

УДК 622.012.2:621.311.1

К.М. Маренич, канд. техн. наук, доц.,
С.В. Василець, канд. техн. наук,
ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

МОДЕЛЮВАННЯ АВТОКОМПЕНСАЦІЇ ЄМНІСНОЇ СКЛАДОВОЇ СТРУМУ ВИТОКУ ПРИ ЗНИЖЕННІ ЧАСТОТИ ЕРС ВИБІГУ ДВИГУНІВ ДІЛЬНИЧНОЇ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖІ

Шляхом моделювання досліджено вплив зниження частоти ЕРС вибігу двигунів дільничної електромережі напругою 660 В на рівень автокомпенсації ємнісної складової струму витоку на землю при різних значеннях коефіцієнта розладу компенсатора.

математична модель, виток струму на землю, дільнична електромережа, кількість електрики, автокомпенсація, частота напруги, асинхронний двигун, ємність ізоляції

Актуальність проблеми та її зв'язок з прикладними задачами. Важкі умови експлуатації електрообладнання на дільницях шахт обумовлюють високу імовірність пошкодження електроізоляційних матеріалів і, як наслідок, виникнення витоків струму на землю [1]. Апарати захисту від витоків струму на землю, що застосовуються в мережах напругою 660В [1, 2], розроблялися у 1970-1980х роках у розрахунку на тогочасні параметри елементів системи. Зокрема, були поширені асинхронні двигуни одиничною потужністю 100-150 кВт, що зумовлювало відносно незначну тривалість існування зворотної ЕРС під час вибігу. На сьогоднішній день одинична потужність асинхронних електродвигунів у вибухозахищеному виконанні досягає 400 кВт, що зумовлює суттєве збільшення тривалості існування ЕРС вибігу. Внаслідок цього знижується ефективність функціонування пристрою автоматичної компенсації у складі апарата захисту від витоків струму на землю, що підвищує імовірність смертельного електроураження людини.

Аналіз досліджень та публікацій. Питанню підвищення ефективності захисту дільничних електромереж шахт від витоків струму на землю присвячені роботи В.С. Дзюбана, В.П. Колосюка, Б.М. Ягудаєва, Ф.П. Шкрабця та інших науковців [1-4]. Були обґрунтовані теоретичні основи та технічні рішення щодо виконання захисного відключення мережі та автокомпенсації ємнісної складової струму витоку в мережах напругою 660 В, а також виявлення та закорочення

пошкодженій фазі в мережах напругою 1140 В. Однак, при побудові пристроїв автокомпенсації не було враховано зміну частоти зворотної ЕРС асинхронних двигунів споживачів під час вибігу, що набуло суттєвого значення з підвищенням одиничної потужності рудникових електродвигунів.

Постановка задачі. Задачею досліджень є уточнення стану кола витоку струму на землю в дільничній електромережі шахти напругою 660 В, яка живить потужні електродвигуни, при наявності пристрою автоматичної компенсації ємнісної складової струму витоку за умови урахування зниження частоти ЕРС вибігу двигунів.

Основний матеріал та результати досліджень. Розглянемо електричну мережу, де напруга від дільничної трансформаторної підстанції (ДТП) типу КТПВ 630/6-0,69 по двом паралельним магістральним кабелям (МК) ЭВТ 3х120+1х10, довжиною 50 м кожний, подається на розподільчий пункт.

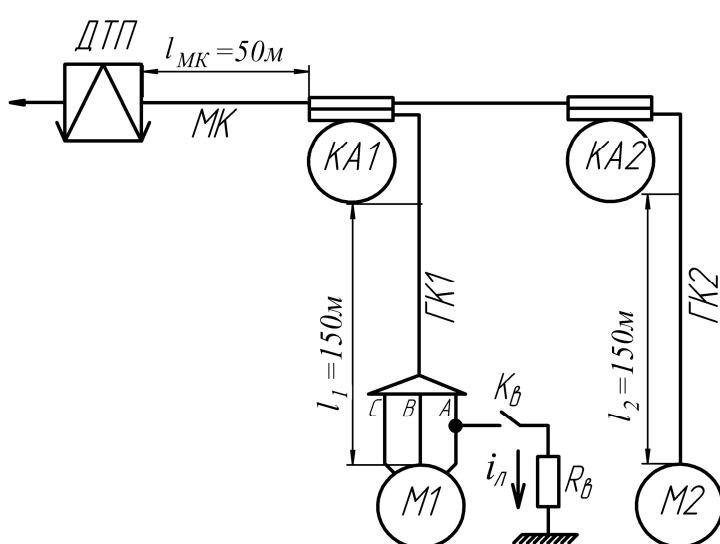


Рисунок 1 - Схема досліджуваної шахтної мережі напругою 660 В

Останній вміщує два пускачі (КА1 та КА2), до яких гнучкими кабелями ГК1 та ГК2 марки КГЭШ 3х95 (довжиною по 50 м) під'єднані вибухозахищені асинхронні двигуни (М1 та М2) ЭКВФ315LA4 номінальною потужністю 200 кВт кожний (рис. 1). Приймається припущення про виникнення з фази А першого відгалуження однофазного витоку струму на землю i_l через опір R_B , що відповідає замиканню ключа K_B .

Математична модель такої мережі складена на основі запропонованої в роботах [5, 6] методики. Зокрема, загальна частина мережі (ДТП з автоматичним вимикачем АВ на виході та МК) описана диференціальним рівнянням (рис. 2, а):

$$\bar{u}_{1e} = \frac{\sqrt{2}U_{\phi}e^{j2\pi ft}}{k_{cx}} - \left(\frac{R_{mp}}{k_{cx}^2} + R_{AB} + R_{МК} \right) \bar{i}_{\Sigma e} - \left(\frac{L_{mp}}{k_{cx}^2} + L_{МК} \right) \bar{\alpha} \frac{d\bar{i}_{\Sigma e}}{dt}, \quad (1)$$

де \bar{u}_{1e} – просторовий вектор напруги на вхідних клеммах комутаційних апаратів відгалужень; k_{cx} – схемний коефіцієнт (при з'єднанні вторинної обмотки дільничного трансформатора за схемою «зірка» $k_{cx}=1$, при схемі «трикутник» $k_{cx}=\sqrt{3}$); R_{AB} – опір фази автоматичного вимикача, для якого, при вимкненні, прийнято припущення про стрибкоподібну зміну від перехідного опору у замкненому стані до опору ізоляції між полюсами при розмиканні.

Відгалуження мережі з одним двигуном описане системою диференціальних рівнянь (рис. 2, б):

$$\begin{cases} \frac{d\bar{\psi}_1}{dt} = \bar{u}_1 - \bar{i}R_1; \\ \frac{d\bar{\psi}_r}{dt} = j\omega\bar{\psi}_r - \bar{i}_rR_r; \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J}(M - M_c), \end{cases} \quad (2)$$

де $\bar{\psi}_1$ – просторовий вектор потокозчеплення статора двигуна та гнучкого кабеля; $\bar{i} = (L_r\bar{\psi}_1 - L_m\bar{\psi}_r) / (L_1L_r - L_m^2)$, $L_1 = k_{cx}^2L_K + L_{sl} + L_m$ – просторовий вектор струму та індуктивність статорного кола двигуна; $R_1 = k_{cx}^2(R_{KA} + R_K) + R_s$ – активний опір статорного кола двигуна, включає опори комутаційного апарата R_{KA} , кабеля R_K та статора R_s .

Струм i_l через опір R_e кола витoku на землю визначається з системи рівнянь (рис. 2, в):

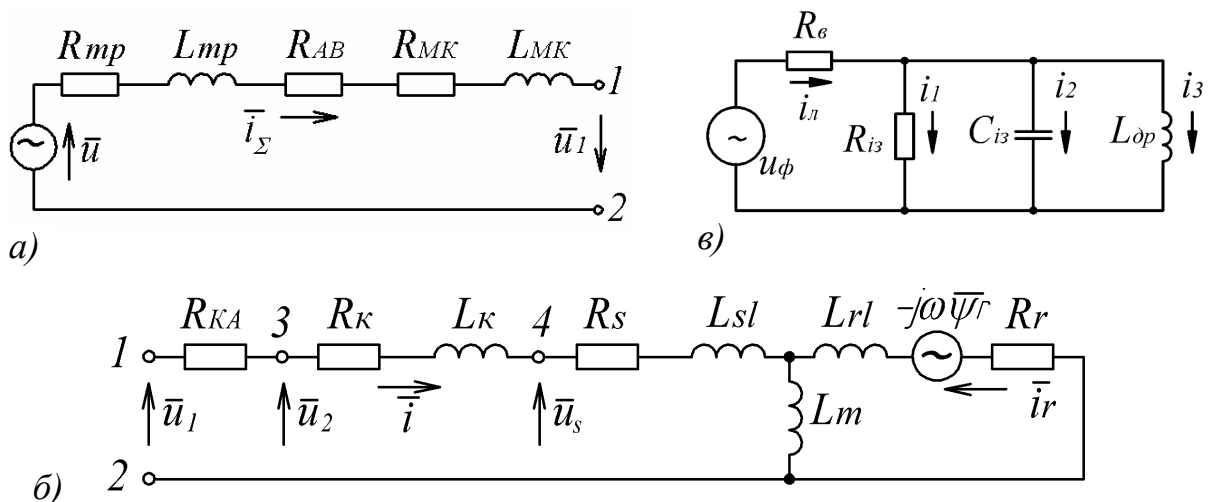


Рисунок 2 - Схеми заміщення: а - загальної частини мережі; б - відгалуження з одним двигуном; в - кола однофазного витoku струму на землю

$$\begin{cases} i_1 = \frac{1}{R_{i3}C_{i3}} \int i_2 dt; \\ i_2 = \frac{1}{R_6} (u_\phi - i_1 R_{i3}) - i_1 - i_3; \\ i_3 = \alpha_{ак} \bar{\beta}_k \int i_4 dt; \\ i_4 = \frac{1}{L_{dp}C_{i3}} \int i_2 dt; \\ i_L = i_1 + i_2 + i_3, \end{cases} \quad (3)$$

де $C_{i3} = 3C_{i3\phi}$; $R_{i3} = R_{i3\phi}/3$ – сукупні ємність та активний опір ізоляції фаз кабелів, що впливають на стан кола витоків; u_ϕ – фазна напруга в місці пошкодження ізоляції; $\alpha_{ак}$ – змінна, що визначає наявність ($\alpha_{ак} = 1$) або відсутність ($\alpha_{ак} = 0$) компенсатора ємнісної складової струму витоків з індуктивністю L_{dp} .

На основі інтегро-диференціальних рівнянь (1)-(3) побудована комп'ютерна модель шахтної електромережі напругою 660 В описаної конфігурації. Комп'ютерне моделювання функціонування системи проводилося у наступній послідовності (рис. 3): а) запуск двигуна М1, при відсутності механічного навантаження на валу, шляхом ввімкнення пускача КА1 у момент t_1 ; б) запуск двигуна М2 за аналогічних умов у момент t_2 ; в) виникнення витоків струму на землю (момент t_3) з наступним захисним відключенням автоматичного вимикача підстанції (t_{AB}).

У моделі системи були враховані наступні фактори, значення яких є випадковими величинами і стосовно яких прийнято припущення про підпорядковування нормальному закону розподілення:

- відносні значення напруг a_1 та a_2 самовільного відключення контакторів пускачів КА1 та КА2 (під час моделювання задавалися наступні параметри розподілення: $m[a_1]=0,2$ в.о., $\sigma[a_1]=0,05$ в.о.; $m[a_2]=0,3$ в.о., $\sigma[a_2]=0,02$ в.о.);

- тривалість захисного відключення мережі при виникненні витоків струму на землю $t_{3\phi}$ ($m[t_{3\phi}]=0,15$ с, $\sigma[t_{3\phi}]=0,02$ с);

- коефіцієнт розладу автокомпенсатора v ($m[v]=0$, $\sigma[v]=0,05$ в.о.);

- нестабільність параметрів компенсуючого дроселя моделювалася шляхом додавання до обчисленого значення індуктивності (з

урахуванням вибіркового значення коефіцієнта розладу) випадкової нормальної величини L_K^* з $m[L_K^*]=0$ та $\sigma[L_K^*]=3,16 \cdot 10^{-2}$ Гн;

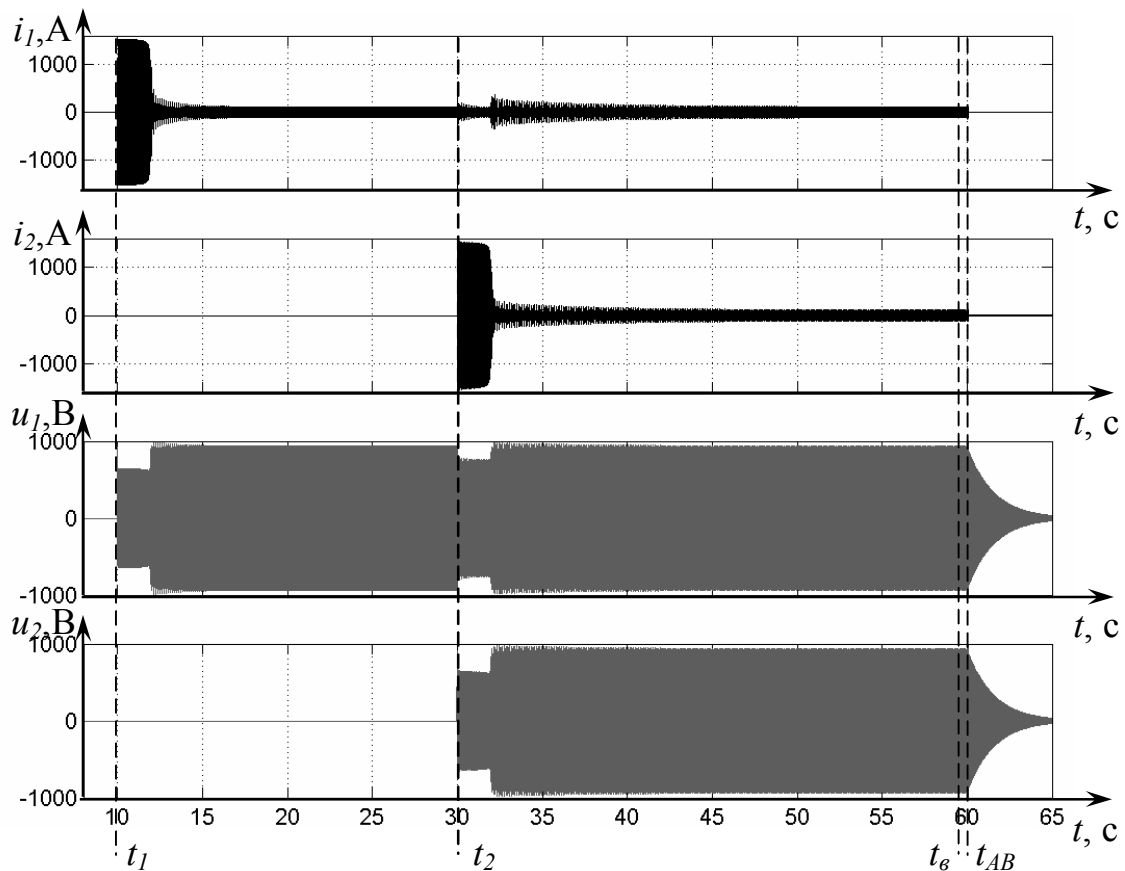


Рисунок 3 - Діаграми лінійних струмів i_1 , i_2 та напруг u_1 , u_2 двигунів М1 та М2 комп'ютерної моделі дільничного електротехнічного комплексу, що функціонують без навантаження: t_1 , t_2 – моменти запуску М1 та М2 відповідно; t_6 , t_{AB} – моменти виникнення витоку струму та відключення автоматичного вимикача підстанції

- нестабільність ємності та активного опору ізоляції кабелів мережі враховувалася шляхом додавання до обчислених (за паспортними даними кабелів) значень цих параметрів випадкових нормальних величин $C_{i3\phi}^*$ ($m[C_{i3\phi}^*]=0$; $\sigma[C_{i3\phi}^*]=5,5 \cdot 10^{-10}$ Ф) та $R_{i3\phi}^*$ ($m[R_{i3\phi}^*]=0$; $\sigma[R_{i3\phi}^*]=2 \cdot 10^3$ Ом) відповідно.

Напруга в мережі після захисного відключення автоматичного вимикача (внаслідок виникнення витоку струму на землю) підтримується зворотньою ЕРС вибігу двигунів, амплітуда якої знижується експоненціально зі сталою часу $T=1,56$ с, а частота – в даному випадку при відсутності механічного навантаження на валах двигунів – лінійно на 16 Гц за інтервал $3T$ (рис. 4, а, б). Після відключення АВ до

момента t_{KA1} відключення комутаційного апарата аварійного відгалуження (в реалізації перехідного процесу, що розглядається, - протягом 2,6 с) ємнісна складова струму витоку (останній підтримується зворотною ЕРС вибігу двигунів) має знижуватися пристроєм автокомпенсації, що входить до складу апарата захисту від витоків струму на землю [1]. Однак, автокомпенсатор налаштований на промислову частоту мережі ($f=50$ Гц). Зі зміною величини f , що відбувається під час вибігу асинхронних двигунів, якість компенсації суттєво знижується. У випадку, що розглядається, під час вибігу двигунів на інтервалі (t_{AB} , t_{KA2}) тривалістю 1,7 с при наявності автокомпенсації амплітуда струму витоку становить 25 мА при опорі кола витоку $R_g=1$ кОм (рис. 4, д). Загальна кількість електрики через опір кола витоку для реалізації перехідного процесу, що розглядається, становить 48 мА·с (рис. 4, е) при максимально припустимому значенні 50 мА·с (ГОСТ 22929–78).

З використанням математичної моделі системи, що розглядається, отримані діаграми миттєвих значень струму витоку при фіксованих значеннях коефіцієнта розладу автокомпенсатора $\nu = \{-0,1; -0,05; 0; 0,05; 0,1\}$ (рис. 5), аналіз яких дозволяє встановити наступне: випадок $\nu < 0$ відповідає збереженню значних величин струму витоку під час вибігу двигунів до відключення комутаційного апарата відгалуження (рис. 5, а, б); при $\nu = 0$ амплітуда струму витоку збільшується відповідно зменшенню частоти напруги мережі (рис. 5, в); при $\nu > 0$ зі зниженням f амплітуда струму витоку знижується практично до нуля (наступає резонанс у контурі «компенсуючий дросель – ємність ізоляції мережі»), після чого підвищується (рис. 5, д, е).

Для визначення впливу параметрів автокомпенсатора на стан кола витоку струму на землю при наявності в системі електродвигунів зі значними сталими часу затухання зворотної ЕРС обертання з використанням комп'ютерної моделі електромережі дільниці шахти напругою 660 В (рис. 1) проведені паралельні дослідження, в результаті чого отримано дві вибірки однакового об'єму ($n_1 = n_2 = n = 50$) значень сукупної кількості електрики, що пройшла через опір кола витоку за час аварійного процесу.

Ці вибірки відповідають різним величинам стандартного відхилення $\sigma[\nu]$ (при нульовому математичному очікуванні $m[\nu]=0$) коефіцієнта розладу автокомпенсатора: в першому випадку (вибірка Q_1) $\sigma[\nu]=0,08$ (рис. 6); у другому (вибірка Q_2) $\sigma[\nu]=0,04$. Отримані вибі-

рки перевірені за критерієм згоди Колмогорова-Смирнова. В обох випадках гіпотеза про нормальне розподілення вибірових даних не була відкинута за рівня значущості 0,05.

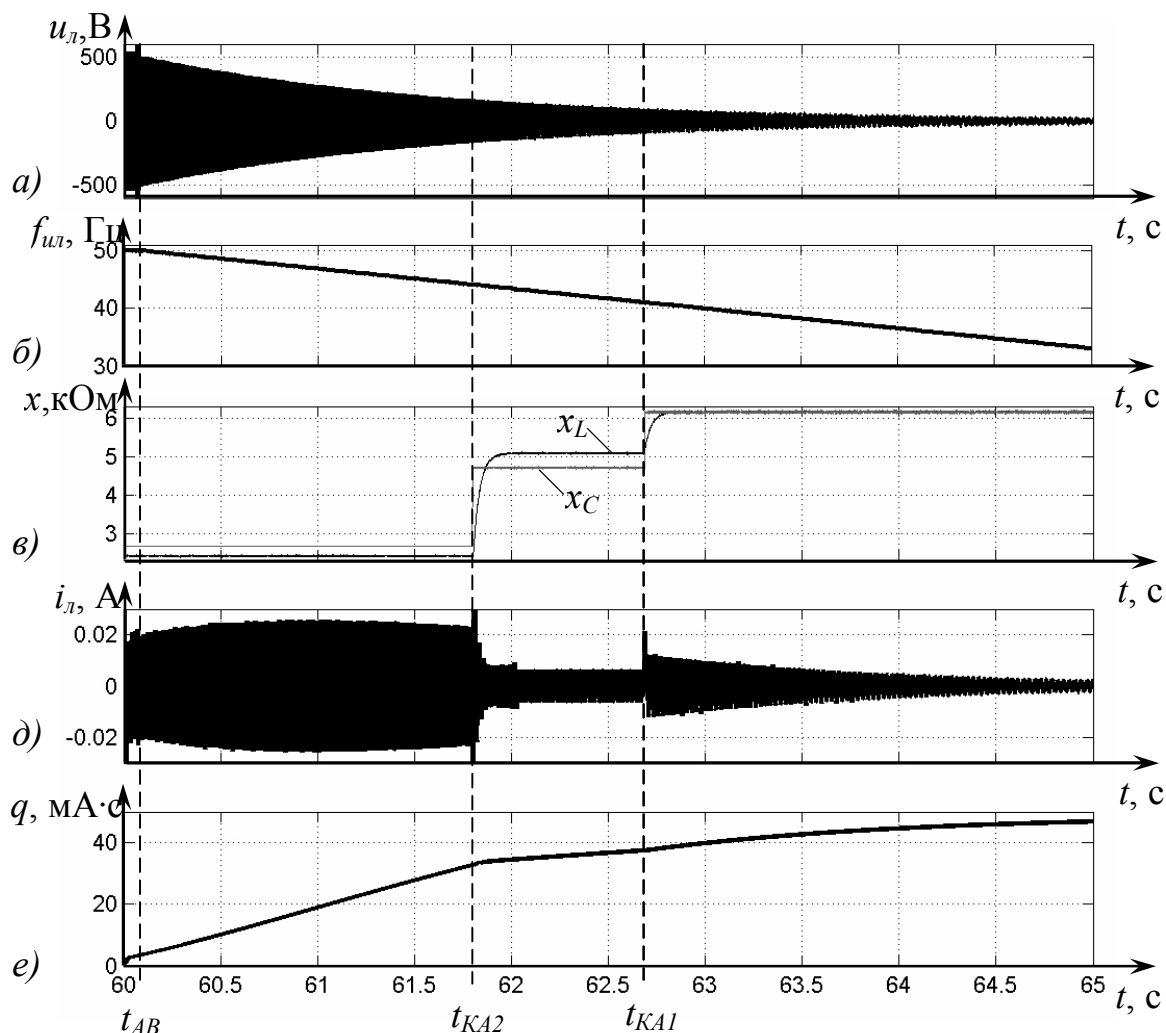


Рисунок 4 - Діаграми, що відображають одну з реалізацій перехідного процесу в системі при виникненні витоку струму на землю в мережі 660 В за умови функціонування двох двигунів ЭКВФ315LA4 без навантаження:

- a* – напруга на колі витоку; *б* – частота напруги на колі витоку;
- в* – ємнісний опір x_C ізоляції фази мережі відносно землі та індуктивний опір x_L автокомпенсатора; *д* – струм однофазного витоку на землю;
- е* – крива накопичення кількості електрики через опір кола витоку

Вибіркові статистики мають наступні значення: для вибірки Q_1 математичне очікування $\hat{m}[Q_1]=37,07$ мА·с, стандартне відхилення $\hat{\sigma}[Q_1]=7,69$ мА·с, дисперсія $\hat{\sigma}^2[Q_1]=59,23$ мА²·с²; для вибірки Q_2 - $\hat{m}[Q_2] = 35,6$ мА·с, $\hat{\sigma}[Q_2]=4,23$ мА·с, $\hat{\sigma}^2[Q_2]=17,91$ мА²·с².

Висунемо стосовно дисперсій генеральних сукупностей Q_1 та Q_2 нульову ($H_0: \sigma^2[Q_1]=\sigma^2[Q_2]$) та альтернативну ($H_1:$

$\sigma^2[Q_1] \neq \sigma^2[Q_2]$) гіпотези. Фактичне значення критерія Фішера становить:

$$F_{\phi} = \frac{\sigma^2[Q_1]}{\sigma^2[Q_2]} = \frac{59,23}{17,91} = 3,3. \quad (4)$$

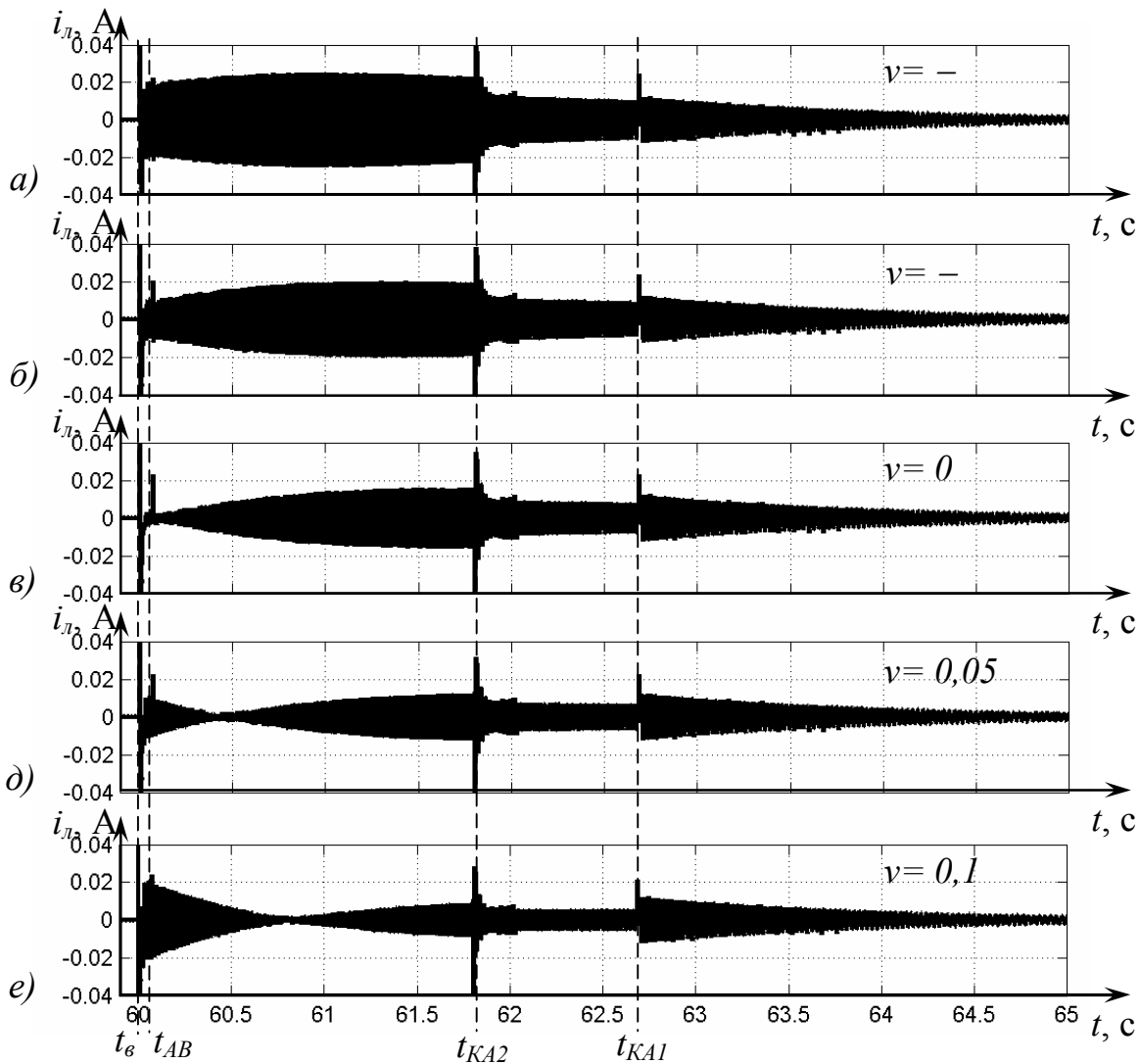


Рисунок 5 - Діаграми струмів витоку на землю при фіксованих значеннях коефіцієнта розладу ν автокомпенсатора, отримані шляхом моделювання: а) $\nu = -0,1$; б) $\nu = -0,05$; в) $\nu = 0$; д) $\nu = 0,05$; е) $\nu = 0,1$.

Критичне значення даного критерія при рівні значущості $\alpha = 0,05$ та степенях свободи $k_1 = k_2 = n - 1 = 49$ становить:

$$F_{кр} \left(\frac{\alpha}{2}, k_1, k_2 \right) = F_{кр} \left(\frac{0,05}{2}, 49, 49 \right) = 1,76. \quad (5)$$

Оскільки $F_{\phi} > F_{кр}$, то H_0 відкидається, тобто дисперсії отриманих вибірок не можна вважати однорідними.

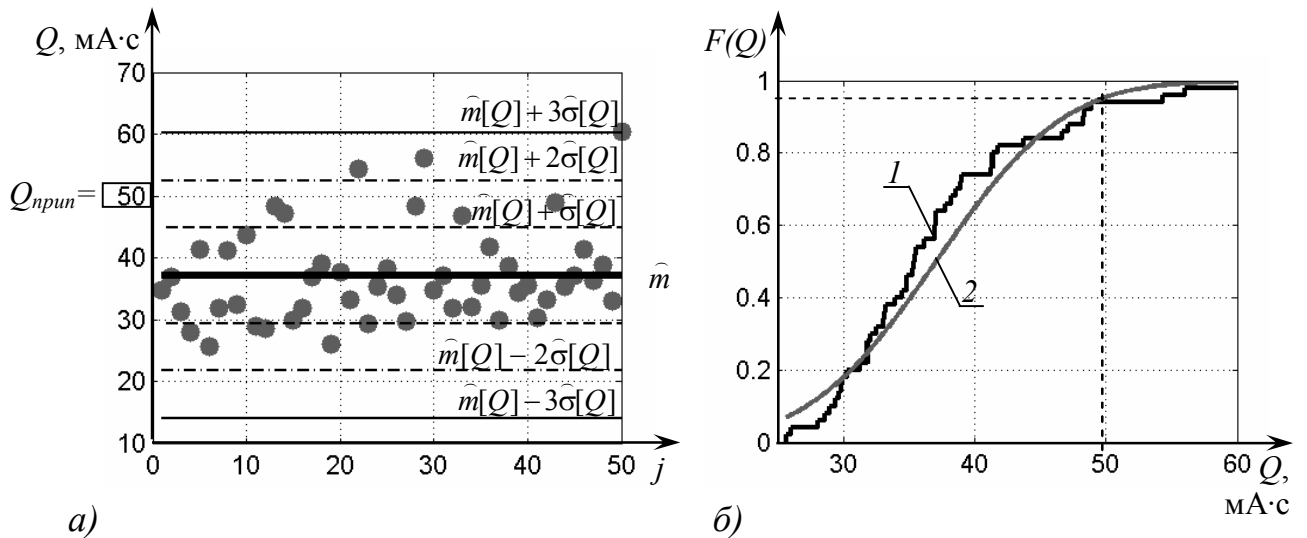


Рисунок 6 - Вибіркові значення сукупної кількості електрики Q через опір 1 кОм кола витoku в мережі напругою 660 В за наявності автокомпенсації ($m[v]=0$, $\sigma[v]=0,08$) ємнісної складової струму витoku (а), отримані в результаті моделювання, а також емпірична 1 функція розподілення $F(Q)$ цих значень (б) та відповідна теоретична функція розподілення 2

Для порівняння середніх двох нормальних вибірок при нерівних дисперсіях (задача Беренса-Фішера [7]) висунемо нульову ($H_0: m[Q_1] = m[Q_2]$) та альтернативну ($H_1: m[Q_1] \neq m[Q_2]$) гіпотези. Скористаємося статистикою:

$$t = \frac{\hat{m}[Q_1] - \hat{m}[Q_2]}{\sqrt{\frac{\hat{\sigma}^2[Q_1]}{n_1} + \frac{\hat{\sigma}^2[Q_2]}{n_2}}} = \frac{37,07 - 35,6}{\sqrt{\frac{59,23}{50} + \frac{17,91}{50}}} = 1,18. \quad (6)$$

Нульова гіпотеза H_0 буде відкинута при рівні значущості α , якщо $t > t'_{\alpha/2}$, де значення квантіля $t'_{\alpha/2}$ може бути обчислено за критерієм Кохрена-Кокса:

$$t'_{\alpha/2} = \frac{\frac{\hat{\sigma}^2[Q_1]}{n_1} \cdot t_{\alpha/2}(n_1 - 1) + \frac{\hat{\sigma}^2[Q_2]}{n_2} \cdot t_{\alpha/2}(n_2 - 1)}{\frac{\hat{\sigma}^2[Q_1]}{n_1} + \frac{\hat{\sigma}^2[Q_2]}{n_2}}, \quad (7)$$

де $t_{\alpha/2}(n_2 - 1)$ - квантіль розподілення Ст'юдента.

При рівні значущості $\alpha = 0,05$ маємо $t'_{0,025} = 2,01$. Оскільки $t < t'_{\alpha/2}$, то немає підстав відкидати нульову гіпотезу про тотожність

математичних очікувань вибірок Q_1 та Q_2 . Це свідчить про відсутність впливу на величину математичного очікування сукупної кількості електрики через опір кола витoku струму на землю величини стандартного відхилення $\sigma[v]$ коефіцієнта розладу автокомпенсатора при $m[v]=0$.

Висновки і напрямки подальших досліджень.

Тривалість існування перехідної складової струму витoku на землю в дільничній електромережі шахти, що обумовлена ЕРС вибігу ненавантажених потужних асинхронних двигунів, може досягати декількох секунд, що суттєво перевищує максимально припустиму тривалість захисного відключення мережі при виникненні витoku струму на землю.

В мережах напругою 660 В ефективне зниження величини такої перехідної складової струму витoku на землю має виконувати пристрій автокомпенсації ємнісної складової струму витoku. Однак, ефективність функціонування останнього знижується через зменшення частоти ЕРС вибігу асинхронного двигуна.

Шляхом математичного моделювання уточнено стан кола витoku струму на землю при фіксованих значеннях коефіцієнта розладу автокомпенсатора з діапазона $\pm 0,1$ при врахуванні зниження частоти ЕРС вибігу двигунів.

Врахування комплексу випадкових факторів дало змогу провести паралельні імітаційні дослідження на моделі системи, статистична обробка результатів яких дала змогу встановити відсутність впливу на величину математичного очікування сукупної кількості електрики через опір кола витoku струму на землю величини стандартного відхилення коефіцієнта розладу автокомпенсатора (за нульового математичного очікування даного параметра) при наявності в системі ненавантажених потужних двигунів, частота ЕРС вибігу яких знижується.

В ході подальших досліджень доцільно обґрунтувати аналітичні залежності для обрахування величини струму витoku при наявності в системі автокомпенсації з урахуванням зниження частоти ЕРС вибігу сукупності потужних асинхронних двигунів.

Список літератури

1. Колосюк В.П. Защитное отключение рудничных электроустановок / В. П. Колосюк. – М.: Недра, 1980. – 334 с.
2. Ягудаев Б.М. Защита от электропоражения в горной промышленности / Б. М. Ягудаев, Н. Ф. Шишкин, В. В. Назаров. – М.: Недра, 1982. – 152с.

3. 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.
4. 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.
1. 5. Маренич К.М. Обґрунтування ефективності нейтралізації зворотньої ЕРС двигунів як способу підвищення безпеки експлуатації електротехнічного комплексу дільниці шахти / К. М. Маренич, С. В. Василець // Технічна електродинаміка. – 2009. – №2. – С. 42–47.
5. Маренич К. М. Уточнення стану ланцюга однофазного витоку струму на землю в умовах електротехнічного комплексу дільниці шахти після захисного відключення мережі / К. М. Маренич, С. В. Василець // Праці Луганського відділення Міжнародної академії інформатизації. – Луганськ: СНУ ім. В. Даля, 2008. – №2 (17). – С. 71-74.
6. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика / А.И. Кобзарь. - М.: Физматлит, 2006. — 816 с.

К.М. Маренич, С.В. Василець. Моделювання автокомпенсації ємнісної складової струму витоку при зниженні частоти ЕРС вибігу двигунів дільничної електромережі. Шляхом моделювання досліджено вплив зниження частоти ЕРС вибігу двигунів дільничної електромережі напругою 660 В на рівень автокомпенсації ємнісної складової струму витоку на землю при різних значеннях коефіцієнта розладу конденсатора.

математична модель, виток струму на землю, дільнична електромережа, кількість електрики, автокомпенсація, частота напруги, асинхронний двигун, ємність ізоляції

K. Marenych, S. Vasylets. Self-compensation of Leakage Current Capacitive Component Modelling in Case of Motor Back EMF Frequency Decreasing in Power Network of Mine Section. The influence of motor back EMF frequency decreasing on the level of self-compensation of leakage current capacitive component by modelling was analysed for different values of compensator mismatching factor in 660 V power network of mine section.

mathematical model, leakage current, power network of mine section, quantity of electricity, self-compensation, voltage frequency, induction motor, isolation capacity

Стаття надійшла до редколегії 19.10.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф. каф. «Гірнична електротехніка та автоматика ім. Р.М.Лейбова» С.Б. Ковальов

© Маренич К.М., Василець С.В., 2010