

УДК 621.647.1:621.316.1

К.М. Маренич, канд. техн. наук, доц.**І.В. Ковальова**, аспірант

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ В ЖИВЛЯЧОМУ КАБЕЛІ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО КОМПЛЕКСА ДІЛЬНИЦІ ШАХТИ

Розроблена математична модель дільничного шахтного електротехнічного комплексу, що містить приєднання з короткозамкненим асинхронним двигуном. Проаналізовані перехідні процеси в разі виникнення міжфазних (трифазних і двофазних) коротких замикань в кабелі живлення, обумовлені дією зворотної ЕРС обертання двигуна споживача.

шахтна електрична мережа, міжфазне коротке замикання, перехідний процес, електричні параметри, асинхронний двигун

Постановка задачі та її актуальність. Не стаціонарність технологічного обладнання видобувної дільниці шахти потребує застосування гнучких кабелів для електроживлення приводних асинхронних двигунів споживачів. Отже, саме гнучкий кабель є тим об'єктом, який є найменш захищеним від механічного впливу з боку устаткування і оточуючого середовища в обмеженому просторі гірничих виробок. Результатом такого впливу стає пошкодження оболонки кабелю з подальшим пошкодженням ізоляції силових жил, або внутрішнє пошкодження ізоляції цих жил оголеною жилою заземлення в разі значного стиснення оболонки кабелю стороннім об'єктом. В обох випадках мова йде про неприпустимий режим експлуатації, розвитком якого є міжфазне коротке замикання, небезпечне за фактором пожежі, або вибуху метано-повітряної суміші [1]. Підвищення продуктивності технологічних установок обумовлює застосування електрообладнання із зниженими електричними опорами (трансформаторні підстанції та асинхронні двигуни (АД) підвищеної потужності, гнучкі кабелі підвищеного перетину). Крім того, актуальним питанням сьогодення є збільшення величини номінальної напруги шахтного дільничного електротехнічного комплексу (ЕТК) до 3,3 кВ, Все це обумовлює суттєве підвищення величини струму міжфазного короткого замикання і ще більш загострює проблематику підвищення швидкодії знеструмування місця к.з. в кабелі електромережі [2]. Збільшення довжин кабельних ліній підвищує ймовірність пошкодження окремих кабелів,

що також обумовлює актуальність удосконалення засобів максимального струмового захисту. Сучасні захисні засоби виконують функцію автоматичного відключення пошкодженого приєднання з боку живлячої трансформаторної підстанції, але це стає недостатнім для припинення струму короткого замикання в місці пошкодження кабелю живлення АД. Причина полягає у наявності зворотної ЕРС обертання раніш ввімкненого АД аварійного приєднання, який переходить до режиму вибігу і стає джерелом зворотного енергетичного потоку, що підживлює ланку короткого замикання. Цим обумовлена актуальність дослідження характеру впливу енергетичного потоку АД на точку короткого замикання та виявлення відповідного інформаційного параметру з метою створення засобу автоматичного усунення дії зворотної ЕРС асинхронного двигуна.

Аналіз досліджень і публікацій. Класична теорія короткого замикання зосереджується на розгляді перехідного процесу, яким супроводжується виникнення цього аварійного стану і представляє струм к.з. як сукупність його періодичної та аперіодичної складових, отримала розвиток у роботі [3], де особлива увага приділяється розподілу енергетичних потоків в разі виникнення к.з. в кабельній лінії. В роботі [4] обґрунтована математична модель процесу к.з. в шахтній дільничній електромережі, а отримані у [5] діаграми зміни струму в аварійному приєднанні підтверджують високий рівень початкових струмів в точці к.з., що обумовлені дією ЕРС обертання АД. Проте, відсутньою є цілісна математична модель дільничного ЕТК, яка б дозволяла аналізувати процеси при виникненні міжфазних коротких замикань з подальшим захисним відключенням мережі. Дана робота присвячена обґрунтуванню структури та параметрів такої математичної моделі.

Постановка задачі. Задачею дослідження є обґрунтування структури та параметрів математичної моделі електротехнічного комплексу дільниці шахти, яка, враховуючи сукупність факторів впливу, дозволить аналізувати процеси в дільничному ЕТК під час виникнення міжфазного короткого замикання в кабелі живлення АД з урахуванням факторів впливу з боку зворотних енергетичних потоків електричних машин.

Основний матеріал і результати дослідження. Обґрунтування математичної ЕТК дільниці шахти передбачає використання диференціальних рівнянь елементів об'єкта дослідження. В цьому разі доці-

льно скористатись методом просторового вектора [6], коли спільна дія всіх трьох фаз виражається єдиною комплексною величиною:

$$\bar{x} = \frac{2}{3} (x_a + a \cdot x_b + a^2 \cdot x_c) \quad (1)$$

де x_a, x_b, x_c - миттєві значення величини x трифазної системи; $a = e^{j120^\circ}$ - фазовий множник.

На схемі заміщення відгалуження асинхронного двигуна (рис.1) позначено: \bar{u}_1 - просторовий вектор напруги мережі; R_k, L_k - активний опір та індуктивність гнучкого кабелю; R_{KA} - активний опір комутаційного апарату; R_s, R'_r - активні опори фази статора та ротора (приведеного до статора), відповідно; L_{sl}, L'_{rl} - індуктивності статора та ротора (приведеного до статора), відповідно; L_m - індуктивність, що обумовлена головним магнітним потоком; $\bar{\psi}_r$ - просторовий вектор потокозчеплення ротора; ω - швидкість обертання ротора двигуна; \bar{i}_1, \bar{i}_r - просторові вектори струму у статорному колі та струму ротора двигуна, відповідно. Розрахунки відносяться до двигунів із з'єднанням обмоток за схемою «зірка» (Y).

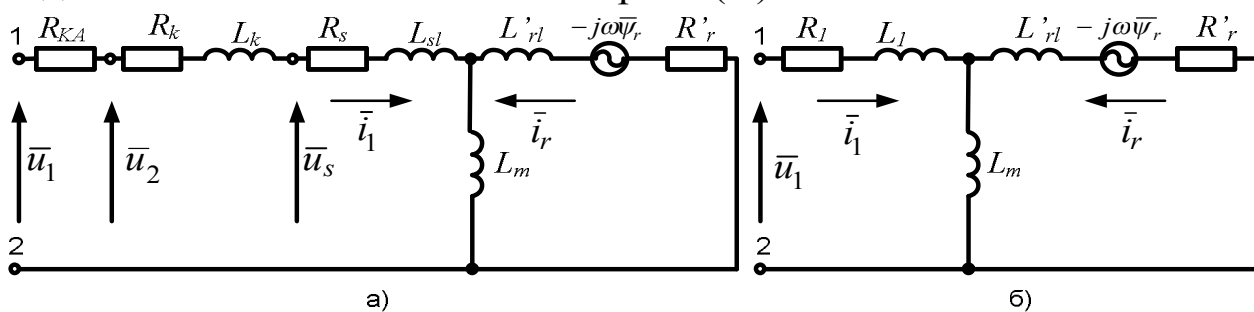


Рис. 1 – Схема заміщення відгалуження АД: а) вихідна; б) розрахункова

На розрахунковій схемі (рис.1 б) позначено:

$$R_1 = R_{KA} + R_k + R_s \quad (2)$$

$$L_1 = L_k + L_{sl} + L_m \quad (3)$$

Дослідження процесів в асинхронному двигуні методом складових α і β є доцільним, коли в разі симетрії ротора має місце несиметрія статора. В цьому разі електричні параметри записуються в системі координат статора (нерухомій), дійсна вісь якої співпадає з віссю статорної обмотки фази А. Просторові вектори розкладаються на вісі α і β :

$$\bar{u}_1 = u_{1\alpha} + ju_{1\beta} \quad (4)$$

$$\bar{\psi}_1 = \psi_{1\alpha} + j\psi_{1\beta}; \bar{\psi}_r = \psi_{r\alpha} + j\psi_{r\beta} \quad (5)$$

$$\bar{i}_1 = i_{1\alpha} + ji_{1\beta}; \bar{i}_r = i_{r\alpha} + ji_{r\beta} \quad (6)$$

де $\bar{\psi}_s, \bar{\psi}_r$ - вектори потокозчеплення статорного кола та ротора, відповідно.

Відповідно до наведеної схеми заміщення (рис.1б) згідно законів Кірхгофа, запишемо рівняння електричної рівноваги у нерухомій системі координат із додаванням основного рівняння динаміки двигуна:

$$\begin{cases} \psi_{s\alpha} = \int (u_{s\alpha} - i_{1\alpha} R_s) dt + \psi_{s\alpha}(0); \\ \psi_{s\beta} = \int (u_{s\beta} - i_{1\beta} R_s) dt + \psi_{s\beta}(0); \\ \psi_{r\alpha} = \int (-i_{r\alpha} R_r - \omega \psi_{r\beta}) dt + \psi_{r\alpha}(0); \\ \psi_{r\beta} = \int (-i_{r\beta} R_r + \omega \psi_{r\alpha}) dt + \psi_{r\beta}(0); \\ \omega = \frac{1}{J} \int (M - M_c) dt + \omega(0); \end{cases} \quad (7)$$

де J – момент інерції двигуна; M_c – момент навантаження; M – електромагнітний момент двигуна:

$$M = \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_s L'_r} \bar{\psi}_r \times \bar{\psi}_s = \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_s L'_r} (\psi_{r\alpha} \psi_{s\beta} - \psi_{r\beta} \psi_{s\alpha}) \quad (8)$$

$$L_s = L_{sl} + L_m \quad (9)$$

$$L_r = L'_{rl} + L_m \quad (10)$$

L'_r - перехідна індуктивність ротора:

$$L'_r = L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \quad (11)$$

$$i_{1\alpha} = \frac{L_r \cdot \psi_{s\alpha} - L_m \cdot \psi_{r\alpha}}{L_s \cdot L_r - L_m^2}; i_{1\beta} = \frac{L_r \cdot \psi_{s\beta} - L_m \cdot \psi_{r\beta}}{L_s \cdot L_r - L_m^2} \quad (12)$$

$$i_{r\alpha} = \frac{L_s \cdot \psi_{r\alpha} - L_m \cdot \psi_{s\alpha}}{L_s \cdot L_r - L_m^2}; i_{r\beta} = \frac{L_s \cdot \psi_{r\beta} - L_m \cdot \psi_{s\beta}}{L_s \cdot L_r - L_m^2} \quad (13)$$

Наведені вирази відповідають дво полюсній асинхронній машині [6]. В процесі дослідження багатополусної машини механічні пара-

метри мають бути перераховані до еквівалентної двополюсної машини.

Колова швидкість:

$$\omega = p\omega' \quad (14)$$

Обертаючий момент:

$$M = M'/p \quad (15)$$

Момент інерції:

$$J = J'/p^2 \quad (16)$$

де p – число пар полюсів асинхронної машини; дійсні параметри позначені рискою.

Просторовий вектор напруги в мережі визначається виразом:

$$\bar{u}_1 = (R_{KA} + R_k)\bar{i}_1 + L_k \frac{d\bar{i}_1}{dt} + \bar{u}_s \quad (17)$$

$$u_{1\alpha} = U_m \cos(\omega t); u_{1\beta} = U_m \sin(\omega t) \quad (18)$$

Залежності (4) - (18) являють собою математичну модель електротехнічного комплексу, що містить приєднання, навантажене асинхронним двигуном, яка дозволяє досліджувати процеси при виникненні міжфазних коротких замикань в кабелі живлення.

В разі виникнення трифазного короткого замикання напруга в місці пошкодження кабелю дорівнює нулю ($u_{2\alpha} = 0; u_{2\beta} = 0$), статор стає короткозамкненим, та його потокозчеплення в перший момент залишається незмінним, що призводить до виникнення короточасної безструмової паузи на ділянці між точкою пошкодження кабелю та АД.

Найбільш істотна різниця між трифазним та двофазним коротким замиканням полягає в тому, що двигун при двофазному замиканні залишається з'єднаним з живлячою мережею через неушкоджену фазу, та сталий струм двофазного к.з. не дорівнює нулю, на відміну від сталого струму трифазного к.з. Двофазне коротке замикання характеризується тим, що фаза А приєднання знеструмлена ($i_{1\alpha} = 0; \bar{i}_1 = j\bar{i}_{1\beta}$), а напруга між фазами В і С відсутня ($u_{2\beta} = 0; u_b = u_c; \bar{u}_2 = u_{2\alpha}$).

При заданих початкових умовах система (7) може бути вирішена чисельними методами із використанням засобів комп'ютерного моделювання з урахуванням конкретних параметрів системи. Зокрема,

мають бути введені наступні припущення: номінальна напруга живлення – 660 В частоти 50 Гц; потужність АД становить 220 кВт (що відповідає машині типу 2ЭКВ4УС2, паспортні данні якої наведені в [7]); момент на валу двигуна приймається сталою величиною, що дорівнює номінальному значенню. Тип дільничної підстанції - КТПВ-630; гнучкий екранований кабель (марки КГЭШ) живлення АД довжиною 300 м, перетин силових жил - 70 мм² [7]. Вважатимемо, що в разі виникнення короткого замикання максимальний струмовий захист подасть команду на відключення напруги живлення за 0,1 с.

Згідно розробленої математичної моделі, з урахуванням введених припущень побудована комп'ютерна модель, яка дозволяє отримати величину струму в статорному колі АД при виникненні різних видів короткого замикання. Моделювання має проводитись у наступній послідовності: до моменту часу $t_1 = 3$ с двигун працював у штатному режимі. У момент t_1 виникає коротке замикання в кабелі живлення АД (приймаємо, що пошкодження сталось посередині). У момент часу $t_2 = 3,1$ с комутаційний апарат відключається за командою від максимального струмового захисту. При виникненні двофазного замикання, що переходить до трифазного - наступне пошкодження третьої фази має місце у момент часу $t_1' = 3,05$ с. Отримані діаграми струмів в мережі статора АД наведені на рис. 2, рис. 3.

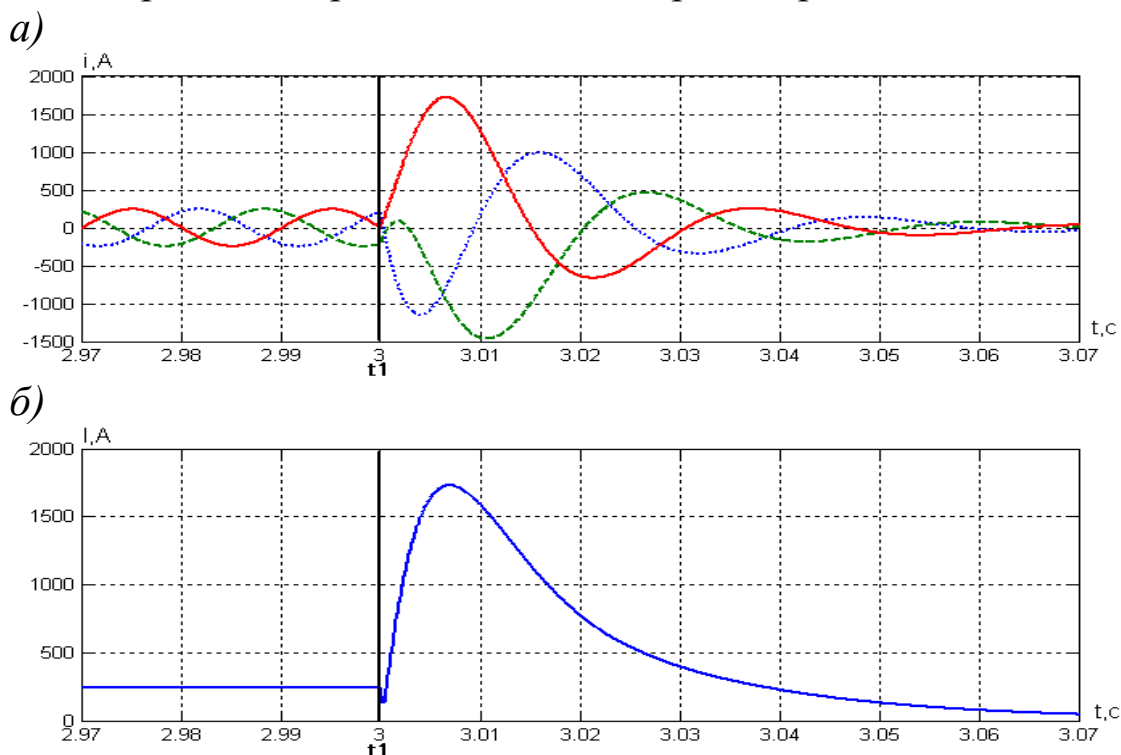


Рис. 2 – Діаграми, отримані в результаті моделювання трифазного к.з. в кабелі: а) миттєві значення струмів в колі статора АД; б) діюче значення струму в колі статора АД

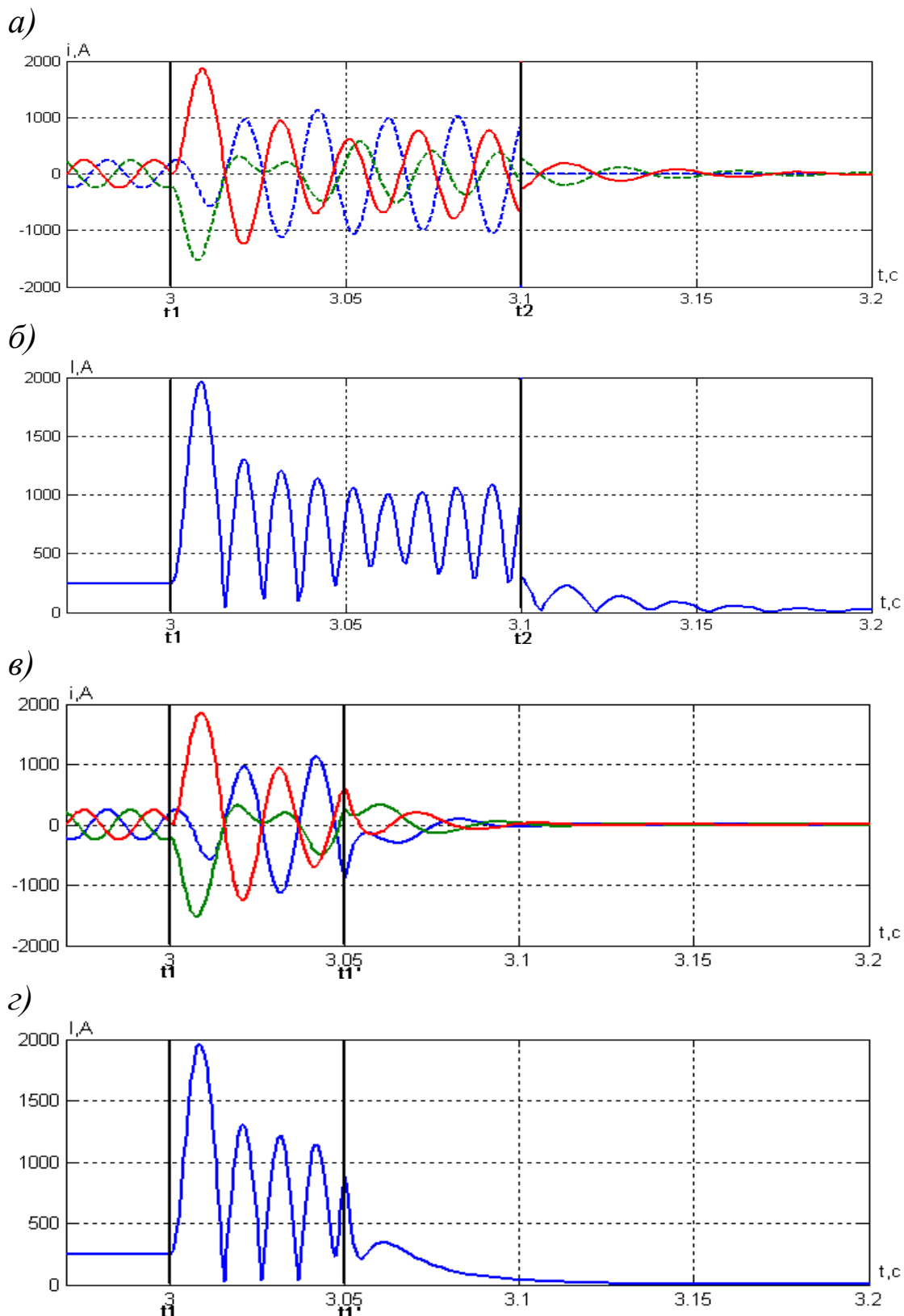


Рис. 3 – Діаграми, отримані в результаті моделювання двофазного к.з. в кабелі: а) миттєві значення струмів в колі статора АД; б) діюче значення струму в колі статора АД; в) миттєві значення струмів в колі статора АД при двофазному та подальшому трифазному к.з. в кабелі; г) діюче значення струму в колі статора АД при двофазному та подальшому трифазному к.з. в кабелі

Аналіз діаграм дозволяє встановити наступне. До моменту t_1 виникнення короткого замикання робота двигуна визначається характером його навантаження. З моменту t_1 в разі виникнення двофазного замикання і до моменту t_2 відключення контактора, в статорному колі протікає струм, обумовлений напругою живлення електромережі (через неушкоджену фазу А) та параметрами живлячого кабелю і асинхронного двигуна (рис.3а,б). У момент t_2 модельного часу відбувається відключення комутаційного апарату, АД переходить до режиму вибігу, і струм в колі його статора визначається тільки його ЕРС та параметрами кабелю живлення. Якщо у момент t_1' відбувається пошкодження третьої фази, двигун одночасно переходить до вищевказаного режиму (рис. 3 в,г).

В разі утворення трифазного к.з. водночас із пошкодженням кабелю (рис. 2) з моменту t_1 двигун перестає отримувати живлення від трансформаторної підстанції та переходить до режиму вибігу. В цей момент виникає короткочасне інтенсивне зменшення струму з подальшим підвищенням. Дослідження параметрів цього процесу залежно від впливових факторів представляє практичний інтерес.

З метою встановлення характеру впливу параметрів ЕТК на процес формування струму у статорному колі АД має бути обґрунтований вибір зміни впливових факторів. Довжина кабелю до місця пошкодження змінюється в межах $0 \div 300$ м з перетином силових жил: 70 мм^2 ; 95 мм^2 ; навантаження кабелю представлено асинхронним двигуном наступного типажного ряду потужностей: 180 кВт, 220 кВт; момент на валу двигуна в попередньому режимі дорівнює $0 \div 100\%$ від номінального значення. Це є найбільш типовим для схемотехніки сучасних шахтних дільничних ЕТК. Моделювання з введенням прийнятих параметрів дозволило отримати діаграми, наведені на рис. 4, рис. 5.

Результатами дослідження встановлено, що амплітудне значення та термін існування короткочасного інтенсивного зменшення статорного струму залежить від параметрів живлячого кабелю (його перетину та довжини), потужності двигуна споживача (опору його статорних обмоток) та характеру навантаження на валу АД в рушійному режимі, що передував стану короткого замикання.

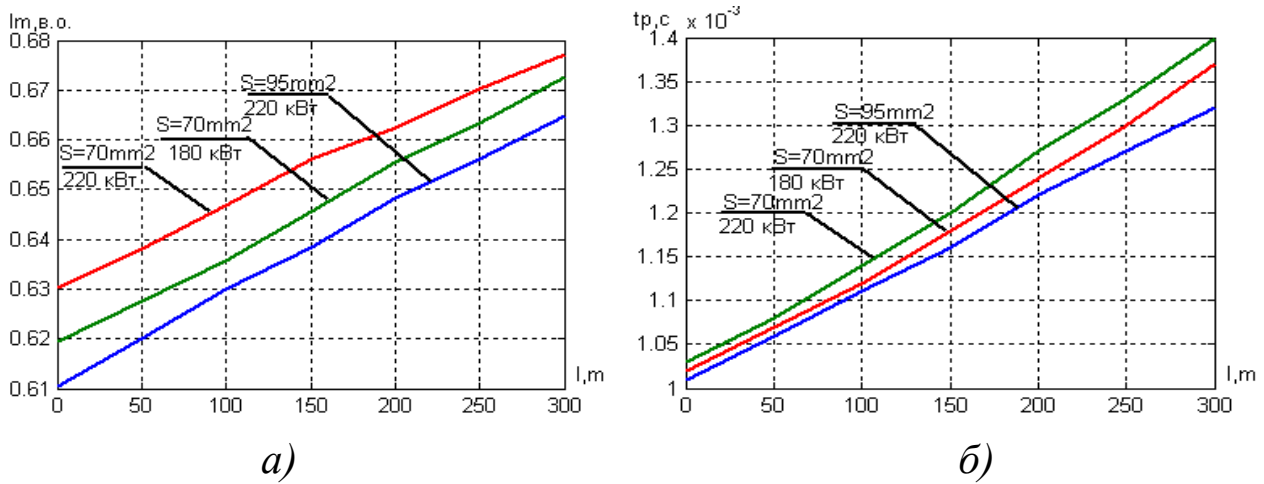


Рис. 4 - Діаграми амплітуд $i_{lm}=f(L)$ (а) та тривалостей $t_p = f(L)$ (б) короткочасного інтенсивного зменшення струму у статорному колі АД в момент виникнення трифазного короткого замикання

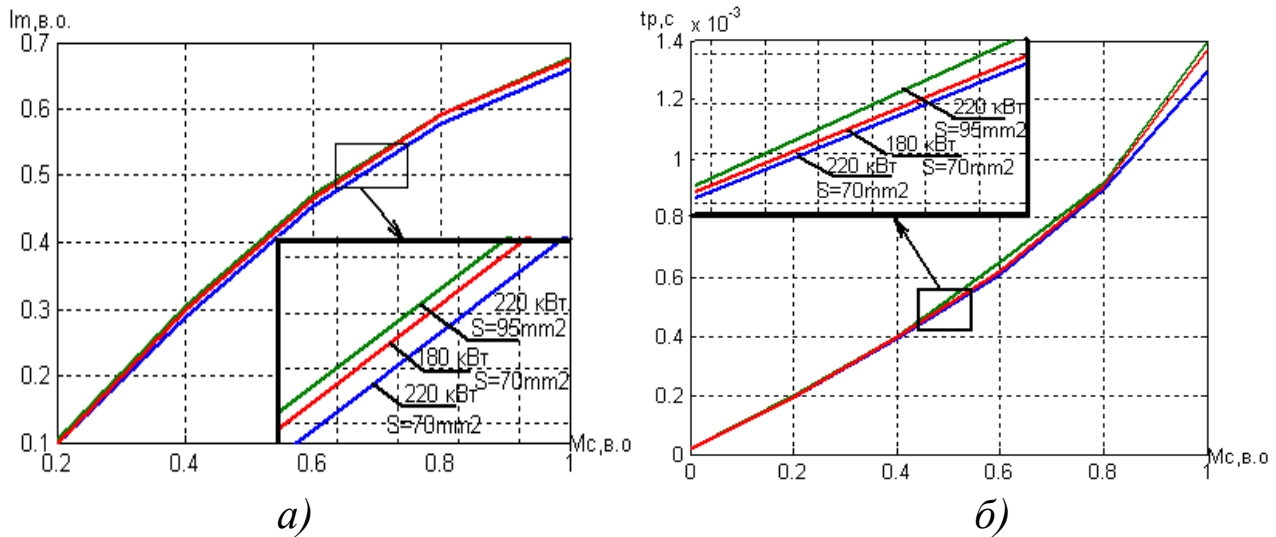


Рис. 5 - Діаграми амплітуд $i_{lm}=f(M_c)$ (а) та тривалостей $t_p = f(M_c)$ (б) короткочасного інтенсивного зменшення струму у статорному колі АД в момент виникнення трифазного короткого замикання

Висновки і напрями подальших досліджень. Виконаними дослідженнями обґрунтовано структуру та параметри математичної моделі електротехнічного комплексу дільниці шахти, яка дозволяє аналізувати процеси в дільничній електромережі під час виникнення міжфазного короткого замикання в кабелі живлення АД з урахуванням подальшого захисного відключення напруги живлення та факторів впливу з боку зворотних енергетичних потоків електричних машин. Модель дозволяє встановити реальні параметри формування струму в статорному колі в залежності від конфігурації та параметрів

ЕТК. Отримані результати обґрунтовують доцільність розробки технічних рішень щодо примусового припинення дії зворотних ЕРС асинхронних двигунів споживачів в разі виникнення міжфазних коротких замикань та після захисного відключення мережі. Встановлено, що в якості інформаційного параметру, що свідчить про початок процесу трифазного короткого замикання в кабелі живлення АД є короточасне зменшення струму його статора із подальшим інтенсивним збільшенням. Моделюванням встановлена закономірність зміни цих параметрів у залежності від довжин та перетинів кабелів мережі, потужностей застосованих асинхронних двигунів та величин їхнього навантаження. Встановлено також, що виникнення двофазного короткого замикання в кабелі вищезазначеним інформаційним параметром не супроводжується.

Напрямом подальшого дослідження слід вважати обґрунтування технічних рішень із виявлення імовірних аварійних станів кабелю живлення АД і примусового усунення його зворотного енергетичного потоку водночас із захисним відключенням.

Список джерел:

1. Демченко О.А. Обоснование мер предотвращения взрывов при эксплуатации гибких силовых кабелей на угольных шахтах: дис. канд. техн. наук: 05.26.01 / Олег Александрович Демченко. – Макеевка, 2011. – 194 с.
2. Дзюбан В.С. Требования к взрывозащищённому электрооборудованию в системах электроснабжения горных машин на напряжение 3 (3,3) кВ / В.С. Дзюбан, Н.М. Басов // Взрывозащищённое электрооборудование: Сб. науч. тр. УкрНИИВЭ. – Донецк: ООО «АИР», 2009. – С.209-213.
3. Перехідні процеси в системах електропостачання: [підр. для вуз. вид.2-е, доправ. та доп.] / Г.Г.Півняк, В.М.Винославський, А.Я. Рибалко, Л.І. Несен; за ред. Академіка НАН України Г.Г.Півняка. – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2002.- 579 с.
4. Маренич К.Н. Обоснование структуры модели процесса короткого замыкания в электро-техническом комплексе участка шахты / К.Н. Маренич, И.В. Ковалёва // Наківі праці Донецького національного технічного університету. Серія гірничо-електромеханічна. – 2006. – Вип. 12(113). – С. 179-185.
5. Маренич К.Н. Обоснование информационного параметра функционирования устройства автоматического подавления ЭДС двигателей при аварийном отключении электросети / К.Н. Маренич, И.В. Ковалёва //Автоматика -2008: 15-а Міжнар.конф. з автоматичного управління. - Одеса: Одеська нац. морська акад., 2008.- С. 352-354.
6. Ковач К.П. Переходные процессы в машинах переменного тока / К.П. Ковач, И. Рац. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963.- 744 с.
7. Справочник энергетика угольной шахты: [2-е изд.] / [Дзюбан В.С., Ширнин И.Г., Ванеев Б.Н., Гостищев В.М.]; под общ. ред. Ванеева Б.Н. – Донецк, ООО «Юго-Восток Ltd.», 2001. – Т1. - 447 с.

Стаття надійшла до редколегії 25.04.2011

Рецензент: зав. каф. електронної техніки ДонНТУ, д-р техн. наук, проф. А.А. Зорі

К.Н. Маренич, И.В. Ковалёва. Математическое моделирование короткого замыкания в питающем кабеле электротехнического комплекса участка шахты. Разработана математическая модель участкового шахтного электротехнического комплекса с короткозамкнутым асинхронным двигателем присоединения. Проанализированы переходные процессы в случае возникновения междуфазных (трёхфазных и двухфазных) коротких замыканий в питающем кабеле, обусловленные действием обратной ЭДС вращения двигателя потребителя.

шахтная электрическая сеть, междуфазное короткое замыкание, переходный процесс, электрические параметры, асинхронный двигатель

K. Marenych, I. Kovalyova. The mathematic model of short-circuit in flexible cable of local mining electrotechnical complex. The mathematic model of local mining electrotechnical complex, which contains squirrel-cage asynchronous motor, is based. The transients in case of phase to phase (three-phase and two-phase) short-circuit in power cable, due to the action of back electromotive force of induction motor, are analyzed.

mining electrical grid, phase to phase short-circuit, transients, electrical parameters, asynchronous motor

© Маренич К.М., Ковальова І.В., 2011