

УДК 621.311.014.3

А.М. ПАНЧЕНКО

Харківський університет Повітряних Сил, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ НАЯВНОСТІ ЗАТРИМКИ СПРАЦЮВАННЯ МЕХАНІЧНОГО ВИМИКАЧА

Розглядаються процеси, обумовлені вмиканням трансформатора з затримкою в часі, та послідуною зміною навантаження. Представлені залежності перехідних процесів, викликані інерційністю контактної пари вимикача.

перехідні процеси, інерційність вимикача, затримка в часі

Постановка проблеми

Відомо, що вага джерел живлення бортової системи електропостачання апаратів є досить критичним показником. В першу чергу на неї впливає потужність споживачів, і вона з кожним роком зростає. Існує певне перебільшення потужності джерела живлення над потужністю споживачами, обумовлене перехідними процесами, що виникають в системі живлення при різкій зміні навантаження. Значення кидків струму, що при цьому виникають, є випадковою величиною і для збільшення надійності системи живлення йдуть шляхом завищення установленної потужності джерел живлення. Але характер перехідних процесів залежить від ряду факторів і зокрема, від фази вмикання споживача (момент спрацювання контактів по відношенню до синусоїди напруги). При використанні електронних комутаційних апаратів, які здатні спрацювати в фіксовані моменти часу, можливо вмикати навантаження з мінімальним перехідним процесом, що дає можливість зменшити установлену потужність джерел живлення. Навантаження на борту, як правило має активно-індуктивний характер, до цієї категорії відносяться трансформатори, двигуни тощо.

В існуючій літературі широко висвітлені перехідні процеси, що виникають у трансформаторах. Але питання, як впливає на хід перехідного процесу за-

тримка в часі, що обумовлена інерційністю механічних частин вимикача між моментом надходження команди і її фізичним виконанням, потребує подальшого вивчення. Стосовно трифазних вимикачів, які в силу об'єктивних причин неможливо виконати такими, щоб усі три полюси спрацьовували одночасно, це явище створює специфічні перехідні процеси. В даній роботі висвітлюється проблема: на що впливає затримка в спрацюванні вимикача тривалістю від дольов періоду до декількох періодів, та як залежать перехідні процеси від зміни фази вмикання.

Аналіз літератури

В класичній літературі по перехідним процесам детально опрацьовані окремо взяті процеси. Так в [1] процес вмикання описується диференціальним рівнянням другого порядку, але при його рішенні не враховуються понад перехідні струму і рішення зводиться до рівняння першого порядку. В [2] перехідні процеси описуються лише для штучного режиму при вмиканні навантаженого трансформатора на постійну напругу. Більш детально розглядаються питання вмикання навантаженого трансформатора в [3], але не враховується вплив негармонічних складових. Опрацьовані математичні моделі, що відображають ці процеси [4 – 6], але у вказаних виданнях питання роботи трансформатора розглядаються як окремі процеси, відсутній опис в єдиному часі –

вмикання трансформатора, вихід на усталений режим, стрибкове збільшення навантаження на уже працюючому трансформаторі, вплив затримки в часі спрацювання механічного вимикача при вмиканні та при збільшенні навантаження.

Мета статті. Отримати математичний опис роботи системи електропостачання бору апарату в цілому, який би включав в себе процес вмикання навантаженого трансформатора, перехід його в усталений режим з послідовним різким збільшенням навантаження в єдиному часі. На підставі отриманих рішень, вводячи затримку в часі, як для процесу вмикання так і для кидка додаткового навантаження, з'ясувати характер перехідних процесів.

Основний матеріал

Розглянемо процес вмикання навантаженого трансформатора, диференційне рівняння, що його описує для струму первинної обмотки приведено в роботі [5]:

$$i_1''(M^2 - L_1 L_2) - i_1'(r_1 L_2 + r_2 L_1) - i_1 r_1 r_2 + U_0(L_2 \omega \cos(\omega t + \psi) + r_2 \sin(\omega t + \psi)) = 0, \quad (1)$$

де i_1 , i_1' , i_1'' – струм первинної обмотки та його похідні; r_1 – активний опір первинної обмотки трансформатора; r_2 – активний опір вторинної обмотки разом з активним опором навантаження; ω – кутова частота; ψ – кут вмикання (фаза вмикання); U_0 – амплітудне значення напруги живлення; L_1 , L_2 , M – відповідно індуктивності первинної, вторинної, та взаємодуктивності обмоток трансформатора.

Для загальності міркувань будемо вважати, що рівняння (1) складене для фази А, тоді наступні рівняння для фаз Б і С будуть відрізнятися від попереднього зсувами кутів відповідно на 120 та 240°. Рівняння для фази Б прийме такий вигляд:

$$i_1''(M^2 - L_1 L_2) - i_1'(r_1 L_2 + r_2 L_1) - i_1 r_1 r_2 + U_0(L_2 \omega \cos(\omega t + \psi + 120^\circ) + r_2 \sin(\omega t + \psi + 120^\circ)) = 0. \quad (2)$$

Розглянемо випадок вмикання фази В реальним вимикачем, тобто між поданим сигналом на його

спрацювання і фізичним виникненням контакту буде існувати певна затримка часу t_0 . За нуль відліку часу будемо вважати момент подачі сигналу на вимикач. Тоді рівняння (2) прийме такий вигляд:

$$i_1''(M^2 - L_1 L_2) - i_1'(r_1 L_2 + r_2 L_1) - i_1 r_1 r_2 + U_0(L_2 \omega \times \cos[\omega(t - t_0) + \psi + 120^\circ] + r_2 \sin[\omega(t - t_0) + \psi + 120^\circ]). \quad (3)$$

Рішення рівняння (3) будемо шукати в формі

$$i_1(t) = C_1 e^{\lambda_1 t} + C_2 e^{\lambda_2 t} + A \cos(\omega t) + B \sin(\omega t). \quad (4)$$

В роботі (5) отримані значення коефіцієнтів для рівняння (1). Їх можна використати і для рівняння (3), врахувавши зсув фази на 120° та затримку в часі на t_0 . Для коефіцієнтів A , B , C_1 , C_2 будемо мати:

$$A = U_0 \frac{[(\rho \omega^2 + \beta) L_2 \omega - \eta \omega r_2] \cos(\psi + 120^\circ) - [(\rho \omega^2 + \beta) r_2 + \eta \omega^2 L_2] \sin(\psi + 120^\circ)}{(\rho \omega^2 + \beta)^2 + \eta^2 \omega^2}, \quad (5)$$

$$B = U_0 \frac{[(\rho \omega^2 + \beta) r_2 + \eta L_2 \omega^2] \cos(\psi + 120^\circ) - [(\rho \omega^2 + \beta) L_2 \omega - \eta \omega r_2] \sin(\psi + 120^\circ)}{(\rho \omega^2 + \beta)^2 + \eta^2 \omega^2}, \quad (6)$$

$$C_1 = \frac{1}{(\lambda_1 - \lambda_2)} \left(\frac{U_0 L_2 \sin(\psi + 120^\circ)}{L_1 L_2 - M^2} + A \lambda_2 - B \omega \right); \quad (7)$$

$$C_2 = \frac{1}{(\lambda_2 - \lambda_1)} \left(\frac{U_0 L_2 \sin(\psi + 120^\circ)}{L_1 L_2 - M^2} + A \lambda_1 - B \omega \right). \quad (8)$$

Тоді загальний вираз для первинного струму можемо записати як

$$i_1(t) = C_1 e^{\lambda_1 t} + C_2 e^{\lambda_2 t} + A \cos[\omega(t - t_0)] + B \sin[\omega(t - t_0)]. \quad (9)$$

З метою врахування затримки в часі процес опишемо двома функціями:

$$i(t) = 0; \text{ для } 0 < t < t_0;$$

$$i(t) = i_1(t) \text{ для } t_0 < t < 4\tau + t_0,$$

де τ – стала часу трансформатора; 4τ – тривалість перехідного процесу; $4\tau + t_0$ – тривалість перехідного процесу з врахуванням затримки в часі. Таким чином, ми отримали функцію, що описує паузу, обумовлену інерційністю вимикача, та перехідний процес вмикання навантаженого трансформатора.

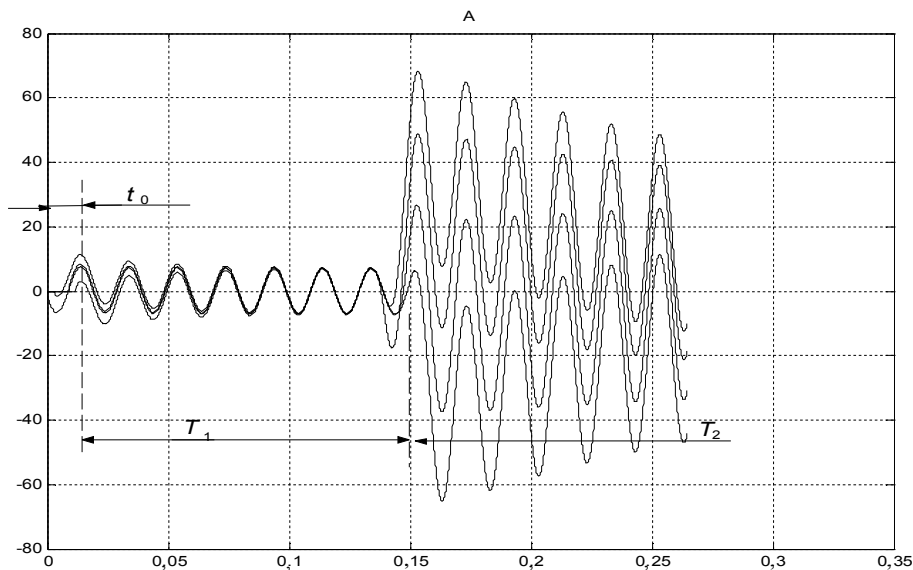


Рис. 1. Перехідні процеси, обумовлені затримкою в часі процесу вмикання

Змінюючи паузу затримки вмикання трансформатора, можемо спостерігати, як при цьому змінюється перехідний процес. Результати моделювання вказаного випадку наведені на рис. 1.

Пауза t_0 складала відповідно 0; 0,003; 0,005; 0,009 секунд, а перехідний період 4τ , на графіку ця тривалість позначена T_1 . Як видно з графіків, перехідні процеси починаються з нуля і залежать від тривалості затримки вмикання, але при наближенні до усталеного процесу всі криві сходяться. Дійсно усталений процес не залежить від миті вмикання, а визначається лише параметрами схеми, які на цьому інтервалі часу були не змінні. А оскільки процеси моделюються на одній фазі і фаза вмикання залишається незмінною, усі вони різні за формою, але зфазовані, і внаслідок чого сходяться в усталеному процесі. Дещо інша картина спостерігається, якщо затримку в часі зафіксувати, а змінювати фазу вмикання. Результати такого моделювання представлені на рис. 2. В такому випадку перехідні процеси мають різну форму і зміщуються по фазі.

В подальшому для вивчення перехідних процесів, що виникають в наслідок вмикання додаткового навантаження в уже працюючому трансформаторі, скористаємося наступною методикою. Будемо вважати, що зміна навантаження відбувається в усталеному режимі роботи трансформатора. Необхідно

визначити, який характер будуть мати перехідні процеси, якщо момент вмикання навантаження буде відбуватися в різних точках гармонічного сигналу струму. Також для отримання результатів в єдиному масштабі часу точку зміни навантаження на гармонічній кривій струму будемо задавати, змінюючи затримку в часі вмикання трансформатора t_0 , користуючись виразом

$$t_n = t_0 + 4\tau, \quad (10)$$

де t_n – момент вмикання навантаження.

Поставка 4τ завжди забезпечить вмикання навантаження в усталеному режимі, що власне і відповідає умовам експлуатації.

За основу візьмемо диференціальне рівняння, отримане в роботі [5] для випадку несподіваного короткого замикання в навантаженому трансформаторі. Як було встановлено, воно відрізняється від рівняння (1) не нульовими початковими умовами струмів та іншими виразами для похідних. Тобто, коефіцієнти A (5) і B (6) відрізняються значенням опору навантаження у вторинному колі та кутом ψ_s (кутом вмикання нового навантаження), ці вирази не будемо приводити. Стосовно коефіцієнтів C_1 і C_2 вони зміняться і набудуть вигляду:

$$C_1 = \frac{1}{(\lambda_1 - \lambda_2)} (I'_{1k} - \lambda_2 I_{1k} + \lambda_2 A - \omega B);$$

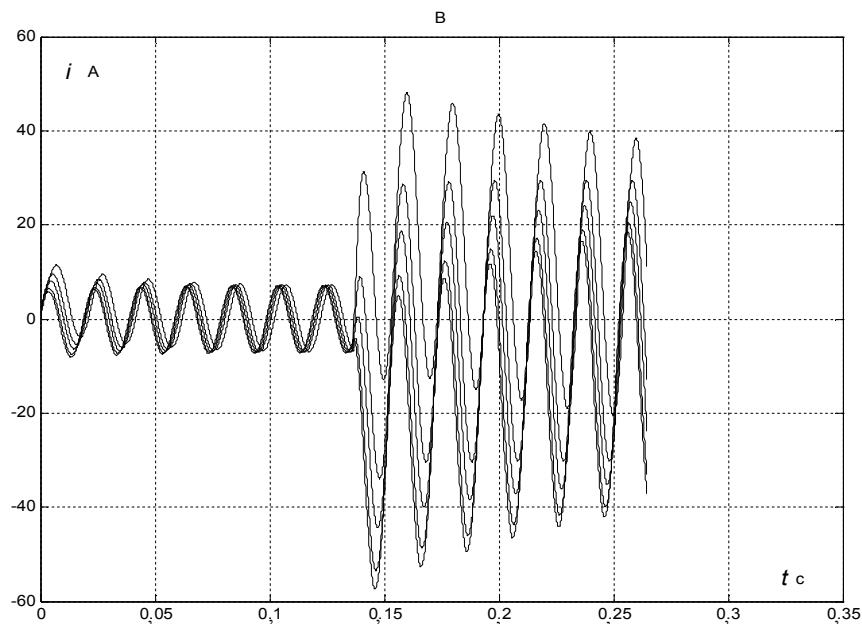


Рис. 2. Перехідні процеси при зміні фази вмикання

$$C_2 = \frac{1}{(\lambda_2 - \lambda_1)} (I'_{1k} - \lambda_1 I_{1k} + \lambda_1 A - \omega B), \quad (11)$$

де I_{1n} і I'_{1n} – значення струму і значення похідної від струму первинного кола на момент комутації.

Значення струму знаходимо із попереднього рівняння струму (4) на час $t_0 + 4\tau$, похідну для струму на момент комутації беремо із [5]:

$$i'_H = \frac{U_0 L_2 \sin(\psi_H) - L_2 I_1 r_1 - I_2 M r_2}{(L_1 L_2 - M^2)}. \quad (12)$$

Для визначення кута вмикання наступного навантаження ψ_n , виконуючи відлік часу в єдиному масштабі, запишемо

$$\psi_n = (t_0 + T_1)\omega + \psi + 120^\circ, \quad (13)$$

де ω – кутова частота при 50 Гц; ψ – фаза вмикання трансформатора; 120° – кут зсуву фази Б.

Таким чином, процес затримки в часі, вмикання навантаженого трансформатора з наступним вмиканням додаткового навантаження в єдиній системі координат запишемо:

$$i(t) = 0; \text{ для } 0 < t < t_0;$$

$$i(t) = i_1(t) \text{ для } t_0 < t < 4\tau + t_0;$$

$$i(t) = i_2(t) \text{ для } 4\tau + t_0 < t < 4\tau_2 + 4\tau + t_0,$$

де $4\tau_2$ – тривалість нового перехідного періоду з врахуванням зменшення активного опору навантаження; $i_2(t)$ – функція перехідного струму з новими

значеннями C_{11} , C_{22} , A_2 , B_2 , де враховуються початкові струми на момент вмикання в первинній і вторинній обмотках, їх похідні (11), (12), значення кута вмикання нового навантаження (13), та затримка в часі, що складається з затримки часу вмикання t_0 та тривалості виходу на усталений режим при вмиканні трансформатора 4τ ;

$$i_2(t) = C_{11}e^{\lambda_1 t} + C_{22}e^{\lambda_2 t} + A_2 \cos[\omega(t - t_0 - 4\tau)] + B_2 \sin[\omega(t - t_0 - 4\tau)], \quad (14)$$

На рис. 1 в межах часу T_2 показані криві зміни струму при вмиканні додаткового навантаження.

За рахунок введення затримки вмикання і незмінності 4τ можемо спостерігати, як змінюється характер перехідного процесу в залежності від зміни моменту вмикання навантаження на кривій струму. Для більшої очевидності режим вмикання додаткового навантаження заданий меншим від тривалості нового усталеного режиму. З рис. 1 видно, що як перехідний режим процесу вмикання навантаженого трансформатора, так і зміна його навантаження протікають по різному в залежності від точки комутації, але в усталеному режимі усі криві сходяться. Більш наглядно процес сходження кривих представлено на рис. 3, де t_1 – відповідає тривалості перехідного режиму вмикання, а t_2 – тривалості перехідного режиму при збільшенні навантаження.

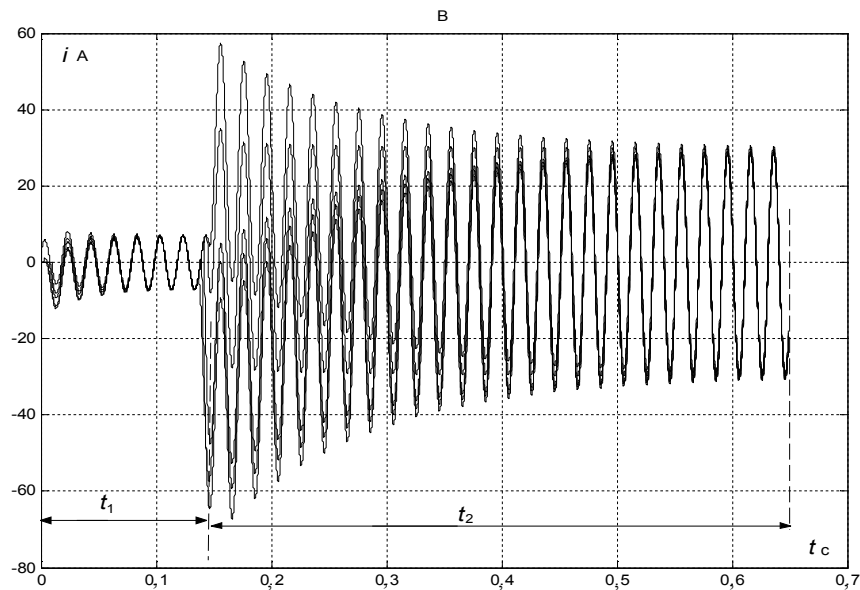


Рис. 3. Перехідні струми при затримці комутації

Висновок

Затримка в часі, обумовлена інерційністю комутаційної апаратури в межах одного півперіоду, істотно впливає на характер перехідного процесу.

Встановлено, що кожна пара полюсів вимикача, як однофазного так і, що найбільш важливо, трифазного, мають свою власну затримку в часі і цей параметр на виробництві та в експлуатації враховується досить грубо [7].

В зв'язку з цим є підстави сподіватися, що на практиці перехідні процеси без врахування моменту комутації суттєво відрізняються від реальних. Врахування моменту вмикання навантаження дозволить зменшити кидки струму i , як наслідок, зменшити встановлені потужності джерел живлення, а отже їх вагу.

Наявність контролю моменту вмикання навантаження дозволить уникнути інтенсивних перехідних процесів, підняти якість і надійність електроживлення борта літака.

Вирішення розглянутої проблеми можливе лише при заміні механічної комутаційної апаратури на електронну, оскільки інерційність послідньої унеможливорює фіксованого вмикання з необхідною точністю.

Література

1. Казовский Б.Я. Переходные процессы. – М.: АН СССР, 1962. – 624 с.
2. Ковач К.П., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока. – М.Л.: Госэнэргиздат, 1963. – 743 с.
3. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы. – М.-Л.: Энергия, 1964. – 703 с.
4. Электроэнергетика и преобразовательная техника / Под ред. В.П. Себко // Вестник ХГПИ. – Вып. 112. – Х.: ХГПИ. – 2000. – 151 с.
5. Панченко А.М. Спосіб визначення максимально можливого струму при несподіваному короткому замиканні // Системи обробки інформації. – Вип. 12 (40). – Х.: ХВУ. – 2004. – С. 148 – 156.
6. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. – М.: Высш. шк., 2001. – 403 с.
7. Грудинский П.Г., Мандрыкин С.А., Улицкий М.С. Техническая эксплуатация основного электрооборудования станций и подстанций. – М.: Энергия, 1974. – 575 с.

Надійшла до редакції 25.07.2005

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Б.Ф. Самойленко, Харківський університет Повітряних Сил, Харків.