

УДК 621.314.214

## ПРОЦЕСИ ТА ОРГАНІЗАЦІЯ КОМУТАЦІЇ ВОЛЬТОДОДАВЧИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

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

*Розглядаються перехідні процеси, що виникають при комутації первинної обмотки вольтододавчого трансформатора внаслідок насичення його магнітопроводу. Проведено імітаційне візуальне моделювання процесів засобами програмного пакету MATLAB та запропоновано заходи по мінімізації чи позбавленню екстремальних проявів, що можуть виникати при цьому. Бібл. 5, рис. 15.*

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

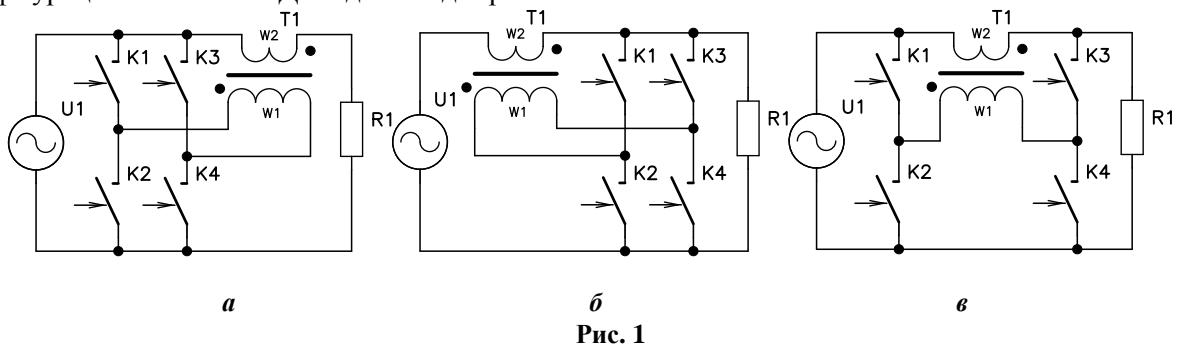
Робота трансформатора в режимі вольтододавання – це достатньо поширена схема його включення [2]. Вона використовується у тих випадках, коли немає потреби у гальванічному розділенні вхідного (мережі живлення) та вихідного (навантаження) кіл струму, а необхідність додавання напруги чи її реверсу (віднімання) не перевищує кількох десятків процентів номінального значення вхідної напруги. При співрозмірній потужності навантаження вузли регулювання напруги на основі вольтододавчих трансформаторів (ВДТ) вигідно вирізняються меншими масою та габаритами. Значення цих параметрів для ВДТ приблизно такі самі, як і у виконуючого подібну функцію автотрансформатора.

Разом із тим, у таких силових вузлах з'являється можливість перенесення комутуючих елементів вузла із кола струму навантаження, пов'язаного із вторинною обмоткою ВДТ, у коло комутації його первинної обмотки, де значення струмів у декілька разів менші, що може надавати низку істотних переваг. Проте ефекти, пов'язані із інерційністю тиристорного ключа чи транзистора, та характер перехідних процесів в первинній обмотці трансформатора, спричинених наявністю магнітопроводу, мають різну природу і тому є складності в належному узгодженні роботи комутаційних і електромагнітних елементів.

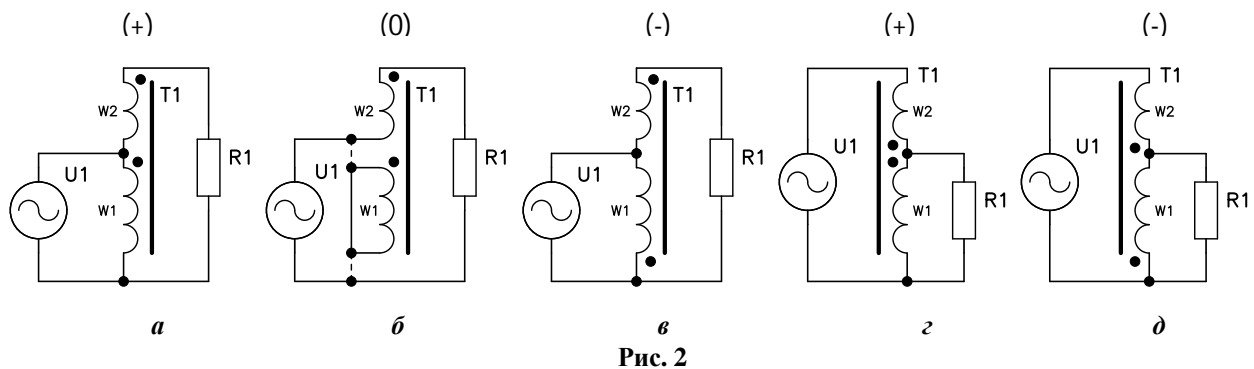
При цьому у найбільш несприятливих режимах роботи трансформатора в залежності від його потужності сплески струму у первинній обмотці, зокрема, і в режимах близьких до холостого ходу, можуть перевищувати в 5–7 разів її номінальний струм. Це призводить до негативних наслідків і для трансформатора, і для пристроя в цілому, адже необхідно враховувати екстремальний характер перехідних процесів і гарантувати необхідний ресурс роботи, в тому числі і за рахунок вибору елементів більших типоміналів. Разом із тим, нелінійні властивості компонентів трансформаторно-ключових вузлів, змінність їхньої структури та параметрів у процесі їхнього функціонування ускладнювали належне проведення аналізу таких процесів, що не дозволяло на цій основі вирішити задачу розробки алгоритмів організації комутацією, спрямованих на зменшення, або і повне позбавлення згаданих негативних проявів. Лише сучасний апарат імітаційного візуального моделювання дозволив системно розглянути хід згаданих процесів і обґрунтовано вирішити організацію власне самої комутації [1,3–5]. При роботі ВДТ, навіть у порівнянні із трансформатором у випадку його класичного застосування, через змінність конфігурацій його включення в процесі регулювання напруги, аналіз процесів іншими методами значно ускладнюється, а його наочність у цілому стає проблематичною.

Взагалі, в залежності від розміщення комутуючого вузла, навіть у випадку застосування найпростішого двохобмоточного трансформатора існують три конфігурації включення ВДТ (рис. 1). Комутуючий вузол для всіх цих варіантів реалізує роботу трьох режимів ВДТ: вольтододавання (аверс напруги – “+”, при замкнених ключах K1, K4), прямої вольтопередачі (“вольтозакоротки” – режим нульового значення напруги обмоток – “0”, замкнені K2, K4, або K1, K3) та вольтовіднімання

(реверс напруги – “–”, замкнені К2, К3). На рис. 2 для даних режимів роботи показано відповідні конфігурації включення ВДТ відносно джерела живлення та навантаження.



Схеми рис. 1, а відповідають конфігурації рис. 2, а, б, в, а схеми рис. 1, б – рис. 2, з, б, д, проте у останньої, у порівнянні із першою, дещо інша одна із точок гальванічного зв'язку замкнутої первинної обмотки, але це ніяк на суть процесів не впливає. Схема рис. 1, в є свого роду комбінацією двох перших, вона найбільш прийнятна з точки зору масогабаритних показників, особливо коли це стосується задачі компенсації відхилень напруги мережі живлення. Без зображення комутуючого вузла в режимах додавання–віднімання вона приймає всім знайому форму включення звичайного автотрансформатора (рис. 2, а, д). При прямій вольтопередачі в одному випадку знову повторюється конфігурація рис. 2, б, а в іншому (замкнені К1, К3) реалізується дещо незвичне за формою синфазне замикання однієї обмотки на другу.



Відомо, що амплітудне значення потоку  $\Phi_m$  осердя трансформатора при наближенні його до ідеального в усталеному режимі та прикладеній синусоїдальній напрузі визначається формулою [3]

$$\Phi_m = U_{w1} / (4,44 f w_1), \quad (1)$$

де  $U_{w1}$  – діюче значення напруги первинної обмотки  $w_1$ ;  $w_1$  – кількість її витків;  $f$  – частота струму мережі живлення.

Очевидно, що для конфігурації рис. 2, б (пряма вольтопередача,  $U_{w1} = U_{w2} = 0$ )  $\Phi_{m(б)} = 0$ , тобто реалізується режим трансформатора струму. Відповідно для інших випадків:  $\Phi_{m(а)} = U_1 / (4,44 f w_1)$  – для режиму вольтододавання (рис. 2, а) та  $\Phi_{m(д)} = U_1 / (4,44 f (w_1 + w_2))$  – для рис. 2, д, тобто:  $\Phi_{m(а)} / \Phi_{m(д)} = 1 + w_2 / w_1$ , де  $U_1$  – діюче значення напруги мережі живлення. Також природно, що для рис. 2, з зустрічне включення обмоток еквівалентне зменшенню числа витків  $w_1$  на  $w_2$ , і тоді  $\Phi_{m(а)} / \Phi_{m(з)} = 1 - w_2 / w_1$ .

Із порівняння конфігурацій аверсу напруги рис. 2, а, з та її реверсу – рис. 2, в, д видно, що останній реалізується зміною підключення виводів обмотки  $w_1$  до джерела напруги. Якщо ж оперувати миттєвими значеннями величин, то для першого випадку  $u_1 = U_{1m} \sin \omega t$ , а для другого  $u_1 = -U_{1m} \sin \omega t$ , де  $U_{1m}$  – амплітуда напруги  $u_1$ . Відомо, що фаза  $\varphi$  магнітного потоку завжди відстає на чверть періоду від фази прикладеної напруги, тобто  $\Phi = \Phi_m \sin(\omega t - \pi/2)$ , а миттєве значення потоку є функцією вольтсекундної площі напруги  $u_1$ , чи, іншими словами, її інтегралом

$$\Phi = (U_{1m} / w_1) \int \sin(\omega t - \pi) dt. \quad (2)$$

Таким чином, ключі K1...K4, виконуючи реверс напруги  $U_1$  відносно обмотки W1, відповідно змінюють і знак потоку осердя трансформатора:  $\Phi_{m(a)} = -\Phi_{m(e)} - \Phi_{m(d)} (1 + w_2/w_1)$ .

Отже, на відміну від трансформатора напруги у його традиційному включенні, ВДТ у загальному випадку при ustalеному режимі роботи і постійності вхідної напруги може мати, за рахунок наявності комутуючого вузла, як різнополярне, так і різне за величиною значення потоку осердя. Окрім того ВДТ має не один, а два варіанти стану магнітопроводу з нульовим значенням його ustalеного потоку: при режимі прямої передачі (рис. 2, б) та при його відключенні і наступному саморозмагнічуванні осердя. Для трансформатора напруги у традиційному варіанті застосування має сенс тільки другий варіант. Причина вказаних відмінностей досить очевидна – це варіативність конфігурацій включення обмоток однієї відносно іншої. Тому для спрощення порівняння ходу процесів при комутаціях раціонально вибрати для аналізу схему рис. 1, а, для якої при ustalених режимах  $\Phi_{m(a)} = -\Phi_{m(e)}$ , тобто аверсне і реверсне значення потоку визначається, на відміну від конфігурацій рис. 1, б, в, при незмінному  $U_1$  лише кількістю витків первинної обмотки. Такий вибір у значній мірі відповідає і запитам практики, адже схема рис. 1, б характеризується при порівнянні не тільки збільшеними масою та габаритами ВДТ, але і вищим значенням еквівалентного внутрішнього опору структури. Це очевидно, адже потужність, що необхідна для забезпечення вольтододатку для даного випадку, завжди передається через обмотку W2, чим спричиняється додаткове падіння напруги в колі навантаження.

Цілком природно, що реалізація комутаційного вузла також може бути різною – на основі транзисторів, тиристорів, механічних контактів, їхніх комбінацій і т.п. Динамічні характеристики цих компонентів знаходяться у зворотній залежності від значення рівня їхнього максимального струмового перевантаження. Наприклад, при частоті напруги промислової мережі 50 Гц кратність перевантаження тиристора протягом півперіоду складає 7...10 при його неповній керованості у цьому проміжку часу, а для транзистора, позбавленого цього недоліку, вона дорівнює лише 1. Електромеханічні контакти не витримують ніякої критики в плані динамічних характеристик та ресурсу роботи, проте можуть мати кратність перевантаження для того ж проміжку часу – 300...400, і в цьому плані вони поза конкуренцією. Для кіл змінного струму із навантаженням загального, тобто невизначеного, типу є характерним наявність струмових ексцесів (при використанні двигунів – пускових струмів, конденсаторів – зарядних струмів, трансформаторів – струмів намагнічування і т.п.), тому у випадках, коли дискретність системи регулювання значно нижча частоти струму мережі живлення, перевага надається тиристорним ключам і, як правило, із природною комутацією. Взагалі це перший напівпровідниковий електронний компонент масового застосування, що дає можливість синхронізації комутації трансформатора (у тому числі і ВДТ) у часі, наприклад, в залежності від фази напруги, струму, потоку чи іншого вибраного параметра, та ще і при достатньо прийнятних для кіл змінного струму характеристиках його допустимого струмового перевантаження. Власне тому у подальшому викладі акцент зроблено на дослідженні процесів саме щодо їхнього використання.

Разом із тим, характер і хід процесів при повній керованості ключів комутаційного вузла (тиристори із вузлами штучної, тобто примусової комутації, транзистори і т.п.) та одинично-разовій частоті перемикання є, як правило, окремими випадками електромагнітних процесів у ВДТ при застосуванні ключів із природною комутацією. Підвищена частота комутації, тобто в проміжку півперіоду струму мережі живлення, виправдана тоді, коли є необхідність реалізувати якісно інші можливості силового вузла регулювання, пов'язані із відповідним функціонуванням навантаження.

Враховуючи викладене вище, для найбільш популярних ключів змінного струму – симетричних тиристорів (тріаків) – на першому етапі можливо обмежитися аналізом лише однієї конфігурації – рис. 3, яка є спрощеним (половинним) варіантом рис. 1, а. Природно, що імітаційна модель такої схеми у середовищі пакету MATLAB цілком відповідає фізичному аналогу і по формі є досить зрозумілою з першого погляду (рис. 4). Якщо підходити більш прискіпливо, то ідеалізовані ключі (Breaker) можна замінити моделями тиристорів у зустрічно-паралельному включенні. Для визначеності параметри моделі трансформатора, в тому числі і параметри кривої намагнічування, вибрані абсолютно аналогічні, як і у розглянутому прикладі [3], за виключенням номінального значення напруги обмотки W2 ( $U_{W2}=44$  В). При цьому в аверсному режимі (включено VS1) при номінальній потужності ВДТ ( $S_n=2200$  ВА) струм у W2 складе  $I_{W2}=I_{R1}=50$  А, а опір навантаження R1 матиме в такому разі значення близько 5,2 Ом ( $P=13,2$  кВт при  $U_{R1}=264$  В). Природно, що у режимі прямої вольтопередачі (включено VS2) струм обмотки W2 при цьому ж навантаженні та  $U_1$  буде за рахунок зміни напруги ( $U_{W2}=0$ ) приблизно на 20% меншим.

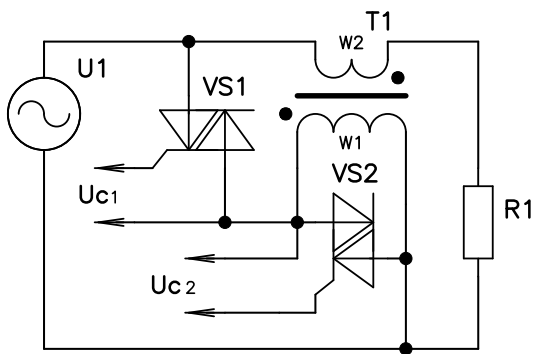


Рис. 3

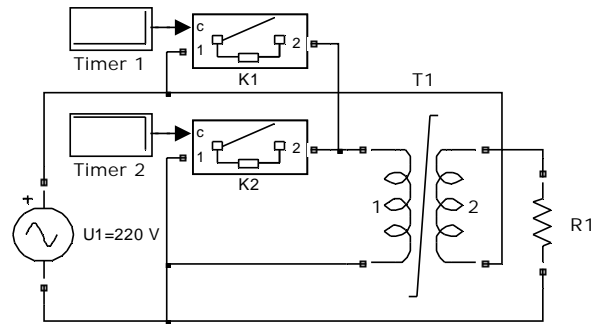
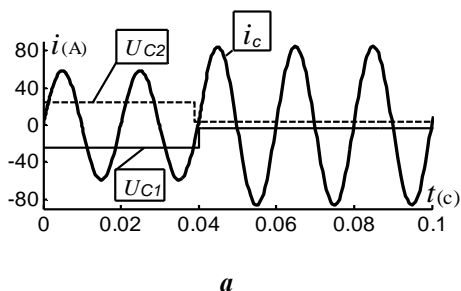


Рис. 4

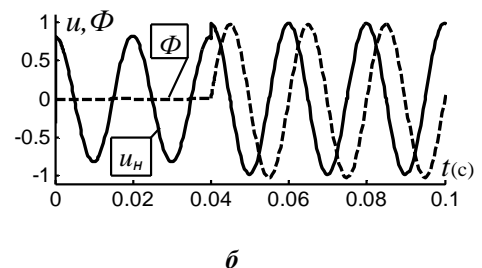
Якщо розглянути процеси у магнітопроводі при переході ВДТ (рис. 1, а) із режиму вольтоза-коротки (рис. 2, б,  $\Phi_m = 0$ ) в режим додавання напруги (рис. 2, а,  $\Phi = \Phi_m$ ) – аверсу напруги, чи, навпаки, – її реверсу ( $\Phi = -\Phi_m$ ), при холостому ході (XX), тобто при  $R1 = \infty$ , будемо мати абсолютну аналогію з комутацією звичайного однофазного трансформатора при повністю розмагніченому осердді. Для нього *при залишковому магнітному потоці осердя* ( $\Phi_s = 0$ ) найбільш сприятливим для включення є момент часу досягнення синусоїдальною напругою, що прикладається до первинної обмотки трансформатора, амплітудного значення ( $U_m$ ). Цілком природно, що для ВДТ включення VS1 (рис. 3) повинно здійснюватися лише за умови зняття керуючого сигналу з VS2 та подальшого закриття цього ключа. В іншому випадку матимемо аварійну ситуацію внаслідок виникнення режиму короткого замикання по колу U1, VS1, VS2. Таким чином, починаючи із моменту виключення VS2, маємо у часі ряд дискретних точок, що співпадають із амплітудою вхідної синусоїдальної напруги, в яких можливе включення VS1 без будь-яких струмових аномалій в первинній обмотці. Відхилення моменту включення від такої точки в той чи інший бік призводить до кидків струму намагнічування, а їхній абсолютний максимум припадає на перехід синусоїди напруги через нуль [3]. Оскільки при XX струм первинної обмотки носить майже чисто індуктивний характер, то закриття VS2 також співпадає із амплітудою  $u_1$ , і таким чином часовий проміжок до комутації VS1 відносно періоду напруги може бути несуттєвим.

Дещо подібна ситуація виникає і при чисто індуктивному навантаженні ВДТ. У такому випадку при номінальному режимі індуктивність навантаження повинна складати  $L = 16,6$  мГн ( $X_L = 5,2$  Ом). На рис. 5, а показано характер зміни струму споживання  $i_c$  у найбільш прийнятному випадку – до, після та під час комутації на фоні рознесених для наочності по вертикалі умовних зображень сигналів управління ( $U_{c1}$ ,  $U_{c2}$ ) ключами VS1 та VS2 (рис. 3), а на рис. 5, б – відповідно напруги на навантаженні  $u_H$  та магнітного потоку осердя  $\Phi$  у співмірних величинах. Тут амплітуди кривих  $u_H$  та  $\Phi$  співставні, бо приведені до одиничних значень.

Зміна моменту включення VS1 від середини позитивної частини півперіоду ( $t = 0,04$  с) лише на 10% ( $t = 0,041$  с) від його тривалості спричиняє уже суттєву аперіодичну складову в струмі споживання  $i_c$ , що видно з порівняння (рис. 6, а) із струмом навантаження  $i_H$ . До комутації значення цих струмів абсолютно однакові, а після неї струм споживання за рахунок ефекту автотрансформації буде відповідно більшим, що наочно видно у позитивній області струмів на рис. 6, а ( $t = 0,041 \dots 0,012$  с). На рис. 6, б показано характер поведінки магнітного потоку – від стаціонарного нульового значення (до комутації) – до перехідного та після неї. Як і в прикладі [3], область графіка рис. 6, б, що розташована в межах ( $u, \Phi$ )  $-1 \dots 1$ , відповідає максимальній величині магнітного опору  $R_m$ , а поза нею –



а



б

Рис. 5

мінімальній. Тобто кожне перевищення потоком вказаних меж завжди буде супроводжуватися відповідним збільшенням струму намагнічування,  $i$ , як наслідок, – збільшенням струму споживання. Також, як і у випадку XX трансформатора, екстремум струму  $i_c$  припадає на включення VS1 при нульовому значенні напруги ( $t=0,045$  с).

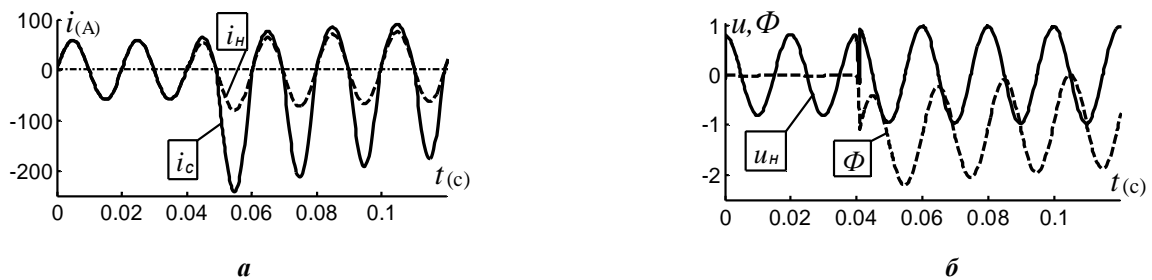


Рис. 6

Проте в даному випадку  $t=0,040$  с – не єдина точка, в якій можлива прийнятна комутація з точки зору мінімізації впливу струму намагнічування. Цим же критерієм буде відповідати і кожний наступний момент часу, де напруга досягатиме свого амплітудного значення. На рис. 7, а показано струм споживання у випадку включення VS1 на четвертому періоді струму після закриття VS2. Характерною особливістю даного випадку є зменшення струму  $i_c$  в інтервалі між закриттям VS2 ( $t=0,04$  с) і відкриттям VS1 ( $t=0,10$  с). У цьому разі первинна обмотка ВДТ розімкнена, сам трансформатор через включену послідовно із навантаженням обмотку W2 відіграє роль нелінійного індуктивного опору, а магнітопровід буде примусово перемагнічуватися по траєкторії, подібній до меандру ( $\Phi$ , рис. 7, б). Висхідні та спадаючі відрізки потоку відповідають максимальній величині магнітного опору, а в цілому він фактично відображає в прямому та дзеркальному зображенні криву намагнічування осердя. Напруга  $u_{W2}$  (рис. 7, в) є похідною функцією потоку, має найбільші значення там, де швидкість зміни потоку найбільша, і відповідно до закону електромагнітної індукції протидіє  $u_1$ . Внаслідок цього, в інтервалі часу 0,04...0,10 с у площині синусоїди вихідної напруги в районі її амплітуди наявні характерні гострокутні вирізи ( $u_H$ , рис. 7, б).

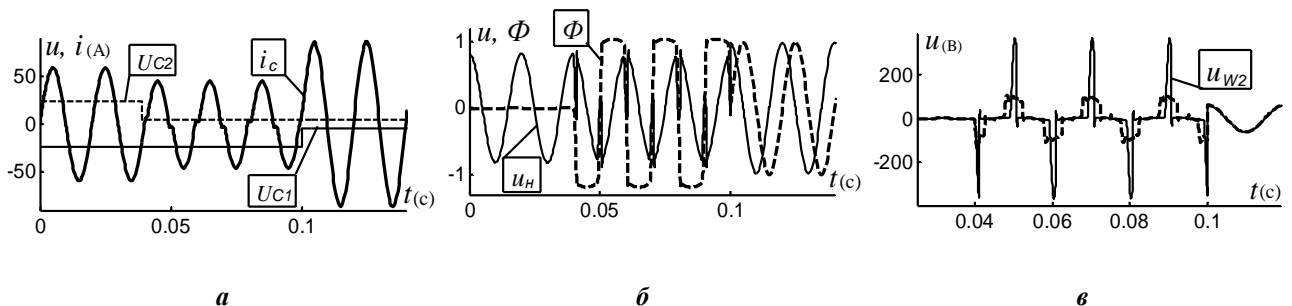


Рис. 7

Зрозуміло, що такої ж форми імпульси напруги (як на обмотці W2) будуть також трансформовані із коефіцієнтом  $w_1/w_2$ , у первинну обмотку і тому при виборі комутаційних елементів необхідно відповідним чином це враховувати. Оскільки їхня амплітуда залежить від швидкості зміни потоку, то зміна нахилу кривої намагнічування суттєво впливає на  $u_{W2}$ . На рис. 7, в, неперервною лінією показано  $u_{W2}$ , для випадку, коли при номінальній напрузі струм холостого ходу  $I_{xx}$  складає 5% номінального струму навантаження  $I_H$  (саме для такого значення  $I_{xx}$  наведені всі приклади). Збільшення  $I_{xx}$  до 33%  $I_H$  призводить при розімкненій W1 до суттєвого зменшення амплітуди напруги  $u_{W2}$  (рис. 7, в, штрихова крива), проте вольтсекундна площа  $u_{W2}$  в обох випадках буде приблизно однаковою. Зрозуміло, що збільшення  $I_{xx}$  погіршує масогабаритні та енергетичні показники трансформатора, тому комутацію треба не розтягувати у часі, щоб вплив такого роду ефектів був мінімальним або взагалі відсутнім (рис. 5).

Зменшення величини навантаження також уповільнює ступінь насичення магнітопроводу і призводить до аналогічного ефекту – зменшення амплітуди  $u_{W2}$ . Причому в останньому разі точки прийнятної комутації, з позицій мінімізації впливу струму намагнічування, залишаються тими ж самими, тобто співпадаючими із моментами амплітуди синусоїдальної напруги. Перехід ВДТ (рис. 1, а) із

вольтозакоротки (рис. 2, б,  $\Phi_m=0$ ) до режиму реверсу напруги (рис. 2, в,  $\Phi=-\Phi_m$ ) якісно не відрізняється від розглянутого. Різниця лише в усталених значеннях напруг та струмів до та після комутації. Модифікації схеми (рис. 3) та моделі (рис. 4) також є несуттєвими, достатньо поміняти місцями виводи обмотки W1 у точках її підключення.

А от комутація у зворотному напрямку – переходу ВДТ із режиму вольтодобавки (рис. 2, а,  $\Phi=\Phi_m$ ) до прямої передачі (рис. 2, б,  $\Phi_m=0$ ) – має свої особливості. Для її реалізації у моделі (рис. 4) необхідно поміняти місцями блоки Timer1 та Timer2, які задають алгоритм управління ключами. На рис. 8, а для моменту включення ключа VS1  $t=0,04$  с наведено криві процесів для струму споживання  $i_c$  (із масштабним коефіцієнтом – 150) та відносних значень (зведених до одиниці) напруги на навантаженні  $u_n$  і магнітного потоку осердя  $\Phi$ . Як бачимо, дані криві фактично є дзеркальним відображенням (відносно вертикалі) відповідних графіків наведених на рис. 5, а, б, і з усіх точок зору є прийнятними. Зміщення включення VS1 у будь-який наступний момент амплітуди напруги також призведе до процесів із дзеркальною подібністю, проте вже при порівнянні із рис. 7, а, б, в.

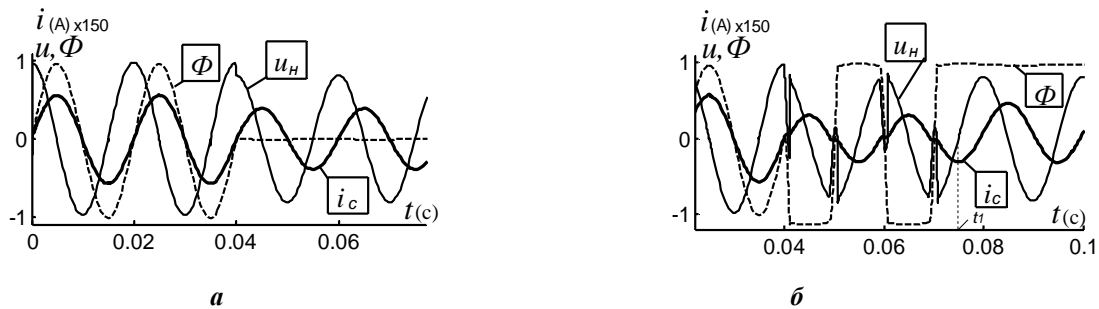


Рис. 8

Проте, якщо незначне зміщення моменту включення ключа аверсного режиму (рис. б) спричинило сплески струму намагнічування, а через нього і загального струму споживання  $i_c$ , то в даному випадку будь-який довільно вибраний момент комутації замикаючого W1 ключа не буде супроводжуватися такого роду проявами. Для прикладу, на рис. 8, б комутація виконується у найбільш несприятливий (з точки зору переходу) як до аверсу, так і до реверсу напруги момент перетину синусоїдою напруги нульового значення ( $t_1=0,075$  с). Проте із порівняння кривих  $i_c$  на рис. 8, а і рис. 8, б бачимо, що в останньому випадку відбувається не сплеск, а зменшення струму споживання через затягування часового проміжку між закриттям одного ( $t=0,04$  с) та відкриттям ( $t=0,075$  с) іншого ключів, тобто аналогічно із наведеним на рис. 7. Але рівень намагніченості осердя трансформатора після закінчення комутації у цих випадках істотно відрізняється – від нульового значення потоку  $\Phi=0$  (рис. 8, а) і до максимального  $\Phi=\Phi_m=1$  (рис. 8, б) в межах лінійної ділянки кривої намагнічування. Також неважко впевнитися, що варіація моменту  $t_1$  комутації замикаючого W1 ключа в діапазоні фазових кутів  $0 \dots \pi$  призведе до наявності на момент закінчення комутації залишкового магнітного потоку в межах  $-1 \dots 0 \dots +1$ . У подальшому відбуватиметься експоненціальне саморозмагнічування осердя трансформатора, що буде проявлятися аперіодичною складовою в струмі навантаження та напрузі на ньому. Але оскільки постійна часу такого процесу досить велика, то як правило, в енергетичному плані на це не зважають. Разом із тим, в режимах, близьких до XX ВДТ, енергії розмагнічування достатньо, щоб підтримувати у відкритому стані тиристор протягом декількох десятків часток секунди. Якщо не враховувати цю обставину, то можливе виникнення аварійних режимів КЗ. Ще одним аргументом того, що замикання VS2 (рис. 3) все ж таки необхідно проводити при фазовому куті, відповідному амплітуді напруги, є те, що, завдяки цьому трансформатор завжди буде автоматично підготовлений до наступного включення із наперед відомими відносно потоку нульовими початковими умовами. Тобто для забезпечення комутації ВДТ, прийнятної з точки зору недопущення кидків струму намагнічування, необхідно (незалежно від напрямку комутації) як починати, так і закінчувати її завжди при нульовому значенні магнітного потоку (свого роду дотримання принципів симетрії чи рівновіддаленості). Дотримання цієї умови дозволяє спроектувати прості і ефективні системи управління комутацією із жорстким алгоритмом функціонування, ілюстрацією роботи яких є рис. 5 та рис. 8, а. Вони забезпечать працездатність комутуючого вузла у всьому діапазоні навантаження, проте із однією суттєвою поправкою: вони придатні лише для роботи у окремому випадку – чисто індуктивного навантаження.

У викладеному вище акцент було зроблено на стан магнітної системи трансформатора, а щодо комутаційних елементів, то їхня робота визначалася наступним правилом – включення потрібного ключа допускалося лише після закриття попередньо включеного ключа, тобто необхідний деякий часовий проміжок між фронтами керуючих струмів чи напруг ( $U_{c1}$ ,  $U_{c2}$ , рис. 3). Але можлива та допустима й така ситуація, коли фронти включаючого і выключаючого сигналів співпадають. Це можливо тоді, коли напрям струму КЗ, що виникає при цьому, направлений проти струму тиристорного ключа, з якого зняли струм керування. Ця проблема досить детально висвітлена [1,5]. Коротко правило реалізації успішної комутації формулюється таким чином: комутація, яка спричиняє після її завершення підвищення вихідної напруги силового вузла (рис. 1, 3), повинна припадати на часові відрізки, в яких вхідні струм та напруга мають одну і ту ж полярність, і навпаки, комутація у зворотному напрямку (зменшення вихідної напруги) повинна припадати на часові відрізки, в яких вхідні струм та напруга мають різну полярність. Якщо керуватися цим правилом, то у нашому випадку – чисто індуктивного навантаження – такого роду комутація в напрямку аверсу напруги можлива, наприклад, (із порівняння фаз струму та напруги – рис. 8, а) в інтервалах  $t=0\dots0,05$  с,  $0,01\dots0,5$  с,  $0,04\dots0,45$  с... і т.п. На рис. 9, а показано відповідні криві для часу комутації  $t=0,44$  с, тобто значно ближче до переходу напругою нульового рівня, ніж до найближчого моменту її амплітуди. При цьому у струмі споживання  $i_c$  проявляються характерні сплески, пов'язані із зміною стану магнітопроводу ВДТ, тобто його насиченням. Про це свідчить і співпадіння форми струму із магнітним потоком  $\Phi$  осердя трансформатора. Таким чином, природа процесів така сама, що і в прикладі, проілюстрованому на рис. 6, а.

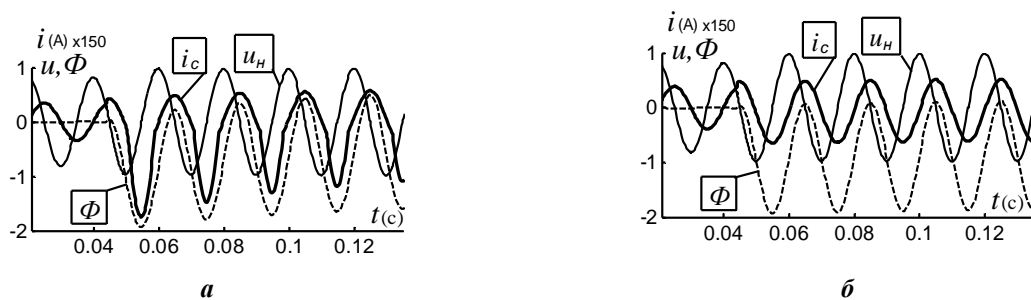


Рис. 9

Як видно із рис. 9, а, після включення К1 (рис. 4) потік майже досягає значення  $-2$ , тобто для запобігання небажаних сплесків струму необхідно на таку ж величину збільшити значення індукції ВДТ. У діалоговому вікні задання параметрів трансформатора апроксимована крива намагнічування [3] визначається коротким рядом величин, віднесених до своїх номінальних значень, у такій формі:  $[0,0; 0,05; 1,0; 1,0; 1,05]$ , де перша цифра групи виокремленої розділовим знаком “;” відповідає відношенню величини струму обмотки W1 при XX ( $I_0$ ) до значення її номінального струму ( $I_{W1\text{ ном}}$ ), а друга –  $U_{W1}/U_{W1\text{ ном}}$ . Іншими словами, струм XX обмотки W1 складає 5% від номінального значення у випадку, коли напруга на ній також є номінальною, і зрівнюється по величині з ним, коли напруга на обмотці перевищить на 5% свою номінальну величину. Тобто, коли відкоригувати параметри кривої намагнічування до виду  $[0,0; 0,05; 1,9; 1,0; 1,95]$ , що буде означати збільшення на 90% установленної (габаритної) потужності ВДТ і таке ж саме підняття межі (від 1,0 до 1,9), за якою відбувається насичення магнітопроводу, то очевидно, що позбудемось і сплесків відповідних струмів (рис. 9, б). Необхідно відзначити, що у першому випадку (рис. 9, а) затухання магнітного потоку  $\Phi$  у часі до своєї установленої величини за рахунок енергії сплесків струму є значно швидшим, ніж у другому (рис. 9, б). Через це час до наступної такого ж роду комутації в першому випадку буде коротший, ніж в іншому. Більш детально це висвітлювалося при розгляді процесів комутації звичайного трансформатора [3], проте вочевидь існує взаємозв'язок між моментом комутації і інтервалом часу до наступного її повторення. Як проміжний висновок із викладеного можна стверджувати, що при індуктивному характері навантаження найбільш прийнятною є точка комутації, що припадає на момент часу, відповідний амплітуді вхідної напруги. Цим забезпечуються мінімальні габарити ВДТ, досягається максимальна швидкодія системи управління та відсутність екстремальних струмів.

Робота ВДТ на індуктивному навантаженні при комутації первинної обмотки, що комутується на індуктивне навантаження, є, з точки зору її аналізу, найпростішим випадком, оскільки характер

протікання процесів, як в навантаженні так і трансформаторі співпадають. При роботі ж на активне навантаження характер процесів дещо складніший. У цьому разі при номінальному навантаженні ВДТ природне закриття тиристорних ключів (K2 або VS2) внаслідок практичного співпадіння фаз напруг та струмів відбувається із переходом кривою напруги  $u_1$  нульового рівня. Проте включення необхідного ключа K1, яким ВДТ переводиться в аверсний режим, безпосередньо після закриття K2, як і в раніше розглянутому подібному випадку (рис. 9, а), через насичення магнітопроводу, є також одним із найбільш незадовільних, що ілюструє рис. 10, а. Коли ж далі змістити у часі ввімкнення ключа до найближчого моменту амплітуди напруги (рис. 10, б,  $U_{C1}$ ), то спочатку струм повторюватиме форму вихідної напруги, а пізніше всеодно одержимо сплеск струму споживання, але вже протилежної полярності.

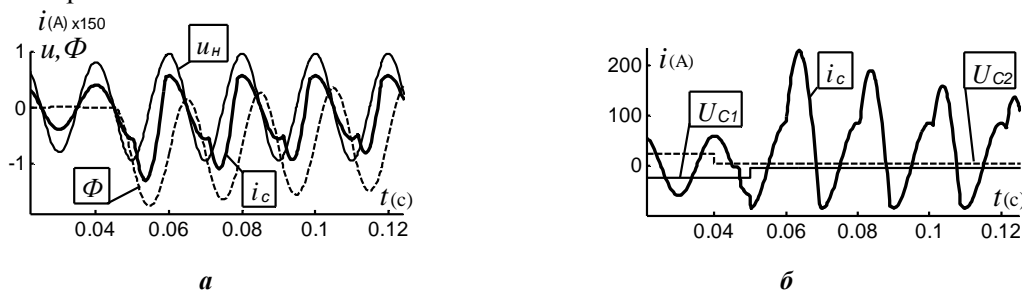


Рис. 10

Із такої різнознакової направленості сплесків струму  $i_c$  випливає, що момент включення ключа, при якому б вони були відсутні, повинен знаходитися в проміжку  $t=0,045\dots0,05$  с, тобто в першій чверті періоду після закриття K2. Варіацією часу зміни  $U_{C1}$  нескладно визначити такий необхідний момент часу: для даного випадку – це  $t=0,0469$  с. Порівнюючи рис. 9, б та рис. 10, б, можна побачити, що у першому випадку маємо постійну синфазну подібність потоку та струму, а в іншому – наростаюче у часі зміщення фази вхідного струму, пов'язане із зміною його характеру, від активно-індуктивного – безпосередньо після включення K1, до чисто активного – після затухання перехідного процесу. Тобто активна постійно діюча складова  $i_c$ , що визначається переважно навантаженням, діє в поперечному напрямку до індуктивної, пов'язаної із затухаючою величиною потоку осердя.

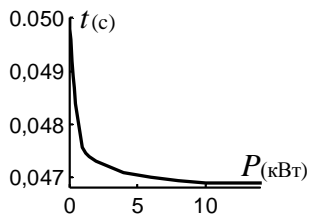


Рис. 11

Проте, при різних значеннях активного навантаження, на відміну від індуктивного, момент часу, при якому включення ВДТ в аверсний режим відбувається без сплесків струму намагнічування, змінюється (рис. 11). Якщо взяти відлік в градусах від моменту переходу кривою напруги нульового рівня, то даний інтервал часу складатиме  $55,8^\circ\dots90^\circ$ , тобто його тривалість – 3,1 мс. Як видно із рис. 11, лише при потужностях

навантаження, близьких до номінальної ( $P=13,2$  кВт), кут включення ключа майже незмінний і може бути заданий в системі управління комутацією фіксованим. При переході із стану замкненої обмотки W1 до режиму реверсу напруги також простежується якісна відмінність у ході процесів, але не тільки в порівнянні із їхнім характером при індуктивному навантаженні, а і при активному: як приклад – відмінність від уже розглянутого суміжного переходу до аверсу ВДТ. На рис. 12 на фоні кривої вхідної напруги (при відносному приведенні до одиничного значення її амплітуди та номінальному активному навантаженні ВДТ) показано умовні зображення рознесених по вертикалі надходжень сигналів управління  $U_c$  на ключі VS1 та VS2 за умови відсутності струмів намагнічування. Причому тут негативний фронт  $U_{C2}$  відповідає моменту зняття управління із замикаючого W1 ключа, позитивний фронт  $U_{C1+}$  відповідає переходу до аверсу напруги, а  $U_{C1-}$  – навпаки, до її реверсу. Як видно з рис. 12, оптимальний момент включення на аверс напруги W2 знаходиться зліва від моменту амплітуди ( $t=0,05$  с), а на реверс – справа, і майже співпадає ( $t=0,0549$  с) із нульовим значенням  $u_1$ . При варіаціях активного навантаження момент часу, при якому перехід ВДТ до реверсу відбувається без сплесків струму намагнічування, також змінюється (рис. 13) і при цьому

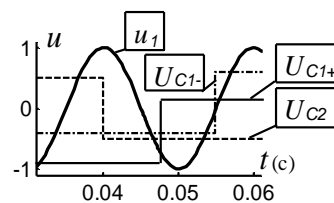


Рис. 12

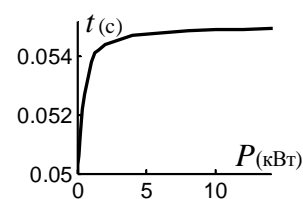


Рис. 13



є фактично дзеркальним відображенням рис. 11 відносно осі  $P_{(кВт)}$ , коли її провести із точки  $t=0,05$  с. Такого ж роду залежності (рис. 11, 13) можна побудувати і при змінах характеру навантаження, її величини і т.п., проте вони не дають відповіді, як же вибрати кут включення у загальному випадку – невизначеному характері навантаження ВДТ та його величини.

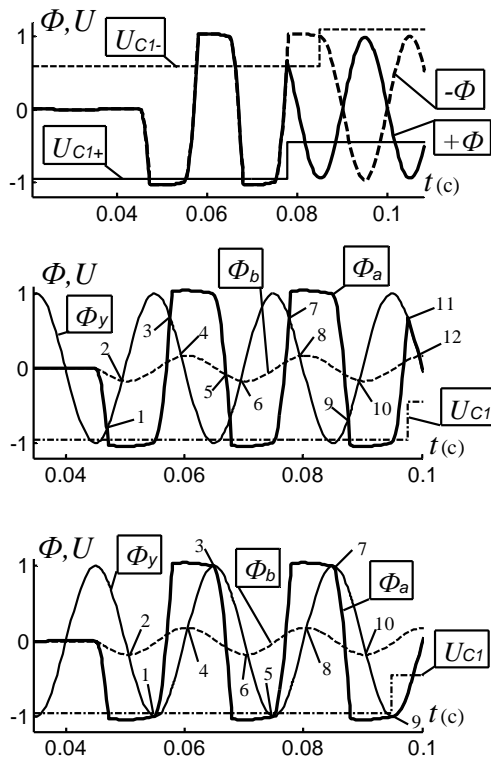


Рис. 14, а, б, в

гого етапу продовжимо вправо, а синусоїду усталеного значення потоку  $\Phi_y$  ВДТ – відповідно вліво і таким чином накладемо комутаційну та передкомутаційну області графіка. На рис. 14, б цифрами від 1 до 12 показано точки співпадінь  $\Phi_y$  з кривими потоків другого етапу комутації  $\Phi_a$  – при номінальному, та  $\Phi_b$  – при зменшеному на два порядки навантаженнях. Порівнюючи рис. 14, а і рис. 14, б, видно, що точка 7 відповідає випадку комутації на рис. 14, а. Співставляючи рис. 12 з рис. 14, б і знаючи, що між усталеними напругою і потоком є однозначна подібність з різницею лише в фазовому куті  $-\pi/2$ , можна відзначити, що даній комутації відповідає точка 1. Використовуючи модель рис. 4 та достатньо прості методи автоматизації процедури моделювання [4], можна впевнитися, що і інші точки відповідають режиму бажаної комутації. Розміщення парних точок – 2, 4, 6, ..., що відповідають моментам комутації в режимі малого навантаження, суттєво відмінне від непарних, що є відображенням залежності рис. 13. Таким чином, можна зробити висновок, що перехід ВДТ у режим аверсу повинен виконуватися в момент рівності миттєвого значення магнітного потоку його осердя із усталеним значенням потоку, який з'являється в магнітопроводі після комутації.

На рис 14, в показано відповідні криві та точки комутації для реверсу ВДТ. Очевидною особливістю є локалізація точок комутації при номінальному режимі навантаження в моменти амплітуди усталеного потоку осердя трансформатора і подальша зміна як  $\Phi_a$ , так і  $\Phi_y$  в одному напрямку. На практиці при жорсткій установці моменту комутації відносно фази напруги це призводить до деякого зменшення амплітуди сплесків струму намагнічування в порівняння із аверсним переходом. У цілому даний приклад є ілюстрацією залежності рис. 13. Зворотний перехід від реверсу (аверсу) напруги W2 до вольтозакоротки, якщо прийняти за основу визначення точок комутації, принцип співпадіння миттєвого і усталеного потоків буде відрізнятися лише одним – величина усталеного потоку повинна бути нульовою. Тобто, при відповідній модифікації рис. 14, б, в він повинен буде відображатися вже не синусоїдою, а горизонтальною прямою. Природно, що при візуалізації сказаного точки комутації будуть співпадати із перетинами  $\Phi_a$  або  $\Phi_b$  нульової лінії  $\Phi_y=0$ . Інші особливості комутації ВДТ, що висвітлювалися при аналізі його роботи при індуктивному струмі W2, також у повній мірі стосуються

Питання стане більш ясным, коли відтворити епюри сигналів управління рис. 12 на фоні магнітних потоків (рис. 14, а) для аверсу ВДТ ( $+\Phi$ ) та його реверсу ( $-\Phi$ ); для наочності моменти включення відповідних ключів зміщені на 3 півперіоди від точки ( $t=0,045$  с) природного закриття VS2. Як видно із рисунка, на перших двох етапах комутації (1 – нульового значення  $\Phi$ ,  $t=0\dots0,045$  с, 2 – трапецієподібної форми потоку, через примусове перемагнічування W2 струмом навантаження, від  $t=0,045$  с і до позитивного фронту  $U_{C1+}$ ) характер поведінки потоку абсолютно ідентичний.

І лише на третьому етапі – усталених потоків ( $+\Phi$ ,  $-\Phi$ ), що починаються від відповідних позитивних фронтів  $U_{C1+}$  і  $U_{C1-}$ , бачимо, що  $+\Phi$  є дзеркальним відображенням  $-\Phi$ , і навпаки. Це і є формальною причиною різниці поведінки залежностей, показаних на рис. 11, 13. Значення потоку при вибраних моментах включення VS1 як при реверсі напруги W2, так і її аверсі, вкладається в межі  $+1\dots-1$ . Тому сплесків струму спостерігатися не буде, як і для випадку, представленою рис. 11...13. Природно також, що зміщення фронтів  $U_{C1+}$  і  $U_{C1-}$  спричинить перевищення потоком вказаних меж і, як наслідок, призведе до сплесків  $i_c$  (рис. 10, а, б). Щоб сформулювати алгоритм вибору бажаних моментів комутації VS1, змістимо його включення у часі (рис. 14, б, в), тобто криву  $\Phi_a$  комутаційного проміжку другого етапу

і процесів при його активному навантаженні. Ємнісний характер навантаження ВДТ при його комутації спричинює коливальність процесів, що формально пояснюється підвищенням порядку рівнянь електричних кіл. У цілому це ускладнює сприйняття графічного матеріалу, і тому ілюстрації процесів для такого випадку не показані. Разом із тим, принцип визначення точок комутації і при такому навантаженні залишається таким самим, як і у випадку монотонного ходу комутаційних процесів, тобто як і при активно-індуктивному навантаженні.

Таким чином, для реалізації даного принципу необхідним є визначення характеру двох потоків – миттєвого і усталеного для післякомутаційного періоду. Визначення першого як для моделі, так і в реальності, уже наводилося [3,4]. Другий – для даної конфігурації ВДТ і за умови достатньо невеликих значень його повного внутрішнього опору отримується також простим інтегруванням вхідної напруги. Проте для інших конфігурацій ВДТ необхідна відповідна корекція. Так, для схеми рис. 2, *з* одержану величину відповідно зменшують на коефіцієнт  $(1 - w_2/w_1)$ , а для рис. 2, *д* – збільшують у  $(1 + w_2/w_1)$  рази.

На рис. 15 показано модель, яка реалізує автоматичний вибір найближчої точки комутації при довільно заданому часі включення відповідного ключа. За основу взято модель аналогічного призначення для звичайного трансформатора [4]. Засвоївши на ній принципи комутації та управління нею, досить нескладно перейти до практичної реалізації.

В основі моделі – два канали інтегрування напруги із подальшим порівнянням результату їх операції. Блоки Timer2 та Timer1 відповідно задають час зняття та подачі керування на необхідні ключі. Тригер D Latch перетворює лінійний час блоку Timer1 у найближчий дискретний відлік, одержаний в результаті порівняння, від якого і починається відлік включеного стану К2.

Таким чином, підсумовуючи викладене, необхідно відзначити, що при мінімально можливих габаритах ВДТ одномоментна дискретно-рзова комутація його первинної обмотки для уникнення сплесків струму, пов'язаних із насиченням магнітопроводу, можлива лише в момент досягнення прикладеною синусоїдальною напругою свого амплітудного значення, що відповідає нулю його магнітного потоку. Реалізація цього можлива лише у випадку повної керованості ключів змінного струму, тобто при використанні транзисторів, тиристорів із примусовою комутацією і т.п., а при природній комутації тиристорів – лише в окремому випадку – тільки при індуктивному навантаженні. Коли ж неможливо забезпечити такого роду комутацію суміжних ключів і виникає режим розімкненої і відключеної первинної обмотки (характерно при природній комутації тиристорів), необхідно керуватися правилом, відповідно до якого включення потрібного іншого ключа повинно виконуватися в момент рівності миттєвого значення магнітного потоку осердя ВДТ із усталеним значенням його потоку, який повинен бути після комутації. І хоч при цьому можливо одержати цілий ряд дискретних часових відліків, в яких можливе включення наступного необхідного ключа, проте цей комутаційний період часу необхідно, по можливості, не затягувати через сплески напруги на обмотках трансформатора. Включення повинно бути виконане у найбільш близький прийнятний (за вказаним критерієм) момент часу після закриття попередньо включеного ключа, оскільки перший сплеск напруги на обмотках має найменшу амплітуду. 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 ВДТ до іншої не при-

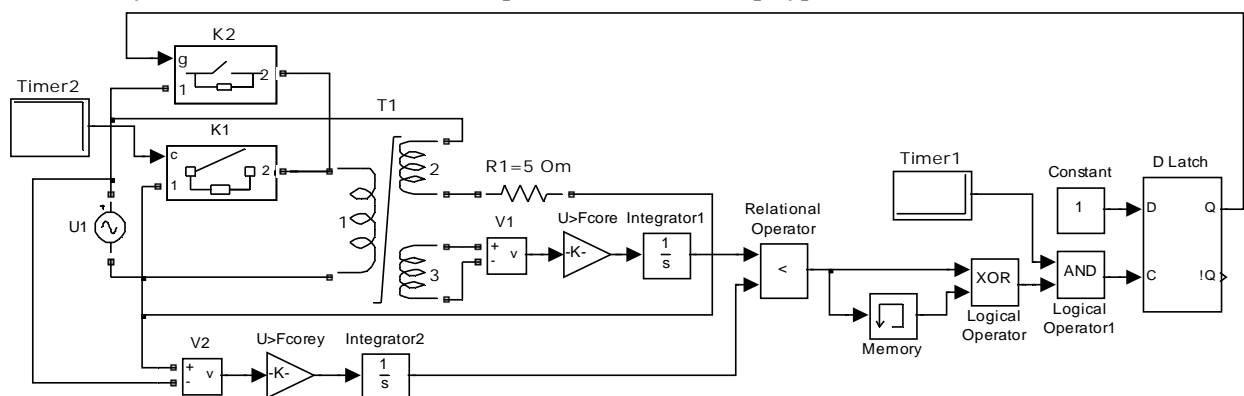


Рис. 15

зводив до зміни величини потоку.

Реалізація наведених принципів дозволяє повністю використати електроенергетичні характеристики вольтододавчих трансформаторів, уникнути різного роду ексцесів через появу аперіодичних складових в струмі споживання, поліпшити динаміку системи регулювання. Організація керування комутацією на даних принципах пройшла відповідну схемотехнічну апробацію і показала реальність унеможливлення (в процесі регулювання напруги за допомогою для ВДТ) небажаних перехідних ексцесів, незалежно від величини навантаження, його характеру, кратності перевантаження і т.п.

1. Липківський К.О., Халіков В.А., Можаровський А.Г. Фазове регулювання напруги ключами із природною комутацією та її дослідження в системі MATLAB // Техн. електродинаміка. – Тем. випуск “Проблеми сучасної електротехніки”. – 2002. – Ч. 2. – С. 72–79.

2. Миловзоров В.П., Мусолин А.К. Дискретные стабилизаторы и формирователи напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 248 с.

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

4. Халіков В.А., Можаровський 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.

5. Халіков В.А., Можаровський А.Г. Природна комутація ключів при фазовому регулюванні напруги та імпульсному характері навантаження, її дослідження в системі MATLAB // Техн. електродинаміка. – 2003. – №6. – С. 30–35.

УДК 621.314.214

#### **Процессы и организация коммутации вольтодобавочных трансформаторов**

**В.А.Халиков**, канд.техн.наук

**Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, Киев–57, 03680, Украина.**

*Рассматриваются переходные процессы при коммутации первичной обмотки вольтодобавочного трансформатора, возникающие вследствие насыщения его магнитопровода. Проведено имитационное визуальное моделирование процессов средствами программного пакета MATLAB и предложены меры минимизации или исключения возникающих при этом экстремальных явлений. Библи. 5, рис. 15.*

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

#### **Transient processes and organization to switching's buck-boost transformer**

**V.A.Khalikov**

**Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,  
Peremogy, 56, Kyiv–57, 03680, Ukraine.**

*Transient processes appearing over core saturation on switching of the primary winding of a buck-boost transformer are considered. Visual modeling of transient processes is done with MATLAB and techniques for minimization or elimination of transients are suggested. References 5, figures 15.*

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

1. Lipkivskyi K.O., Khalikov V.A., Mozharovskyi A.G. Phase voltage regulation by switches with natural commutation and its studying with MATLAB // Tekhnichna elektrodynamika. – Tematychnyi vypusk “Problemy suchasnoi elektrotekhniki”. – Vol.2. – 2002. – P. 72–79. (Ukr)

2. Milovzorov V.P., Musolin A.K. Discrete stabilizers and shapers of the voltage. – Moskva: Energoatomizdat, 1986. – 284 p. (Rus.).

3. Khalikov V.A., Lypkivskyi K.O. Processes and organization of transformer switching // Tekhnichna elektrodynamika. – 2010. – №5. – P. 22–30. (Ukr).

4. Khalikov V.A., Mozharovskyi A.G. Methodology of modeling and studying of electromagnetic processes in transformer switching executive structure with MATLAB programme package: Education manual. – Kyiv, Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine, 2001. – 45 p. (Ukr).

5. Khalikov V.A., Mozharovskyi A.G. Natural commutation of switches in phase voltage regulation systems with pulsed loads and its studying with MATLAB // Tekhnichna elektrodynamika. – 2003. – №6. – P. 30–35. (Ukr)

Надійшла 11.04.2011

Received 11.04.2011