \Phi(B)$  і на момент комутації став дорівнювати нулю, із його усталеним також нульовим значенням  $\Phi_y(C)$ . Тобто умови включення фази "С" такі самі, як і для фази "А".

Відхилення від визначених моментів задовільної комутації призводить до перевищення потоком граничних значень усталеного режиму ( $+1,0$  та  $-1,0$ ), це в свою чергу веде до сплесків вхідного струму. На рис. 5, а в області графіку штрих-пунктирною лінією показана межа усталеного режиму для від'ємних значень потоку, на якій виділені інтервали її перекриття (1 – 2, 3 – 4, для  $\Phi(B)$  та (5 – 6) для  $\Phi(C)$ ). В такому разі вхідні струми обмоток будуть суттєво перевищувати свої номінальні значення (рис. 5, б).

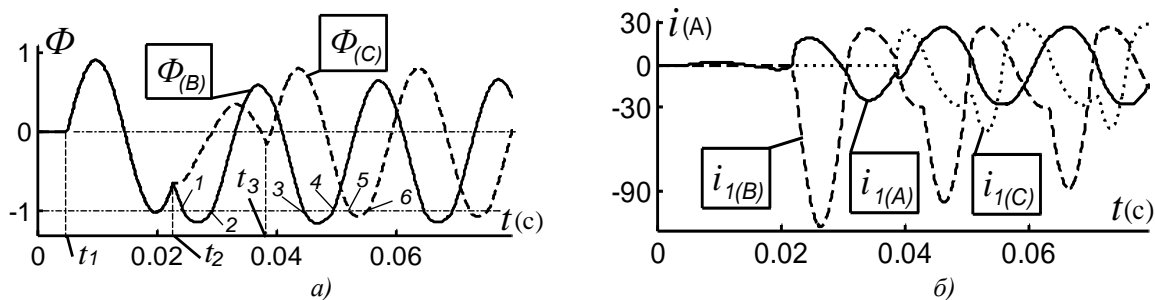


Рис. 5. Характер процесів при незадовільній комутації ТФТ ( $Y_n / Y_n$ )

Таким чином, як випливає із рис. 4, в основі умови правильного вибору моментів комутації обмоток ТФТ є порівняння величини поточного магнітного потоку даного стрижня магнітопроводу із його усталеним значенням, властивим уже для післякомутаційного періоду. Цим створюються умови, при яких миттєве значення потоку в процесі комутації завжди буде вписуватися у вказані межі. Може здатися, що ніщо не перешкоджає розрахувати трансформатор із неперервним комутаційним режимом роботи із відповідним запасом по індукції, наприклад подвійним, хоча це буде вимагати відповідних витрат сталі осердя та матеріалу обмоток, але при цьому буде допустимою довільна, а не дискретна, варіація моментів комутації ключа в інтервалі всього півперіоду. Проте це призводить до закінченні комутації ключів до надлишкового магнітного потоку. В подальшому відбуватиметься експоненціальне саморозмагнічування осердя трансформатора, що буде проявлятися аперіодичною складовою в струмах обмоток та напрузі на навантаженні. Стала часу такого процесу досить велика, тому, як правило, в енергетичному плані, цим часто нехтують. Разом із тим, в режимах комутації незначних навантажень, енергії розмагнічування достатньо, щоб підтримувати у відкритому стані тиристор протягом декількох десятих часток секунди, чим погіршуються динамічні властивості системи ключ-трансформатор. Таким чином, довільний вибір одного параметру веде до необхідності збільшення дискретизації в часі і ускладнює реалізацію систем регулювання та організації наступної комутації.

На основі принципу порівняння потоків можливо організувати систему комутації таким чином, що необхідність у приведення магнітного потоку у ТФТ до нульових початкових умов взагалі відпадає. На рис. 6 наведено такого роду модель системи управління комутаціями ТФТ із конфігурацією обмоток  $\Delta/\Delta$

яка відтворена в середовищі MATLAB/Simulink, та реалізує автоматичний вибір необхідних дискретних часових точок комутації при довільно заданому часі включення відповідного ключа.

Основу моделі, як системи, складає субмодуль Subsystem, в якому порівнюється проінтегрована і відповідним чином промасштабована лінійна напруга  $U_1(AB)$  із напругою, пропорційною магнітному потоку  $\Phi(A)$ , а також виконується також операція порівняння для  $U_1(CA)$  та  $\Phi(C)$ . При моделюванні в даному випадку бажано вибрати алгоритм обчислення “ode23t”.

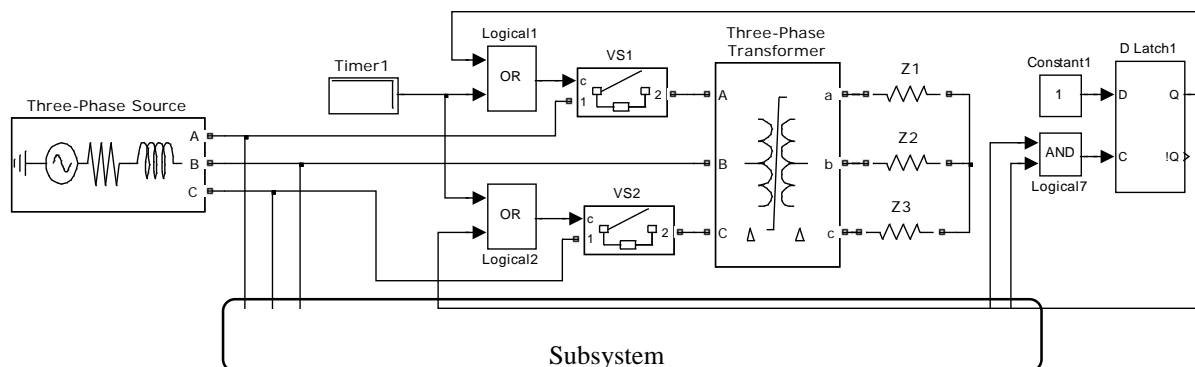


Рисунок 6 – Система комутації із автоматичним вибором моментів включення силових ключів

### Висновки

Реалізація такої моделі системи робить зайвим застосування струмообмежувальних компонентів у комутаційних колах і не призводить до втрат енергії при зміні стану трансформатора. За умови виконання принципу порівняння відповідних потоків, комутація ТФТ буде відбуватися завжди так, що перехід від одного стану (відсутності напруги на первинній обмотці) трансформатора до іншого (підключення напруги), не призводить до такої зміни величини потоку, при якій би він міг у подальшому перевищити задані заздалегідь для нього межі. Моделювання проводилося при нульовому запасі по величині індукції магнітопроводу ТФТ, і тому воно гарантовано транспонується на реальні трансформатори, проектування яких передбачає відповідні допуски.

### Список використаної літератури

1. Климаш В. С. Способы включения трехфазного электрооборудования и их реализация /В. С. Климаш, В. И. Тараканов //Воронеж: Воронеж. инновац.-технол. центр, Электротехнические комплексы и системы управления, - 2015. – № 2. - С. 24–28. (Сб. науч. трудов).
2. Сергеевков Б. Н. Электрические машины: Трансформаторы / Б. Н. Сергеевков, В. М. Киселев, Н. А. Акимова. – М.: Высшая школа. - 1989. –352с.
3. А. с. 639120 СССР, МПК H02P 13/04. Способ включения трехфазного трансформатора /А. М. Гусев (СССР). – №2529320/24-07; заявл. 12.09.77; опубл. 25.12.1978, Бюл. №47.
4. Патент № 2536304 на полезную модель (Рос. Фед.), МПК B60M 3/00, H02P 13/06. Способ включения трансформатора подстанции /В. С. Климаш, В. И. Тараканов; заявл. 08.05.2013; опубл. 20.12.2014, Бюл. № 35.
5. Халіков В. А. Процеси та організація комутації трифазного трансформатора /В. А. Халіков // Технічна електродинаміка. - 2012. - № 4. - С. 37 - 45.

A. Novosel'tsev, Corresponding member of the NAS of Ukraine,  
Institute of Engineering Thermophysics of the NAS of Ukraine

V. Kyryk, Dr. Sc., Professor,

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

### EXCLUSION OF EXTREME REGIMES WHEN SWITCHING THREE-PHASE TRANSFORMERS

*In this paper, the problem of the occurrence of aperiodic burst of currents during switching of three-phase transformers due to the saturation of their magnetic circuits is considered. The possibilities of avoiding extreme currents in transformer windings with the help of alternating switching of thyristor keys are shown. The*

*consequence is the elimination of the negative effects of transients in general and energy supply in particular. The model of control system of switching with automatic choice of transformer switching moments, which eliminates the appearance of unwanted transients, is presented.*

**Keywords:** power transformer, key, commutation, magnetization curve, saturation of the magnetic circuit, transient process.

#### References

1. Klimash V. S. Sposoby vklyucheniya trekhfaznogo elektrooborudovaniya i ikh realizatsiya /V. S. Klimash. V. I. Tarakanov //Voronezh: Voronezh. innovats.-tekhnol. tsentr. Elektrotekhnicheskiye komplekсы i sistemy upravleniya. - 2015. - № 2. - S. 24–28. (Сb. nauch. trudov).
2. Sergeyenkov B. N. Elektricheskiye mashiny: Transformatory / B. N. Sergeyenkov. V. M. Kiselev. N. A. Akimova. – M.: Vysshaya shkola. - 1989. – 352s.
3. A. s. 639120 SSSR. MPK H02P 13/04. Sposob vklyucheniya trekhfaznogo transformatora /A. M. Gusev (CCCR). – №2529320/24-07; zayavl. 12.09.77; opubl. 25.12.1978. Byul. №47.
4. Patent № 2536304 na poleznuyu model (Ros. Fed.). MPK B60M 3/00. H02P 13/06. Sposob vklyucheniya transformatora podstantsii /V. S. Klimash. V. I. Tarakanov; zayavl. 08.05.2013; opubl. 20.12.2014. Byul. № 35.
5. Khalikov V. A. Protsey ta orhanizatsiia komutatsii tryfaznoho transformatora / V. A. Khalikov // Tekhnichna elektrodynamika. □ 2012. □ № 4. □ S. 37-45.

УДК 621.311

**А.В. Новосельцев**, д-р техн. наук, чл.кор. НАН України,  
**Інститут технічної теплофізики НАН України,**

**В.В. Кирик**, д-р техн. наук, проф.,

**Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»**

#### **ТИРИСТОРНАЯ КОММУТАЦИЯ ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ, КАК СРЕДСТВО ИЗБЕЖАНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ**

*В работе рассмотрена проблема возникновения аperiodических всплесков токов при коммутации трехфазных трансформаторов вследствие насыщения их магнитопроводов. Представлены возможности избегания экстремальных токов в обмотках трансформатора средствами преобразовательной техники за счет синфазного поочередного включения ключей тиристорного коммутатора и, как следствие, устранение негативных последствий для устройства в целом и питающей сети в частности.*

**Ключевые слова:** силовой трансформатор, ключ, коммутация, кривая намагничивания, насыщение магнитопровода, переходный процесс.

Надійшла 01.11.2017

Received 01.11.2017