УДК 621.314.214

ПРОЦЕСИ ТА ОРГАНІЗАЦІЯ КОМУТАЦІЇ ТРИФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

В.А.Халіков, канд.техн.наук,
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна.

Розглядаються перехідні процеси при комутації первинної обмотки трифазного трансформатора, що виникають внаслідок насичення його магнітопроводу. Проведено візуальне моделювання процесів засобами програмного пакету MATLAB та запропоновано заходи щодо мінімізації чи позбавленню екстремальних проявів, що можуть виникати при цьому. Бібл. 3, рис. 11.
Ключові слова: трансформатор, комутація, перехідний процес, моделювання.

Електротехнічні установки більш-менш значної потужності асоціюються, як правило, із застосуванням в них трифазних трансформаторів (ТФТ). Тому багато хто стикався із екстремальними перехідними процесами в первинній обмотці такого трансформатора, спричиненими насиченням магнітопроводу в момент її підключення до мережі живлення. В залежності від типономіналу трансформатора сплески струму первинної обмотки, в тому числі й у режимах близьких до холостого ходу трансформатора, можуть перевищувати у 5–7 разів її номінальний струм. Досить поширені пристрої, для яких композиційна структура – ключ/трансформатор – є основним виконавчим органом, режим роботи якого періодичні та досить часті дискретно-разові комутації трансформатора. Проте характер перехідних процесів, пов'язаний із насиченням магнітної системи, при розробці відповідних пристроїв часто ігнорується чи недооцінюється. Або ж при відповідальному підході все ж вибираються необхідні запаси по ресурсах комутаційних елементів, обмоток і т.п. в залежності від струму, що в них протікає, тобто при певних матеріальних затратах таки враховується екстремальний характер перехідних процесів.

Такий стан справ не сприяє ні режиму економії електроенергії, ні її якості в мережі живлення. Також при цьому виникають електромеханічні напруження в обмотках, викликані комутаційними струмами, відбувається їхній перегрів. Як наслідок, прискорюється старіння ізоляції обмоток, знижується надійність трансформатора і пристроїв в цілому тощо.

При застосуванні однофазних трансформаторів такого роду ексцесів можна уникнути, наприклад, в одному окремому випадку − при нульовому залишковому магнітному потоці осердя ($\Phi_з$=0), тобто при повному його розмагніченні; найбільш сприятливим для включення завжди є момент амплітуди (U_{1m}) синусоїдальної напруги, що прикладається до первинної обмотки трансформатора [1]. У такому разі трансформатор відразу виходить на режим усталеного магнітного потоку Ф, тобто його циркуляція буде відбуватися в рамках відрізка кривої намагнічування, для якого характерне велике значення магнітного опору. А взаємозв'язок потоку із напругою буде відображатися залежністю

$$\Phi=(U_{1m}/ w_1)\int \sin(\omega t - \pi)dt , \qquad (1)$$

де w_1 – кількість витків відповідної обмотки.

При цьому $u_1 = U_{1m} \sin \omega t$, $\Phi=\Phi m \sin(\omega t - \pi/2)$, а амплітудне значення потоку Φ_m осердя трансформатора в усталеному режимі визначається формулою

$$\Phi m = U_1/(4{,}44\, f\, w), \qquad (2)$$

де U_1 – діюче значення напруги первинної обмотки, f – частота струму мережі живлення.

У загальному ж випадку при довільній формі кривої вхідної напруги включення повинно виконуватися в момент рівності миттєвого значення магнітного потоку Ф осердя трансформатора із усталеним значенням його потоку, що повинен настати після комутації [2, 3]. Тобто при виборі моменту включення необхідно оперувати вольт-секундними площами відповідних напруг. При цьому викладений вище приклад – комутації при нульовому залишковому магнітному потоці – буде лише окремим граничним випадком, до того ж іще й спрощеним, через синусоїдальну форму кривої прикладеної напруги.

При розгляді процесів у ТФТ, як правило, при їхньому включенні завжди необхідно очікувати сплески струмів намагнічування, оскільки хоча б в одній із трьох фаз напруга в момент включення

© Халіков В.А., 2012

все ж буде близькою до нуля [1]. Тобто умови для включення обмотки трансформатора на цю фазу будуть несприятливі. Часто при аналізі процесів у ТФТ, як і в даному висновку, їх розглядають як декомпозицію із трьох однакових однофазних. Тому логічно припустити, що при конфігурації обмоток трансформатора "зіркою" (Y_n) із нульовим проводом позбутися сплесків струму можливо способом послідовного почергового підключення відповідних фаз (*A, B, C*) в моменти, коли напруга в них досягне відповідно значень: $U_{1m(A)}$, $U_{1m(B)}$, $U_{1m(C)}$. При частоті струму 50 Гц та нульовому початковому відліку значення фазового кута для напруги $U_{1(A)}$ такими найближчими моментами часу могли б бути: 5 mc ($\pi/2$ – для фази *A*), 11.66 mc ($\pi/2+120^o$ – для фази *B*), 8,33 mc ($\pi/2+60^o$ – для фази *C*) і т.п. із дискретністю їхнього повторення в один півперіод – 10 mc (π).

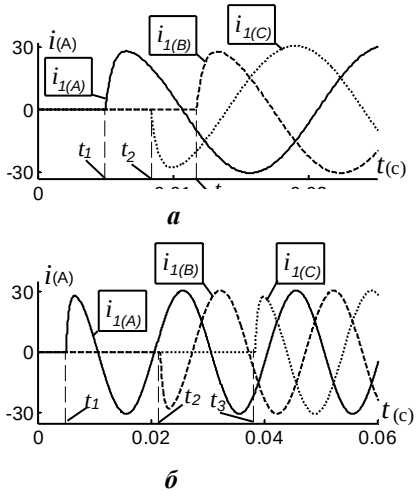
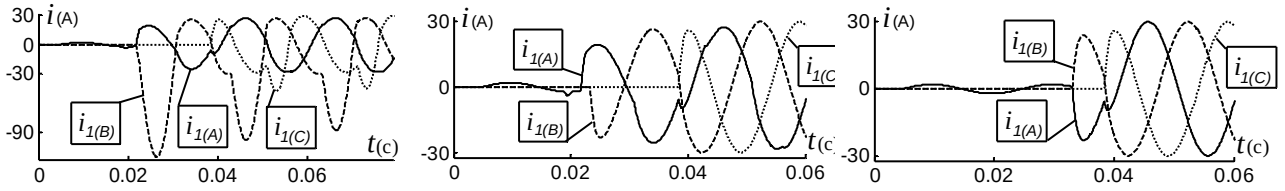


Рис. 1

І дійсно, при підключенні трьох однофазних трансформаторів у вказаних конфігураціях та черговості комутацій для кожного з них буде одержано фактично ідеальне протікання комутаційного процесу (рис. 1). На рис. 1, *а* показано струм i_1 первинної обмотки для максимально скороченого проміжку часу комутації всіх трьох фаз трансформатора, тобто при вищевказаних моментах включення ключів (t_1=5 mc, t_2=8,33 mc, t_3=11,66 mc). Природно, що як черговість підключення фаз, так і проміжки часу між цими операціями можуть бути іншими (рис. 1, *б*), необхідно лише витримати умову виконання комутації, яка повинна випадати на моменти часу, відповідні амплітуді напруги, при її синусоїдальній формі або ж на переходи через нуль обмежуючої кривої для вольт-секундної площі напруги u_1 при суттєвих відхиленнях її від форми синусоїди. Дані криві були одержані за допомогою імітаційної моделі схеми комутації в середовищі пакету MATLAB за вже розробленою методологією [3]. Напруга джерела струму складала 220/380 В, 50 Гц, а опір однієї фази навантаження, включеного зіркою (Y), – 10 Ом. Для спрощення та визначеності параметри моделі трансформаторів, у тому числі і параметри кривої намагнічування, вибрані абсолютно аналогічні, як і у розглянутих прикладах [2, 3], але при коефіцієнті трансформації 1,0. Номінальні значення потужності трансформаторів та напруги їхньої первинної обмотки відповідають опору навантаження та вихідній напрузі джерела струму.

Як видно із рис. 1, *а*, кожна наступна комутація, після першої (t_1), проводиться через 3,33 mc, що відповідає фазовому куту у 60° ($\pi/3$). Щодо прикладу рис. 1, *б*, то комутація обмотки трансформатора для фази *B* виконується при t_2=21,66 mc, а для фази *C* – при t_3=38,33 mc, тобто кратність цих значень при відліку від t_1 і по відношенню до часового проміжку 3,33 mc складе відповідно 5 і 10, що ілюструє некритичність вибору комутаційних моментів у часі. Проте, якщо перенести даний алгоритм комутації, що дає прийнятні результати для конфігурації Y_n із трьох однофазних трансформаторів, на ТФТ із такою самою схемою включення його первинної обмотки, то одержимо результат дуже далекий від бажаного (рис. 2, *а*). Лише у фазі *A* струм матиме прийнятні величину та форму, в інших фазах спостерігатимуться характерні сплески струму, пов'язані із насиченням магнітопроводу та подальшим експоненціальним їхнім спадом до свого усталеного значення.

Але ніщо не заважає здійснити деяку варіацію моменту підключення наступної фази, наприклад, у сторону збільшення значення t_2. У такому разі при t_2=23,33 mc буде досягнуто задовільного результату (рис. 2, *б*), причому не тільки для фази *B*, що можна б було передбачити, а і для фази *C*, для якої момент здійснення комутації не змінювався. Тобто ефект усунення сплесків струмів, пов'язаних із насиченням магнітопроводу ТФТ, досягається простим зміщенням моменту включення приблизно на 30°, тобто – 1,666 mc (23,33–21,66=1,67) від часу досягнення напругою відповідної фази своєї амплітуди. Про те, що це – закономірність, можна впевнитися простою перевіркою: визначається наступний момент досягнення напругою фази *B* своєї амплітуди (31,5 mc), до цього значення додається згаданий інтервал зміщення 1,66 mc і одержане число буде відповідати моменту часу прийнятної комутації (рис. 2, *в*). Очевидно, що кінцевий результат аналогічний наведеному на рис. 2, *б*.



а *б* *в*

Рис. 2

Таким чином, викладене дає можливість сформулювати алгоритм організації комутації для одного окремого випадку ТФТ, первинна обмотка якого включена в "зірку" із нульовим проводом. Він полягає у тому, що *при заданих прямому порядку чередування фаз (A, B, C) та такому самому порядку підключення відповідних обмоток трансформатора їхня комутація повинна відбуватися у момент досягнення напругою відповідної фази своєї амплітуди, за виключенням фази B, для якої включення проводиться із запізненням на 1,66 тс*. Разом із тим, для ТФТ характерна багатоваріантність умов, що впливають на організацію їхньої комутації. Це, в першу чергу, схема включення первинної обмотки трансформатора ("трикутником" – Δ, "зіркою" – Y) із нульовим проводом чи без нього, порядок послідовності фаз – прямий чи зворотний, порядок підключення фазних обмоток до мережі живлення і т.п. На основі комбінацій таких умов можна сформувати ряд можливих варіантів комутації і чисто механістично, підбором моментів часу включення відповідного ключа (маючи дані лише про напругу мережі живлення і не цікавлячись ходом процесів у магнітопроводі) сформувати для кожного із них свій алгоритм комутації, який би запобігав виникненню сплесків струмів намагнічування. Такий підхід має право на життя, проте більш-менш прийнятні і осмислені результати будуть одержані за його допомогою лише тоді, коли форма напруги візуально не відрізняється від синусоїдальної, несиметрія її фаз складає 5…10% і т.п., тобто похибку результату нашої дії буде компенсовано природним запасом магнітопроводу за індукцією, що закладається розробником трансформатора на випадок підвищення напруги, зміни її форми тощо. У ряді випадків може бути більш простим як алгоритм комутації, так і апаратна частина його реалізації.

Наприклад, при більш поширеній конфігурації включення обмоток Δ/Y для комутації ТФТ достатньо двох ключів (імітаційна модель для такої схеми в середовищі пакету MATLAB – рис. 3), а не три, як розглядалося раніше. Модель схеми цілком відповідає фізичному аналогу по формі і по суті і є досить зрозумілою з першого погляду. Вузли **Timer1** та **Timer2** задають час включення відповідного ключа (**К1**, **К2**), а результат виводиться на блоки візуалізації **Scope1**…**Scope3**. Вибір необхідної величини відбувається через внутрішні діалогові панелі відповідних вузлів, як то із **Three-Phase V-I Measurement** через **From1** на **Scope1** змінної **Vabc** – трифазних (або лінійних, в залежності від потреби) візуально суміщених напруг. Аналогічно виводяться фазні струми – змінна **Iabc,** або через блок **Multimeter** струми в обмотках трансформатора (**Three-Phase Transformer**) чи магнітні потоки у стержнях його осердя. Цифра на зображенні блоку **Multimeter** відповідає кількості змінних (3), що виводиться під'єднаним блоком візуалізації **Scope3**. Тому, навіть штатних, вмонтованих у графічну оболонку засобів, цілком достатньо для осмислення даної задачі.

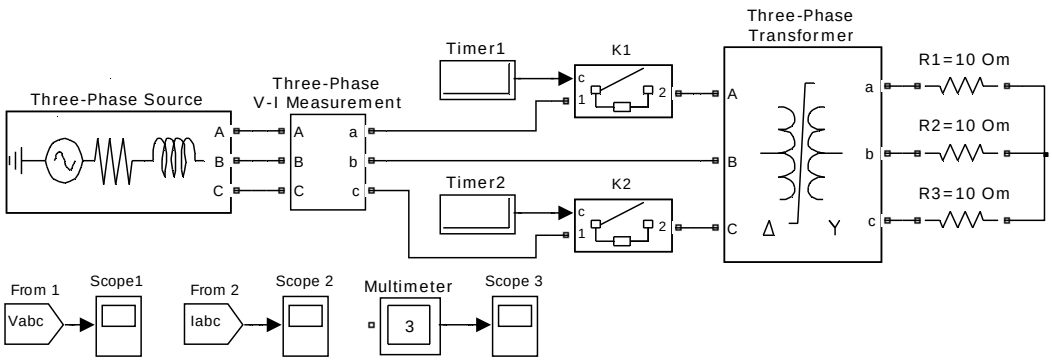


Рис. 3

Досить очевидно, що включення **К1** необхідно виконувати аналогічно комутації однофазного трансформатора, і природно, що це повинен бути момент досягнення амплітуди, проте не фазною напругою $U_{1(A)}$, а лінійною – $U_{1(AB)}$. При виборі параметру блоку **Timer1** та тому ж нульовому початковому відліку значення фазового кута для напруги фази *A* необхідно зважувати на те, що точка досягнення абсолютного максимуму $U_{1m(AB)}$ відносно найближчого $U_{1m(A)}$ буде зміщена на 30° в сторону випередження, як це показано на рис. 4, *а* і відповідатиме часовим відлікам t_1=3,33 mc, t_2=13,33 mc, t_3=23,33 mc і т.п., тобто з інтервалом 10 mc.

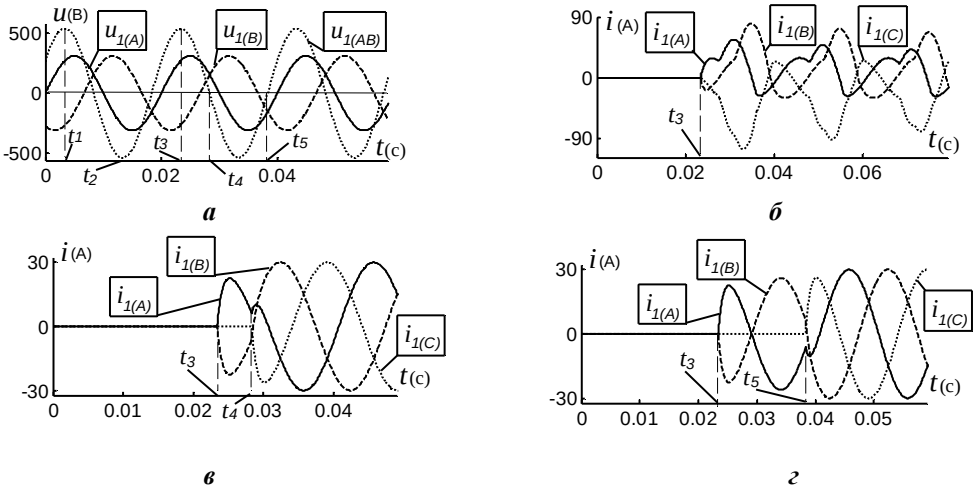


Рис. 4

При одночасному підключенні обмоток ТФТ до джерела струму ключами **К1, К2** (рис. 3) у момент досягнення лінійної напругою своєї амплітуди $U_{(AB)m}$, наприклад, при t_3=23,33 mc (рис. 4, *а*) так, як і в попередньому випадку (рис. 2, *а*), буде одержано незадовільний результат (рис. 4, *б*). Характер поведінки вхідних струмів у даному випадку може здатися ще більш неприйнятним, оскільки у формі струмів уже не у двох фаз, а у всіх трьох, з'являються екстремальні складові, викликані насиченням магнітопроводу. Це є природним і пов'язано із зміною схеми включення обмоток та відсутністю нульового проводу. Проте, якщо аналогічно виконати варіацію моменту включення **К2** у сторону збільшення, взявши за точку відліку t_3, то при t_4=28,33 mc (через проміжок часу відповідний фазовому куту $\pi/2$), що співпадає із переходом лінійною напругою свого нульового значення, одержимо цілком задовільний результат (рис. 4, *в*). Змінюючи момент включення ключа **К2** із дискретністю у півперіоду відносно t_4, тобто у кожний наступний перехід $U_{(AB)}$ через нуль, можна впевнитися у задовільному ході комутації. Це видно із рис. 4, *а*, *г*, де замикання **К2** виконувалося при t_5=38,33 mc.

Таким чином, можна зробити висновок, що *при з'єднанні первинних обмоток ТФТ трикутником комутація першого ключа (підключення двох фаз) повинна виконуватися у максимумі лінійної напруги, яка подається першою, а підключення третьої фази – при нульовому значенні тієї ж самої напруги.* Очевидно, що організація комутації трансформатора за таким алгоритмом буде простіша, ніж у випадку, розглянутому раніше, оскільки немає потреби у генерації фіксованого інтервалу часу, і для її реалізації досить двох компараторів. Розглянуті приклади ілюструють можливість сучасних засобів вирішувати достатньо просту поставлену задачу, причому фактично не вдаючися до суті процесів. Проте, щоб сформулювати більш загальні підходи, необхідним є взаємозв'язок не тільки між вхідними струмами і фазовими кутами включення відповідних ключів, а й з причиною, що викликає відхилення цих струмів від усталених (розрахункових) значень, тобто циркуляцією потоку в магнітопроводі при відповідному врахуванні нелінійних властивостей останнього.

Достатньо очевидним є те, що різниця в алгоритмах організації комутації для трьох однофазних трансформаторів і одного ТФЕ при одній і тій самій конфігурації включення первинних обмоток може бути обумовлена тим фактом, що в першому випадку магнітні системи є роздільними, а у другому – суміщені і представляють собою одне ціле. У першому випадку включення однієї фази ніяк не впливає на інші магнітопроводи, тобто початкові умови для їхнього включення залишаються такими ж, які були для вже включеного трансформатора, в іншому − магнітній потік включеної обмотки

відповідним чином перерозподіляється на суміжні стержні магнітопроводу і таким чином змінює умови для організації прийнятної комутації.

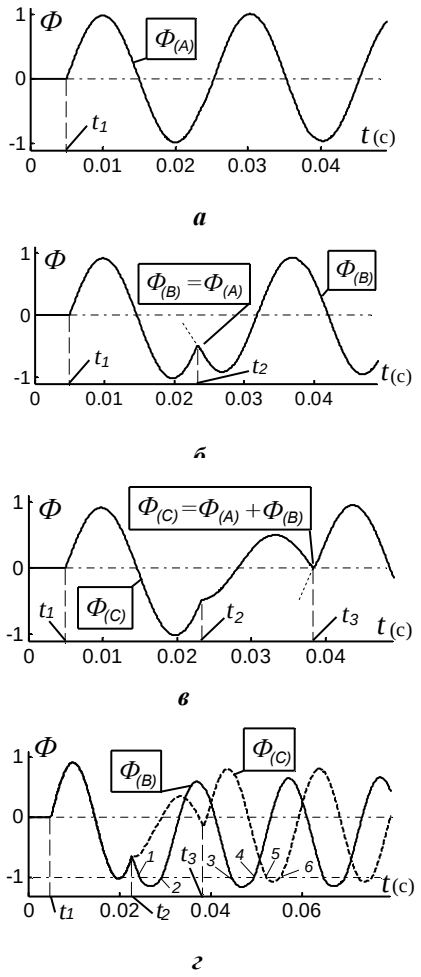
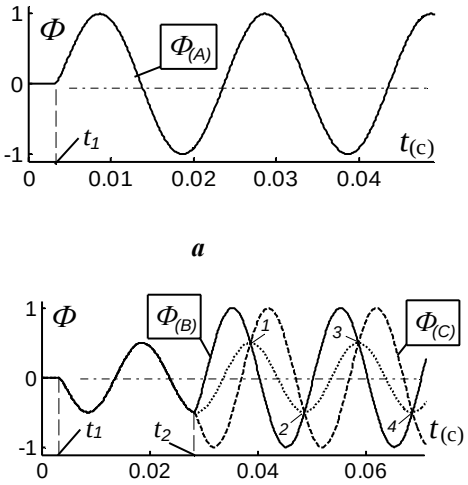


Рис. 5

Для ілюстрації розглянемо характер поведінки потоків для наведеного прикладу рис. 2, *б*, *в*, тобто при комутації ТФТ з первинними обмотками, включеними "зіркою" із нульовим проводом Yn, та випадку задовільного ходу процесів. На рис. 5 показано, як змінюються потоки в стержнях кожної фази трансформатора у відносних величинах, приведених до одиничного значення усталеного магнітного потоку. Із порівняння рис. 5, *а*, *б*, *в* видно, що від моменту комутації фази *A* (t_1) до часу (t_2) підключення обмотки фази *B* потоки в стержнях магнітопроводу для всіх трьох фаз співпадають. Це природно, адже потік є функцією напруги (1), кількість витків всіх обмоток однакова, а стан магнітопроводу визначається лише однією прикладеною фазною напругою $U_{1(A)}$. Циркуляція потоку фази *A* – $\Phi_{(A)}$ відбувається в межах +1…–1 (рис. 5, *а*) і нічим не відрізняється від свого усталеного режиму ні за величиною, ні за формою. На рис. 5, *б* показано характер поведінки $\Phi_{(B)}$, де вже можна виділити два інтервали: до моменту комутації фази *B* ($t_1 \ldots t_2$), коли потік визначається лише напругою фази *A*, і після комутації (t_2 ….), коли його поведінку визначає вже підключена до джерела струму напруга фази *B*. Як бачимо із рис. 5, *б*, для цього стержня 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. У подальшому (після точки t_2) $\Phi_{(B)}$ буде ідентично повторюватиме поведінку $\Phi_{y(B)}$, тобто в стані магнітопроводу не буде причин для виникнення аперіодичних проявів тієї чи іншої форми. Для стержня фази *C* хід процесу складніший (рис. 5, *в*), оскільки в інтервалі *часу* ($t_2 \ldots t_3$), тобто до моменту комутації для цієї фази, $\Phi_{(C)}$ визначається не лише напругою, прикладеною до обмотки фази *A*, а і напругою фази *B*. Таким чином, $\Phi_{(C)}$ буде представляти собою векторну суму $\Phi_{(A)}$ та $\Phi_{(B)}$, через це його амплітуда зменшиться вдвічі. Проте із рис. 5, *в* також витікає, що точка прийнятної комутації (t_3) припадає також на момент зрівняння поточного магнітного потоку $\Phi_{(C)}$, який в інтервалі $t_1 \ldots t_3$ визначався геометричною сумою $\Phi_{(A)}+\Phi_{(B)}$ і на момент комутації став рівним нулю із його усталеним також нульовим значенням $\Phi_{y(C)}$. Тобто умови включення фази *C* такі ж самі, як і для фази *A*. Принципи визначення точок комутації для однофазних трансформаторів [2, 3] на основі порівняння магнітних потоків, за своєю суттю, поширюються і на ТФТ. Цілком очевидно, що відхилення від визначених моментів комутації призводять до перевищення потоком граничних значень усталеного режиму (+1,0 та –1,0), а це, в свою чергу, призведе до сплесків вхідного струму. На рис. 5, *г* штрих-пунктирною лінією показана межа усталеного режиму для від'ємних значень потоку, на якій виділено інтервали її перекриття (*1–4* – для $\Phi_{(B)}$ та *5–6* – для $\Phi_{(C)}$). При його порівнянні з рис. 2, *а* (криві $\Phi_{(B)}$, $\Phi_{(C)}$ на рис. 5, *г* ілюструють саме цей приклад) буде очевидним співпадіння сплесків i_1 з даними інтервалами часу. Фактично правило вибору моментів комутації на основі порівняння із усталеним магнітним потоком створює 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 з відповідним запасом по індукції, наприклад, вдвічі більших, хоча це буде вимагати й вдвічі більших витрат сталі осердя та матеріалу обмоток, але при цьому буде допустимою довільна, а не дискретна варіація моментів комутації ключа в інтервалі всього півперіоду. Та це призводить до наявності при закінченні комутації, в порівнянні із Φ_y, надлишкового магнітного потоку. В подальшому відбуватиметься експоненціальне саморозмагнічення осердя трансформатора, що буде проявлятися аперіодичною складовою в струмах обмоток, напрузі на навантаженні. Постійна часу такого процесу досить велика, тому, як правило, в енергетич-

ному плані на це не зважають. Разом із тим, в режимах, близьких до холостого ходу, енергії розмагнічування достатньо, щоб підтримувати у відкритому стані тиристор протягом декількох десятих часток секунди, чим погіршуються динамічні властивості системи ключ-трансформатор. Таким чином, свобода при виборі одного параметру обертається необхідністю збільшення дискретизації в часі для іншого і ускладнює реалізацію систем регулювання та організації комутації.

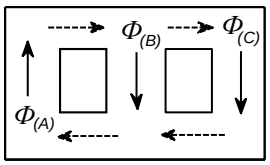
З'єднання первинних обмоток трансформатора "трикутником" у порівнянні із схемою Yn спрощує як схему включення (рис. 3), так і алгоритм організації комутації (рис. 4, *в*, *г*). Це ж стосується суті і форми магнітних процесів під час її протікання. На рис. 6, *а* показано поведінку магнітного потоку $\Phi_{(A)}$ в стержні *A* осердя, якому відповідає лінійна напруга $U_{1(AB)}$ (рис. 4, *а*), прикладена з моменту часу t_1=3,33 mc. Індексація напруг і потоків в даному випадку дещо різні – потоку $\Phi_{(B)}$ у стержні *B* відповідає лінійна напруга $U_{1(BC)}$ і аналогічно: $\Phi_{(C)}$ – $U_{1(CA)}$, тобто перша буква індексу потоку відповідає першій букві індексу лінійної напруги. З порівняння рис. 6, *а* і рис. 5, *а* видно, що криві потоків ідентичні за формою, проте значення t_1 різні, що зумовлено різними фазовими кутами амплітудних значень фазної та лінійної напруг (рис. 4, *а*). До включення другого ключа **К2** (t_1 ... t_2) потік $\Phi_{(A)}$ буде порівну перерозподілятися по ярму на стержні *B* і *C*, як показано на рис. 7. Тобто магнітні потоки $\Phi_{(B)}$ та $\Phi_{(C)}$ будуть рівні між собою і складати $0{,}5\Phi_{(A)}$, проте протилежної направленості, що і показано на рис. 6, *б* для інтервалу часу t_1 ... t_2. Оскільки як $\Phi_{(B)}$, так і $\Phi_{(C)}$ після включення **К2** при t_2=28,33 mc циркулюють по своїх усталених траєкторіях (не виходять за межі значень ±1,0), то такий момент часу є прийнятним для комутації, що підтверджується і кривими струмів рис. 4, *в*. Якщо ж у полі графіка рис. 6, *б* продовжити криву $\Phi_{(B)}$, або $\Phi_{(C)}$ за межі часового інтервалу t_1... t_2, що показано пунктирною лінією, то одержимо ряд інших точок, позначених цифрами *1*, *2*, *3*, *4*, в яких перетинаються всі три криві, показані на рисунку. Дискретні моменти часу, що відповідають цим точкам, і є відповідними умовами прийнятної комутації. Для їхнього визначення достатньо лише двох величин при трьох наявних, тому є різні варіанти реалізації такої операції. Наприклад, порівняння кривих $-\Phi_{(A)}/2$ і $\Phi_{y(B)}$; $-\Phi_{(A)}/2$ і $\Phi_{y(C)}$; $\Phi_{y(B)}$ та $\Phi_{y(C)}$. При достатньо жорсткій зовнішній характеристиці трансформатора всі ці величини одержують інтегруванням відповідних лінійних напруг [2].



а

б

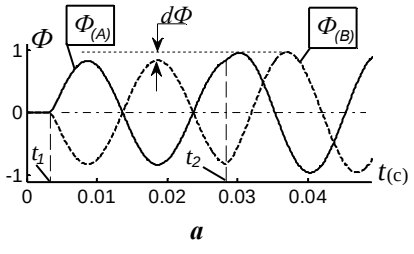
Рис. 6



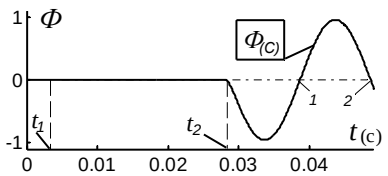
$\Phi_{(B)}=\Phi_{(C)}=\Phi_{(A)}/2$

Рис. 7

Трансформатори, у яких з'єднання первинних обмоток виконано "зіркою" без нульового проводу, через зміну схеми включення також мають при комутації свої особливості в ході перехідних магнітних процесів. На рис. 8 показано графіки $\Phi_{(A)}$, $\Phi_{(B)}$ та $\Phi_{(C)}$ для відповідних стержнів магнітопроводу ТФТ, одержані для тієї ж моделі (рис. 3), у якій змінено лише конфігурацію первинної обмотки. Так само, з моменту часу t_1=3,33 mc підключається напруга $U_{1(AB)}$ (рис. 8, а), потім варіацією t_2 досягаємо нульових сплесків струму намагнічування. Проте, незважаючи на включення, виконане при досягненні $U_{1(AB)}$ своєї амплітуди, жодний із магнітних потоків, як $\Phi_{(A)}$, так і $\Phi_{(B)}$, у проміжку часу t_1 ... t_2 не матиме своєї усталеної величини, як на рис. 6, *а*, де $\Phi_{(A)}=\Phi_{y(A)}$ для того ж інтервалу t_1 ... t_2. Це пояснюється тим, що при відключеному живленні трансформатора по фазі *C* лінійна напруга $U_{1(AB)}$ (380 В) перерозподілиться між двома однаковими фазними обмотками трансформатора ($U_{1(A)}=U_{1(B)}$=380/2=190 В) при їхній номінальній напрузі $U_{1(A)n}$ =220 В.



а



б

Рис. 8

Тобто спостерігається пряма аналогія з двома ідентичними однофазним трансформаторами, первинні обмотки яких включено

послідовно. В даному випадку, через пряму пропорціональність з напругою значення потоків буде приблизно на 14% меншим від свого номіналу (220–190)/220=0,136), тобто $d\Phi = 0{,}136\ \Phi_{y(A)}$ (рис. 8, *а*). Направленість і розподілення потоків осердя в інтервалі $t_1 \ldots t_2$ ілюструється рис. 9, де показано взаємокомпенсацію складових потоку для стержня фази *С*. Тому $\Phi_{(C)}$ аж до моменту включення К2 (t_2) матиме нульове значення (рис. 6, *б*). Таким чином, щоб одержати інші точки комутації для фази *С* необхідно миттєве значення усталеного магнітного потоку порівнювати із нульовим рівнем. На рис. 6, *б* показано ще дві такі точки, позначені цифрами *1* і *2*, для яких відповідні часові відліки відповідатимуть критерію прийнятної комутації. Проте залишається питання, яким чином визначається усталений магнітний потік фази *С*? Тут, як і при використанні схеми з'єднання із нульовим проводом, величину потоку визначає фазна напруга $U_{1(C)}$. Тому найпростішим варіантом є її інтегрування і використання результату порівняння одержаної кривої з нулем для управління відповідним комутатором. Необхідно відзначити, що немає необхідності знати величину потоку, а лише його точку переходу нульового рівня. Це означає, що *RC*-компоненти, які повинні використовуватися як основні елементи інтегратора, можуть мати довільні допуски за температурною стабільністю, номіналом тощо. Це ж стосується реалізації і інших розглянутих алгоритмів. Якщо ж неможливо мати фазну напругу в "чистому" вигляді, то організовують штучну нульову точку, відносно якої і виконуються всі операції, або ж $U_{1(C)}$ розраховують як векторну суму лінійних напруг $U_{1(BC)}$ та $U_{1(AC)}$.

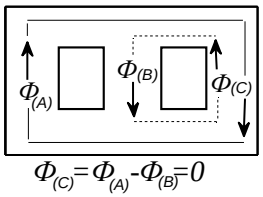


Рис. 9.

Таким чином, із розглянутого очевидно, що початкові умови стану магнітопроводу при включенні кожного наступного ключа, окрім першого, різні; це відповідно впливає як на вироблення алгоритмів комутації, так і на їхню наступну реалізацію. Проте, коли напруги в мережі більш-менш симетричні і синусоїдальні, то моменти часу прийнятної комутації у трипровідній системі при з'єднанні обмоток "трикутником" і "зіркою" будуть співпадати (рис. 6, *б*, рис. 8, *б*). Якщо на графік потоку рис. 8, *б* накласти співмірні фазну напругу джерела струму $U_{(C)}$ та лінійну $U_{1(AB)}$, подану при t_1 на відповідні фази трансформатора, то буде очевидно (рис. 10), що, як і для однофазного трансформатора, фаза *С* включається при амплітуді фазної напруги, яка повинна на неї подаватися (t_2). Але із цим бажаним для комутації моментом часу співпадає і фаза уже поданої на трансформатор лінійної напруги $U_{1(AB)}$, і тому правило здійснення комутації при трипровідній системі підключення може бути таким: перш**и**й ключ (рис. 3) повинен замикатися при досягненні напругою, що підключається, своєї амплітуди, а другий − у будь-який момент нульового значення цієї ж напруги (t_2 та моменти часу, що відповідають точкам *1*, *2*, *3*, *4* і т.п. на осі, показаній штрих-пунктирною лінією на рис. 10). Тобто алгоритм, сформульований для схеми Δ на основі спостереження лише фазності напруг, є справедливим і для схеми Y. Можна допустити, що комутатор, спроектований для однієї конфігурації обмоток, буде з деяким допуском прийнятним і для включення ТФТ з іншою схемою обмоток і навпаки. Коли ж для мережі живлення характерні значні "перекоси" фаз, викривлення форми напруги і т.п., тоді для реалізації даних принципів необхідно мати значення миттєвих величин двох потоків: поточного, наявного у трансформаторі на момент комутації, і усталеного − у післякомутаційному періоді. Зауважимо, що описані алгоритми комутації необхідно починати при нульовому значенні магнітного потоку осердя.

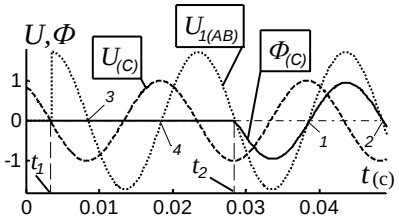


Рис. 10

Приклад практичної реалізації одного із розглянутих алгоритмів комутації при з'єднанні обмоток трансформатора "трикутником" показано на схемі рис. 11.

Інформаційна обробка відповідних лінійних напруг, підключених до трьох клем ХР1, виконується, в першу чергу, двома інтеграторами (*R*1, *C*1, *DA*2.*C* та *R*2, *C*2, *DA*1.*B*). При даних номіналах елементів вони за своїми параметрами практично наближаються до ідеальних. Переходи вихідної напруги першого інтегратора (воль-секундної площі $U_{1(AB)}$) через нульовий рівень фіксуються двома компараторами (*DA*2.*A*, *DA*2.*B*) і за допомогою *C*8, *R*28 та *C*9, *R*29 виділяються у формі вузьких (близько 100 мкс) імпульсів, співпадаючих при синусоїдальній напрузі з моментом досягнення нею амплітуди. Останні через оптоізолятор *VT*1 подаються на вхід синхронізації тригера *DD*1.*A*. Функція тригера – перетворення асинхронної команди на включення ТФТ від ключа К1 через *VT*1 в синхронну, рівень якої змінюється лише впродовж надходження згаданих синхроімпульсів. Виконавчим органом є оптотріак *VD*9, що включається безпосередньо на управляючі електроди двох силових

зустрічно-паралельно включених тиристорів (не показані на схемі) чи до одного симістора при анодному включенні *VD*9. Таким чином виконується включення перших двох фаз (*A*, *B*) трансформатора. Відповідно до принципу, ілюстрованому на рис. 7, напруга першого інтегратора зменшується вдвічі (*DA*1.*A* – поточний магнітний потік стержня фази *C*) і в суматорі *DA*3.*C* зрівнюється з напругою другого інтегратора (*DA*1.*B* – усталений потік стержня фази *C*). Момент рівності буде відповідати нульовому значенню напруги на виході *DA*3.*C*. Подальша обробка сигналів абсолютно аналогічна розглянутій, але дозволяючим сигналом для тригера *DD*1.*B* буде вже не замикання ключа, а наявність сигналу на включення для першого силового ключа. Таким чином, перший комутаційний ключ трансформатора замикається при досягненні напругою живлення своєї амплітуди, а другий – у момент порівняння двох вольт-секундних площ.

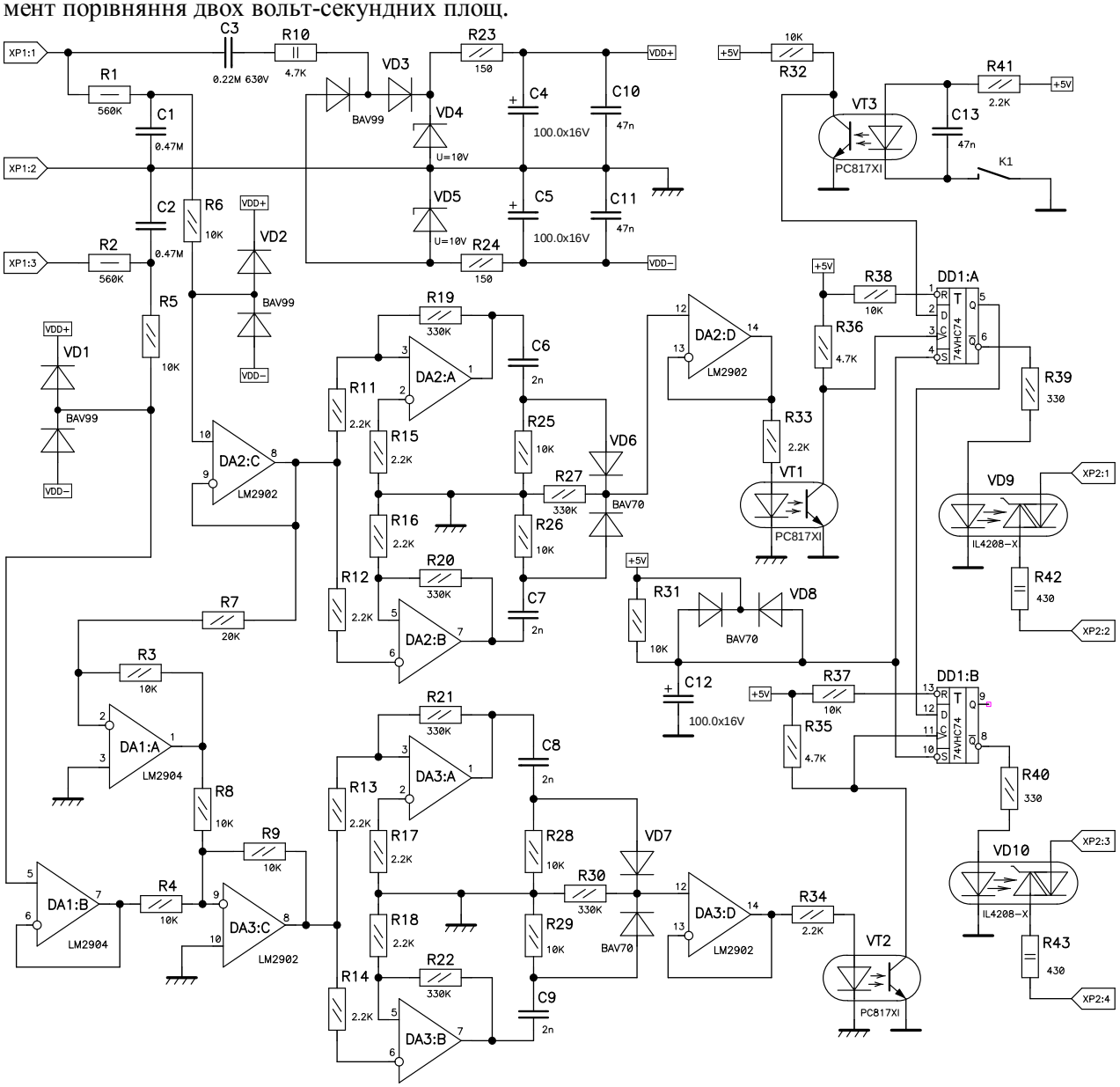


Рис. 11

Напруга живлення *DA*1... *DA*3 – ±10 В, причому її подача організовується безпосередньо від мережі 380 В за допомогою *VD*3, *VD*4, *VD*5. Елементи системи живлення *DD*1 – +5 В через їхню тривіальність на схемі не показані. Призначення *R*31та *C*12 – примусова установка тригера в момент початкового включення напруги живлення. Практичним застосуванням даної схеми було забезпечення комутації ТФТ дугових випрямлячів в установках напівавтоматичного зварювання.

Таким чином, підсумовуючи викладене, необхідно відзначити, що за мінімально можливих габаритах ТФТ при комутації його первинної обмотки для уникнення сплесків струму, пов’язаних із насиченням магнітопроводу, необхідно керуватися правилом, відповідно до якого включення потріб-

ного ключа повинно виконуватися в момент рівності миттєвих значень поточного магнітного потоку відповідного стержня магнітопроводу ТФТ із усталеним значенням його потоку, який повинен бути у ньому після комутації. В основі викладеного лежить принцип електромагнітної інерції, відповідно до якого наявна тенденція до збереження незмінними магнітних потоків, тобто комутація повинна відбуватися таким чином, щоб перехід від однієї конфігурації включення трансформатора до іншої не приводив до такої зміни величини потоку, при якій би він у подальшому перевищував задані заздалегідь для нього межі. Інші окремі алгоритми виконання комутації витікають, як правило, із сформульованого – загального і прийнятні при згаданих спрощених умовах експлуатації.

Реалізація згаданих принципів дозволяє повністю використати електроенергетичні можливості трансформаторів, уникнути різного роду ексцесів через появу аперіодичних складових у струмі споживання, поліпшити динаміку системи у цілому. Вони пройшли хорошу апробацію і забезпечували надійну комутацію без вказаних перехідних режимів незалежно від характеру навантаження і його величини.

1. *Сергеенков Б.Н., Киселев В.М., Акимова Н.А.* Электрические машины: Трансформаторы. – М.: Высшая школа, 1989. – 352 с.

2. *Халіков В.А., Липківський К.О.* Процеси та організація комутації трансформаторів // Техн. електродинаміка. – 2010. – №3. – С. 22–30.

3. *Халіков В.А., Можаровський А.Г.* Методологія застосування програмного пакета MATLAB при моделюванні та дослідженні електромагнітних процесів у трансформаторно-ключових виконавчих структурах. – Київ: ІЕД НАН України, 2001. – 45 с.

УДК 621.314.214

ПРОЦЕССЫ И ОРГАНИЗАЦИЯ КОММУТАЦИИ ТРЕХФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

В.А. Халиков, канд.техн.наук,
Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев–57, 03680, Украина.

Рассматриваются переходные процессы при коммутации первичной обмотки трехфазного трансформатора, возникающие вследствие насыщения его магнитопровода. Проведено визуальное моделирование процессов средствами программного пакета MATLAB и предложены меры минимизации или исключения возникающих при этом экстремальных явлений. Библ. 3, рис. 11.

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

TRANSIENT PROCESS AND ORGANIZATION OF SWITCHING THREE-PHASE TRANSFORMER

V.A. Khalikov,
Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,
Peremogy pr., 56, Kyiv–57, 03680, Ukraine.

Transient processes appearing over core saturation on switching of the primary winding of a three-phase transformer are considered. Visual modeling of transient processes is done with MATLAB and techniques for minimization or elimination of transients are suggested. References 3, figures 11.

Key words: transformer, switching, transient, modeling.

1. *Sergeenkov B.N., Kiselev V.M., Akimova N.A.* Electric machines: Transformers. – Moskva: Vysshaia shkola, 1989. –352 p. (Rus)

2. *Khalikov V.A., Lypkivskyi K.O.* Processes and organization of transformer switching // Tekhnichna elektrodynamika. – 2010. – №3. – Pp. 22–30. (Ukr)

3. *Khalikov V.A., Mozharovskyi A.G.* Methodology of modeling and studying of electromagnetic processes in transformer switching executive structure with MATLAB programme package. – Kyiv: IED NAN Ukraine, 2001. – 45 p. (Ukr)

Надійшла 27.12.2012
Received 27.12.2012