

УДК 621.312/314

А.М. ПАНЧЕНКО

*Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків***АВАРІЙНІ СИТУАЦІЇ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ ЛІТАКА**

Запропонований математичний опис перехідних процесів, що виникають в автономній системі електропостачання літака при виникненні аварійних ситуацій, та способи підвищення надійності роботи системи аварійного захисту.

ударний струм, система автоматичного захисту, тривалість перехідного процесу, режим короткого замикання

Вступ

Постановка проблеми. В автономних системах електропостачання космічних апаратів, літаків, де співвідношення ваги і потужності є досить важливим, необхідно мати джерело електричної енергії, яке здатне забезпечити як номінальні режими роботи, так і перехідні. В зв'язку з відсутністю чіткої методики, яка б описувала перехідні режими при виникненні короткого замикання в системі і реакції на неї автоматики та релейного захисту, в ряді випадків ідуть шляхом завищення встановленої потужності як генератора, так і привідного механізму, що негативно впливає на масогабаритні показники.

На визначення необхідної встановленої потужності генератора бортової системи електропостачання літака впливає багато факторів, одним із них є здатність генеруючої установки забезпечити надійну роботу при аварійних ситуаціях в бортовій системі. Відомо, що значення ударних струмів синхронного генератора при виникненні короткого замикання може перебільшувати номінальний струм у десятки разів, в той же час при певній комбінації споживачів можуть виникнути перехідні процеси, максимальні струми яких будуть наближатися до значень ударних струмів. З іншого боку, ці струми є досить короткочасними, що потребує або ускладнювати систему захисту, або завищувати встановлену потужність генератора. Спосіб розрахунку перехідних проце-

сів при виникненні короткого замикання генератора, або різкої зміни навантаження, який би враховував значення активного опору в колі статора, на даний час не існує.

Відомо, що явище несподіваного короткого замикання (НКЗ) є досить складне, тому для пояснення процесів, що при цьому відбуваються, використовують рівняння і припущення, які істотно відрізняються від режиму усталеного короткого замикання (КЗ). Тобто фізично синхронний генератор один і той же, але фізичні і математичні моделі, що використовуються при цих двох процесах, різні. Також не існує критерію того, при якому значенні активного опору статорного кола можна користуватися моделлю НКЗ, а при якому – моделлю усталеного КЗ, оскільки при складанні рівнянь для НКЗ, штучно активний опір прирівнюється до нуля. Зрозуміло, що в дійсності це не так, по-перше, активний опір статорної обмотки завжди присутній, і він істотно впливає на перехідний процес, по-друге, сама точка короткого замикання може мати досить різний активний опір. На даний час існує дві крайні методики розрахунку перехідних процесів синхронного генератора. Перша – це НКЗ, коли взагалі не враховується активний опір статорного кола, і друга – це усталений режим КЗ, коли перехідні процеси закінчилися і в певних випадках активний опір враховують. Але різниця між поняттям короткого замикання і

різкою зміною навантаження є досить умовною. При зміні навантаження також виникають характерні перехідні процеси і зведення їх до одного із вказаних процесів дає низьку точність результату. Пропонується єдина система диференціальних рівнянь, що описують перехідні режими, починаючи з режиму металевого короткого замикання на шинах генератора, змінюючи навантаження як активного, так індуктивного характеру і закінчуючи обривом кола живлення, тобто встановлення нескінченно великого опору в колі статора.

Аналіз літератури. Як відмічалось вище, більшість авторів [1 – 6] розглядають процес НКЗ при умові відсутності активного опору. Що лишає можливості визначити його вплив на процеси при НКЗ. Ряд авторів для пояснення явищ, що при цьому мають місце, вводять поняття понадпровідності на короткий проміжок часу. За загальноприйнятою методикою рівняння складаються в системі координат d - q , струми статора і ротора представляються декількома складовими, що відповідно описуються окремими рівняннями, для вирішення яких застосовуються графоаналітичні методи [1, 2]. Такий підхід не може забезпечити достатньої точності і очевидності отриманих результатів.

Мета статті. Автором пропонується математичний опис роботи синхронного генератора єдиною системою рівнянь, що описують режим НКЗ, установлений режим КЗ та режим нормальної роботи. В якому із перерахованих процесів знаходиться генератор, визначається лише часом та активним опором статорного кола. До речі, існуючий розподіл зазначених режимів є досить штучний в тому сенсі, що чіткої грані між ними не існує, а в кожному конкретному випадку встановлюється умовно. Результатом рішення таких рівнянь буде миттєве значення струму статора.

Основний матеріал

Відомо, що при металевому КЗ трифазний синхронний генератор можна розглядати як однофазний,

оскільки в кожній із фаз відбуваються аналогічні явища з врахуванням зсуву в часі. На рис. 1 приведена модель, що складається з нерухомого контуру s , що символізує коло статора, та рухомий контур r – коло ротора. В подальшому розглядаємо синхронний генератор з неявно вираженими полюсами. Очевидно, якщо вісі контурів співпадають, то їх взаємодукація буде максимальною, при взаємодукації перпендикулярній орієнтації контурів їх магнітний зв'язок буде дорівнювати нулю.

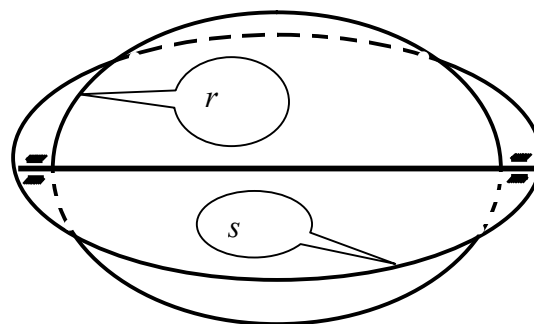


Рис. 1. Два магнітно зв'язані контури

Можемо записати закон зміни в часі взаємодукації контурів при обертанні контуру r з швидкістю ω :

$$M(t) = \frac{1}{2} M_0 [1 + \cos(2\omega t + \varphi)], \quad (1)$$

де M_0 – максимальне значення взаємодукації;
 φ – початкова фаза;
 ω – швидкість обертання контуру.

У виразі (1) подвійна частота під знаком косинуса обумовлена тим фактом, що за один оберт максимальне значення взаємодукації виникає двічі через кожні 180° . Також враховується, що взаємодукативність не може мати від'ємного значення. Беручи до уваги, що в колі статора (контур s) протікає змінний струм, можемо записати закон зміни потокозчеплення від статорного струму

$$\Psi_s(t) = i_s(t) \cdot M(t). \quad (2)$$

При розгляді фізичних моделей явища НКЗ рядом авторів [3] використовується аналогія понадпровідності контурів статора і ротора на якомусь проміжку часу, інші автори [1, 2, 4 – 6] вводять до-

суть складні фізичні моделі, де магнітні потоки на якомусь проміжку часу змінюють свої контури. Характерним є той факт, що всі автори роблять одне і теж припущення про незмінність потокозчеплення на певному інтервалі часу після НКЗ, хоча чим визначається ця тривалість при відсутності активного опору в моделі – сказати складно.

На думку автора, для пояснення процесів при НКЗ достатньо користуватися законом, який свідчить, що при змінній індуктивності і змінному струмі потокозчеплення стрибком не змінюється. Тобто для ЕРС, що наводиться в колі ротора, можна записати

$$E_r(t) = \frac{d\Psi_s(t)}{dt} = i'_s(t) \cdot M(t) + i_s(t) \cdot M'(t). \quad (3)$$

У виразі (3) виконано диференціювання потокозчеплення, обумовленого струмом статора, як складної функції. Підставляючи значення $M(t)$ із виразу (1) в (3), отримаємо ЕРС, що наводиться в роторі за рахунок змінного струму статора та зміни значення взаємоіндуктивності контурів, надалі цю ЕРС буде називати трансформаторною:

$$E_r(t) = i'_s(t) \cdot \frac{1}{2} M_0 [1 + \cos(2\omega t + 2\varphi)] - i_s(t) \cdot M_0 \sin(2\omega t + 2\varphi). \quad (4)$$

Відповідно струм, створений $E_r(t)$ в роторі, по аналогії з трансформатором наведе відповідну $E_s(t)$ в статорі, запишемо для неї вираз

$$E_s(t) = \frac{d\Psi_{tr}(t)}{dt} = i'_{tr}(t) \cdot M(t) + i_{tr}(t) \cdot M'(t),$$

де Ψ_{tr} – потокозчеплення, обумовлене трансформаторною складовою струму ротора;

i_{tr}, i'_{tr} – трансформаторна складова струму ротора та його похідна.

Можемо записати вираз для трансформаторної ЕРС в колі статора, обумовленої трансформаторним струмом ротора

$$E_{str}(t) = i'_{tr}(t) \cdot \frac{1}{2} M_0 [1 + \cos(2\omega t + 2\varphi)] - i_{tr}(t) \cdot M_0 \omega \sin(2\omega t + 2\varphi). \quad (5)$$

Як базовою будемо користуватися відомою формулою балансу напруг трансформатора, лише введемо індексацію, притаманну синхронному генератору:

$$\begin{cases} U_0 \sin(\omega t + \varphi) = L_s i'_s + i_s r_s - M_0 i'_{tr}; \\ M_0 i'_s = L_r i'_{tr} + i_{tr} r_r, \end{cases} \quad (6)$$

де $i_s, i'_s, i_{tr}, i'_{tr}$ – значення струмів первинної і вторинної обмоток та їх похідні;

r_s – активний опір первинної обмотки (статор);

r_r – активний опір вторинної обмотки (ротор);

ω – кутова частота;

φ – фаза напруги;

U_0 – амплітудне значення напруги живлення;

L_s, L_r, M_0 – відповідно індуктивності первинної, вторинної, та взаємоіндуктивність обмоток трансформатора.

Безпосереднє рішення рівняння (6), запропоноване в роботі [7], дає можливість враховувати не лише індуктивність розсіювання, як це виконується традиційно, а й визначити вплив на перехідні процеси фактичних індуктивностей первинної та вторинної обмоток. Відмінність формули (6) для її застосування до синхронного генератора полягає в тому, що у трансформаторі взаємоіндуктивність не змінна, а в нашому випадку за рахунок зміни взаємного положення статора і ротора вона змінюється за законом (1). Також, якщо в трансформаторі напруга підводиться зовні, то в генераторі вона наводиться за рахунок взаємного переміщення магнітного потоку збудження і контуру статора, тобто

$$E_s(t) = \omega \cdot I_0 L_z \sin(\omega t + \varphi), \quad (7)$$

де I_0 – постійний струм збудження, що забезпечує номінальне значення напруги генератора на холостому ході;

L_z – індуктивність обмотки збудження генератора.

При обертанні контуру ротора в магнітному потоці, обумовленому струмом статора в ньому, як встановлено в роботі [8], наводяться обертові струми, які, в свою чергу, в статорі наводять обертову

ЕРС, напрямом якої направлений проти причини, що її викликала, тобто врівноважує ЕРС статора, можемо записати

$$E_s(t) = r_s i_s(t) + L_s i'_s(t) - E_{tr}(t) + E_v, \quad (8)$$

де E_v – обертова ЕРС, яка пропорційна обертовому струму ротора, індуктивності ротора та швидкості обертання. Враховуючи той факт, що максимум зазначеної ЕРС буде, коли контури розміщені взаємно перпендикулярно, можемо записати синусоїдальний закон зміни величини E_v :

$$E_v(t) = \omega L_z i_v(t) \sin(\omega t + \varphi). \quad (9)$$

Таким чином, можемо записати рівняння балансу напруг статорного кола, беручи до уваги вирази (5, 7, 8, 9):

$$\begin{aligned} \omega \cdot I_0 L_z \sin(\omega t + \varphi) &= r_s i_s + L_s i'_s - \\ &- [i'_{tr}(t) \cdot \frac{1}{2} M_0 [1 + \cos(2\omega t + 2\varphi)] - \\ &- i_{tr}(t) \cdot M_0 \omega \sin(2\omega t + 2\varphi)] + \omega L_z i_v(t) \sin(\omega t + \varphi). \end{aligned} \quad (10)$$

У рівнянні (10) ми маємо три невідомі величини: струм статора, трансформаторну і обертову складову струму ротора. Беручи до уваги рівняння (4), можемо записати баланс напруг для трансформаторного струму ротора:

$$\begin{aligned} i'_s(t) \cdot \frac{1}{2} M_0 [1 + \cos(2\omega t + 2\varphi)] - \\ - i_s(t) \cdot M_0 \omega \sin(2\omega t + 2\varphi) &= r_r i_{tr} + L_z i'_{tr}. \end{aligned} \quad (11)$$

Тепер запишемо баланс напруг для обертового струму ротора, обумовленого струмом статора

$$\omega L_s i_s(t) \sin(\omega t + \varphi) = r_r i_v + L_z i'_v. \quad (12)$$

Об'єднавши рівняння (10, 11, 12), запишемо систему рівнянь для синхронного генератора:

$$\begin{cases} \omega \cdot I_0 L_z \sin(\omega t + \varphi) = r_s i_s + L_s i'_s - \\ - [i'_{tr} \cdot \frac{1}{2} M_0 [1 + \cos(2\omega t + 2\varphi)] - \\ - i_{tr} \cdot M_0 \omega \sin(2\omega t + 2\varphi)] + \omega L_z i_v \cdot \sin(\omega t + \varphi); \\ i'_s \cdot \frac{1}{2} M_0 [1 + \cos(2\omega t + 2\varphi)] - \\ - i_s \cdot M_0 \omega \sin(2\omega t + 2\varphi) = r_r i_{tr} + L_z i'_{tr}; \\ \omega L_s i_s \sin(\omega t + \varphi) = r_r i_v + L_z i'_v. \end{cases} \quad (13)$$

Маємо систему трьох диференціальних рівнянь з трьома невідомими – статорний струм, трансформаторний та обертовий струм ротора. Розглядаємо випадок, коли НКЗ виникає при умові роботи генератора на холостому ході. Це значить, що початкові умови по усім трьом струмам є нульовими. Визначивши початкові умови по струмам, ми тим самим задаємо і початкові умови по потокозчепленню, тобто початкові умови по потокозчепленню незалежно від кута виникнення КЗ завжди будуть також нульовими. Тим самим виконуємо один із законів комутації, що потокозчеплення стрибком не змінюється. Рішення системи рівнянь (13) для випадку, коли момент виникнення НКЗ відповідав куту 0° , приведений на рис. 2.

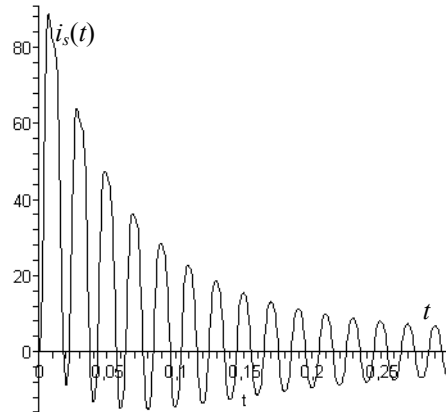


Рис. 2. Коротке замикання при фазі 0°

Випадок коли НКЗ виникає при фазі 90° , представлений на рис. 3.

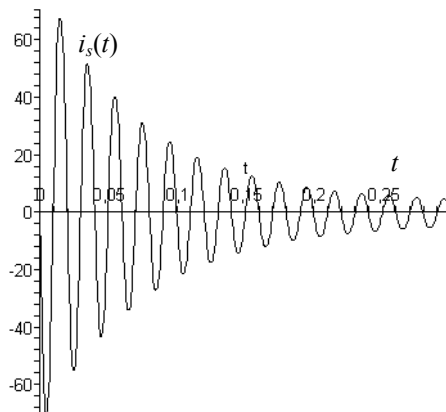


Рис. 3. Коротке замикання при фазі 90°

Тобто характер перехідного процесу і максимально можливий ударний струм істотним чином залежить від фази виникнення НКЗ. На рис. 4, 5, 6

наведені приклади, коли активний опір в колі статора змінювався від режиму холостого ходу до 0,1 Ом, 10 Ом і 100 Ом відповідно. Було встановлено, що при збільшенні активного опору становиться не суттєвою фаза початку перехідного процесу.

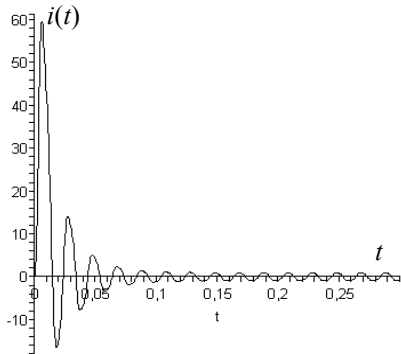


Рис. 4. Опір статорного кола 0,1 Ом

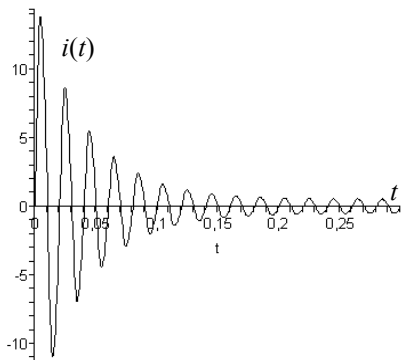


Рис. 5. Опір статорного кола 10 Ом

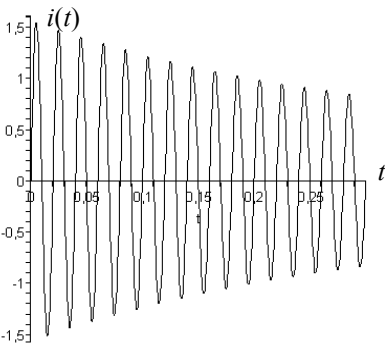


Рис. 6. Опір статорного кола 100 Ом

Висновки

Запропонований спосіб визначення ударних струмів дозволить встановити такий алгоритм черговості спрацювання споживачів бортової системи електропостачання літака, при якому їх значення не будуть наближатися до значень спрацювання системи захисту. Уточнені значення струмів короткого замикання та тривалості їх дії дозволять підвищити

селективність роботи системи захисту і тим самим підвищити надійність роботи бортової системи електропостачання.

На відміну від традиційних способів розрахунку перехідних процесів отримана єдина система диференціальних рівнянь, що охоплює весь спектр перехідних процесів, що можуть виникнути в процесі експлуатації літака від зміни навантаження (включаючи зміну характеру навантаження) до несподіваного короткого замикання. При цьому використовуються досить обмежена кількість параметрів, які можуть бути визначені в умовах експлуатації.

Література

1. Ковач К.П., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1936. – 743 с.
2. Казовский Б.Я. Переходные процессы в электрических машинах переменного тока. – Академия наук СССР, 1962. – 624 с.
3. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. – Л.: Энергия, 1972. – 543 с.
4. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы. – М.-Л.: Энергия, 1964. – 703 с.
5. Шуйский В.П. Расчет электрических машин. – Л.: Энергия, 1968. – 731 с.
6. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. – М.: Высш. шк., 2001. – 403 с.
7. Панченко А.М. Особливості вмикання навантаженого трансформатора // Збірник наукових праць ХВУ. – Х.: ХВУ, 2003. – № 6. – С. 48-54.
8. Панченко А.М. Математична модель асинхронного двигуна // Системи озброєння і військова техніка. – 2006. – № 2 (6). – С. 55-58.

Надійшла до редакції 23.01.2007

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