

УДК 621.314.214

В.А.Халіков, канд.техн.наук, **К.О.Липківський**, докт.техн.наук (Інститут електродинаміки НАН України, Київ)

ПРОЦЕСИ ТА ОРГАНІЗАЦІЯ КОМУТАЦІЇ ТРАНСФОРМАТОРІВ

Розглядаються перехідні процеси, що виникають при комутації первинної обмотки трансформатора внаслідок насичення його магнітопроводу. Проведено візуальне моделювання процесів засобами програмного пакету MATLAB та запропоновано заходи по мінімізації чи позбавлення екстремальних проявів, що можуть виникати при цьому.

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

Трансформатор – один із найпоширеніших електричних апаратів. Тому кожний електротехнік на своєму рівні усвідомлення стикався з екстремальними перехідними процесами в первинній обмотці трансформатора, спричиненими насиченням магнітопроводу при її підключенні до напруги живлення. Адже, в залежності від потужності сплески струму первинної обмотки, в тому числі й у режимах близьких до холостого ходу трансформатора, можуть перевищувати в 5–7 разів її номінальний струм. Далеко не завжди трансформатор експлуатується в неперервному стаціонарному режимі. Досить поширені пристрої, для яких композиційна структура – ключ/трансформатор – є основним виконавчим органом, режим роботи якого це – періодичні та досить часті дискретно-разові комутації трансформатора (це – стабілізатори напруги змінного струму, установки напівавтоматичного зварювання, плавильні печі і т.п. [1]). Проте характер перехідних процесів, пов'язаний із насиченням магнітної системи, при розробці принципів управління таких пристроїв часто ігнорується чи недооцінюється. Зрозуміло, що такий стан справ також не сприяє ні режиму економії електроенергії, ні її якості в мережі живлення. Природно, що в такому разі в обмотках виникають електромеханічні напруження, спричинені комутаційними струмами, і відбувається їхній перегрів. Як наслідок, прискорюється старіння ізоляції обмоток, знижується надійність трансформатора і пристрою в цілому тощо. Комутаційні елементи (контактори, тиристори і т.п.) також необхідно вибирати із відповідним запасом по струму їх навантаження, тобто враховувати екстремальний характер перехідних процесів, щоб витримати необхідний ресурс їхньої роботи.

Ключ до вирішення такого роду проблеми при застосуванні однофазних трансформаторів, правда лише для одного окремого випадку, сформульовано майже в кожному підручнику по електричних машинах. Згідно із ним, при нульовому залишковому магнітному потоці осердя ($\Phi_s=0$), тобто при повному його розмагнічуванні, найбільш сприятливим для включення є момент амплітуди (U_m) синусоїдальної напруги, що прикладається до первинної обмотки трансформатора.

У такому випадку після включення амплітудне значення потоку Φ_m осердя трансформатора при наближенні його до ідеального визначається відомою формулою [2]:

$$\Phi_m = U_1 / (4,44 f w_1), \quad (1)$$

де U_1 – діюче значення напруги первинної обмотки; w_1 – кількість її витків; f – частота струму мережі живлення.

При цьому фаза φ магнітного потоку завжди відстає на чверть періоду від фази прикладеної

напруги, тобто при $u_1 = U_{1m} \sin \omega t$, маємо $\Phi = \Phi_m \sin (\omega t - \pi/2)$, де U_{1m} – амплітуда напруги u_1 , а величина потоку є функцією вольтсекундної площі u_1 , або іншими словами – її інтегралом:

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

Це наочно ілюструє рис. 1, а, на якому показано відповідно співмірні криві величин для випадку включення трансформатора по умовному сигналу управління U_y при $t=0,005$ с.

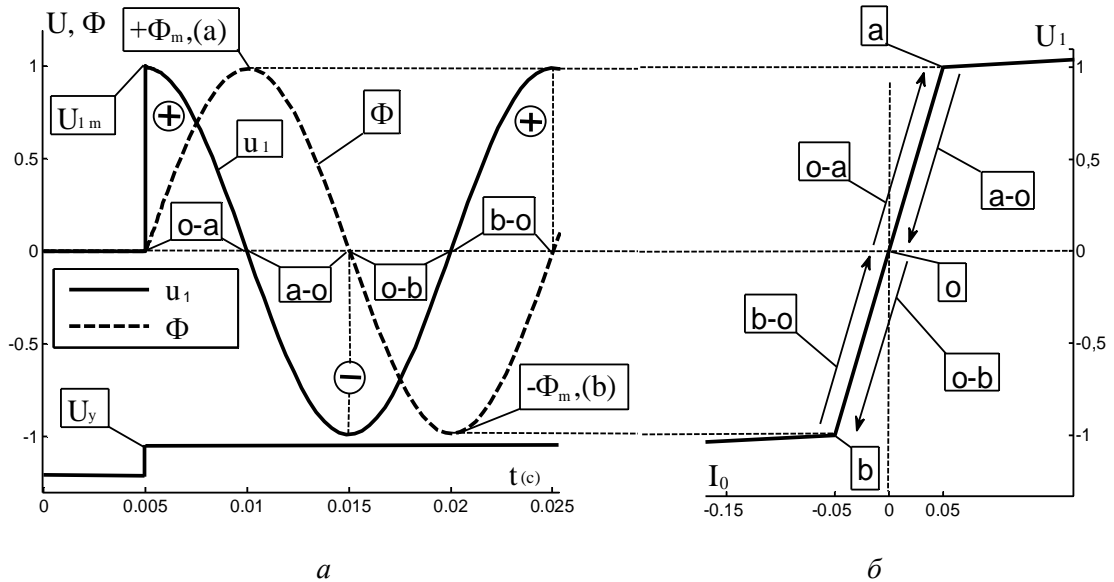


Рис. 1

Амплітуда струму намагнічення I_{0m} , що утворює в осерді трансформатора магнітний потік Φ , або іншими словами – реактивна складова струму холостого ходу – буде дорівнювати

$$I_{0m} = (\Phi_m / w_1) R_m. \quad (3)$$

Величина магнітного опору осердя трансформатора R_m визначається кривою намагнічування, яка зображена у координатах I_0, U_1 (рис. 1, б) відносними одиницями до їхніх номінальних значень без врахування явища гістерезису і спрощено апроксимована трьома характерними лінійними відрізками. При цьому середньому круто падаючому відрізку (ab) кривої відповідає найбільше значення R_m , а нахил крайніх відрізків по відношенню до нахилу середнього показує, на скільки зменшується величина R_m при переході потоком точок перегину (a – при позитивних значеннях Φ , коли $\Phi = +\Phi_m = 1$; b – при негативному Φ , коли $\Phi = -\Phi_m = -1$) кривої намагнічування.

Якщо взяти геометричну інтерпретацію процесів при такій комутації (рис. 1), то першій позитивній чверті періоду ($t=0,005 \dots 0,01$ с) напруги u_1 після підключення буде співставний вектор степені насичення ($o-a$) магнітопроводу на кривій його перемагнічування (рис. 1, б). У такому разі моменту часу $t=0,01$ с відповідає нульове значення $u_1=0$ і максимальна позитивна величина намагнічування ($+\Phi_m$) осердя (точка –“ a ”) на відрізку (ab). Перехід u_1 в область від’ємних значень призводить до зменшення магнітного потоку, який досягне нульової величини в амплітуді напруги $-U_{1m}$ ($t=0,015$ с). При цьому напрямок зміни степені намагнічування осердя на рис. 1, б показано вектором ($a-o$). Повний цикл перемагнічування осердя із поверненням магнітного потоку із області його від’ємних значень у початкову точку із значенням $\Phi=0$ буде завершено при $t=0,025$ с, тобто в позитивному максимумі напруги u_1 , що і відображено векторами кривої намагнічування та відповідними їм чвертями періоду вхідної напруги.

Таким чином, в усталеному режимі роботи трансформатора загального призначення при його раціональному розрахунку перемагнічення осердя, як правило, відбувається на відрізку (ab) при максимальному значенні магнітного опору і мінімальному струмі I_0 . Такий випадок комутації є найбільш сприятливим для трансформатора, оскільки він відразу виходить на усталений режим роботи, тобто без струмових ексцесів. У випадку відсутності навантаження струм первинної обмотки буде дорівнювати струму холостого ходу трансформатора, який через незначний вклад своєї активної складової буде по формі і фазі співпадати із кривою магнітного потоку. При номінальному активному навантаженні струм I_1 , через незначну величину I_0 в порівнянні з номінальним струмом, по формі та фазі

буде майже повністю співпадати із вхідною напругою U_1 . Різниця буде спричинена впливом індуктивності розсіювання трансформатора, тобто для більшості випадків – несуттєвою. Природно, що при навантаженнях, менших номінального, форма струму відповідно матиме проміжні варіанти між цими граничними випадками.

В дійсності необхідно завжди мати на увазі варіативність навантаження від чисто індуктивного характеру до чисто ємнісного чи його нелінійні властивості, що при дослідженні процесів будуть суміщатися із нелінійністю кривої намагнічування власне трансформатора, яка реально має далеко не такий спрощений вид, як показано на рис. 1, б. Тому неважко уявити, чому порушені питання до недавнього часу не одержували належного розвитку. Проте поширення і розвиток сучасних програмних пакетів моделювання дозволяє не тільки осмислити характер процесів, а й одержати кількісні результати із долею достовірності, недоступною для аналітичних методів. Електротехніки, в силу специфіки своїх об'єктів, мають розвинуте візуальне компонентно-схемотехнічне мислення, що надає зображенню систем виду окремих функціональних блоків із максимальним їх наближенням до реальних фізичних прототипів. Тому і пакети комп'ютерного моделювання електротехнічних систем мають ту саму направленість. Наприклад, призначення і функціонування моделі (рис. 2) – найпростішої структури ключ-трансформатор у середовищі пакету MATLAB – цілком відповідає фізичним аналогам і зрозуміло з першого погляду.

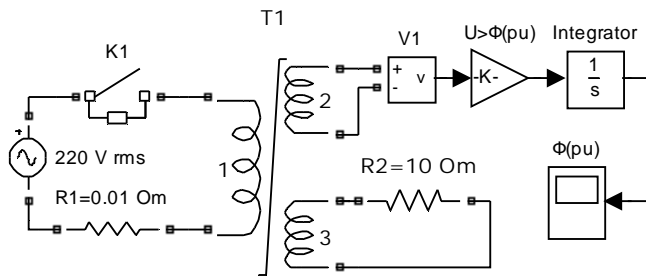


Рис. 2

Параметри елементів моделі задаються у відповідних діалогових панелях і, наприклад, для трансформатора T1 апроксимована крива намагнічування (рис. 1, б) визначається коротким числовим рядом у відносних одиницях у такій формі: [0,0; 0.05,1.0; 1.0,1.05], де перша цифра відповідає значенню I_{0m} , а друга – U_{1m} . Параметри обмоток (w) задаються їхньою напругою холостого ходу (у даному випадку для всіх обмоток – 220 В), а більшість інших величин (значення індуктивності розсіювання L_w , активного опору

R_w і т.п.), як правило, відносними ($R_{(p.u.)}$, $L_{(p.u.)}$), приведеними одиницями ($p.u.$ – “per unit”). При цьому враховують, що

$$R_{(p.u.)}=R_w/R_{base}, \quad R_{base}=(U_1)^2/S_n, \quad L_{(p.u.)}=L_w/L_{base}, \quad L_{base}=R_{base}/\omega,$$

де S_n – повна номінальна потужність трансформатора (ВА).

Для даної моделі навантаження $Z_H=R_2=10$ Ом має активний характер і підключене до обмотки 3. При таких заданих параметрах і були одержані відповідні криві (рис. 1, а), володіння аналітикою процесів тут необхідне лише для загальної орієнтації у правильності функціонування моделі і оцінки достовірності одержаних результатів. Проте для ефективного моделювання, навіть для такого простого прикладу, необхідно мати деякий рівень комп'ютерної грамотності та навички роботи із програмним пакетом, володіти методологією дослідження [3].

Зрозуміло, що величина і характер вхідного струму трансформатора безпосередньо залежить від навантаження його вторинної обмотки. На рис. 3 показано криві струму I_1 для тих самих параметрів комутації та трьох характерних варіантів навантаження (рис. 3, а – активне навантаження; рис. 3, б – чисто індуктивне, $L_H=0,03185$ Гн; рис. 3, в – чисто ємнісне, $C_H=318,5$ мкФ), тобто із абсолютно однаковим значенням $Z_H=10$ Ом.

Цілком природно і відповідно до законів комутації, що при індуктивному навантаженні (рис. 3, б), у порівнянні із активним (рис. 3, а), здійснюється “затягування” наростання струму $I_1=I_{1L}$, і його



Рис. 3, а, б

фаза та форма при номінальному значенні навантаження буде повністю співпадати із тими ж параметрами для магнітного потоку (рис. 1, а) трансформатора. Форма $I_1=I_{1R}$ при активному навантаженні майже співпадає із вхідною напругою (рис. 1, а), тобто вплив власної індуктивності L_T трансформатора несуттєвий.

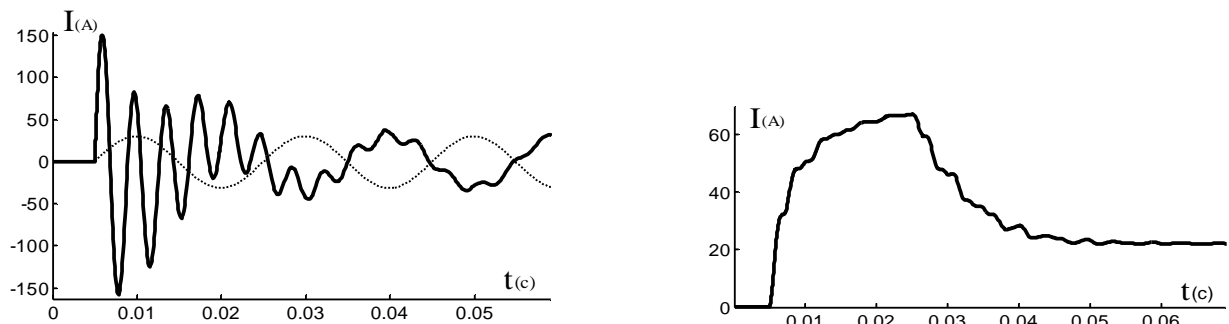


Рис. 3, в, г

Ємнісне навантаження ($I_1=I_{1C}$) якісно змінює картину процесу (рис. 3, в): спостерігається більш ніж на півтора-два періоди коливальний процес установлення вхідного струму із значними піковими перевантаженнями (для порівняння на рис. 3, в пунктирною лінією показано I_{1L}). Якщо говорити математичною мовою, то в даному випадку маємо збільшення порядку рівнянь для такого електричного кола від 1 (монотонний процес) до 2, що відповідає коливальному процесу. Період коливань, як завжди, визначається добутком ($L_T C_n$), а їхнє згасання – власним еквівалентним активним опором трансформатора Т1. При цьому через пікове перевантаження необхідно належним чином вибирати ключові елементи, особливо це стосується напівпровідникових пристроїв, в яких можливе поступове руйнування структури переходів із наростаючим у часі погіршенням характеристик. Обмотки трансформатора також піддаються суттєвому перевантаженню: як показано на рис. 3, г, діюче значення струму протягом періоду напруги перевищує номінальне більш ніж у два рази, що еквівалентно чотирикратному збільшенню виділення тепла в проміжку комутації.

Якщо ж сумістити графіки потоків трансформатора для двох крайніх різнохарактерних навантажень (рис. 3, б, в), то як видно із порівняння (рис. 4), фази потоків співпадають, проте значення $\Phi_m(C)$ при ємнісному навантаженні (показано неперервною лінією) дещо більше величини $\Phi_m(L)$ при його чисто індуктивному характері (в даному випадку – приблизно на 4%).

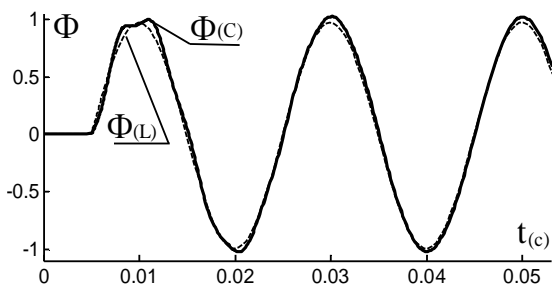


Рис. 4

Пояснення тут просте, якщо знати, що існує лінійна залежність між напругою і потоком (I). В даному випадку ефект спричинено ємнісною (поперечною) компенсацією власної індуктивності L_T трансформатора (для кожної обмотки w моделі трансформатора Т1 – $L_{w(p.u.)}=0,008$, $R_{w(p.u.)}=0,002$). Тому чим менше значення L_T , тим більш мізерним стає вплив зміни характеру навантаження та його величини, і навпаки. Важливо лише те, щоб значення Φ_m не перевищувало своїх допустимих меж, що задаються точками a, b кривої (рис. 1, б). Необхідно відзначити, що мінімальне значення магнітного потоку буде у випадку не чисто індуктивного навантаження, а при його активно-індуктивному характері, коли фазовий кут його повного опору буде співпадати з кутом повного еквівалентного внутрішнього опору трансформатора, тобто при синфазності струмів. Таким чином, можна зробити висновок, що величина та характер навантаження трансформатора не впливають суттєво на величину магнітного потоку його осердя, тобто перехідні процеси, пов'язані із насиченням магнітної системи, можливо розглядати окремо від процесів у навантаженні, а одержані результати для деякого окремого випадку (режиму холостого ходу, активного навантаження і т.п.) будуть справедливими і при інших варіантах поведінки зовнішніх кіл, підключених до вторинної обмотки під час комутації.

Зміни магнітного потоку в процесі комутації трансформатора можна простежити на його моделі, яка внутрішньо забезпечує збереження і інших необхідних значень його параметрів, а також спостереження за їхньою поведінкою. Для цього необхідно лише у вікні параметрів (Blok Parameters) моделі T1 перейти на вкладку – Configurations і у вікні Measurements вибрати: All measurement (V, I, Flux) або Flux and excitation current ($I_m + I_{Rm}$) і потім на полі моделі (рис. 2) розмістити блок – Multimeter, відповідним чином задавши у ньому перелік необхідних параметрів та приєднавши блок візуального спостереження – Scope. Проте у реальному трансформаторі ми позбавлені такого роду сервісних послуг, і тому на рис. 2 показано перетворення потоку у електричний сигнал. Для цього задіяна додаткова обмотка T1–2, проміжний фіктивний елемент Voltage Measurement (V1), що включається завжди між електричними і векторними ланками моделі, пропорційна ланка Gain ($U > \Phi(\mu)$) із

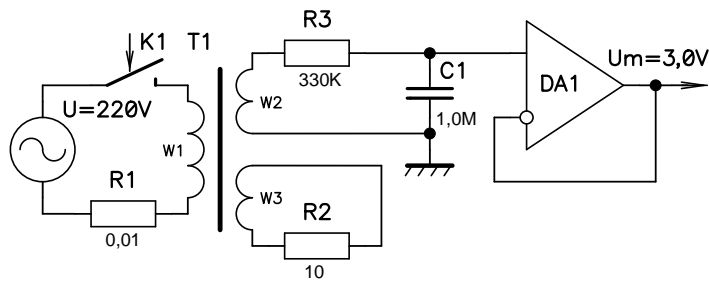


Рис. 5

коєфіцієнтом підсилення: $1/(220 \cdot \sqrt{2})/2/\pi/50$ для приведення до одиничного значення та інтегратор. Реальна схемотехніка ще простіша за рахунок суміщення двох останніх блоків простою пасивною RC-ланкою R3, C1 (рис. 5).

При номінальних значеннях елементів ланки, вказаних на схемі (рис. 5), відношення її вхідної напруги до вихідної складає близько 100, проте подавати таку високу напругу немає необхідності, хоча б із точки зору безпеки: навіть при зниженні цього

відношення на порядок ще забезпечується достовірність фази та величини потоку при похибці близько 1%, що є цілком прийнятним.

Зміщення моменту комутації від середини півперіоду вхідної напруги в той чи інший бік призводить до відносно короткочасного перехідного процесу, під час якого струм намагнічення I_0 різко зростає. Це пов'язано із появою асиметрії в кривій магнітного потоку, оскільки він є функцією вольт-секундної площі напруги, і виходу його амплітуди за межі, визначені точками перегину (*a*, *b*), тобто в область низьких значень магнітного опору R_m осердя трансформатора. Це, власне, і ілюструє рис. 6, на якому показано формування магнітного потоку при зміщеному вліво на 0,5 мс від моменту амплітуди ($t=5,0$ мс) часу комутації первинної обмотки трансформатора T1.

Якщо знову співставимо потік Φ (рис. 6, *a*) та криву намагнічення (рис. 6, *б*), подібно розглянутому випадку комутації (рис. 1) при фазовому куті – $\pi/2$ ($t=0,05$ мс), то одержимо цілком очікуваний результат: повний цикл перемагнічування, відповідний першому періоду U_1 , буде відбуватися між точками *c* та *d* кривої рис. 6, *б*, а не в проміжку *ab*, що було притаманне номінальному усталено-

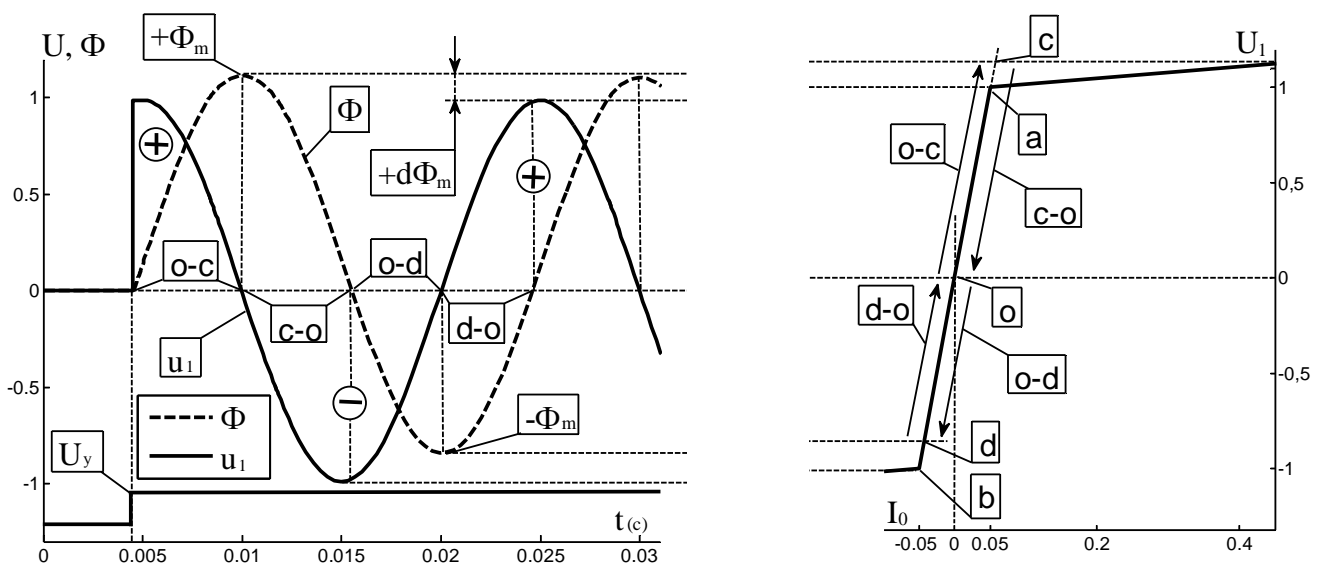


Рис. 6, а,б

му режиму. При цьому амплітуда Φ_m , як і раніше, буде досягнута при $U_1=0$, проте вона перевищить значення амплітуди свого усталеного значення на $d\Phi_m$. В області від'ємних значень потоку Φ , навпаки, намагнічуваність осердя не досягне свого абсолютного максимуму (b – рис. 1, б), характерного для усталеного режиму трансформатора, що видно із порівняння векторів $o-d$, $d-o$ (рис. 6, б) та $o-b$, $b-o$ (рис. 1, б). Таким чином, завжди наявна рівність відрізків ab та cd , проте розміщення останнього відносно нульової точки осей асиметричне.

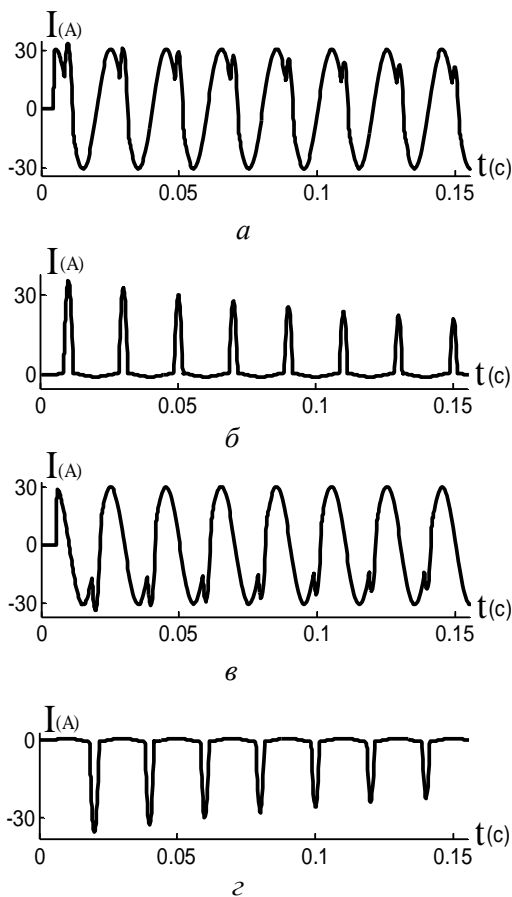


Рис. 7

характеристики поведінки потоку Φ відносно напруги U_1 стає дещо некоректним. Проте із рис. 1, б очевидно, що позитивне значення вхідної напруги завжди призводить до зростання магнітного потоку, а негативне – до його спаду, причому точки амплітуди потоку при синусоїдальній формі напруги завжди припадають на її нульове значення, що дає можливість приблизно уявити якісну картину процесів. Сама ж форма потоку і його величина визначається відомою формулою (2). Тому, маючи прямий взаємозв'язок потоку і струму намагнічування, видно, що найбільш несприятливим, з точки зору досягнення I_0 своїх максимальних значень, буде момент переходу вхідною напругою U_1 свого нульового значення ($t=0$). На рис. 8 показано криві струму I_1 для таких двох крайніх характерних моментів комутації при $U_1=0$ і $\Phi_s=0$, причому рис. 8, а відповідає включенню при наростаючому U_1 (перехід u_1

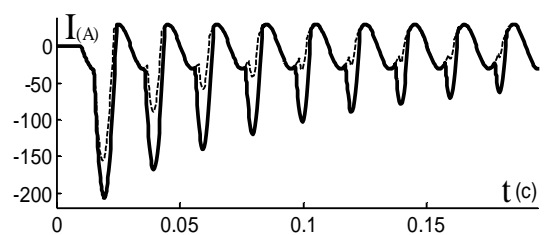
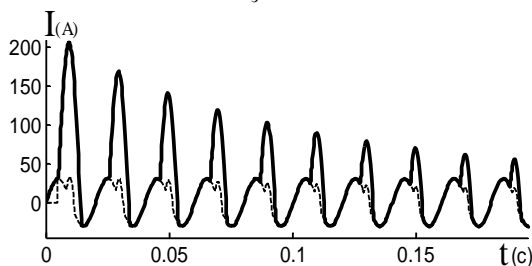


Рис. 8, а, б

Задача визначення I_{0m} у геометричній інтерпретації вирішується, як показано (рис. 6), проекцією потоку на криву намагнічування і в даному випадку він буде співставним із номінальним струмом I_{1n} первинної обмотки. Характер зміни вхідного струму I_1 на фоні дії номінального активного навантаження трансформатора показано на рис. 7, а. Природно, що при холостому ході трансформатора характер струму намагнічування буде виражено більш явно (рис. 7, б). Подальше зміщення моменту включення трансформатора в тому ж напрямку збільшує вольтсекундну площу напруги u_1 між моментом комутації і її спадом до нуля, відповідно будуть збільшуватися і екстремальні сплески струму намагнічування. Зміщення комутації трансформатора від моменту амплітуди u_1 ($\varphi=\pi/2$) вліво по осі часу, навпаки, зменшує вольтсекундну площу напруги u_1 між моментами початку комутації і її переходом через нульове значення. При цьому вектором намагнічування не буде досягнуто точки перегину відповідної кривої, тому сплеску струму намагнічування в півперіоді, на який безпосередньо припадає момент подачі напруги, за такої умови не виникне. Однак, оскільки асиметрія магнітного потоку буде наявна, сплеск струму I_0 проявиться в наступному (негативному) півперіоді. Такий випадок ілюструє рис. 7, в, г для номінального активного навантаження та холостого ходу Т1 відповідно.

Як видно із рис. 6, 7, у струмі I_0 наявна аперіодична складова, пов'язана із поступовим виходом потоку осердя в зону великих значень R_m кривої намагнічування. В такому разі використання параметру відносного положення в часі для кривих усталених процесів – фазового кута φ – для ха-

в позитивну область значень, $t=0$ с), а рис. 8, б – спадаючому U_1 (перехід u_1 в негативну область його значень, $t=0,01$ с, або при $\varphi=\pi$). Для наочності порівняння на криву процесу рис. 8, а накладено графік рис. 7, а, показаний штриховою лінією. Як видно по значенню амплітуди струму, такого роду прояви аж ніяк неможливо ігнорувати. Окрім того, тривалий і по своєму характеру аперіодичний процес супроводжується несинусоїдальним споживанням струму, що, в цілому, погіршує якість електроенергії та електромагнітну сумісність пристроїв. Із аналізу рис. 6...8 досить очевидно, що *включення трансформатора в фазовому проміжку $\varphi=0... \pi/2$ при позитивному значенні вхідної напруги завжди супроводжується позитивним сплеском струму намагнічування, що в часі співпадає з півперіодом напруги, на який припала комутація. Комутація в фазовому проміжку $\varphi=\pi/2... \pi$ при тому ж значенні напруги завжди викликає негативний сплеск струму, проте в півперіоді, що є наступним за тим, в якому було проведено підключення. Це правило відповідно транспонується і на негативний півперіод комутації.*

Оскільки амплітуда струму спадає в експоненціальній залежності від величини показника (рис. 7, 8), що є відношенням R_{w1}/L_{w1} [2], тобто значень внутрішніх параметрів первинної обмотки w_1 трансформатора, то варіацією цих параметрів можливо зменшити тривалість перехідного процесу. Наприклад, збільшення параметру $R_{w(p.u.)}$ для даної моделі трансформатора (рис. 2) від 0,002 до 0,02 призведе до візуально сприйняттого згасання сплесків струму на фоні номінального його значення (рис. 8, б) вже на восьмому періоді вхідної напруги, що показано штриховою лінією. Проте такий шлях для силових трансформаторів є неприйнятним, але ніщо не перешкоджає включити на деякий час в комутаційне коло зовнішній демпферний резистор відповідної потужності. Для моделі рис. 2 просте збільшення R_1 , що відіграло роль еквівалентного внутрішнього опору джерела напруги, до 5,0 Ом практично обмежує перехідний процес (рис. 8, а) одним півперіодом, на який припав момент включення (рис. 9). Графік, із метою наочності, показано для холостого ходу Т1, проте, як уже підкреслювалося, процеси, пов'язані із магнітним насиченням, не залежать від типу чи степені навантаження.

Зрозуміло, що такого роду реалізація мінімізації перехідних процесів через необхідність включення в коло силового струму достатньо громіздких елементів не є бажаною і виправдана лише при застосуванні механічних комутаторів. Більш прийнятним є принцип синхронної із напругою u_1 комутації в моменти часу, в яких би забезпечувався для магнітної системи трансформатора вихід відразу на усталений режим роботи. Природно, що такий режим можливо реалізувати лише при застосуванні напівпровідникових ключів змінного струму. Вище було підкреслено, що для одного окремого випадку – нульового значення залишкового потоку магнітопроводу – моменти включення трансформатора завжди повинні співпадати з амплітудою вхідної напруги. А якщо мати на увазі, що тиристри при їхній природній можливості відновлення ізолюючих властивостей напівпровідникової структури (ключ К1 моделі рис. 2 – має спрощені характеристики симістора) при холостому ході трансформатора або індуктивному навантаженні будуть завжди закриватися в амплітуді напруги, коли $\Phi=0$, то цим самим трансформатор завжди буде автоматично підготовлений до наступного включення в ті ж самі жорстко і наперед задані моменти часу, також співпадаючі із амплітудою напруги. В деяких випадках [4] для реалізації якісного режиму комутації, тобто без згаданих сплесків струму (рис. 8, 9), достатньо знання лише цих окремих особливостей.

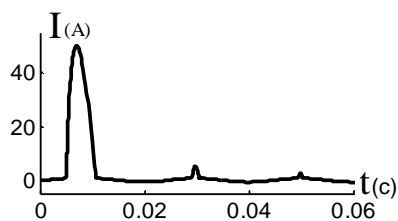


Рис. 9

Проте часто без додаткових засобів чи маніпуляцій неможливо привести трансформатор до стану, при якому б $\Phi=0$, наприклад, при активному навантаженні, коли струм I_1 фактично співпадає з U_1 , і самозакриття тиристорного ключа відбувається із спадом струму до нуля при $U_1=0$, що відповідає $\Phi=\Phi_m$. Після цього відбувається експоненціальне (тобто теоретично “затягнуте” у часі до безкінечності) саморозмагнічування осердя трансформатора до $\Phi=0$, а практично, до деякого залишкового значення потоку Φ_3 . Причому, на момент наступного включення навіть при його відносно достатній віддаленості в часі, величина потоку може бути досить значною – $\Phi_3=(0,1...0,3)\Phi_m$, тобто такою, що нехтувати нею неможливо. Таким чином, щоб мати можливість підключення трансформатора в один і той самий найбільш прийнятний момент часу, необхідно приведення магнітопроводу до стану із значенням потоку – $\Phi_3=0$.

Один із способів оперативної підготовки трансформатора до наступного включення ілюструє рис. 10, відповідно до якого в один із наступних півперіодів напруги після природного закриття ключа К1 виконується короткий імпульсом управління його повторне замикання на час, дещо менший чверті періоду U_1 . Як видно із рис. 10, а, потік в момент природної комутації ключа ($t_1=0,045$ с) досяг своєї амплітуди і поступово став спадати. Повторне короткочасне включення ключа виконується при іншій полярності напруги U_1 при $t_2=0,0909$ с (рис. 10, б), виходячи з достатності вольтсекундної площі i_1 від моменту включення і до її нульового значення для компенсації потоку. Відносно великий часовий проміжок, в якому проходить спад потоку, тут вибрано із чисто практичного погляду, оскільки чим більше віддалено t_2 , тим більша невизначеність щодо величини компенсаційної вольтсекундної площі. Тому раціональним є виконання такої операції по можливості якнайшвидше. У такому випадку форма потоку та вхідних струму і напруги матимуть відповідно вид, як на рис. 10, в, г. Природно, що в часі алгоритм роботи ключа також буде інший ($t_1=0,055$ с, $t_2=0,0601$ с). Оскільки за час між закриттям ключа К1 і його повторним включенням потік суттєво не встигає зменшитися, то t_2 фактично співпадає із моментом ($t=0,06$ с) амплітуди U_1 . Такий вид процесів характерний для номінального навантаження трансформатора. Із його зменшенням крутизна спаду потоку буде збільшуватися, і в своїй межі – при холостому ході Т1, необхідність в компенсації відпадає. Таким чином, реалізація цього алгоритму виправдана при таких варіаціях активного навантаження трансформатора, для яких внесок його власної індуктивності незначний. Коли мова йде про довільні варіації як величини навантаження, так і його характеру та часті і неперіодичні комутації, то, очевидно, що не можливо уникнути вказаних негативних ефектів, дотримуючися жорсткої синхронізації з фазою вхідної напруги.

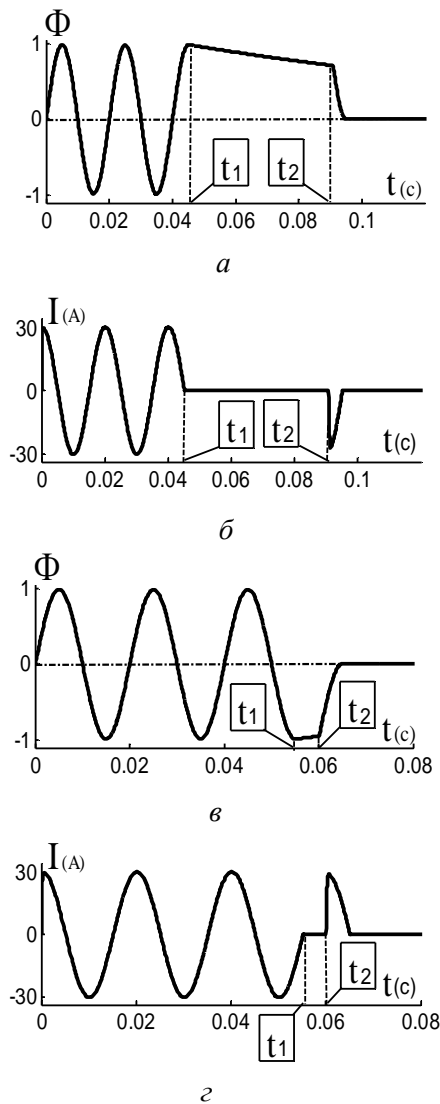


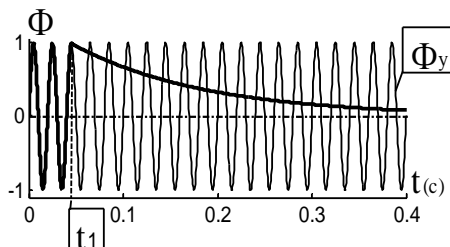
Рис.10.

Основний принцип, який повинен бути покладений в такий спосіб комутації, впливає із викладеного вище та аналізу рис. 1, 6, згідно з яким фазовий кут подачі вхідної напруги трансформатора повинен бути саме таким, щоб в подальшому зумовлена ним амплітуда потоку не виходила за вказані допустимі рамки. Тобто для реалізації цього способу комутації ще до моменту власне її здійснення необхідно мати інформацію про усталений магнітний потік Φ_y трансформатора, що буде наявним після його підключення. Необхідне значення цього потоку можливо одержати шляхом інтегрування напруги мережі живлення (2), а схемотехнічно – шляхом дублювання елементів моделі рис. 2 чи схеми рис. 5 для спостереження за миттєвим значенням потоку Φ трансформатора і підключення входу цього другого вузла спостереження безпосередньо до джерела живлення. Якщо відобразити обидва потоки – усталений Φ_y і миттєвий (поточний) Φ – на одному графіку рис. 11, а за тих самих умов закриття ключа (рис. 10, а), то одержимо їхнє природне співпадіння до моменту t_1 . Після цього форма Φ набуде характеру експоненціального спаду, а Φ_y – буде природно і далі у вигляді синусоїди. Можливо допустити, що сприйнятні умови комутації будуть належати точкам співпадіння поточного Φ і усталеного Φ_y потоків, адже в такому випадку потік в магнітопроводі відразу стане циркулювати по траєкторії свого усталеного значення.

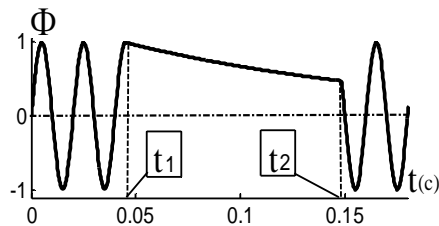
Перевірити це припущення можливо послідовним перебором у даному діапазоні значення t_2 – часу повторного включення ключа К1. Такого роду процедура у середовищі пакету MATLAB легко піддається автоматизації шляхом використання так званих *m*-файлів [3]. На рис. 11, б...д показано графіки потоків і струмів первинної обмотки трансформатора відповідно для двох вибірових значень $t_2=0,1484$ с і $t_2=0,0634$ с, при яких було досягнуто рівність Φ і Φ_y . Приклади ілюструють повтор-

не включення трансформатора як при висхідному, так і при низхідному значеннях вхідної напруги, а також як при максимальному його наближенні до моменту попереднього закриття ключа, так і при відносному віддаленні від нього.

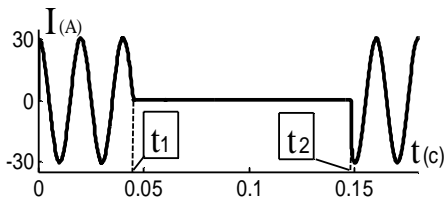
Із рис. 11, а, б, г видно, що протягом спаду потоку Φ існує наявний ряд нерівномірно розміщених дискретних точок, в яких тільки і можлива задовільна комутація трансформатора, при цьому їхня кількість складає дві дискрети на період напруги. Якщо при спаді величина потоку досягне нульового значення, то природно, що рівність Φ і Φ_y буде



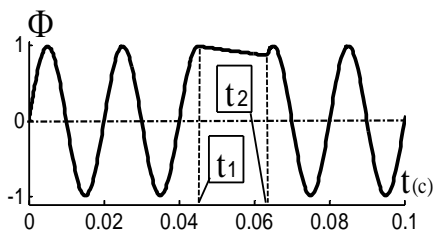
а



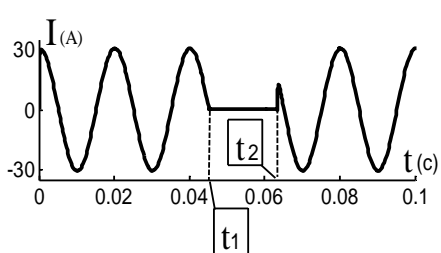
б



в



г



д

Рис. 11

припадати на моменти амплітуди U_1 і отримаємо окремий граничний випадок одержання точок комутації, на якому було наголошено на початку статті. В рамках програми моделювання також можлива реалізація достатньо простої системи управління комутацією з автоматичним дискретним вибором моменту включення трансформатора при довільній в часі на це команді [3].

Таким чином, підсумовуючи викладене, можна сказати, що кожне наступне включення трансформатора повинно виконуватися в момент рівності миттєвого значення магнітного потоку його осердя із усталеним значенням потоку, що буде наявним в магнітопроводі після комутації. В деяких випадках можлива реалізація інших, на перший погляд, принципів одержання точок комутації, проте їхнє рішення є, як правило, окремими граничними випадками даного правила. Формулювання принципу комутації здається і складним для розуміння, проте він схемотехнічно реалізується простими, можна сказати, навіть елементарними засобами.

Загалом вказані принципи дозволяють повністю використати електроенергетичні можливості трансформаторів, уникнути різного роду ексцесів через появу аперіодичних складових у струмі первинної обмотки, поліпшити динаміку системи регулювання. Вони пройшли хорошу апробацію і їхня реалізація забезпечувала надійну комутацію без вказаних перехідних режимів незалежно від характеру навантаження, у т.ч. і при 2–3-кратних перевантаженнях вторинної обмотки трансформатора.

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

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

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

4. Халіков В.А., Можаровський А.Г., Шатан О.Ф., Паханьян В.М. Контролери установок электродугового зварювання в середовищі захисних газів // Техн. електродинаміка. – 2008. – №5. – С. 68–75.

Надійшла 15.03.2010