

УДК 621.316.3

С.А. Руссіян

Донецький національний технічний університет, м. Донецьк
кафедра вищої математики
E-mail: math@dgtu.donetsk.ua

ВИЗНАЧЕННЯ ЙМОВІРНОСТІ ХИБНОГО СПРАЦЬОВУВАННЯ АПАРАТУ «АЗУР» МАТЕМАТИЧНИМИ МЕТОДАМИ

Анотація

Руссіян С.А. Визначення ймовірності хибного спрацьовування апарата «АЗУР» математичними методами. Обґрунтована і досліджена математична модель визначення ймовірності хибного спрацьовування апарата захисту від витоку струму на землю в електротехнічному комплексі дільниці шахти в результаті впливу комутаційного перехідного процесу, доведена доцільність застосування додаткових заходів із зменшення впливу процесу комутації силових приєднань на оперативний ланцюг апаратів захисту від витоків струму на землю.

Ключові слова: електротехнічний комплекс, дільниця шахти, апарат захисту, струм витоку на землю, математична модель, розрахунок, ймовірність, захисне відключення.

Актуальність проблеми та її зв'язок з прикладними задачами.

Апарати серії «АЗУР» є ефективним технічним рішенням, що забезпечує захист людини від електроураження при торканні елементів шахтної дільничної мережі під напругою 660В, або 1140 В [1]. Захисна функція апарата також полягає у випереджальному відключенні дільничної мережі при виникненні однофазного замикання на землю (до розвитку аварійної ситуації у двофазне, аби трифазне замикання). В разі виникнення небезпечного витоку струму на землю за командою АЗУР відключається автоматичний вимикач дільничної трансформаторної підстанції, і цим знеструмлюється весь електротехнічний комплекс шахтної дільниці. Однак, контакторна комутація асинхронних двигунів споживачів дільниці супроводжується короткочасним стрибкоподібним збільшенням амплітуд напруги в мережі, що є фактором впливу на реагуючий орган АЗУР, потребує відповідних засобів налаштування і в принципі може спричинити хибне виконання захисної функції, що іноді має місце на практиці. Тому проблематика визначення ймовірності хибного спрацьовування апаратів серії «АЗУР» є актуальною і потребує застосування математичних методів дослідження.

Аналіз досліджень та публікацій.

Фундаментальні дослідження із проблематики забезпечення захисту від електроураження при експлуатації шахтних дільничних електротехнічних комплексів виконані у роботах [1, 2, 3]. Проте в них не приділено достатньої уваги питанню обґрунтування заходів щодо перешкоджання впливу комутаційних перехідних процесів в дільничній мережі на величину контрольованого параметру апарату захисного відключення. Зокрема, практичну актуальність має визначення ймовірності хибного спрацьовування апарата „АЗУР” математичними методами.

Постановка задачі.

Задача досліджень полягає у розробці і дослідженні математичної моделі визначення ймовірності хибного спрацьовування апарата захисту від витоків струму на землю з метою обґрунтування доцільності запровадження додаткових заходів із зменшення впливу

комутаційних перехідних процесів електромережі дільниці на оперативний ланцюг апаратів захисту від витоків струму на землю.

Основний матеріал та результати досліджень.

Хибне спрацьовування апарата захисту матиме місце у випадку перевищення контрольованим параметром порога спрацьовування АЗУР під час перехідних процесів у системі, пов'язаних з контакторними комутаціями силових відгалужень, які можуть відбуватися в довільний момент часу. Відповідно до цього, засобами комп'ютерного моделювання на основі обґрунтованих структур моделі та відповідних аналітичних залежностей [4], виконана серія досліджень (в кількості $n=50$), у кожному з яких момент t' відключення першого відгалуження системи (рис.1) є вибірковою величиною, рівномірно розподіленою на інтервалі від 2 з до 3с. У кожному дослідженні реєструвалося максимальне значення струму через вимірювальний елемент апарата АЗУР-1 i_{7max} (рис. 1). При цьому прийняті наступні параметри ізоляції кабелів системи:

- магістральний кабель: $R_{0a}=3,8 \cdot 10^5$; $R_{0b}=4,2 \cdot 10^5$; $R_{0c}=3,9 \cdot 10^5$ (Ом/фазу);
 $C_{0a}=C_{0b}=C_{0c}=3 \cdot 10^{-7}$ Ф/фазу;
- гнучкий кабель 1-го приєднання: $R_{1a}=4 \cdot 10^5$; $R_{1b}=4,5 \cdot 10^5$; $R_{1c}=4 \cdot 10^5$ (Ом/фазу);
 $C_{1a}=C_{1b}=C_{1c}=2,5 \cdot 10^{-7}$ Ф/фазу;
- гнучкий кабель 2-го приєднання: $R_{2a}=4 \cdot 10^5$; $R_{2b}=4,1 \cdot 10^5$; $R_{2c}=4,2 \cdot 10^5$ (Ом/фазу);
 $C_{2a}=C_{2b}=C_{2c}=2,5 \cdot 10^{-7}$ Ф/фазу.

Результатами дослідів є вибіркові значення максимальної величини струму через

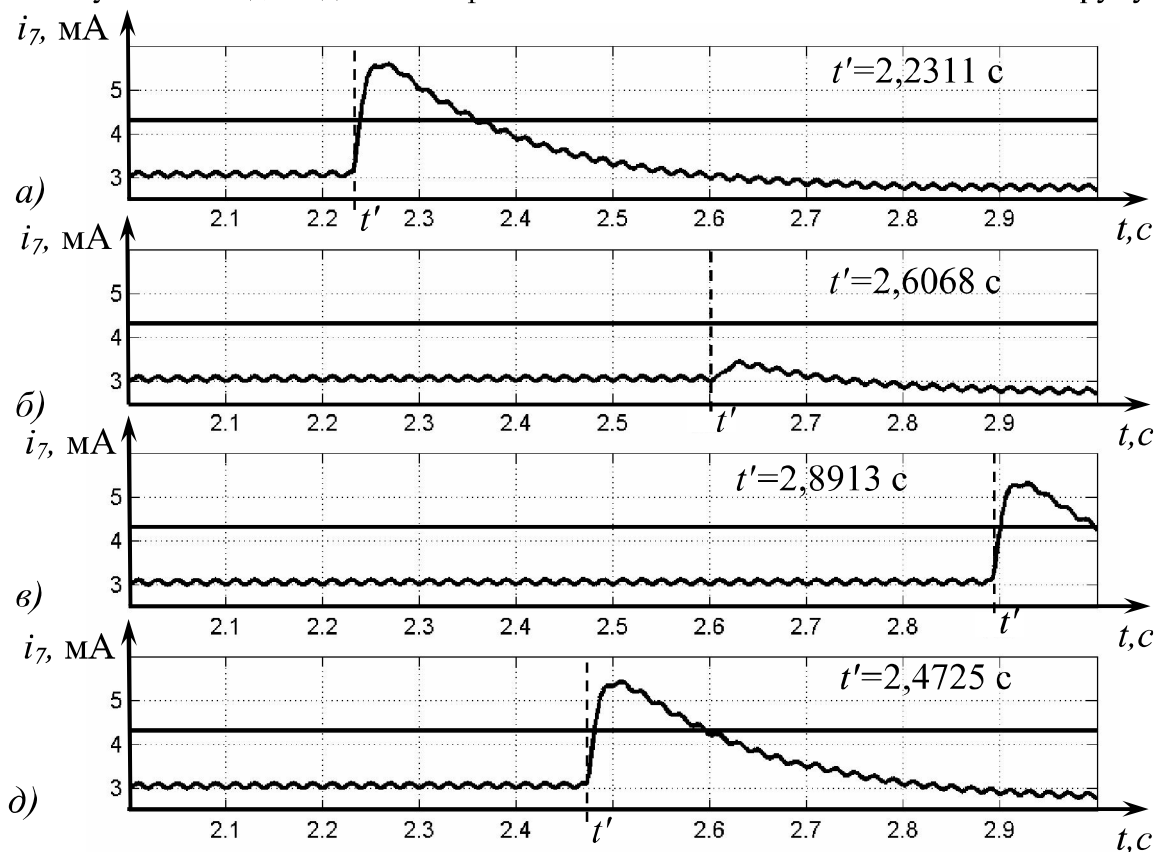


Рисунок 1 – Діаграми струму через вимірювальний елемент АЗУР-1 при випадкових моментах відключення комутаційного апарата першого відгалуження, отриманий шляхом моделювання: а - $t' = 2,2311$ с, $i_{7max} = 5,58$ мА; б - $t' = 2,6068$ с, $i_{7max} = 3,45$ мА; в - $t' = 2,8913$ с, $i_{7max} = 5,30$ мА; д - $t' = 2,4725$ с, $i_{7max} = 5,42$ мА

вимірювальний елемент апарата типу АЗУР-1 $i_{7\max}$ (рис. 2). Виконання первинної статистичної обробки результатів спостережень припускає виключення значень, що різко виділяються. Розташувавши вибіркові значення $i_{7\max}$ у варіаційний ряд за зростанням, визначимо мінімальне та максимальне значення: $\min[i_{7\max}] = 2,83$ мА, $\max[i_{7\max}] = 5,8$ мА.

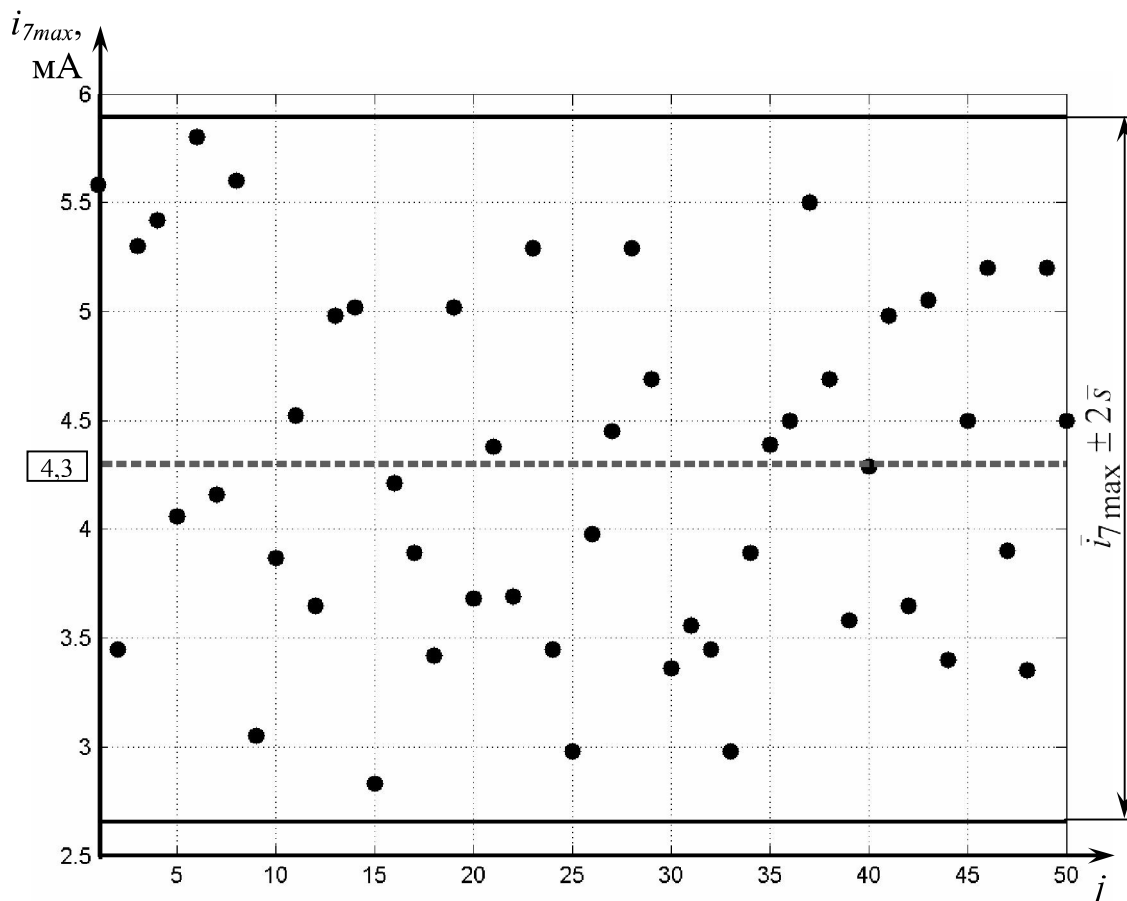


Рисунок 2 – Вибіркові максимальні значення струму через вимірювальний елемент апарату типу АЗУР-1 при комутації відгалуження мережі

Доцільним є виконання статистичної перевірки наступних двох конкуруючих гіпотез [5]: нульова гіпотеза H_0 - вибірка є однорідною; альтернативна гіпотеза H_1 - спостереження одного з результатів ($\min[i_{7\max}]$ або $\max[i_{7\max}]$) виконувалося при істотно змінених умовах, цей результат необхідно виключити. Значення критерію для першого та останнього члена варіаційного ряду мають бути знайдені відповідно до залежностей:

$$v_1 = \frac{|\bar{i}_{7\max} - \min[i_{7\max}]|}{\bar{s}}, \tag{1}$$

$$v_n = \frac{|\bar{i}_{7\max} - \max[i_{7\max}]|}{\bar{s}}, \tag{2}$$

де $\bar{i}_{7\max} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n i_{7\max j} = 4,27$ мА, $\bar{s} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (i_{7\max j} - \bar{i}_{7\max})^2} = 0,81$ мА – відповідно, вибіркові значення математичного очікування і стандартного відхилення кидків струму через вимірювальний елемент апарата типу АЗУР-1 при комутації відгалуження.

Тоді розрахункові значення критерію становлять: $v_1 = \frac{|4,27 - 2,83|}{0,81} = 1,78$; $v_n = \frac{|4,27 - 5,8|}{0,81} = 1,89$. Критичне значення критерію визначається обсягом вибірки n та величиною $Q = 200\alpha$ %, де α - прийнятий рівень значимості. При $n=50$ і $\alpha=0,05$ згідно [5] має: $v_{\max}(n, Q) = v_{\max}(50, 10\%) = 2,99$. Оскільки $v_1 < v_{\max}$ й $v_n < v_{\max}$, те при рівні значимості $\alpha=0,05$ немає підстав відкидати нульову гіпотезу H_0 , тобто при заданому рівні вибірку можна вважати однорідною.

Для перевірки стохастичної незалежності результатів спостережень, є доцільним користування критерієм квадратів послідовних відхилень [5]. Приймемо дві конкуруючі гіпотези: нульову H_0 - результати спостережень є стохастично незалежними, і альтернативну H_1 - вибіркові значення не можна розглядати як стохастично незалежні величини. Розрахункове значення критерію визначається відповідно до залежності:

$$\gamma_n = \frac{q^2(n)}{\bar{s}^2(n)}, \quad (3)$$

де $\bar{s}^2(n) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (i_{7\max j} - \bar{i}_{7\max})^2 = 0,66$ мА² – вибіркова дисперсія;

$$q^2(n) = \frac{1}{2(n-1)} \sum_{j=1}^n (i_{7\max j+1} - i_{7\max j})^2 = 0,71$$
 мА².

$$\text{Тоді } \gamma_{50} = \frac{0,71}{0,66} = 1,076.$$

Критичне значення критерію підраховується по формулі:

$$\gamma_{\alpha}^{(\min)}(n) = 1 + \frac{u_{\alpha}}{\sqrt{n+1}}, \quad (4)$$

де u_{α} - α -квантиль нормованого нормального розподілу.

При рівні значимості $\alpha=0,05$ величина u_{α} становить $u_{0,05} = -u_{0,95} = -1,645$, а критичне значення критерію $\gamma_{0,05}^{(\min)}(50) = 1 - \frac{1,645}{\sqrt{50+1}} = 0,769$. Оскільки $\gamma_{50} > \gamma_{0,05}^{(\min)}(50)$, то нульова гіпотеза H_0 про стохастичну незалежність результатів спостережень має бути прийнятою.

Перевірку гіпотези про нормальний розподіл вибіркових даних має бути виконана за критерієм Колмогорова-Смірнова [6], для чого будується теоретична $G(i_{7\max})$ та емпірична $F(i_{7\max})$ функції розподілу ймовірностей відповідно до вибіркових значень $i_{7\max}$ (рис.3). Розрахункове значення критерію визначається найбільшою розбіжністю між теоретичною й експериментальною функціями розподілу:

$$K_s = \sup_{i_{7\max}} |G(i_{7\max}) - F(i_{7\max})| \quad (5)$$

і для заданої вибірки становить $K_s = 0,1088$. Критичне значення критерію при рівні значимості $\alpha = 0,05$ $K_c = 0,1884$ перевищує розрахункове ($K_c > K_s$), що дозволяє прийняти гіпотезу про відповідність вибірових даних нормальному закону розподілу.

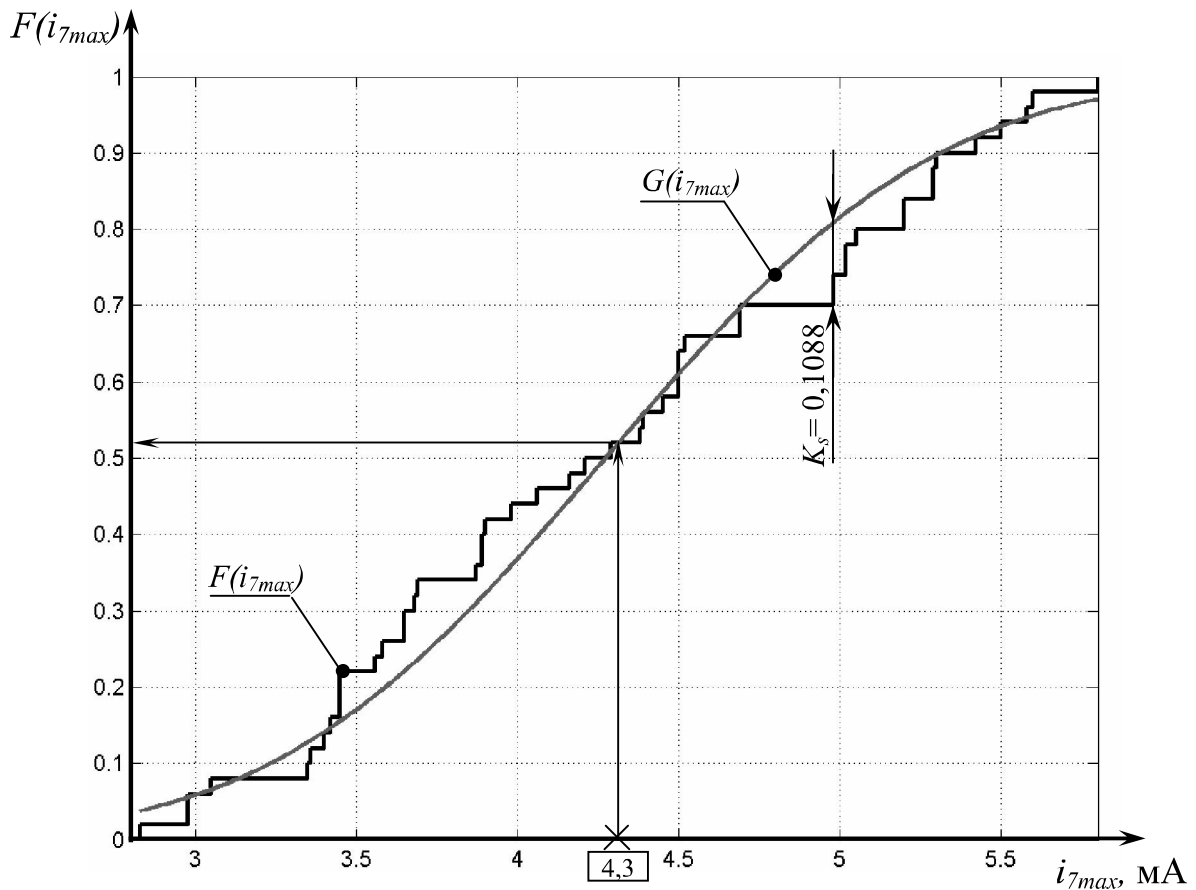


Рисунок 3 – Теоретична $G(i_{7\max})$ і емпірична $F(i_{7\max})$ функції розподілу вибірових максимальних значень струму через вимірювальний елемент АЗУР-1 при комутації відгалуження мережі

Імовірність перевищення максимальним значенням струму через вимірювальний елемент апарата типу АЗУР-1 $i_{7\max}$ уставки спрацьовування апарата $I_{уст}$ при комутації першого відгалуження системи розглянутої конфігурації згідно отриманим вибіровим даним (які при рівні значимості 0,05 не суперечать нормальному закону) може бути визначена відповідно до залежності:

$$P(i_{7\max} > I_{уст}) = 0,5 - \Phi\left(\frac{I_{уст} - \bar{i}_{7уст}}{\bar{s}}\right), \quad (6)$$

де $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-z^2/2} dz$ - функція Лапласа.

При уставці в елементі вимірювання апарата захисту $I_{уст} = 4,3$ мА шукана ймовірність становить: $P(i_{7max} > 4,3) = 0,49$, що є неприпустимим. Аналогічний результат можна отримати шляхом графічних побудов на діаграмі функції розподілу ймовірностей (рис. 3). Більш точною є імовірнісна модель системи, що описує ймовірність помилкового спрацьовування апарата захисту від витоків струму на землю, припускає побудову дерева подій (рис. 4) [7].

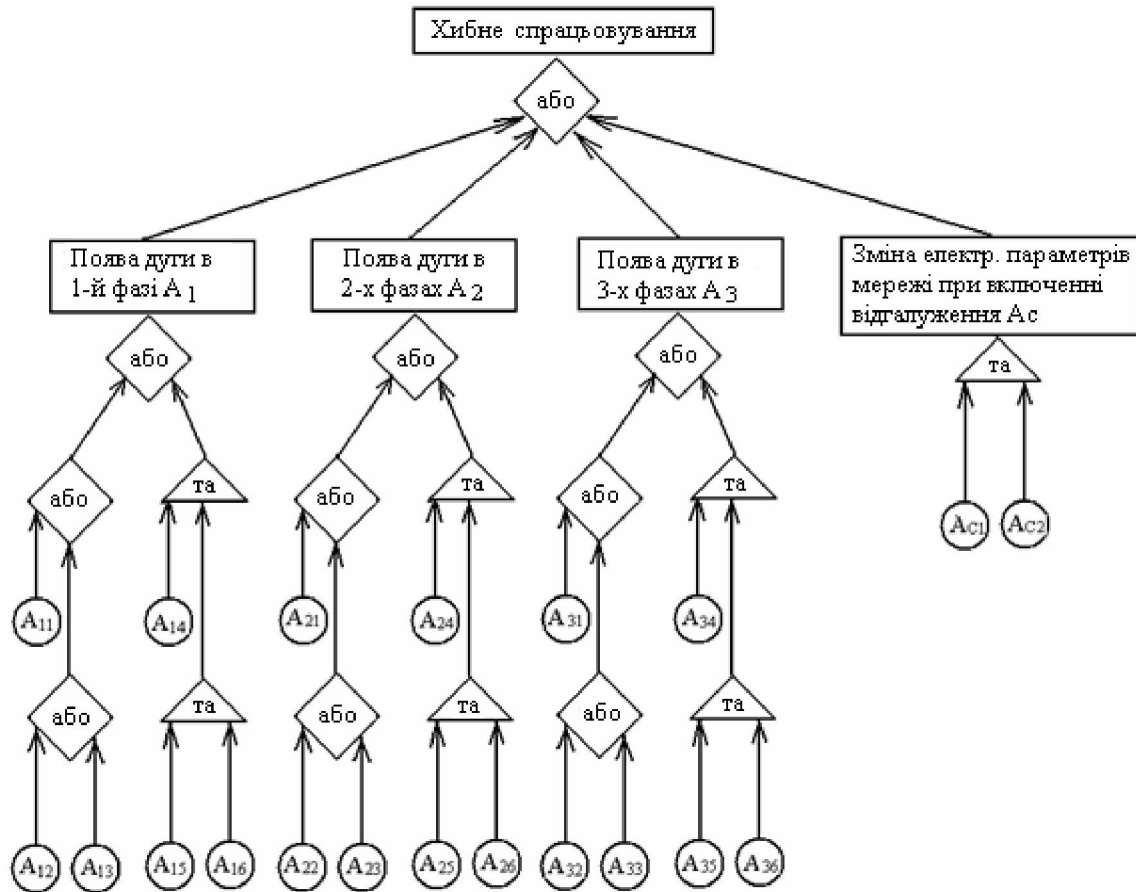


Рисунок 4 – Дерево подій, що приводять до хибного спрацьовування апарату типу «АЗУР»

Побудова дерева подій здійснюється по наступних етапах: аналіз наявності дуги на контактах контактора пускача, визначення електричних параметрів ділянки мережі, визначення логічного взаємозв'язку між подіями що приводять до хибного спрацьовування. Дерево подій являє собою сукупність елементарних подій, об'єднаних логічними операціями кон'юнкції або диз'юнкції, що дозволяють одержати булеву модель виникнення хибного спрацьовування АЗУР. У результаті аналізу дерева подій, отримане логічне рівняння події виникнення помилкового спрацьовування, що містить логічні операції над елементарними подіями A_i , має наступну структуру:

$$\begin{aligned}
 A_{\text{помилк.спрац.}} &= A_1 \vee A_2 \vee A_3 \vee A_4 = \\
 &= (((A_{12} \vee A_{13}) \vee A_{11}) \vee (A_{14} \wedge A_{15} \wedge A_{16})) \vee \\
 &\vee (((A_{22} \vee A_{23}) \vee A_{21}) \vee (A_{24} \wedge A_{25} \wedge A_{26})) \vee \\
 &\vee (((A_{32} \vee A_{33}) \vee A_{31}) \vee (A_{34} \wedge A_{35} \wedge A_{36})) \vee (A_{C1} \wedge A_{C2}),
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

де A_1 - поява дуги в одній фазі; A_2 - поява дуги у двох фазах; A_3 - поява дуги в трьох фазах; A_{11} , A_{12} , A_{13} - зношування контактів, що призводить до збільшення часу горіння дуги (0,6); A_{12} , A_{22} , A_{32} - механічне (0,6), A_{13} , A_{23} , A_{33} - хімічне ушкодження контактів, що призводить до зниження опору контактів контактора в замкненому стані (0,25); A_{14} , A_{24} , A_{34} - розрив контакту при протіканні максимального струму (0,5); A_{15} , A_{25} , A_{35} - зміна ємності мережі, що призводить до сплеску струму на реагуючому органі АЗ (0,2); A_{16} , A_{26} , A_{36} - зменшення опору ізоляції силового кабелю (0,75); A_{C1} - збільшення ємності мережі при включенні відгалуження (0,2); A_{C2} - зменшення опору ізоляції кабелю при включенні відгалуження (0,75). У дужках зазначена ймовірність появи події A_i при комутації відгалуження мережі, стосовно до апарата захисту типу АЗУР-4.

Для кількісної оцінки дерева подій отримана ймовірнісна модель виникнення помилкового спрацьовування дільничного апарата захисту від витоків струму на землю:

$$\begin{aligned}
 P(A_{\text{помилк.спрац.}}) = & 1 - (1 - ((P(A_{12}) + P(A_{13}) - P(A_{12})P(A_{13})) + P(A_{11}) - \\
 & - (P(A_{12}) + P(A_{13}) - P(A_{12})P(A_{13}))P(A_{11}))(1 - P(A_{14})P(A_{15})P(A_{16})) * \\
 & * (1 - ((P(A_{22}) + P(A_{23}) - P(A_{22})P(A_{23})) + P(A_{21}) - (P(A_{22}) + P(A_{23}) - \\
 & - P(A_{22})P(A_{23}))P(A_{21}))(1 - P(A_{24})P(A_{25})P(A_{26})) * \\
 & * (1 - ((P(A_{32}) + P(A_{33}) - P(A_{32})P(A_{33})) + P(A_{31}) - (P(A_{32}) + P(A_{33}) - \\
 & - P(A_{32})P(A_{33}))P(A_{31}))(1 - P(A_{34})P(A_{35})P(A_{36}))(1 - (1 - P(A_{C1})P(A_{C2}))
 \end{aligned} \tag{8}$$

Підставивши в залежність (8) ймовірності виникнення окремих подій, отримаємо результат, згідно якого при комутації кабельного відгалуження типового шахтного низьковольтного дільничного електротехнічного комплексу ймовірність помилкового спрацьовування апарата захисту серії «АЗУР» становить $P(A_{\text{помилк.спрац.}}) = 0,06$. Це є ґрунтацією для вжиття заходів із зменшення впливу перехідних процесів електромережі на оперативний ланцюг апаратів захисту від витоків струму на землю серії «АЗУР».

Висновки.

Обґрунтовано методику визначення ймовірності помилкового спрацьовування апарата захисту від витоків струму на землю, що враховує конкретні параметри елементів системи, і передбачає використання запропонованої математичної моделі при припущенні про рівномірний розподіл на аналізованому часовому інтервалі моменту виникнення комутації.

Література

1. Дзюбан В.С. Взрывозащищенные аппараты низкого напряжения / В.С. Дзюбан. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 240 с.
2. Анализ параметров и процессов в шахтных электрических сетях / [Шкрабец Ф.П., Шидловская Н.А., Дзюбан В.С., Вареник Е.А.]. – Днепропетровск: Нац. горный ун-т, 2003. – 151 с.
3. Забезпечення безпеки та ефективності шахтних електроустановок / [Вареник Є.О., Випанасенко С.І., Дзюбан В.С., Шидловська Н.А., Шкрабець Ф.П.]; за ред. Г. Г. Півняка. – Дніпропетровськ: Нац. гірничий ун-т, 2004. – 334 с.
4. Маренич К.Н. О влиянии коммутации ответвления шахтной участковой электросети на устойчивость работы аппарата защитного отключения / К.Н. Маренич,

С.А. Руссиян // Наук. праці ДонНТУ. Серія Гірничо-електромеханічна. – 2008.- Вип.16 (142).- С. 191-197.

5. Айвазян С.А. Статистическое исследование зависимостей / С.А. Айвазян. – М.: Металлургия, 1968. – 227 с.

6. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика / А.И. Кобзарь. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 816 с.

7. Руссиян С.А., Головаха Д.В. Вероятностная модель несанкционированного срабатывания аппаратуры защитного отключения при коммутации ответвления сети шахты / С.А. Руссиян, Д.В. Головаха // Збірник науково-методичних робіт кафедри «Вища математика» ДонНТУ. – 2009. – Вип. 6. – С.56-58.

Надійшла до редакції:
29.01.2011

Рекомендовано до друку:
д-р техн. наук, проф. Улітін Г.М.

Abstract

Russiyana S. Determination of False Triggering Probability of the “AZUR” Device Using Mathematical Methods. The mathematical model for determination of false triggering probability of protection device against switching transient caused ground leakage current, which is used in electro technical complex of mine section, is considered. The feasibility of additional measures to reduce the impact of power switching transients on the operational part of protection devices is proved.

Key words: electrotechnical complex, mine section, protection device, leakage current, mathematical model, computation, probability, shutoff protection.

Аннотация

Руссиян С.А. Определение вероятности ложного срабатывания аппарата «АЗУР» математическими методами. Обоснована и исследована математическая модель определения вероятности ложного срабатывания аппарата защиты от утечек тока на землю в электротехническом комплексе участка шахты в результате воздействия коммутационного переходного процесса, доказана целесообразность применения дополнительных мер уменьшения влияния процесса коммутации силовых присоединения на оперативную цепь аппаратов защиты от утечек тока на землю.

Ключевые слова: электротехнический комплекс, участок шахты, аппарат защиты, ток утечки на землю, математическая модель, расчет, вероятность, защитное отключение.

© Руссиян С.А., 2011