

УДК 621.314.222.6.004.15

М.Ю. Голованьов

Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут”

УТОЧНЕННЯ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ ТА ЇЇ ЗАСТОСУВАННЯ ПРИ ЙМОВІРНІСНОМУ ПІДХОДІ ДО ВИБОРУ ЕЛЕМЕНТІВ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

© Голованьов М.Ю., 2001

У статті пропонується уточнена більш адекватна модель процесу короткого замикання з обліком дев'яти параметрів, що впливають на значення струмів к.з. Наведено приклад розрахунку й аналіз результатів.

In the paper an improved and more adequate model of short circuits with taking into account of nine parameters that have a considerable influence on short circuit currents is presented. Calculation example and analysis of the results are given.

Однією з вимог при виборі елементів систем електропостачання (СЕС) є забезпечення термічної та динамічної стійкості до струмів короткого замикання (СКЗ). Згідно з існуючим детермінованим підходом до вибору елементів СЕС ці вимоги зводяться до виконання умови

$$H_k \leq P_{k.o}. \quad (1)$$

де $P_{k.o}$ – постійна міцність елемента СЕС (припустимий ударний струм, тепловий імпульс тощо) гарантована заводом-виробником; H_k – максимальне значення характерного СКЗ.

При виконанні цієї умови передбачається забезпечення нормальної роботи елементів СЕС впродовж терміна їх експлуатації.

Виходячи з загальної стохастичної моделі вибору електроустановок (ЕУ) за технічними критеріями [1], вибір ЕУ за критеріями СКЗ можна представити мінімізацією або лімітуванням ймовірності прояву небажаної події, коли навантаження $H_k(t)$ більше чи дорівнює міцності $P_k(t)$ ЕУ, тобто

$$p[H_k(t) \geq P_k(t)] = \min, \quad (2)$$

чи

$$p[H_k(t) \geq P_k(t)] \leq \alpha, \quad (3)$$

Ймовірність α , як ступінь ризику, що відбудеться відмова ЕУ, регламентується стандартами та директивними документами. Наприклад, у [8] значення цієї ймовірності рекомендується 0,05.

Випадковий характер міцності $P_k(t)$ зумовлений різними випадковими впливами при виготовленні, монтажі й експлуатації ЕУ. Для більшості ЕУ він ще не вивчений, що пояснюється значними затратами праці, часу і грошей. Тому випадковий процес $P(t)$ на цьому етапі ми змушені враховувати постійною величиною $P_{k.o}$, а вирази [2, 3] записати у вигляді

$$p[H_k(t) \leq P_{k.o}] = \min, \quad (4)$$

або

$$p[H_k(t) \leq P_{k.o}] \leq \alpha. \quad (5)$$

Через випадковий характер багатьох змінних, що впливають на процес к.з. цей процес є стохастичним, а характерні СКЗ $H_k(t)$ є випадковими величинами.

Оскільки заводи-виробники ЕУ в якості $\Pi_{к.о.}$ для оцінки динамічної стійкості задають звичайно припустимі динамічний струм i_d і струм відмикання $I_{отк}$, то доцільно й термічну стійкість ЕУ оцінювати через припустимий ефективний струм $I_{к.од.}$. Значення цього струму можна визначити, зважаючи на припустиму температуру нагрівання провідникових матеріалів $\Theta_{к.з.доп}$ при к.з.

Знаючи припустимі значення характерних СКЗ (i_d , $I_{Э.доп.}$, $I_{отк}$) математичне формулювання критеріїв, що залежать від СКЗ. без обліку ймовірнісних обмежень, можна представити у вигляді

$$\begin{aligned} i_{д.α} &\leq i_d; \\ I_{к.Э.α} &\leq I_{к.Э.доп.}; \\ I_{к.О.α} &\leq I_{отк.}, \end{aligned} \quad (6)$$

де $i_{д.α}$, i_d – квантиль ударного СКЗ, отриманий стохастичним моделюванням при ймовірності перевищення α та його припустиме значення; $I_{к.Э.α}$, $I_{к.Э.доп.}$ – квантиль ефективного значення СКЗ за час відмикання к.з. і його припустиме значення; $I_{к.О.α}$, $I_{отк.}$ – квантиль струму відмикання і його припустиме значення.

Запропонована в [2] нова, більш адекватна модель випадкового процесу к.з. враховує випадковий характер десяти впливових змінних ζ_i : кут вмикання к.з. α_k ; напруга мережі U ; активний і реактивний опір системи R_c , X_c ; активний і реактивний опір навантаження R , X ; час відмикання к.з. t_0 ; моменти часу зміни виду к.з. t_1 та t_2 ; навантаження споживачів, підімкнених до мережі R_c і X_c враховує випадковий характер стану комунікаційних апаратів системи, а опорів R , X – випадковий характер місця короткого замикання.

При цьому зв'язок між змінними H_k і ζ_i є детермінована

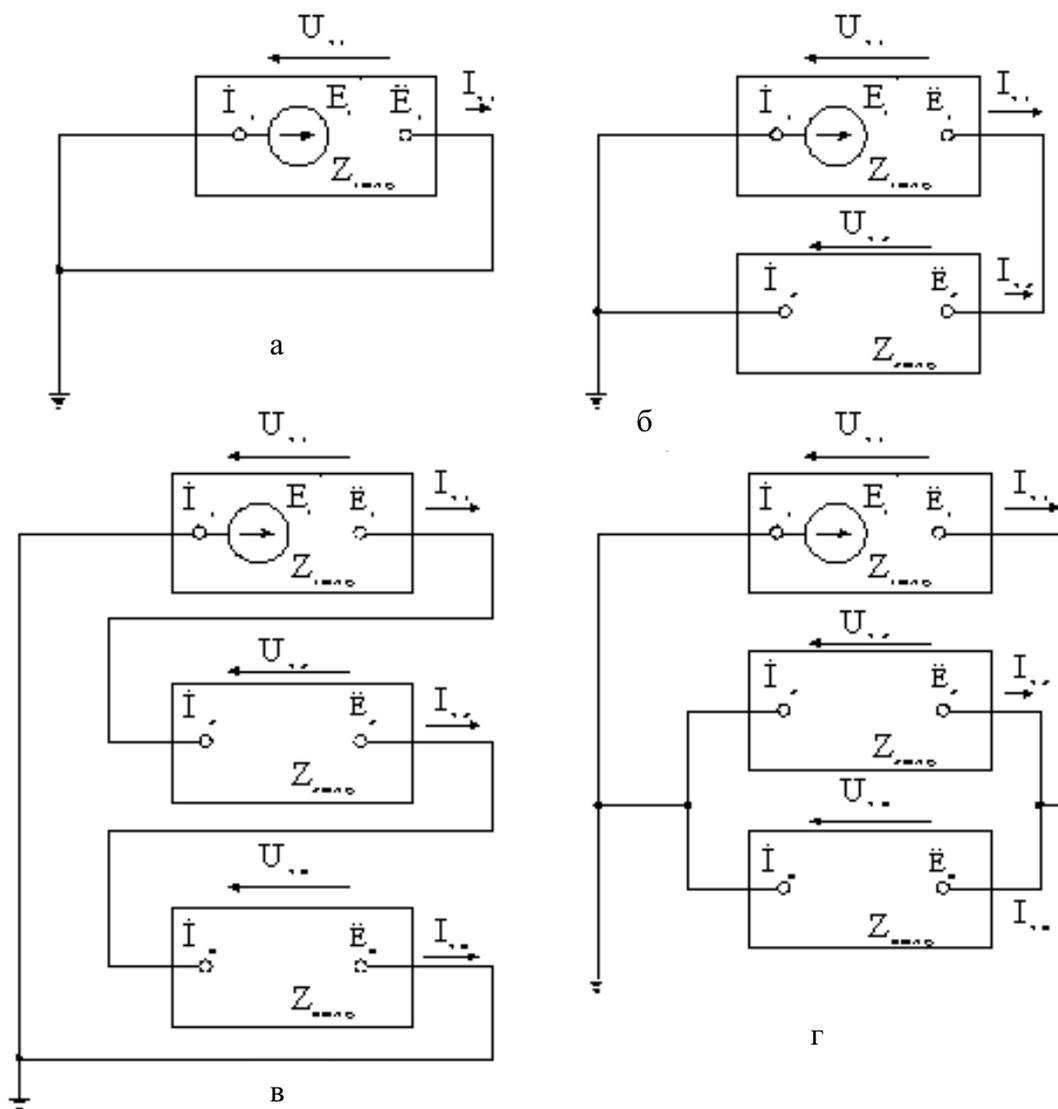
$$H_k = \Psi(\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_n). \quad (7)$$

Модель процесу к.з., описана в [2], не враховує зміни опорів схем заміщення мережі при переході одного виду к.з. в інший. У цій роботі дані уточнення моделі процесу к.з. з урахуванням цієї обставини.

Співвідношення між симетричними складовими напруги в місці к.з. [3] дозволяють для кожного виду к.з. скласти схеми заміщення прямої, зворотної і нульової послідовностей і розрахувати результуючі опори цих схем $Z_{1.рез.}$, $Z_{2.рез.}$, $Z_{0.рез.}$.

На рисунку показані комплексні схеми заміщення короткозамкненого ланцюга при різних видах к.з., де $U_{к1}$, $U_{к2}$, $U_{к0}$ – відповідно напруги прямої, зворотної і нульової послідовностей; $I_{к1}$, $I_{к2}$, $I_{к0}$ – відповідно струми прямої, зворотної і нульової послідовностей; $Z_{1.рез.}$, $Z_{2.рез.}$, $Z_{0.рез.}$ – відповідно комплексні опори схем заміщення прямої, зворотної і нульової послідовностей.

Розрахувавши еквівалентні активний $R_{\Sigma}^{(V)}$ і реактивний $X_{\Sigma}^{(V)}$ опори отриманих схем заміщення різних V-х видів к.з. ($V = 1, 2, 3$), можна потім визначити постійну часу загасання



Комплексні схеми заміщення трифазного (а), однофазного (б), двофазного (в) і двофазного на землю (г) короткого замикання.

апериодичної складової СКЗ $T_U^{(V)}$, кут вмикання к.з. $\gamma^{(V)}$ і миттєві значення СКЗ $i^{(V)}$ при різних V-х видах к.з. за формулами

$$T_a^{(V)} = \frac{X_{\Sigma}^{(V)}}{R_{\Sigma}^{(V)}}; \quad (8)$$

$$\varphi_K^{(V)} = \arctg \frac{X_{\Sigma}^{(V)}}{R_{\Sigma}^{(V)}}; \quad (9)$$

$$i_K^{(1)} = \frac{\sqrt{2}U}{|Z_{\Sigma}^{(1)}|} \left[\sin(\omega t + \alpha_K - \varphi_K^{(1)}) - \exp\left(-\frac{t}{T_a^{(1)}}\right) \sin(\alpha_K - \varphi_K^{(1)}) \right], \quad (10)$$

де $0 \leq t \leq t_1$;

$$i_k^{(2)} = \frac{\sqrt{2}U}{|Z_{\Sigma}^{(2)}|} \left[\frac{\sqrt{3}}{2} \sin(\omega t + \alpha_K - \varphi_K^{(2)} + \frac{\pi}{6}) - \exp\left(-\frac{t}{T_a^{(2)}}\right) \sin(\alpha_K - \varphi_K^{(2)}) + \right. \\ \left. + \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{t-t_1}{T_a^{(1)}}\right) \sin(\omega t_1 + \alpha_K - \varphi_K^{(1)} - \frac{\pi}{3}) \right], \quad (11)$$

де $t_1 \leq t \leq t_2$;

$$i_k^{(3)} = \frac{\sqrt{2}U}{|Z_{\Sigma}^{(3)}|} \left[\sin(\omega t + \alpha_K - \varphi_K^{(3)}) - \exp\left(-\frac{t}{T_a^{(3)}}\right) \sin(\alpha_K - \varphi_K^{(3)}) + \right. \\ \left. + \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{t-t_1}{T_a^{(1)}}\right) \sin(\omega t_1 + \alpha_K - \varphi_K^{(1)} - \frac{\pi}{3}) - \right. \\ \left. - \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{t-t_2}{T_a^{(2)}}\right) \sin(\omega t_2 + \alpha_K - \varphi_K^{(2)} - \frac{\pi}{3}) \right], \quad (12)$$

де $t_2 \leq t \leq t_0$.

У формулах (10)–(12) позначені: t_1, t_2 – час переходу к.з. відповідно з однофазного у двофазне і з однофазного в трифазне.

Ці формули і є уточненою моделлю процесу к.з. Вони дозволяють враховувати також окремі випадки: $t_1 = 0$ – к.з. починається з двофазного; $t_2 = 0$ – к.з. починається з трифазного; $t_1 = t_2, t_1 > 0$ – однофазне к.з. переходить відразу в трифазне.

Через уточнення моделі процесу к.з. виникає необхідність уточнити введені в [2] нові поняття і формули для визначення характерних СКЗ:

– ударний струм к.з. – максимальне значення модуля миттєвого значення СКЗ при різних його видах

$$i_{д.} = \text{Max}[i_k^{(V)}(t)], \quad (13)$$

де $0 \leq t = t_0$;

– ефективне значення СКЗ:

$$I_{к.з.} = \sqrt{\frac{I_{к.з.}^{(1)2} \cdot t_1 + I_{к.з.}^{(2)2} \cdot (t_2 - t_1) + I_{к.з.}^{(3)2} \cdot (t_0 - t_2)}{t_0}} \quad (14)$$

де $I_{к.з.}^{(1)}, I_{к.з.}^{(2)}, I_{к.з.}^{(3)}$ – ефективні струми к.з. при різних його видах обчислюються за формулами

$$I_{к.з.}^{(1)} = \sqrt{\frac{1}{t_1} \cdot \int_0^{t_1} [i_k^{(1)}(t)]^2 dx}; \\ I_{к.з.}^{(2)} = \sqrt{\frac{1}{t_2 - t_1} \cdot \int_{t_1}^{t_2} [i_k^{(2)}(t)]^2 dx}; \\ I_{к.з.}^{(3)} = \sqrt{\frac{1}{t_0 - t_2} \cdot \int_{t_2}^{t_0} [i_k^{(3)}(t)]^2 dx}; \quad (15)$$

– струм відімкнення:

$$I_{\text{к.о.}} = \sqrt{I_{\text{к.о.а}}^2 + I_{\text{к.о.п}}^2}, \quad (16)$$

де $I_{\text{к.о.а}}$, $I_{\text{к.о.п}}$ – діючі значення аперіодичної й періодичної складових струму відмикання, відповідно дорівнюють

$$I_{\text{к.о.а}} = \sqrt{2}U \left[-\frac{1}{2Z_{\Sigma}^{(2)}} \exp\left(-\frac{t_2}{T_a^{(2)}}\right) \sin\left(\omega t_2 + \alpha_K - \varphi_K^{(2)} - \frac{\pi}{3}\right) + \frac{1}{2Z_{\Sigma}^{(1)}} \exp\left(-\frac{t_1}{T_a^{(1)}}\right) \sin\left(\omega t_1 + \alpha_K - \varphi_K^{(1)} - \frac{\pi}{3}\right) - \frac{1}{Z_{\Sigma}^{(3)}} \exp\left(-\frac{t}{T_a^{(3)}}\right) \sin\left(\alpha_K - \varphi_K^{(3)}\right) \right]; \quad (17)$$

$$I_{\text{к.о.п}} = \frac{U}{Z_{\Sigma}^{(3)}}. \quad (18)$$

Припускаючи, що к.з. різних видів відбувається по черзі в одній і тій же точці системи, що знаходиться на значній відстані від генераторів, тобто $X_{\Sigma_{\text{рез}}}^* > 3$, і за тих самих вихідних умов, можна записати такі нерівності [3]:

$$Z_{\Sigma}^{(1)} > Z_{\Sigma}^{(2)} > Z_{\Sigma}^{(1,1)} > Z_{\Sigma}^{(3)}; \quad (19)$$

$$I_K^{(1)} < I_K^{(2)} < I_K^{(1,1)} < I_K^{(3)}. \quad (20)$$

Отримані вище вирази [13–16] можна використати при імітаційному моделюванні реалізацій миттєвих значень СКЗ, згідно з алгоритмом [4], для одержання ансамблю реалізацій характерних СКЗ H_k . Статистична обробка цього ансамблю дозволить визначити квантилі характерних СКЗ, що входять в умову [6] вибору елементів СЕП.

Порівняння результатів вибору елементів СЕП за термічною і динамічною стійкістю до СКЗ, отриманих на основі нової моделі процесу к.з. і стохастичного підходу до їх вибору, з результатами, одержаними на основі існуючих детермінованих моделей, показує, що детермінований підхід до вибору елементів СЕП призводить до завищення їх параметрів на 1–2 ступені, тобто до недовикористання капітальних вкладень.

Для ілюстрації цього порівняємо значення СКЗ, отримані детермінованим їх розрахунком і стохастичним розрахунком на основі викладеної вище ймовірнісної моделі к.з.

Приклад розрахунку СКЗ детермінованим методом розглянутий у [5, с. 46].

Умова:

Для вибору комунікаційної апаратури на шинах п/ст А,Б,В (схема на рисунку) визначити струми трифазного к.з. на шинах 10,5 кВ п/ст А, шинах 10,5 кВ і 0,4 кВ п/ст Б та шинах 10,5 кВ п/ст, а також ударний СКЗ на шинах 10,5 кВ п/ст А і Б.

Розв'язання:

Для вибору електроустаткування на напругу 10,5 і 0,4 кВ досить визначити струм трифазного к.з. у точках K_1 , K_2 , K_3 і K_4 .

При детермінованому підході [5], опори схеми заміщення в іменованих одиницях, приведені до напруги 10,5 кВ, дорівнюють у точці K_1 :

$$X_{\Sigma} = 0,191 + \frac{1,225}{2} \cong 0,804 \text{ Ом};$$

при цьому СКЗ дорівнює

$$I_{10,5}^{(3)} = \frac{10500}{\sqrt{3} \cdot 0,804} = 7550 \text{ А};$$

– для ударного СКЗ:

$$\frac{X_2^{(3)}}{r_2^{(3)}} = 10; \quad r_{\Sigma} = 0,1 \cdot \frac{1,225}{2} \cong 0,0613 \text{ Ом};$$

$$T_a = \frac{0,804}{314 \cdot 0,0613} = 0,0418 \text{ с};$$

$$K_{\text{уд.}} = 1 + e^{-\frac{0,01}{0,0418}} = 1,79;$$

$$i_{\text{уд.}}^{(3)} = \sqrt{2} \cdot 1,79 \cdot 7550 = 19,1 \text{ кА}.$$

Розрахунок для інших точок здійснюється аналогічно і результати розрахунку зведені в табл. 1:

Таблиця 1

Струми	Значення			
	К ₁	К ₂	К ₃	К ₄
$I_{10,5}^{(3)}$	7550	2670	530	524
$i_{\text{уд.}}$	19100	4350	745,6	1271

При ймовірнісному підході були використані, розроблені в [2], алгоритми і тексти програм.

Вихідними даними задаються: середні значення опорів дорівнюють їх значенням при детермінованому підході та коефіцієнти варіацій $V(r) = V(x) = 0,1$.

$$m(x) = \bar{x}; \quad V(x) = 0,1; \quad m(r) = \bar{r}; \quad V(r) = 0,1.$$

Для часу t_1 , t_2 , t_0 , задані:

$$\bar{t}_1 = 0,3 \text{ с}; \quad \bar{t}_2 = 0,5 \text{ с}; \quad \bar{t}_0 = 1 \text{ с}; \quad V[t_1] = V[t_2] = 0,1.$$

Як розрахункові струми визначаються квантиль ефективного струму к.з. за час відімкнення і квантиль ударного струму к.з. з ймовірністю перевищення 0,05.

Результати розрахунків зведені в табл. 2 і 3. Табл. 2 розрахована з використанням моделі процесу к.з., викладеної в [2].

Таблиця 2

Струми	Значення			
	К ₁	К ₂	К ₃	К ₄
$I_{10,5}^{(3)}$	6700	2150	490	465
$i_{\text{уд.}}$	18250	3735	650	920

Таблиця 3

Струми	Значення			
	К ₁	К ₂	К ₃	К ₄
$I_{10,5}^{(3)}$	6200	1765	481	432
$i_{\text{уд.}}$	17932	3270	590	880

Табл. 3 розрахована при процесі к.з. викладеному на початку. При цьому введені доповнення в алгоритм і тексти програм з визначення схем заміщення й опорів елементів цих схем для різних послідовностей (враховувалися схеми з'єднання обмоток трансформаторів, зміна опорів проводів і кабелів для нульової послідовності).

Аналіз даних табл. 1–3 свідчить, що при ймовірнісному підході значення струмів к.з. у розрахункових точках зменшуються на відповідно 13 та 22 %.

Висновок: отримані результати дають можливість розробляти інженерні методи стохастичного розрахунку СКЗ, які дозволять підвищити ефективність вибору режимів і параметрів ЕУ.

1. Hoffmann I., Denisenko N.A., Tschernenko P.A., *Probabilistische Modelle fur die Auslegung und – Optimierung von Elektroenergieanlagen – Nabid.* – 1989 – 43. № 9. – S. 342–344. 2. Денисенко Н.А., Хоффманн И., *Стохастичне моделювання процесів короткого замикання в електроенергетичних системах і установках // Техн. електродинаміка.* – 1991. – № 2. – С. 92–97. 3. Винославский В.Н. та ін. *Перехідні процеси в системах електропостачання.* – К., 1989. 4. Хоффманн И., *Стохастичний розрахунок струмів короткого замикання в системах електропостачання // Техн. електродинаміка.* – 1978. – № 9. – С. 28–32. 5. Беляєва Е.Н. *Як розрахувати струм короткого замикання.* – М., 1983. 6. Хайн М., Глазунов А.А., *Про ймовірнісні й стохастичні характеристики струмів короткого замикання в системах електропостачання // Електрика.* – 1980. – 1. – С. 5–11. 7. Манусов В.С., Мойсеев С.М., *Ймовірнісні характеристики струмів короткого замикання // Техн. електродинаміка.* – 1985 – № 4. – С. 7–81. 8. СТ СЭВ 2726–80 *Електричні установки. Визначення і поняття. Основи вибору за умовами механічної та термічної міцності.* – Введ. 01.06.80.

УДК 621.314.611

М.Н. Горбачов

Інститут загальної енергетики НАН України

ОСОБЛИВОСТІ ГАРМОНІЙНОГО СИНТЕЗУ ЯК СУЧАСНОГО МЕТОДУ ДОСЛІДЖЕННЯ У ТЕОРІЇ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ ТА РАДІОТЕХНІЧНИХ ЛАНЦЮГІВ

© Горбачов М.Н., 2001

Запропоновано і теоретично обґрунтовано нетрадиційний метод перебування в замкнутому вигляді періодичних розв'язань, що описують сталі процеси в лінійних електричних та радіотехнічних ланцюгах із зосередженими параметрами при впливі на них негармонійних сигналів (напруг, ЕРС) істотно несинусоїдальної форми – удосконалений метод гармонійного синтезу. Наведено приклади розв'язань модельних задач.

The features harmonical of synthesis as mathematical method of decision problems and research of physical processes in the electrical engineering and radiotechnical are considered. A number of new examples of summation of infinite functional series having applied meaning in the theory of electrical and radiotechnical circuits is given.