

## СПОСІБ ВМИКАННЯ НАВАНТАЖЕННЯ В МЕРЕЖУ ЗМІННОГО СТРУМУ БЕЗ ІНІЦІУВАННЯ ПЕРЕХІДНОГО ПРО- ЦЕСУ

к.т.н. А.М. Панченко  
(подав д.т.н., проф. Б.Т. Кононов)

*Розглядається перехідний процес при вмиканні активно-індуктивного навантаження в мережу змінного струму та аналізується можливість мінімізації впливу перехідного процесу на роботу споживачів електричної енергії.*

**Постановка проблеми.** Загально відомим є той факт, що вмикання в мережу змінного струму споживачів, які мають активно-індуктивний характер супроводжується кидками струму. В літературі ці кидки струму отримали назву ударних струмів. Їх амплітуда може значно перевищувати номінальні значення. Відомо, що величина ударного струму залежить від моменту вмикання напруги та від параметрів системи живлення та навантаження. Зрозуміло, що найбільш бажаним моментом вмикання є момент, коли струм дорівнює нулю. Виникає питання, чи можливо взагалі добитися вмикання активно-індуктивного навантаження таким чином, щоб перехідний процес був відсутній, а отже відсутній і ударний струм. Це особливо важливо для автономних систем живлення, у яких потужність мережі живлення і потужність споживачів близькі за значеннями.

**Аналіз літератури.** Існує певне протиріччя стосовно рішення проблеми мінімізації кидків струму. Так, в роботах [2, 3] вказується на доцільність вмикання навантаження при фазі напруги  $\pi/2$ , в той же час в роботі [5] пропонуються силові ключі що забезпечують вмикання навантаження при переході фази живлячої напруги через нуль. В цілому у роботах [1 – 5] питання обмеження кидків струму не розглядалося. Слід зауважити, що час спрацювання автомата, який вмикає навантаження понад 1 кВт, значно перевищує тривалість періоду струму мережі живлення, і тому сам момент вмикання відносно миттєвого значення струму носить випадковий характер.

**Мета статті.** В роботі проводиться аналіз можливостей обмеження кидків струму при включенні навантаження активно-індуктивного характеру в залежності від фази вмикання.

**Основний матеріал.** Розглянемо найбільш загальний випадок включен-

ня навантаження, до складу якого входить трансформатор та активний опір. Рівняння рівноваги напруг навантаженого трансформатора можна записати як

$$\begin{cases} U_0 \sin(\omega t + \psi) = L_1 i_1' + i_1 r_1 - M i_2'; \\ M i_1' = L_2 i_2' + i_2 r_2, \end{cases} \quad (1)$$

де  $i_1, i_2, i_1', i_2'$  – струми первинної і вторинної обмоток та їх похідні;  $r_1$  – активний опір первинної обмотки трансформатора;  $r_2$  – активний опір вторинної обмотки разом з активним опором навантаження;  $\omega$  – кутова частота;  $\psi$  – кут вмикання (фаза вмикання);  $U_0$  – амплітудне значення напруги живлення;  $L_1, L_2, M$  – відповідно індуктивності первинної, вторинної, та взаємодуктивність обмоток трансформатора.

В роботі [4] вказаний перехід від рівняння (1) до наступної системи диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} i_1''(M^2 - L_1 L_2) - i_1'(r_1 L_2 + r_2 L_1) - i_1 r_1 r_2 + \\ \quad + U_0(L_2 \omega \cos(\omega t + \psi) + r_2 \sin(\omega t + \psi)) = 0; \\ i_2''(L_1 L_2 - M^2) + i_2'(r_1 L_2 + r_2 L_1) - i_2 r_1 r_2 - U_0 M \omega \cos(\omega t + \psi) = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Рішення рівняння (2) у роботі [4] було представлено у формі

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

зараз будемо його знаходити у вигляді:

$$i_1(t) = C_1 e^{\lambda_1 t} + C_2 e^{\lambda_2 t} + A \cos(\omega t) + B \sin(\omega t). \quad (3)$$

Такий підхід дасть змогу оцінити вплив коефіцієнтів рівняння (3) на перехідні процеси.

Перейдемо до визначення коефіцієнтів  $C_1$  і  $C_2$  рівняння (3) з врахуванням початкових умов  $i(t=0) = 0$ . Виконаємо диференціювання виразу (5) і запишемо систему рівнянь:

$$\begin{cases} i(t=0) = C_1 e^{\lambda_1 t} + C_2 e^{\lambda_2 t} + A \cos \omega t + B \sin \omega t = 0; \\ i'(t=0) = C_1 \lambda_1 e^{\lambda_1 t} + \lambda_2 C_2 e^{\lambda_2 t} - A \omega \sin \omega t + B \omega \cos \omega t = \frac{U_0 L_2 \sin \psi}{L_1 L_2 - M^2}. \end{cases} \quad (4)$$

Знайдемо значення коефіцієнтів  $C_1$  і  $C_2$ , із системи рівнянь (4) при  $t = 0$ :

$$\begin{cases} C_1 + C_2 + A = 0; \\ C_1 \lambda_1 + C_2 \lambda_2 + B \omega = \frac{U_0 L_2 \sin \psi}{L_1 L_2 - M^2} \end{cases} \quad (5)$$

Із (5) знаходимо, що  $C_1 = -C_2 - A$ . Підставляючи значення  $C_1$  в друге рівняння системи (7) запишемо:

$$-C_2\lambda_1 - A\lambda_1 + C_2\lambda_1 + B\omega = \frac{U_0L_2 \sin \psi}{L_1L_2 - M^2};$$

$$C_2(\lambda_2 - \lambda_1) = \frac{U_0L_2 \sin \psi}{L_1L_2 - M^2} + A\lambda_1 - B\omega,$$

звідки

$$C_2 = \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \left( \frac{U_0L_2 \sin \psi}{L_1L_2 - M^2} + A\lambda_1 - B\omega \right). \quad (6)$$

Аналогічним чином знаходимо  $C_1$ :

$$C_1 = \frac{1}{\lambda_1 - \lambda_2} \left( \frac{U_0L_2 \sin \psi}{L_1L_2 - M^2} + A\lambda_2 - B\omega \right). \quad (7)$$

Для знаходження коефіцієнтів  $A$  і  $B$  неоднорідного диференціального рівняння (2) для струму первинної обмотки запишемо його у вигляді:

$$i_1''\rho - i_1'\eta - i_1\beta = -U_0(L_2\omega \cos(\omega t + \psi) + r_2 \sin(\omega t + \psi)); \quad (8)$$

$$\beta i = A \cos(\omega t) + B \sin(\omega t);$$

$$\eta i' = -A\omega \sin(\omega t) + B\omega \cos(\omega t);$$

$$\rho i'' = -A\omega^2 \cos(\omega t) - B\omega^2 \sin(\omega t).$$

Підставивши відповідні вирази похідних струму у (8) спростивши і згрупувавши коефіцієнти біля відповідних косинусів і синусів запишемо:

$$\begin{aligned} & \rho(-A\omega^2 \cos(\omega t) - B\omega^2 \sin(\omega t)) - \eta(-A\omega \sin(\omega t) + B\omega \cos(\omega t)) - \\ & - \beta(A \cos(\omega t) + B \sin(\omega t)) = -U_0L_2\omega \cos \xi - U_0r_2 \sin \xi; \\ & -A\rho\omega^2 \cos(\omega t) - B\rho\omega^2 \sin(\omega t) + A\eta\omega \sin(\omega t) - B\eta\omega \cos(\omega t) - \\ & - A\beta \cos(\omega t) - B\beta \sin(\omega t) = -U_0L_2\omega \cos \xi - U_0r_2 \sin \xi; \\ & (-A\rho\omega^2 - B\eta\omega - A\beta)\cos(\omega t) - (B\rho\omega^2 + A\eta\omega - B\beta)\sin(\omega t) = \\ & = -U_0L_2\omega \cos \xi - U_0r_2 \sin \xi. \end{aligned} \quad (9)$$

Аргумент косинуса і синуса в правій частині рівняння (9) є сума кутів  $(\omega t + \psi)$  розложимо її в відповідності з тригонометричними формулами:

$$U_0L_2\omega \cos(\omega t + \psi) = U_0L_2\omega \cos(\psi) \cos(\omega t) - U_0L_2\omega \sin(\psi) \sin(\omega t);$$

$$U_0r_2 \sin(\omega t + \psi) = U_0r_2 \sin(\omega t) \cos(\psi) + U_0r_2 \sin(\psi) \cos(\omega t).$$

Згрупуємо коефіцієнти при косинусах та синусах і складемо систему:

$$U_0L_2\omega \cos \psi + U_0r_2 \sin \psi = A(\rho\omega^2 + \beta) + B\eta\omega;$$

$$U_0r_2 \cos \psi - U_0L_2\omega \sin \psi = B(\rho\omega^2 + \beta) - A\eta\omega,$$

Звідки знаходимо значення коефіцієнтів:

$$A = U_0 \frac{[(\rho\omega^2 + \beta)L_2\omega - \eta\omega r_2] \cos \psi + [(\rho\omega^2 + \beta)r_2 + \eta\omega^2 L_2] \sin \psi}{(\rho\omega^2 + \beta)^2 + \eta^2\omega^2}; \quad (10)$$

$$B = U_0 \frac{[(\rho\omega^2 + \beta)r_2 + \eta L_2\omega^2] \cos \psi - [(\rho\omega^2 + \beta)L_2\omega - \eta\omega r_2] \sin \psi}{(\rho\omega^2 + \beta)^2 + \eta^2\omega^2}. \quad (11);$$

З метою порівняння коефіцієнтів рівняння (3) отриманих при різних формах представлення запишемо:

1. Форма із [4]:

$$A = U_0\omega \left( \frac{\rho\omega^2 L_2 + \beta L_2 \eta}{(\rho\omega^2 + \beta)^2 + \eta^2\omega^2} \right); \quad B = \frac{U_0(L_2\omega^2 \eta + r_2\rho\omega^2 + r_2\beta)}{(\rho\omega^2 + \beta)^2 + \eta^2\omega^2};$$

$$C_1 = -\frac{1}{(\lambda_2 - \lambda_1)} \left[ \left( \frac{U_0 L_2}{L_1 L_2 - M^2} + A\omega + \lambda_2 B \right) \sin \psi - (\omega B - \lambda_2 A) \cos \psi \right]; \quad (12)$$

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

2. Отримана форма:

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

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

$$C_2 = \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \left( \frac{U_0 L_2 \sin \psi}{L_1 L_2 - M^2} + A\lambda_1 - B\omega \right); \quad (13)$$

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

Представлення перехідних струмів в вигляді (12) і (13) дає один результат, що свідчить про можливість їх використання в подальшому.

На рис. 1 представлені відповідні складові перехідного процесу: 1 – напруга живлення з фазою вмикання  $\psi$ ; 2 і 3 – вільні складові перехідного струму; 4 – вимушена складова струму; 5 – миттєве значення струму. Згідно з законом комутації в момент вмикання сума вказаних складових дорівнює нулю. А надалі процеси можуть розвиватися по-різному, можливі випадки, коли перехідний процес має максимальні кидки струму, тому повинні бути

комбінації, при яких перехідний процес буде мінімальним.

Оскільки ми розглядаємо перехідний процес при вмиканні навантаження, будемо вважати, що параметри мережі і споживача не змінюються.

Змінюється лише в межах  $0 - 360^\circ$  кут вмикання. На рис. 2 наведені два перехідних процеси, відмінність яких обумовлена лише моментом подачі напруги. В першому випадку (а) фаза вмикання дорівнює нулю, в другому (б) –  $\pi/2$ .

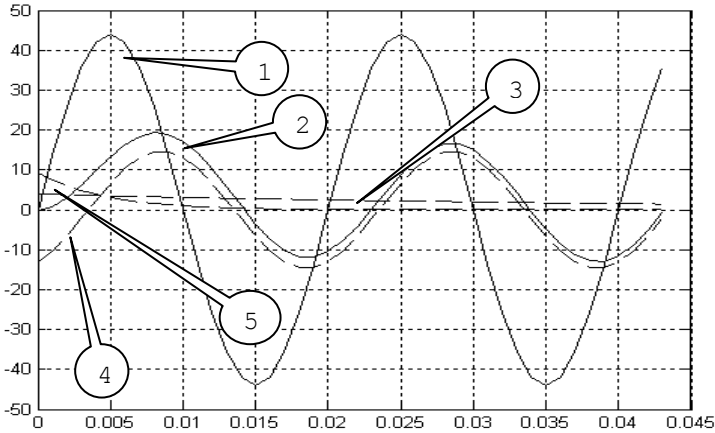


Рис. 1. Складові перехідного процесу

В роботі [4] розглядався випадок коли можна підібрати такий кут вмикання  $\psi = \text{arccotg}(-B/A)$ , при якому при  $t = 0$  значення коефіцієнтів  $C_1$  і  $C_2$  будуть рівними і протилежними за значеннями. Але як слідує з рис. 3, це не свідчить про відсутність перехідного процесу, оскільки сума експонент при  $t > 0$  не дорівнює нулю.

Для об'єктивної оцінки перехідного процесу доцільно встановити критерій. Була розглянута залежність інтегральної суми обох експонент за термін перехідного періоду від кута вмикання  $\psi$ . Вважалося за ймовірне, що чим менша ця сума тим меншим буде відхилення вимушеної складової струму від вісі абсцис.

Проведені досліди на математичній моделі, складеної на підставі рівнянь (1), свідчать, що інтегральна сума від експонент перехідних струмів є величина стала і не залежить від фази вмикання. Це пояснюється тим, що тривалість перехідного процесу залежить лише від параметрів схеми, а самі експоненти можуть приймати різні форми і в той же час мати незмінну інтегральну суму. Аналізуючи вираз (12) і (13) приходимо до висновку, що значення коефіцієнтів  $C_1$  і  $C_2$  змінюється по гармо-

нічному закону від кута  $\psi$ , а отже і існує нульове значення цих коефіцієнтів. Проведені дослідження показали, що коефіцієнти  $C_1$  і  $C_2$  набувають нульових значень але при різних кутах  $\psi$  (рис. 4).

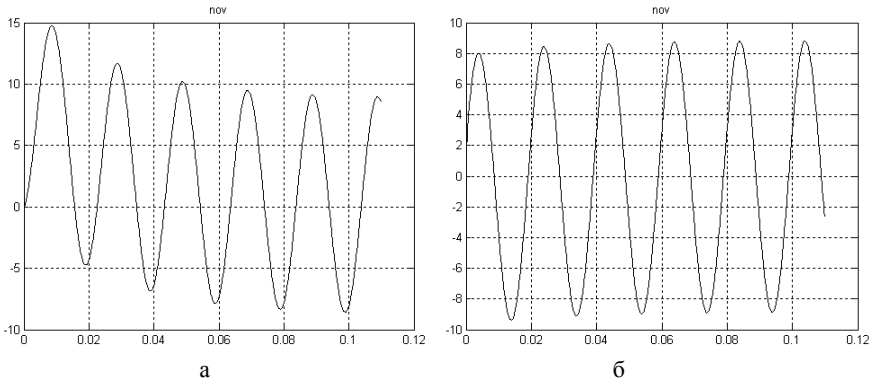


Рис. 2. Залежність перехідного процесу від кута вмикання

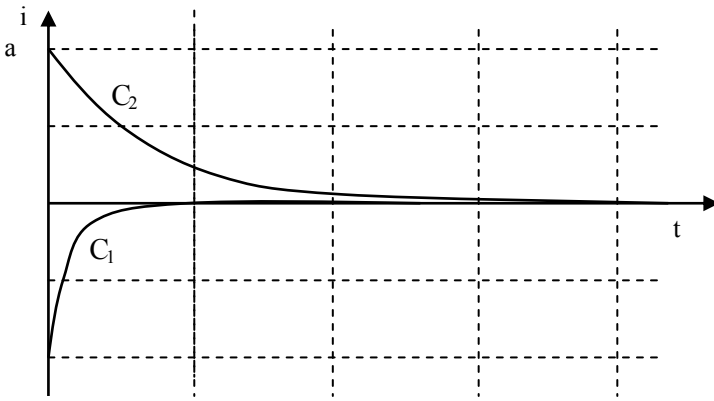


Рис. 3. Експоненціальні криві понадперехідного ( $C_1$ ) і перехідного ( $C_2$ ) струмів

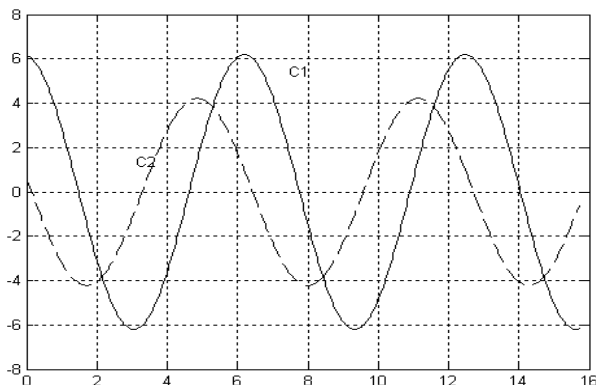


Рис. 4. Залежність коефіцієнтів  $C_1$  і  $C_2$  від кута вмикання. Тобто досягти умови коли коефіцієнти  $C_1$  і  $C_2$  одночасно дорівнюють нулю, не можливо.

Але можна підбирати такі кути вмикання  $\psi$ , при яких значення  $C_1$  і  $C_2$  будуть мінімальні і протилежні за значеннями, тобто вони будуть в певній мірі компенсувати одне одного, внаслідок чого кидки струму будуть мінімально можливими. Проведені дослідження на математичній моделі показали, що взаємне розміщення кривих графіків  $C_1$  і  $C_2$  та їх амплітуди досить різноманітні і залежать від параметрів схеми, але завжди існує точка вмикання, яка дозволяє фактично уникнути перехідного процесу. Недоліком графіка рис. 4 є те, що він не відображає вплив тривалості надперехідного та перехідного процесів на загальний результат, а в ряді випадків з врахуванням відносної короткочасності над перехідного процесу, та комбінації параметрів схеми, його можна враховувати в меншій мірі.

На підставі наведених міркувань вважається доцільним в якості критерію взяти різницю амплітудних значень струму першої і другої напівхвилі після виникнення перехідного процесу.

**Висновок.** Встановлено, що при вмиканні активно-індуктивного навантаження на змінну напругу існують дві точки на протязі періоду, одна з яких дає максимальний кидок струму перехідного процесу, друга – мінімальний. Пошук цих точок можливий шляхом знаходження такого кута вмикання, при якому значення коефіцієнтів  $C_1$  і  $C_2$  будуть мінімальні і протилежні за знаком – це буде відповідати мінімуму кидка струму. В випадку коли коефіцієнти мають максимальні значення і один і той же знак, будемо мати максимальний перехідний процес.

На сьогодні ряд закордонних підприємств випускає модулі управління тиристорами з фазовим управлінням наприклад фірма Ericsson випускає зборку U208B [5] яка виконує вказані функції для потужностей до 3 кВт.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Вольдек Л.И. *Электрические машины*. – Л.: Энергия, 1974. – 839 с.
2. Токарев Б.Ф. *Электрические машины*. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 623 с.
3. Ульянов С.А. *Электромагнитные переходные процессы в электрических системах*. – М.-Л.: Энергия, 1964. – 704 с.
4. Панченко А.М. *Особливості вмикання навантаженого трансформатора // Системи обробки інформації*. – Х.: ХВУ. – 2003. – Вип. 6. – С. 48 – 54.
5. *Зарубежные микросхемы для управления силовым оборудованием*. – М.: ДОДЭКА, 2000. – 288 с.

Надійшла 27.09.2004

**ПАНЧЕНКО** *Анатолій Миколайович*, канд. техн. наук, доцент, начальник кафедри ХУ ПС. В 1978 році закінчив ХВВКІУ. Область наукових інтересів – енергетика.

---