

**КОМУТАЦІЙНІ ПРОЦЕСИ У ТРИФАЗНИХ ТРАНСФОРМАТОРАХ  
З ТРИПРОВІДНОЮ СИСТЕМОЮ ЖИВЛЕННЯ****В.А.Халіков**, канд.техн.наук

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна. email: [xva@nm.ru](mailto:xva@nm.ru)

*Розглядаються комутаційні процеси у трифазних трансформаторах з різними конфігураціями з'єднання обмоток при відсутності в їхній системі живлення нульового проводу. Проведено візуальне моделювання процесів засобами програмного пакету MATLAB. Запропоновано систему управління комутацією, що дозволяє уникнути ефекту насичення магнітопроводу трансформатора та пов'язаних із цим негативних проявів. Бібл. 5, рис. 12.*

**Ключові слова:** трансформатор, комутація, перехідний процес, моделювання.

Комутація трифазних трансформаторів (ТФТ) завжди була проблемною задачею і вона, як правило, асоціюється з екстремальними процесами в обмотках трансформатора у вигляді згасаючих сплесків вхідного струму. Вони спричиняються насиченням магнітопроводу в комутаційному проміжку часу [1,7,8]. Це змушує розробляти алгоритми включення ТФТ, спрямовані на недопущення або пом'якшення такого роду струмових ексцесів. Розроблені алгоритми комутації [2] дають змогу уникнути згаданих проявів, проте розраховані на те, що у всіх трьох стрижнях осердя трансформатора на момент його наступного включення наявне нульове значення магнітного потоку, тобто магнітопровід знаходиться у стані повної розмагніченості. Проте при асинхронному відключенні ТФТ у більшості випадків хоча б один із стрижнів магнітопроводу все ж буде знаходитися у стані, близькому до насичення, а інші матимуть на цей момент проміжні, тобто в деякій мірі менші початкові значення залишкового магнітного потоку  $\Phi_3$ . Експоненціальний спад  $\Phi_3$  до прийнятного значення, хоча б до рівня у 10...20% від амплітуди потоку  $\Phi_m$ , характерного для номінального режиму роботи трансформатора, відбувається у кожному окремо взятому стрижні протягом досить великого проміжку часу, що не дозволяє одержати прийнятні результати при спробі реалізації на цьому відрізку часу згаданих алгоритмів включення ТФТ [2]. Проблема стає ще більш актуальною, коли з технологічних або будь-яких інших мотивів необхідно виконувати періодичний або дискретно-разовий цикл включення-відключення ТФТ у межах даного проміжку, що спричиняє свого роду ефект накопичення, тобто поступового збільшення намагніченості осердя. У такому разі виконання розроблених у [2] алгоритмів комутації ТФТ, спрямованих на уникнення появи екстремальних сплесків вхідних струмів, у згаданому часовому проміжку стає ще більш неприйнятним, а їхнє застосування буде ефективним лише після саморозмагнічування осердя трансформатора. Тобто необхідна оцінка можливостей розробки і реалізації простих принципів виключення трансформатора, при виконанні яких магнітопровід приводився б у розмагнічений стан за прийнятний і по можливості мінімальний проміжок часу. У протилежному разі необхідна розробка альтернативних принципів організації комутації ТФТ.

Для вирішення такого роду задач за задовільної збіжності обчислень, прийнятній достовірності отримуваних результатів і т.п. якнайкраще підходить програмний пакет візуального імітаційного моделювання MATLAB/Simulink (розділ силової електроніки SimPowerSystems) з достатньо розробленою методологією його застосування [6]. У наведених нижче викладках для можливості порівняння параметри трансформаторів та їхні навантаження взято аналогічними, як і у прикладах реалізації комутації ТФТ, запропонованих у [2], тобто апроксимацію кривої намагнічування виконано трьома відрізками під різним кутом нахилу, два крайніх із яких відповідають насиченому стану магнітопроводу, а середній – номінальному режиму роботи [5]. Це дає можливість одержати чітку якісну картину суті процесів (що більш важливо в даному випадку) проте кількісно визначає системну похибку у 10...15% від реальних значень величин.

Передбачуваність у процесах забезпечується синхронізмом виконання комутацій відносно фазових кутів параметрів струму мережі живлення як при включенні, так і при відключенні трансформатора, наскільки це дозволяє природна комутація тиристорних ключів. Зрозуміло, що в такому разі на момент закриття відповідних ключів комутатора буде мати місце значна варіація величин магнітних потоків  $\Phi_3$  кожного із стрижнів осердя, яка окрім всього, в першу чергу, визначається зміною характеру навантаження. Як правило, найбільші значення  $\Phi_3$  досягаються при активному характері на-

вантаження трансформатора. За приклад можна взяти схему комутації ТФТ за відсутності нульових проводів, наведену на рис. 1, із однакою конфігурацією з'єднання як первинних, так і вторинних обмоток трансформатора “зіркою” (Y/Y) та нульових початкових умов для магнітопроводу трансформатора, тобто за умов його повного розмагнічення. Такого роду схемі візуально відповідає модель у середовищі MATLAB/Simulink, що наводилася на рис. 3 у [2], в якій можна, при необхідності і залежно від поставленої задачі, довільно змінювати схеми з'єднання обмоток ТФТ через блок зміни його параметрів.

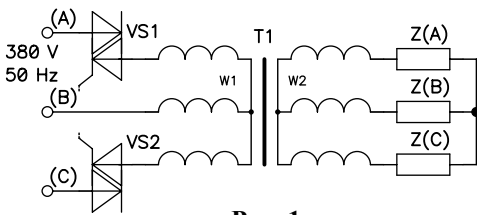


Рис. 1

Коли для вхідної лінійної напруги  $U_{I(AB)}$  брати відлік часу ( $t_0=0$ ) від нульового значення її фазового кута  $\psi_0=0$ , то при включенні ключа VS1, за умови досягнення цією напругою своєї амплітуди ( $t_1=5,0$  мс,  $\psi_1=\pi/2$ ) та подальшому замиканні VS2, але вже при переході кривою  $U_{I(AB)}$  нульового рівня ( $t_2=10,0$  мс,  $\psi_2=\pi$ ), одержимо режим включення ТФТ без перехідного режиму в первинній обмотці, пов'язаний з насиченням магнітопроводу трансформатора (рис. 2, а). Він характеризується циркуляцією магнітного потоку в межах  $1,0 \dots -1,0$  (значення потоку наводяться у відносних одиницях, приведених до його номінальної величини), характерних для усталеного режиму роботи трансформатора відразу після включення VS2. Особливістю такого почергового підключення обмоток трансформатора є одночасна миттєва зміна на  $30^\circ$  (при  $t_2=10,0$  мс) фазових кутів вхідних струмів  $I_{1(A)}$  та  $I_{1(B)}$ , яка пов'язана із включенням VS2 (рис. 2, б).

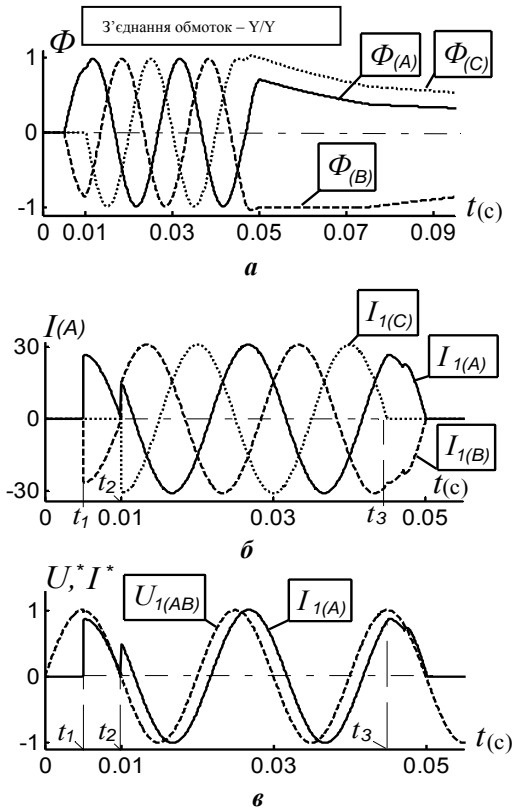


Рис. 2

До цього моменту часу (в інтервалі  $t_1 \dots t_2=5,0 \dots 10,0$  мс) ТФТ фактично перебував у режимі роботи, подібному до однофазного, коли за активного навантаження характерною є синфазність  $U_{I(A)}$  та  $I_{1(A)}$ . Це наочно ілюструє рис. 2, в, де відповідні криві напруги та струму зведені до співмірних одиничних по амплітуді відносних величин.

Одночасне зняття сигналів управління із ключів VS1 та VS2 при  $t_3=45,0$  мс та подальше їхнє вимкнення при досягненні відповідними струмами  $I_1$  нульових рівнів (рис. 2, б) призведе до подальшого спаду магнітних потоків. Причому, як видно з пофазних діаграм приведених значень потоків відповідних стрижнів магнітопроводу, тільки  $\Phi_{(A)}$  почне свій спад із значення, суттєво меншого від одиниці, а  $\Phi_{(B)}$  та  $\Phi_{(C)}$  на момент закриття ключа VS2 будуть мати відповідно максимальні крайні значення, характерні для усталеного режиму, а саме  $\Phi_{m(B)}=-1,0$  та  $\Phi_{m(C)}=+1,0$ . Окрім того, при комутації розподіл потоків в магнітопроводі набуває такого виду, що безпосередньо після виключення VS2  $\Phi_{(B)}$  залишається протягом досить тривалого часу незмінним. Тому момент часу наступного включення трансформатора (тобто виконання комутації відповідних ключів при тих самих фазових кутах  $\psi_1=\pi/2$  та  $\psi_2=\pi$  із таким самим задовільним результатом) визначається фактично тривалістю спаду цього потоку до прийнятної, достатньо близької до нуля, величини. Відносно незначна зміна конфігурації включення вторинних обмоток ТФТ (рис. 1) за рахунок введення електричного зв'язку між їхньою спільною

точкою з'єднання та аналогічною точкою системи навантаження, тобто введення нульового проводу (конфігурація з'єднання обмоток – Y/Y<sub>n</sub>), не позначається на первинному включенні трансформатора (рис. 3, а) та його усталеному режимі роботи. Проте комутаційний процес при відключенні трансформатора від мережі живлення за рахунок іншого перерозподілу струмів вторинних обмоток дещо зміниться у бік незалежності характеру спаду магнітних потоків в окремих стрижнях магнітопроводу. Впевнитися у цьому можна при порівнянні однойменних потоків на графіках рис. 2, а та рис. 3, а. Найбільш чітко різниця проявляється при порівнянні на цих рисунках кривих, відповідних  $\Phi_{(B)}$ .

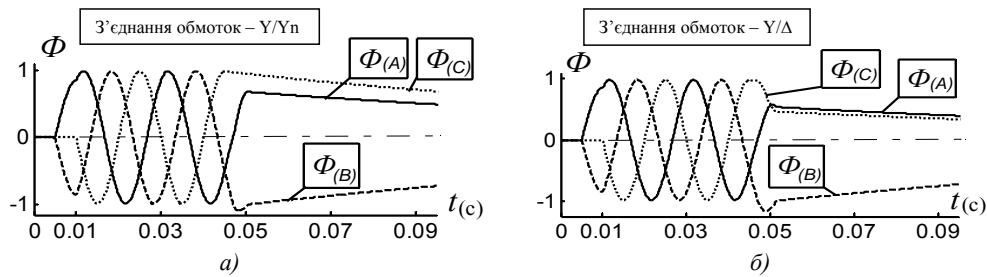


Рис. 3

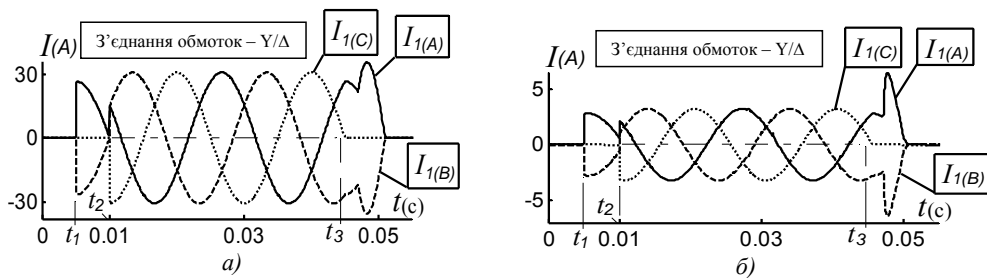


Рис. 4

рис. 2, *a* залежність  $\Phi(B)$  у часовому проміжку 45 ... 55 мс має дещо більший характерний сплеск, амплітуда якого суттєво перевищує (приблизно на 17%) значення, притаманне усталеному режиму трансформатора (при даній полярності потоку  $\Phi_{m(B)} = -1,0$ ). Такого роду аномалія в поведінці  $\Phi(B)$  при знеструмленні трансформатора свідчить про насичення відповідного стрижня магнітопроводу, що проявляється у сплеску струму первинної обмотки в комутаційному проміжку часу (рис. 4, *a*).

При усталеному режимі роботи трансформатора циркуляція його магнітних потоків є динамічно зрівноваженою системою відносно осі, проведеної через їхні нульові значення (сума миттєвих значень потоків для будь-якого конкретного моменту часу в такому режимі буде дорівнювати нулю). Переривання струму за природною комутацією тиристорів через різні значення фазних кутів відбувається для однієї із підключених фаз завжди раніше відносно інших, що порушує зрівноваженість інерційної системи магнітних потоків. Це провокує безпосередньо після моменту часу  $t_3$  (рис. 4, *a, б*) подальше одиночне сплескоподібне збільшення значення потоків відповідних стрижнів ( $\Phi(B)$ ) на рис. 3, *б*). Значення  $\Phi(B)$  у ході своєї зміни перевищує межу ( $\Phi_m = -1$ ), яка відокремлює область насиченого стану магнітопроводу, тому, як наслідок, це спричинить аперіодичне одиночне збільшення вхідного струму.

Таким чином, відключення ТФТ від мережі живлення може супроводжуватися, на відміну від однофазного трансформатора (ОФТ), сплесками струму споживання, а конфігурація включення обмоток трансформатора в тій чи іншій мірі може сприяти цьому (рис. 4, *a, б*) або ж виконувати відносно них пригнічуючу функцію (рис. 2, *б*). Причиною є підпорядкованість процесів у магнітопроводі трансформатора принципу електромагнітної інерції, відповідно до якого для магнітного потоку характерною є тенденція до збереження незмінними своїх величини та напрямку траєкторії. При цьому тривалість та крутизна форми магнітного потоку на етапі спаду буде залежати від значення навантаження вторинної обмотки трансформатора на момент його обезструмлення (тобто уповільненість потоку пропорційна величині навантаження). Отже, відключенням ТФТ у режимах перевантаження або близьких до номінального буде відповідати відносно пологої форма спаду потоку і, навпаки, незначна величина навантаження буде причиною більш швидкого зменшення величини потоку. За відсутності навантаження безпосередньо після закриття ключа його миттєве значення фактично зводиться до нуля.

Коли комутації виконуються при з'єднанні первинних фазних обмоток трансформатора трикутником, то незалежно від вибору схеми з'єднання його вторинних обмоток вхідні струми у відповідних фазах будуть мати ідентичний характер як за формою, так і величиною, і по суті повторюватимуть рис. 2, *б*, представлений для конфігурації обмоток Y/Y. Тобто, з точки зору величини сплесків струму при відключенні застосування конфігурацій з'єднання обмоток  $\Delta/\Delta$ ,  $\Delta/Y$ ,  $\Delta/Y_n$ , Y/Y є більш прийнятним, особливо порівняно із тими самими характеристиками для схеми Y/Δ. Проте характер поведінки магнітних потоків буде дещо іншим. Для прикладу, на рис. 5 показано криві потоків, які

Зміна схеми включення вторинних обмоток трансформатора із "зірки" – Y (рис. 1) на "трикутник" – Δ (схема з'єднання обмоток – Y/Δ) не призводить після закриття ключів – з

точки зору форми та характеру подальшого спаду потоку – до істотних змін, що ілюструє рис. 3, *б*. Але на цьому графіку в порівнянні із аналогічними кривими для схем Y/Y<sub>n</sub> – рис. 3, *a* та Y/Y –

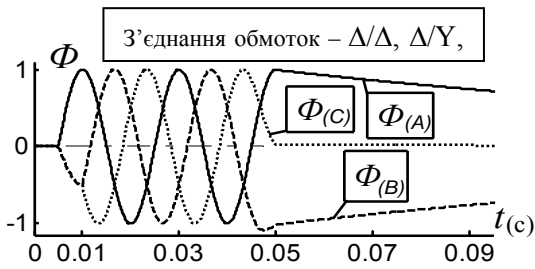


Рис. 5

протилежної полярності, щоб звести значення  $\Phi_{(A)}$  та  $\Phi_{(B)}$  до нуля. Такого роду операція ефективна для однофазних трансформаторів та ТФТ за наявності підключення нульового проводу на первинній стороні такого трансформатора ( $Y_n / Y_n$ ), коли він фактично може розглядатися як конструктивна та електромагнітна комбінація трьох формально незалежних ОФТ, кожний з яких включено окремо між відповідною “фазою” та “нулем” [1, 4]. Проте через електромагнітний взаємозв’язок процесів такого роду організувати операцію одномоментно неможливо, оскільки кожна зміна  $\Phi_{(A)}$  та  $\Phi_{(B)}$  відразу викликає збільшення модуля  $\Phi_{(C)}$  при збереженні загальної тенденції до експоненціального спаду тих потоків, значення яких на цьому етапі комутаційних процесів стало відмінним від нуля. Тут додатковий перемагнічуючий імпульс напруги формується при повторному включенні VS1 коротким імпульсом управління при  $t_4=75,55$  мс. Його форма повторює хід кривої одного із вхідних струмів (рис. 6, б). Разом із тим, на момент закриття VS1 ( $t=80,0$  мс) можна оцінити і візуально (рис. 6, а), що сума модулів потоків буде приблизно у два рази менша, ніж на момент його відкриття. Проте

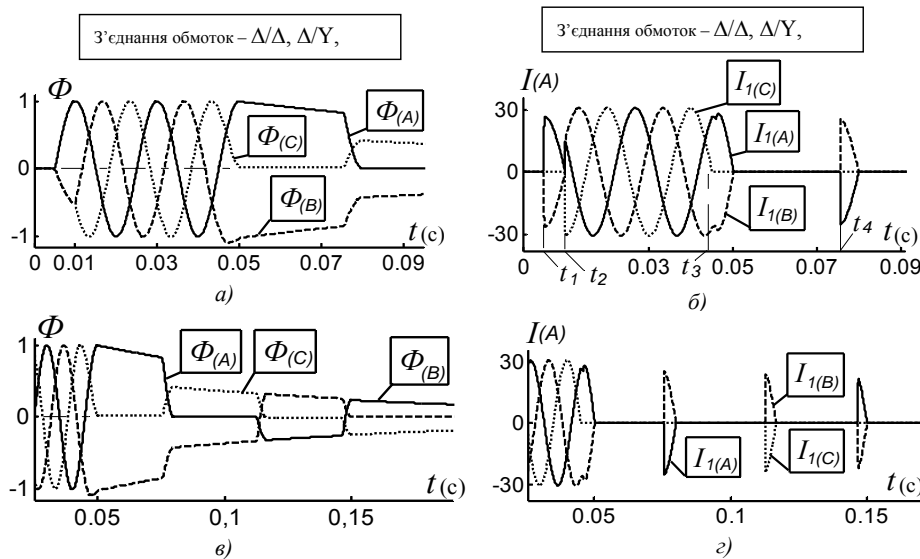


Рис. 6

подальші маніпуляції з наступними почерговими короткочасними включеннями VS2, VS1 такого ефекту вже не дають і в часі (у порівнянні з тривалістю природного пасивного процесу розмагнічування) суттєвого виграшу не буде. Про це свідчать відповідні діаграми потоків у стрижнях ТФТ (рис. 6, в) та вхідних струмів (рис. 6, г).

Отже, привести магнітопровід ТФТ до нульових початкових умов можливо фактично лише двома способами: або через режим попереднього знестру-

млення його вторинних обмоток, і тоді це буде досягнуто практично миттєво після виключення останнього ключа комутатора (VS2), або ж за відносно тривалий проміжок часу (залежно від величини навантаження та значення струму намагнічування) за рахунок експоненціального по формі і природного за характером процесу саморозмагнічування. Активізація процесу розмагнічування шляхом подачі додаткових фазово-регульованих імпульсів напруги ефективна лише на першому початковому етапі її застосування.

Коли неможливо забезпечити нульові значення величин магнітних потоків у стрижнях ТФТ для реалізації комутації ТФТ в моменти часу, відповідні наперед жорстко заданим фазовим кутам вхідної напруги, то тоді необхідна розробка більш гнучких алгоритмів виконання комутацій.

Один із таких варіантів реалізується при дотриманні принципу комутації, відповідно до якого підключення потрібної обмотки виконується в момент рівності миттєвих значень двох магнітних потоків – поточного, реального існуючого на момент комутації, та усталеного, передбачуваного для піс-

лякомутаційного режиму. У цьому випадку не ставиться задача розмагнічування осердя, а визначаються прийнятні моменти комутації, які адаптуються під наявний стан стрижнів магнітопроводу [2, 4, 5].

При цьому маємо ряд дискретних часових відліків, під час яких можливе включення необхідного ключа при дотриманні прийнятних форми і величини вхідного струму. На рис. 7, а показано суміщені криві потоків  $\Phi_{(A)}$  (поток в стрижні до та після виключення комутатора) та  $\Phi_{y(A)}$  (поток, який було б бажано одержати безпосередньо після наступного включення ключа VS1 комутатора). На етапі експоненціального спаду точки перетину  $\Phi_{(A)}$  із синусоїдою  $\Phi_{y(A)}$  повинні дати моменти часу  $t_{k1} \dots t_{kN}$  (показані позначками на осі часу), в яких можливе включення VS1 без екстремальних струмових проявів, тобто точки комутації. Якщо замкнути ключ VS1 у момент часу, відповідний одній із таких точок, наприклад, при  $t_k = t_{k5} = 0,1073$  с, то характер поведінки та форма кривих магнітних потоків буде відповідати рис. 7, б. Як видно з даного графіка, крива  $\Phi_{(A)}$  після  $t_k = 0,1073$  с не виходить за допустимі

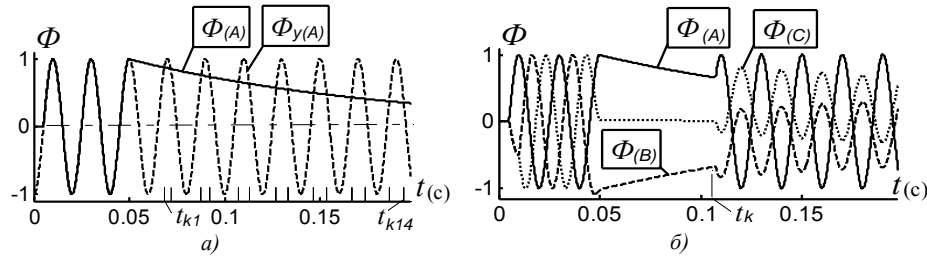


Рис. 7

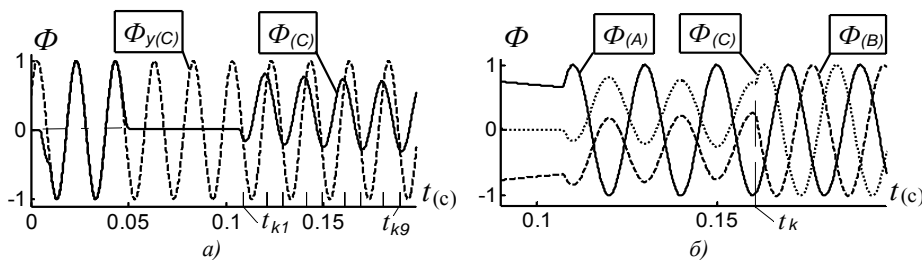


Рис. 8

межі ( $\Phi_m = \pm 1$ ), що гарантує відсутність сплесків струму намагнічування: фактично тут повна аналогія з такого ж роду комутацією для ОФТ. Особливістю є лише характер поведінки потоків у суміжних стрижнях  $\Phi_{(B)}$  та  $\Phi_{(C)}$ : вони після моменту включення  $t_k$  визначаються сумою відповідних експоненціальних спадів та синусоїди з амплітудою, що дорівнює половині номінального значення  $U_1$ . Таким чином, для виконання наступного етапу комутації (замикання VS2) необхідно впевнитись, що принцип,

реалізований на першому етапі, справедливий і для такої, більш складної, аперіодично-коливальної поведінки магнітного потоку в передкомутаційному періоді.

По аналогії з рис. 7, а на рис. 8, а показано суміщені криві потоків  $\Phi_{(C)}$  (характеризує миттєве значення потоку стрижня) та  $\Phi_{y(C)}$  (відображає бажане миттєве значення потоку, яким би він повинен бути після виконання комутації VS2). Відповідно в точках співпадіння цих кривих одержимо точки комутації  $t_{k1} \dots t_{k9}$  для VS2 (рис. 8, а). Замикання VS2 у момент часу, відповідний одній із цих точок, наприклад, при  $t_k = t_{k6} = 0,1609$  с (рис. 8, б), призведе до зміни форми кривих магнітних потоків, проте, як і на попередньому етапі комутації, їхня амплітуда вкладається в задані межі і не може бути причиною екстремальних сплесків струму, що ілюструє рис. 9. Тобто, як потоки в стрижнях магнітопроводу, так і вхідні струми фаз ТФТ після завершення другого етапу комутації (замикання VS2) відразу виходять на усталений режим роботи без будь-яких суттєвих відхилень. Таким чином, принципи організації комутації, розроблені для ОТФ, незважаючи на певні відмінності процесів в ТФТ, можуть бути застосовані і для них.

На рис. 10 показано модель, що функціонує в системі MATLAB/Simulink і яка реалізує автоматичний вибір необхідних дискретних часових точок комутації при довільно заданому часі включення відповідного ключа.

Принципи побудови такого роду моделей вже висвітлювалися [2,5]. Основу роботи моделі як системи складають два канали порівняння, реалізовані за допомогою блоків Relational1 та Relational2. Перший із них зрівнює проінтегровану і відповідним чином промасштабовану лінійну напругу  $U_{I(AB)}$  з напругою, пропорційною магнітному потоку  $\Phi_{(A)}$ , а другий виконує таку ж операцію, але відносно  $U_{I(CA)}$  та  $\Phi_{(C)}$ .

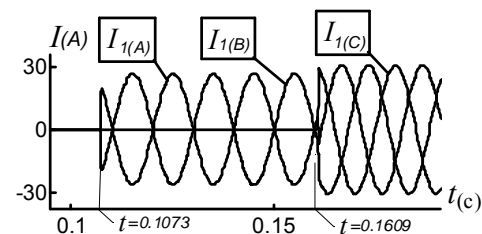


Рис. 9

Результат порівняння – імпульси напруги прямокутної форми і одиничної амплітуди: із них виділяються позитивний і негативний фронти. Функцію виділення виконують блоки Logical3, Logical4.

Вихідним сигналом блоку Logical3 є ряд дискретних часових відліків у формі коротких імпульсів напруги одиничної амплітуди, ілюстрацією яких є позначки на часовій осі рис. 7, а, на які припадає сприятливий момент часу для включення VS1. Блок Logical4 аналогічно задає такого ж роду моменти, але для VS2, що і ілюструє рис. 8, а. Зміною параметрів блоків Timer1 та Timer2 довільно задають відповідно час зняття та наступної подачі управління на ключі комутатора. Тригери D Latch1 і D Latch2 приводять лінійний час блоку Timer2 до найближчих дискретних відліків, одержаних у результаті порівняння, від яких і починається відлік включеного стану відповідно VS1 або VS2. Блоки  $U > \Phi(\text{pu})1$ ,  $U > \Phi(\text{pu})2$ , K1, K2 є пропорційними ланками (Gain) і їхнє призначення – це приведення різномасштабних величин до однакового співмірного одиничного за амплітудою значення. Для  $U > \Phi(\text{pu})1$  та  $U > \Phi(\text{pu})2$  коефіцієнт підсилення повинен бути  $1/(380 * \sqrt{2})/2/\pi/50$ , а для K1 та K2 –  $1/\sqrt{3}$  (при схемі з'єднання первинних

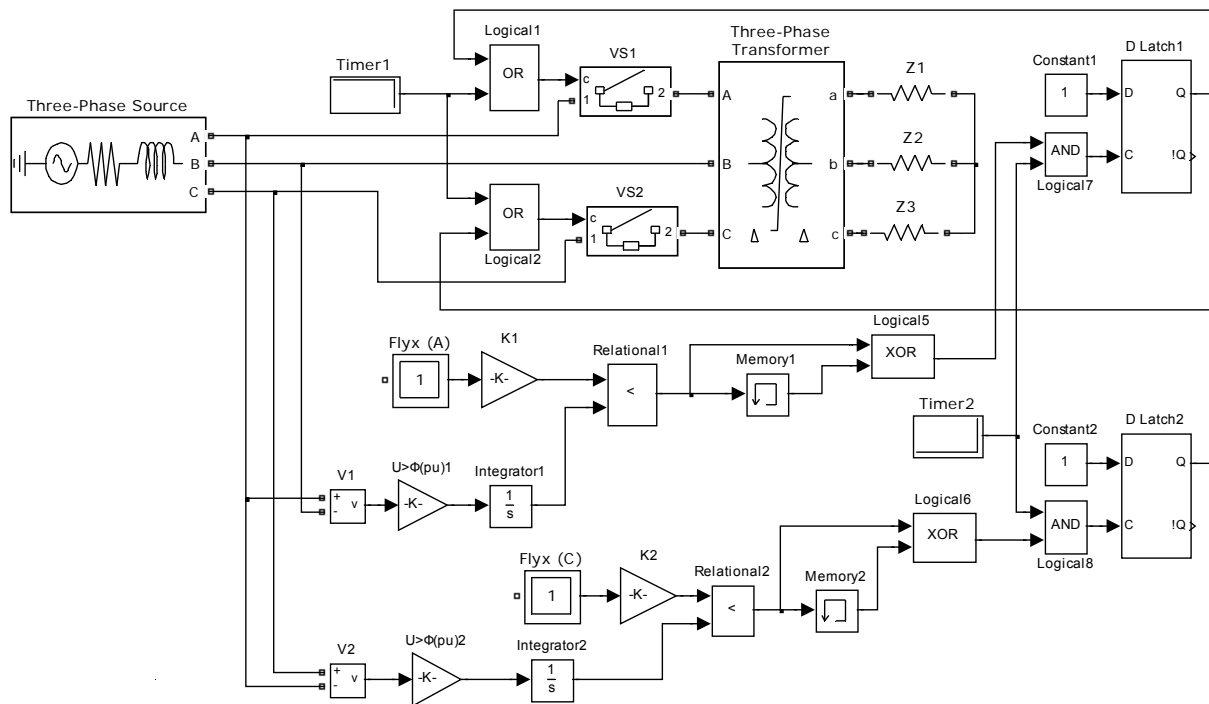


Рис. 10

обмоток “зіркою” параметр для K1 і K2 повинен мати одиничне значення). У даному випадку при моделюванні краще вибрати алгоритм (Solver) обчислення **ode23t**.

При розробці такого виду системи комутації може виникнути питання, а який же мінімально допустимий проміжок часу може бути між суміжними командами на повне знеструмлення та подальше повторне підключення ТФТ. Адже цим визначається динамізм регулюючих можливостей системи комутатор-трансформатор. При цьому необхідно враховувати неповну керованість тиристорного ключа, через що виникає затримка між подачею команди на виключення та її реальним виконанням, яка часто пов’язується з половиною періоду струму. Це справедливо для однофазних систем комутації, а у трифазних зміна реакції комутатора буде спостерігатися при одночасному знятті сигналу управління із усіх ключів, через кожний інтервал у  $60^\circ$  (3,33 мс). Через  $180^\circ$  (10,0 мс) одержимо дзеркальне відображення процесу відносно нульового значення осі ординат, а через  $360^\circ$  (20,0 мс) – повну фазову повторюваність процесу виключення. Тобто багатофазність дещо зменшує час відгуку системи, хоча тривалість процесу до повного відключення напруги залишається такою ж, як і при комутації ОТФ. Іншим фактором затримки є дискретність точок комутації. Як видно із рис. 7, а найперша точка ( $t_{k1}$ ) після знеструмлення ТФТ локалізується поблизу моменту амплітуди потоку. Це означає, що навіть тоді, коли буде подана команда на включення ключа одночасно із моментом часу повного знеструмлення обмоток трансформатора (початок ділянки експоненціального спаду потоку на рис. 7, а), то до початку реакції системи у формі подачі сигналу на включення VS1 мине час, співставний із періодом струму.

На рис. 11, а, б показано відповідні криві потоків та фазних струмів для випадку роботи системи, коли її реакція на відключення починається із припинення струму  $I_{1(C)}$  при  $t=0,025$  с (рис. 11, б), а включення

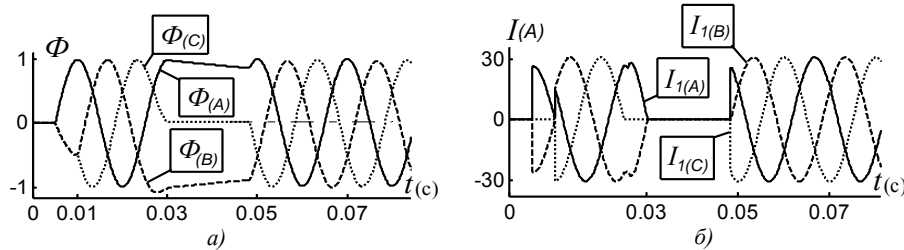


Рис. 11

ТФТ – із досягненням першої ж точки прийнятної комутації при  $t=0,0485$  с. Якщо і далі змінювати параметр блоку Timer2 у сторону зменшення паузи в струмі, то одержимо режим постійної неперервної роботи одного із ключів, тобто від режиму 100% модуляції енергопередачі перейдемо до її регулювання за допо-могою лише одного ключа. При реалізації такого ре-жиму роботи раціонально задавати часові параметри включення окремо для кожного силового ключа. Тобто необхідно функціонально розділити блок Timer2 на два, які повинні бути підключені до тригерів D Latch1 і D Latch2 незалежно. Але з точки зору функціонування системи зменшенню паузи в струмі заважає режим динамічної неврівноваженості потоків, який виникає одразу із виключенням одного з ключів комутатора. У всіх вищенаведених графіках потоків він проявляється у формі деякої аномалії  $\Phi_{(B)}$  у бік його збільшення. Коли обчислити суму миттєвих значень потоків у стрижнях магнітопроводу (рис. 11, а), наприклад, у схемах з'єднання обмоток  $\Delta/\Delta$  і  $Y/\Delta$ , і віднести результат до одиничного усталеного значення одного із них, то наслідок графічно матиме вигляд, відповідний рис. 12. Горизонтальні відрізки цих залежностей співвідносні режимам динамічної врівноваженості потоків магнітопроводу, а сплески тривалістю близько половини періоду (5,0 мс), характеризують степінь її втрати. Отже ні перше включення трансформатора із нульових початкових умов, ні подальші комутації (якщо вони виконані відповідно до наведених принципів) не призводять до порушення рівноваги. Причиною сплесків є лише переривання струму ключа та властива потокам підпорядкованість принципу інерційності. Також очевидна часова належність згаданих принципів комутації, в тому числі і за результатом порівняння магнітних потоків, до статичних, тобто горизонтальних відрізків (рис. 12). Через це необхідно уникати тих моментів часу включення ТФТ, які припадають на інтервали динамічної неврівноваженості потоків магнітопроводу, бо кінцевий результат буде далекий від бажаного. Природно, що застосування в комутаторі повнокерованих ключів знімає такого роду проблему. З рис. 3, б і рис. 12 випливає, що за інших рівних умов включення первинних обмоток трансформатора “трикутником” для забезпечення ефективної організації комутаційного процесу більш прийнятне.

Таким чином, можна зробити висновок, що оперативне приведення магнітопроводу ТФТ до стану, відповідного нульовим початковим умовам за його потоком, можливе через режим попереднього знеструмлення його вторинних обмоток. У інших випадках необхідний результат досягається за рахунок природного процесу саморозмагнічення протягом досить тривалого проміжку часу. В короткочасній перспективі це не дає визначеності щодо стану магнітопроводу на момент наступного включення і є передумовою згаданих негативних проявів.

Проте сплесків струму, пов'язаних із насиченням магнітопроводу, можна уникнути, якщо керуватися правилом, відповідно до якого *включення необхідного ключа повинно виконуватися в момент рівності миттєвих величин поточного магнітного потоку стрижня із його усталеним значенням, яке повинне бути в ньому після комутації*. За цієї умови комутація відбуватиметься таким чином, 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 заздалегідь задані для нього межі, що кореспондуються із пологими відрізками спрощеної кусково-лінійної фігури апроксимації кривої намагнічування.

Необхідно відзначити, що для реалізації згаданих принципів, як правило, достатньо інформації про: вхідну напругу трансформатора, викликаний нею магнітний потік та напругу його вторинної обмотки за умови відносної жорсткості зовнішньої характеристики. При цьому будуть повністю використані електроенергетичні можливості трансформаторів завдяки уникненню різного роду ексце-

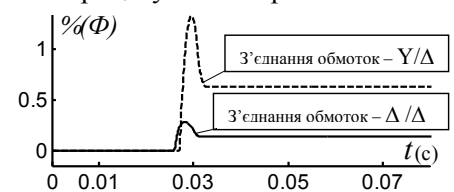


Рис. 12



сів через появу аперіодичних складових у струмі споживання, поліпшиться динаміка системи в цілому та електромагнітна сумісність. Обґрунтовані вище принципи комутації пройшли надійну апробацію, а їхня реалізація забезпечує надійне унеможливлення вказаних перехідних режимів незалежно від характеру навантаження і його величини. Це ж стосується також режимів багатократного струмового перевантаження, коли обмежуючими умовами стають лише температурний режим обмоток трансформатора та допустимий струм ключів комутатора.

1. Зирка С.Е., Мороз Ю.И., Мороз Ю.И., Тарчуткин А.Л. Моделирование переходных процессов в трансформаторе с учетом гистерезисных свойств магнитопровода // Техн. электродинамика. – 2010. – №2. – С. 11–19.
2. Окунь С.С., Сергеенков Б.Н., Киселев В.М. Под ред. Г.Н.Петрова. Трансформаторные и трансформаторно-тиристорные регуляторы-стабилизаторы напряжения. – М.: Энергия, 1969. – 184 с.
3. Халиков В.А. Процеси та організація комутації вольтододавчих трансформаторів // Техн. Електродинаміка. – 2011. – №5. – С. 48–58.
4. Халиков В.А. Процеси та організація комутації трифазного трансформатора // Техн. электродинамика. – 2012. – № 4. – С. 37–45.
5. Халиков В.А., Липківський К.О. Процеси та організація комутації трансформаторів // Техн. Електродинаміка. – 2010. – № 3. – С. 22–30.
6. Халиков В.А., Мозжаровський А.Г. Методологія застосування програмного пакета MATLAB при моделюванні та дослідженні електромагнітних процесів у трансформаторно-ключових виконавчих структурах: Навчальний посібник. – Київ, ІЕД НАН України, 2001. – 45 с.
7. Chiesa N. Power Transformer Modelling. Advanced Core Model. – Milan: Anno Accademico, 2005. – 137 p.
8. Khatri A., Rahi O. Optimal Desing Of Transformer: A Compressive Bibliographical Survey // Intern. Journal of Scientific Engineering and Technology (IJSET). – Vol. 1. – №2. – Pp. 159–167.

УДК 621.314.214

## КОММУТАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ С ТРЕХПРОВОДНОЙ СИСТЕМОЙ ПИТАНИЯ

В.А.Халиков, канд.техн.наук

Институт электродинамики НАН Украины, пр. Победы, 56, Киев–57, 03680, Украина. E-mail: [xva@nm.ru](mailto:xva@nm.ru)

*Рассматриваются коммутационные процессы в трехфазных трансформаторах с различными конфигурациями соединения обмоток при отсутствии в их системе питания нулевого провода. Проведено визуальное моделирование процессов средствами программного пакета MATLAB. Предложена система управления коммутацией, которая позволяет избежать эффекта насыщения магнитопровода трансформатора и связанных с этим неэластичных проявлений. Библи. 5, рис. 12.*

**Ключевые слова:** трансформатор, коммутация, переходный процесс, моделирование.

## TRANSIENTS IN THREE-PHASE TRANSFORMERS, THREE-WIRE POWER SYSTEM

V.A. Khalikov

Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine, Peremohy pr., 56, Kyiv–57, 03680, Ukraine.

Email: [xva@nm.ru](mailto:xva@nm.ru)

*Considered switching processes in the three-phase transformers with various configurations of winding connections in the absence of the power supply system of the neutral conductor. Visual simulation of transient processes is done with MATLAB and proposes measures to minimize the duration of the processes of. Means of visual simulation shows the dependence of decay processes residual magnetic flux in three-phase transformers, depending on the connection scheme. Attention is drawn to that disabling the transformer thyristor switcher accompanied by saturation of its magnetic circuit. Inertial nature of the magnetic flux decline is an obstacle to the next, fast time, connect the transformer to the mains. Patching, a system of three-phase transformer is not expected to reduce the magnetic flux to zero and not allowing inrush current in its windings. Presented a visual model of the proposed switching system and describes in detail the principle of its work. References 5, figures 12.*

**Key words:** transformer, switching, transient, modeling.

1. Zirka S.E., Moroz Yu.I., Moroz E.Yu., Tarchutkin A.L. Simulation of transients in the transformer with the magnetic hysteresis properties // Tekhnichna elektrodynamika. – 2010. – №2. – Pp. 11–19. (Rus)
2. Okun S.S., Sergeenkov B.N., Kiselev V.M. Ed. bu G.N.Petrova. Transformer and transformer-thyristor regulators-stabilizers of the voltage. – Moskva: Energiia, 1969. – 184 p. (Rus)
3. Khalikov V.A. Transient processes and organization to switchings buck–boost transformer // Tekhnichna elektrodynamika. – 2011. – №5. – Pp. 48–58. (Ukr)
4. Khalikov V.A. Processes and organization switching of three-phase transformer // Tekhnichna elektrodynamika. – 2012. – №4. – Pp. 37–45. (Ukr)
5. Khalikov V.A., Lypkivskiy K.O. Processes and organization of transformer switching // Tekhnichna elektro dynamika. – 2010. – №3. – Pp. 22–30. (Ukr)
6. Khalikov V.A., Mozharovskiy A.G. Methodology of modeling and studying of electromagnetic processes in transformer switching executive structure with MATLAB programme package: Navchalnyi posibnyk. – Kyiv, Instytut elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy, 2001. – 45 p. (Ukr)
7. Chiesa N. Power Transformer Modelling. Advanced Core Model. – Milan: Anno Accademico, 2005. – 137 p.
8. Khatri A., Rahi O. Optimal Desing Of Transformer: A Compressive Bibliographical Survey // Intern. Journal of Scientific Engineering and Technology (IJSET). – Vol. 1. – №2. – Pp. 159–167.

Надійшла 17.12.2012



Received 17.12.2012