

# ЕЛЕКТРИФІКАЦІЯ ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ ГІРНИЧИХ РОБІТ

УДК 621.311:621.317.613:621.316.935:621.316.923.5

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РОБОТИ СТРУМООБМЕЖУВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ ЗА СХЕМОЮ РЕАКТОР–ЗАПОБІЖНИК

*В.П. Розен, А.І. Соловей, кандидати технічних наук,  
Д.Є. Момот, інж., В.А. Побігійло, асп. (НТУУ “КПІ”)*

*Разработана математическая модель работы токоограничивающих приборов по схеме реактор–предохранитель, позволяющей ограничивать ток короткого замыкания и уменьшать потребление активной мощности.*

### Вступ

Ріст рівнів струмів короткого замикання (КЗ) висуває підвищені вимоги до електродинамічної і термічної стійкості елементів електротехнічних пристроїв енергетичних і виробничих систем, а також до комутаційної здатності електричних апаратів. В останні роки набули актуальності питання впливу струмів КЗ не тільки на тверді шини, кабелі та електричні апарати, але й на генератори, силові трансформатори і гнучкі провідники розподільних пристроїв.

З метою зменшення впливу струмів КЗ на електроустаткування використовуються різні методи і засоби їх обмеження. З урахуванням специфіки розвитку об'єднаних енергосистем, необхідності забезпечення стійкості та надійності їх роботи, а також техніко-економічних характеристик розробляються і досліджуються принципово нові засоби, які дозволяють обмежувати на тільки величину струму КЗ, але і його тривалість. Розв'язання зазначеної задачі можливе шляхом:

підвищення швидкодії традиційної комутаційної апаратури;

створення і використання нових швидкодіючих комутаційних апаратів, здатних безінерційно, тобто протягом першого напівперіоду, обмежити і відключити струм КЗ;

використання безінерційних та інерційних струмообмежувальних пристроїв.

### Постановка задачі

Можливі різні схеми включення обмежувачів ударного струму, які відрізняються різними способами включення одинарних і здвоєних реакторів, що дозволяє ліквідувати втрати потужності і напруги в реакторах під час

робочих режимів (рис. 1). Для зменшення споживання електричної енергії пропонується шунтування реакторів запобіжником.

Розглянемо один з можливих варіантів застосування струмообмежувальних пристроїв – схему комбінованого включення реактор–запобіжник. У робочому режимі реактор знаходиться в режимі чекання. В момент протікання струму КЗ плавка вставка перегорє і реактор обмежує струм КЗ. Такий варіант використання обмежувачів струму КЗ має значну перевагу – зниження реактивної складової в мережі.

### Математична модель

Моделювання роботи плавкої вставки, яка шунтує реактор, здійснюється за такою розрахунковою схемою (рис. 1):

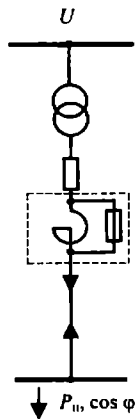


Рис. 1. Розрахункова схема реактор–запобіжник

Для розрахунку вибираємо однофазну схему, вважаючи струм КЗ симетричним трифазним.

Миттєве значення напруги визначається за формулою

$$u = U\sqrt{2} \cdot \sin\omega t. \quad (1)$$

Опори елементів розрахункової схеми визначасмо за такими залежностями:

опір трансформатора дорівнює

$$r_{\text{тр}} = \frac{\Delta P_{\text{мін}} U_{\text{н}}^2}{S_{\text{тр}}^2}, \quad (2)$$

$$x_{\text{тр}} = \frac{u_{\text{н}} U_{\text{н}}^2}{100 S_{\text{тр}} 10^{-3}}, \quad (3)$$

де  $u_k$  – напруга КЗ трансформатора;  $U_n$  – номінальна напруга вторинної обмотки трансформатора;  $S_{\text{тп}}$  – номінальна потужність трансформатора;  $\Delta P_{\text{мізі}}$  – втрати при короткому замиканні в трансформаторі.

Опір кабелю (розрахунок виконується для кабелів з алюмінієвими жилами) обчислюється за наближеними залежностями

$$r_k = \frac{j}{S} l; \quad (4)$$

$$x_k = \omega l, \quad (5)$$

де  $l$  – довжина кабелю;  $S$  – площа перерізу кабелю;

$$r_{\text{тп}} = \frac{U_n^2 \cos \varphi}{P_n 10^{-3}}; \quad (6)$$

$$x_{\text{тп}} = \frac{U_n^2 \cos \varphi \sqrt{1 - \cos^2 \varphi}}{P_n 10^{-3}}, \quad (7)$$

де  $P_n$  – активна потужність навантаження;  $\cos \varphi$  – коефіцієнт потужності.

Після визначення всіх опорів можна скласти схему заміщення  $l$  (рис. 2):

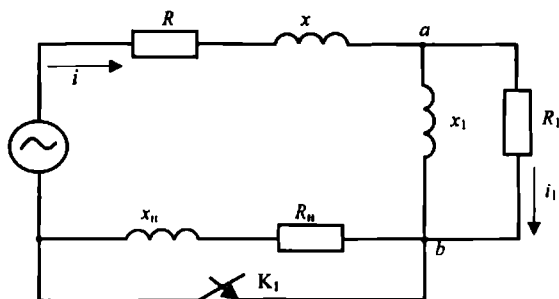


Рис. 2. Схема заміщення  $l$ :  $x_1$  – опір реактора;  $R_1$  – опір плавкої вставки;  $R$  і  $x$  – еквівалентний опір відповідно кабельної лінії і трансформатора;  $R_n$  і  $x_n$  – опір навантаження відповідно кабельної лінії і трансформатора

Замикання ключа  $K_1$  відповідає трифазному КЗ навантаження.

Розрахуємо значення струмів і напруг до комутації. Найзручніше зробити це, використовуючи комплексний метод розрахунку.

Діюче значення струму розраховується за формулою

$$\dot{I} = \frac{i}{(R + R_n) + j(x + x_n) + \frac{R_1 j x_1}{R_1 + j x_1}}. \quad (8)$$

Миттєве значення струму визначаємо за формулою

$$i = |\dot{I}| \sqrt{2} \sin(\omega t + \varphi), \quad (9)$$

де 
$$\varphi = \arctg\left(-\frac{xR_1^2 + xx_1^2 + R_1^2 x_1}{(R_1^2 + x_1^2)(R + R_n) + R_1 x_1^2}\right).$$
 (10)

За формулою “чужого” опору

$$j_1 = j \frac{jx_1}{R_1 + jx_1}. \quad (11)$$

Миттєве значення струму дорівнює

$$i_1 = |j_1| \sqrt{2} \sin(\omega t + \varphi + \varphi_1), \quad (12)$$

де  $\varphi_1 = \arctg \frac{R_1}{x_1}$ . (13)

Аналогічно визначаємо струм через реактор:

$$j_2 = j \frac{jR_1}{R_1 + jx_1}. \quad (14)$$

Миттєве значення струму

$$i_2 = |j_2| \sqrt{2} \sin(\omega t + \varphi + \varphi_2), \quad (15)$$

де  $\varphi_2 = \arctg\left(-\frac{x_1}{R_1}\right)$ . (16)

Напругу на плавкій вставці визначаємо за формулою

$$\dot{U}_{ab} = R_1 j_1, \quad (17)$$

або переходячи до миттєвого значення напруги:

$$u_{ab} = R_1 |j_1| \sqrt{2} \sin(\omega t + \varphi + \varphi_1). \quad (18)$$

Припустимо, що ключ  $K_1$  замикається. Тоді, відповідно до законів комутації

$$i(t_0) = i(t_0 - 0); \quad (19)$$

$$i_2(t_0) = i_2(t_0 - 0), \quad (20)$$

де  $t_0$  – момент комутації, що задається в процесі розрахункового експерименту.

Розрахована схема описується системою диференціальних рівнянь, отриманих на основі законів Кірхгофа:

$$\begin{cases} i = i_1 + i_2 \\ iR + \frac{x}{\omega} \frac{di}{dt} + i_1 R_1 = U \sqrt{2} \cdot \sin \omega t \\ \frac{x_1}{\omega} \frac{di_2}{dt} = R_1 i_1. \end{cases} \quad (21)$$

Виразивши  $i_2 = i - i_1$ , одержимо

$$\begin{cases} \frac{x}{\omega} \frac{di}{dt} = -iR - i_1 R_1 + U_n \sqrt{2} \cdot \sin \omega t \\ \frac{x_1}{\omega} \left( \frac{di}{dt} - \frac{di_1}{dt} \right) = R_1 i_1. \end{cases} \quad (22)$$

Привівши систему до нормальної формули, отримаємо

$$\begin{cases} \frac{di}{dt} = -i \frac{R\omega}{x} - i_1 \frac{R_1 \omega}{x} + \frac{U_n \sqrt{2} \omega}{x} \cdot \sin \omega t \\ \frac{di_1}{dt} = -i \frac{R\omega}{x} - i_1 R_1 \omega \left( \frac{1}{x_1} + \frac{1}{x} \right) + \frac{U_n \sqrt{2} \cdot \omega}{x} \sin \omega. \end{cases} \quad (23)$$

Струм  $i_2$  визначаємо як  $i_2 = i - i_1$ , а  $u_{ab} = R_1 i_1$ .

Оскільки опір плавкої вставки  $R_1$  залежить від струму  $i_1$ , що протікає через неї і дорівнює

$$R_1(i_1) = R_{10}(1 + a|i_1|), \quad (24)$$

де  $R_{10}$  і  $a$  – сталі, то одержимо нелінійну систему диференціальних рівнянь 2-го порядку.

Для числового розв'язання системи використаємо метод Рунге–Кутта 4-го порядку.

Подамо розрахункові формули для системи  $\dot{x} = f(x, t)$  у векторному записі:

$$x_{n+1} = x_n + hF(x_n, t_n, h), \quad (25)$$

$$\text{де } \begin{cases} F(x_n, t_n, h) = \frac{1}{6} [k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4] \\ k_1 = f(x_n, t_n) \\ k_2 = f(x_n + \frac{h}{2} k_1, t_n + \frac{h}{2}) \\ k_3 = f(x_n + \frac{h}{2} k_2, t_n + \frac{h}{2}) \\ k_4 = f(x_n + h k_3, t_n + h); \end{cases} \quad (26)$$

$h$  – крок інтегрування;  $k$  – розрахункові коефіцієнти.

Спочатку обчислюється коефіцієнт  $k_1$  для  $x_n$ . Використовуючи це значення, просуваємося на півкроку  $\frac{h}{2}$  вперед і одержуємо для цього моменту новий коефіцієнт  $k_2$ . Використовуючи коефіцієнт  $k_2$ , знову просуваємося на півкроку вперед від тієї ж точки  $(x_n, t_n)$  і обчислюємо коефіцієнт  $k_3$ . Потім

робимо повний крок уперед від  $(x_n, t_n)$  і обчислюємо коефіцієнт  $k_4$ . Отримані коефіцієнти розташовуємо за важливістю.

Подібним чином обчислення проводяться до того моменту, коли вставка розплавиться. Щоб визначити момент плавлення вставки, розглянемо для неї баланс тепла. До моменту часу  $t$  вставка одержує  $\int_0^t i_1^2 R_1(i_1) dt$  джоулева тепла; частина тепла йде на нагрівання вставки та її плавлення, а частина розсіюється в навколишнє середовище. Отже, момент плавлення вставки  $t$  визначається зі співвідношення:

$$\int_0^{t_{\text{пл}}} i_1^2 R_1(i_1) dt = Q\xi, \quad (27)$$

де  $Q$  – кількість теплоти, необхідна для того, щоб вставка розплавилася;  $\xi$  – коефіцієнт, що враховує теплообмін вставки з навколишнім середовищем, при розрахунку приймаємо  $\xi = 1,2$ .

Кількість теплоти  $Q$  визначається за формулою

$$Q = C_p m (T_{\text{пл}} - T_0) + \lambda m, \quad (28)$$

де  $C_p$  – питома теплоємність вставки;  $m$  – маса вставки;  $\lambda$  – питома теплота плавлення вставки;  $T_{\text{пл}}$ ,  $T_0$  – відповідно температура плавлення і початкова температура вставки.

Для обчислення інтеграла (27) використовується метод трапеції. Елементарний крок обчислення виглядає так:

$$\int_{t_{i-1}}^{t_i} i_1^2(\tau) R_1(i_1) d\tau = \frac{h}{2} [i_1^2(t_i) R_1(i_1(t_i)) + i_1^2(t_{i-1}) R_1(i_1(t_{i-1}))]. \quad (29)$$

Слід зауважити, що внаслідок практично рівномірного виділення тепла по всьому об'єму вставки виключається можливість виникнення дуги в процесі плавлення.

Діючі значення струмів і напруг розраховувалися за формулами

$$I_g = \sqrt{\frac{1}{T} \int_i^{i+T} i(\tau) d\tau}, \quad (30)$$

$$U_g = \sqrt{\frac{1}{T} \int_i^{i+T} U(\tau) d\tau}, \quad (31)$$

де  $i$ ,  $u$  – миттєві значення напруги і відповідного струму;  $T = \frac{2\pi}{\omega}$  – період коливання джерела живлення.

Інтегрування здійснювалося також за формулою трапеції.

Розглянемо післякомутаційний режим, який починається в момент, коли плавка вставка розплавилась. Цей момент відповідає розмиканню ключа  $K_2$  на схемі заміщення 2 (рис. 3).

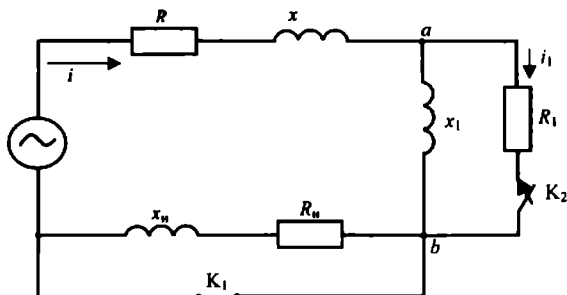


Рис. 3. Схема заміщення 2.

Якщо розмикання ключа відбувається в момент часу  $t_1 = t_{пл}$ , то відповідно до законів комутації матимемо такі початкові умови:

$$i(t_1) = i(t_1 - 0); \quad (32)$$

$$i_2(t_1) = i_2(t_1 - 0); \quad (33)$$

$$i = i_2. \quad (34)$$

Таким чином, ми маємо контур першого порядку, описуваний диференціальним рівнянням

$$\frac{x + x}{\omega} \frac{di}{dt} + i_1 R_1 = U \sqrt{2} \sin \omega t. \quad (35)$$

Позначимо  $L = \frac{x}{\omega}$ . Загальний розв'язок відповідного однорідного рівняння має такий вигляд:

$$i_{o.o.} = C_1 e^{-\frac{R_1}{L} t}, \quad (36)$$

де  $C_1$  – довільна константа.

Знайдемо частинний розв'язок неоднорідного рівняння:

$$i_{ч.н.} = A \sin \omega t + B \cos \omega t. \quad (37)$$

Підставляючи (37) у початкове диференціальне рівняння, одержимо:

$$L A \omega \cos \omega t - L B \omega \sin \omega t + R A \sin \omega t + R B \cos \omega t = U \sqrt{2} \cdot \sin \omega t. \quad (38)$$

Прирівнюючи коефіцієнти при косинусах і синусах, одержимо систему для визначення невизначених коефіцієнтів:

$$\begin{cases} LA\omega + RB = 0 \\ RA - LB\omega = U_n\sqrt{2} \end{cases}, \quad (39)$$

звідки

$$\begin{cases} A = \frac{RU_n\sqrt{2}}{R^2 + (x + x_1)^2} \\ B = -\frac{U_n(x + x_1)\sqrt{2}}{R^2 + (x + x_1)^2} \end{cases}. \quad (40)$$

Тоді

$$\begin{aligned} i &= c_1 e^{-\frac{R}{L}t} + U_n\sqrt{2} \left( \frac{R}{R^2 + (x + x_1)^2} \sin\omega t - \frac{x}{R^2 + (x + x_1)^2} \cos\omega t \right) = \\ &= c_1 e^{-\frac{R}{L}t} + \frac{U_n\sqrt{2}}{\sqrt{R^2 + (x + x_1)^2}} \sin(\omega t - \varphi_3), \end{aligned} \quad (41)$$

$$\text{де } \varphi_3 = \arctg \frac{x}{R}. \quad (42)$$

Визначимо значення константи  $C_1$  виходячи з початкових умов:

$$C_1 = (i(t_1 - 0) - \frac{U_n\sqrt{2}}{\sqrt{R^2 + (x + x_1)^2}} \sin(\omega t_1 - \varphi_3)) / e^{-\frac{R}{L}t_1}. \quad (43)$$

Остаточно маємо:

$$i = [(i(t_1 - 0) - \frac{U_n\sqrt{2}}{\sqrt{R^2 + (x + x_1)^2}} \sin(\omega t_1 - \varphi_3)) e^{-\frac{R}{L}(t-t_1)} + \frac{U_n\sqrt{2}}{\sqrt{R^2 + (x + x_1)^2}} \sin(\omega t - \varphi_3)]. \quad (44)$$

### Висновки

На сьогоднішній день багато способів обмеження струмів КЗ знаходяться в стадії розроблення і потребують глибокого аналізу і фізико-математичного обґрунтування. Один з таких випадків – шунтування реакторів (комбінований спосіб обмеження струмів КЗ) у нормальних робочих режимах з метою зменшення втрат напруги і потужності. У цьому випадку вагомими є також такі фактори, як зручність експлуатації, підвищення надійності і безперервності електропостачання.

Шунтування реакторів є практично найбільш прийнятним виходом у прагненні проектувальників знайти економічно вигідну границю між зниженням струмів КЗ і доступними значеннями рівня різних видів перенапруги.

1. *Анализ подходов к решению проблемы ограничения токов короткого замыкания в производственных и энергетических системах* / Розен В.П.,



Тарадай В.И., Несен Л.И., Побигайло В.А.; Нац. техн. ун-т Украины «Киев. политехн. ин-т». – Киев, 1999. – 18 с. – Рус. – Деп. в ГНТБ Украины.

2. *Обзор математических моделей* электрической дуги / Розен В.П., Тарадай В.И., Побигайло В.А.; Нац. техн. ун-т Украины «Киев. политехн. ин-т». – Киев, 1999. – 8 с. – Рус. – Деп. в ГНТБ Украины.

УДК 611.313.332.2

## **СТРУКТУРЫ ПРОПОРЦИОНАЛЬНО-ИНТЕГРАЛЬНЫХ НЕЧЕТКИХ КОНТРОЛЛЕРОВ С ПЕРЕМЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА**

*А.В. Чермалых, канд. техн. наук, В.В. Кузнецов, асп. (НТУУ «КПИ»)*

*Наведено структури нелінійних нечітких контролерів для автоматизованого електроприводу, отримані в результаті використання різних методів дефазифікації у визначенні керуючого впливу, які мають змінний коефіцієнт підсилення, що залежить від величини та знаку вхідних змінних контролера.*

### **Введение**

Несмотря на то, что нечеткая технология управления уже нашла практическое применение, основы теории таких систем находятся еще в стадии развития. Целью настоящей статьи является аналитический анализ структур простых нечетких контроллеров (фаззи-контроллеров), использующих различные методы формирования управляющих воздействий.

Используя преимущества аналитического анализа, авторы выполнили теоретические исследования для определения адекватности известных методов дефазификации в контексте нечеткого управления с целью сравнения динамических и статических (включая локальную стабильность в точке равновесия) характеристик нечетких контроллеров. Нечеткие контроллеры в этом анализе рассматриваются как нелинейные, адаптивные. Их конфигурация включает два входных и три выходных нечетких набора, четыре правила управления и четыре метода вывода управляющего сигнала ( $R_M, R_L, R_{DP}, R_{BP}$ ). Нечеткие контроллеры наиболее эффективно могут применяться для автоматизированного управления скоростью или положением электропривода переменного тока, имеющего сложную структуру с переменными параметрами и нелинейными звеньями [1].