

І.В.Ковальова, К.М.Маренич

**ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОМУТАЦІЙНИХ ПЕРЕХІДНИХ
ПРОЦЕСІВ НА СТІЙКІСТЬ РОБОТИ ЗАСОБУ СИНХРОННОГО
ДВОБІЧНОГО ЗНЕСТРУМЛЕННЯ МІСЦЯ УШКОДЖЕННЯ
КАБЕЛЮ В ЕЛЕКТРОМЕРЕЖІ ДІЛЬНИЦІ ШАХТИ**

Принцип і схема пристрою синхронного автоматичного двобічного знеструмлення місця uszkodження кабелю живлення асинхронного двигуна в електротехнічному комплексі дільниці шахти. Відсутність впливу комутаційних перехідних процесів на функцію спрацьовування цього пристрою.

К л ю ч е в і с л о в а: знеструмлення місця uszkodження, перехідні процеси, пристрої захисту, двигун

Постановка проблеми. Пересування технологічного обладнання в процесі експлуатації шахтної дільниці викликає необхідність застосування розгалуженої мережі гнучких екранованих кабелів. Але умови гірничого виробництва створюють підвищену небезпеку механічного uszkodження кабелю, що, у свою чергу, стає причинами таких небезпечних станів, як однофазний витік струму на землю, а також міжфазні короткі замикання (КЗ). Існуючі засоби максимального струмового захисту відокремлюють місце виникнення КЗ від джерела живлення з боку дільничної комплектної трансформаторної підстанції (КТП) і відрізняються достатньою швидкістю. Випереджальну захисну функцію виконує також дільничний апарат захисту (АЗ) від витоків струму на землю в разі, якщо uszkodження екранованого шахтного кабелю розпочинається з пошкодження ізоляції однієї з його силових жил. Однак після захисного відключення мережі дільничного електротехнічного комплексу (ЕТК) від джерела живлення небезпечний стан останнього певний час може підтримуватись дією зворотного енергетичного потоку від асинхронного двигуна (АД), що був ввімкнений в аварійному приєднанні. Тому актуальною є задача обґрунтування параметрів і схемних рішень технічних засобів припинення дії зворотних енергетичних потоків АД і, зокрема, синхронного двобічного знеструмлення точки uszkodження гнучкого кабелю в приєднанні живлення АД.

Аналіз досліджень і публікацій. Комплексні дослідження процесів в гірничих дільничних ЕТК при виникненні небезпечних станів [1], стосуються обґрунтування технічних рішень щодо знеструмлення місць uszkodження кабелів шляхом відключення енергетичного потоку, спрямованого від живлячої КТП. Схемотехніка автоматичного швидкодіючого вимикача АБВ-250 [2] дозволяє суттєво підвищити швидкість знеструмлення місця

КЗ в кабелі за рахунок штучного створення короткозамкненої ланки в силовій схемі виходу вимикача водночас із роз'єднанням його контактів. За умови приєднання безпосередньо до вводу АД таке штучне КЗ дозволяє припинити дію його зворотного енергетичного потоку. Але на практиці це потребує формування керуючого сигналу на спрацьовування короткозамикача на ввіді в АД, суттєво ускладнює силову схему дільничного ЕТК, створює передумови виникнення його небезпечного стану в разі хибного ввімкнення ланки штучного КЗ в силовому приєднанні АД.

Позитивними функціональними властивостями відрізняється пристрій захисту від впливу зворотного енергетичного потоку (ПЗЕП) двигуна на точку КЗ в кабелі живлення (рисунок 1) [3]. Схемою цього пристрою передбачено, що підключення заземлюючої жили кабелю в пристрої кабельного вводу АД до заземлюючого болта виконується через трансформатор струму блоку захисного відключення (БЗВ), вихід якого приєднується до входу виконавчого комутаційного апарата. Його контакти К1, К2 і К3 комутують «зірку» трифазної схеми статора АД і мають роз'єднувати цю статорну схему за наявності достатнього значення сили струму в ланцюзі між заземлюючою жилою кабелю та місцем її приєднання до металевого корпусу АД. Шлях цього струму ($I_{кзАД}$) забезпечується виникненням провідного стану стабілітрону VD1 у зворотному напрямі за наявністю контакту між фазою кабелю та його заземлюючою жилою. Це відбувається через виникнення в кабелі КЗ, що призводить до значного підвищення різності потенціалів між заземлюючою жилою кабелю та загальною точкою обмотки статора АД.

Дія ПЗЕП забезпечує синхронне відокремлення впливу на місце пошкодження кабелю від енергетичних потоків як з боку АД, так і від живлячої КТП. Ця функція за умови реакції АЗ на пошкодження ізоляції однієї фази кабелю є випереджальною щодо подальшого розвитку міжфазного КЗ. Захисна дія пристрою зберігається і при виникненні КЗ в мережі живлення АД за умови знаходження останнього в стані вільного вибігу. В цьому випадку сила струму $I_{кзАД}$ буде визначатися значенням електрорухомої сили (ЕРС) обертання АД і протікати від його статора за вищезначеним шляхом.

З метою перешкоджання впливу на роботу схеми з боку АЗ в структурі пристрою передбачений діод VD2, приєднаний у напрямі, зворотному щодо напрямку оперативного струму АЗ. Однак окремого дослідження потребує проблематика узгодження функціональних властивостей ПЗЕП із параметрами перехідних процесів при контакторному пуску та відключенні АД. Відомо, що ці процеси супроводжуються короткочасним підвищенням напруги в окремих складових дільничного ЕТК. Важливим є те, щоб це не спричинило хибного спрацьовування БЗВ і роз'єднання силових контактів К1, К2 і К3 (рисунок 1).

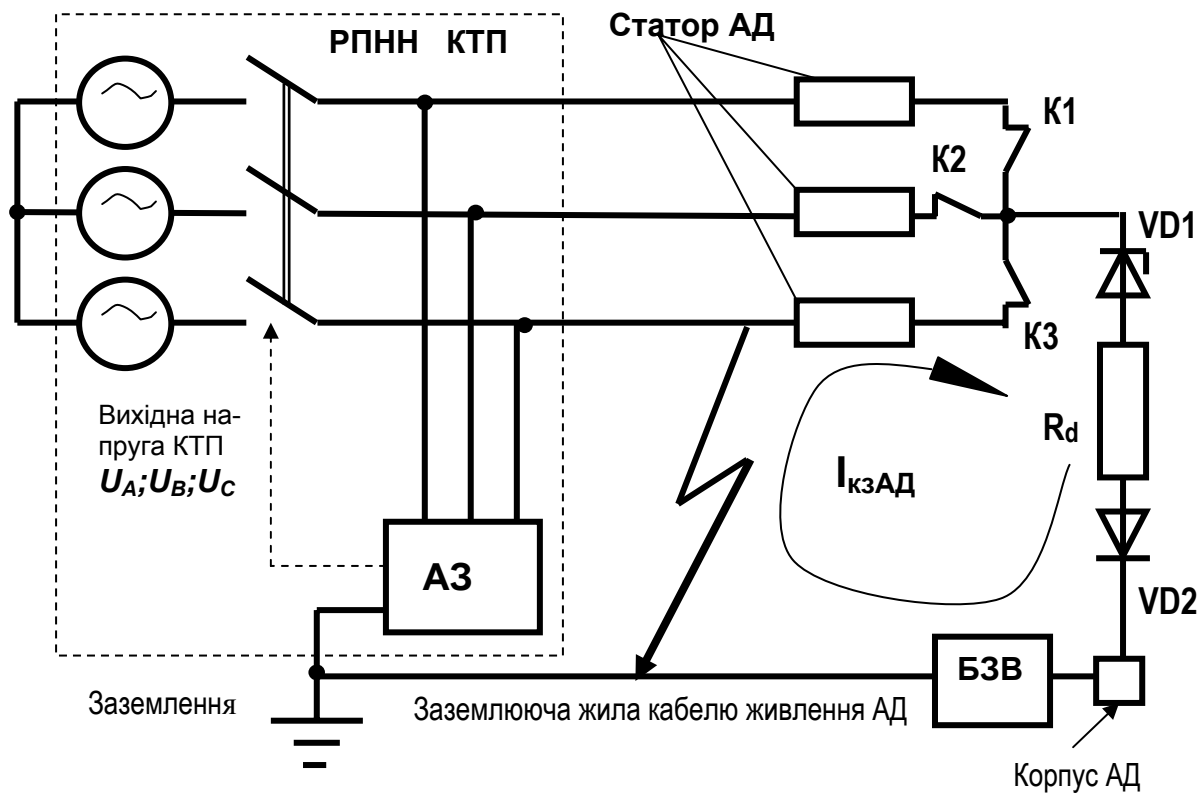


Рисунок 1 – Структурна схема пристрою синхронного двобічного знеструмлення місця короткого замикання в кабелі живлення двигуна

Мета статті. Визначення параметрів впливу комутаційних перехідних процесів на стійкість роботи засобу знеструмлення місця ушкодження кабелю.

Результати досліджень. Характер впливу комутаційних перехідних процесів в шахтному дільничному ЕТК на стійкість роботи ПЗЕП може бути встановлений дослідженням розрахункової схеми ЕТК (рисунок 2), в якій передбачене одне силове приєднання, навантажене АД. З метою урахування підключення ланки VD1-Rd-VD2 відповідно до схеми (рисунок 1), в комп'ютерній моделі АД має бути представлений сукупністю фазних активних та індуктивних опорів. Засіб захисту від витoku струму на землю представлений схемою реагуючого пристрою апарату АЗУР-4, активні та ємнісні опори ізоляції кабелю (R_{iz}, X_{iz}) – зосередженими елементами, KTP – трифазною схемою джерел фазних напруг U_A, U_B, U_C та активними і індуктивними опорами вторинних обмоток R_{TP}, X_{TP} трансформатора відповідно до його типу (потужності). Активні та індуктивні опори робочих жил кабелю позначені як $R_{GK}; X_{GK}$. Автоматичний вимикач (АВ) та комутаційний апарат (пускач) представлені як активні опори R_{AB} та R_{KA} ; R'_1 та R'_2 – опори землі між заземленими точками схеми.

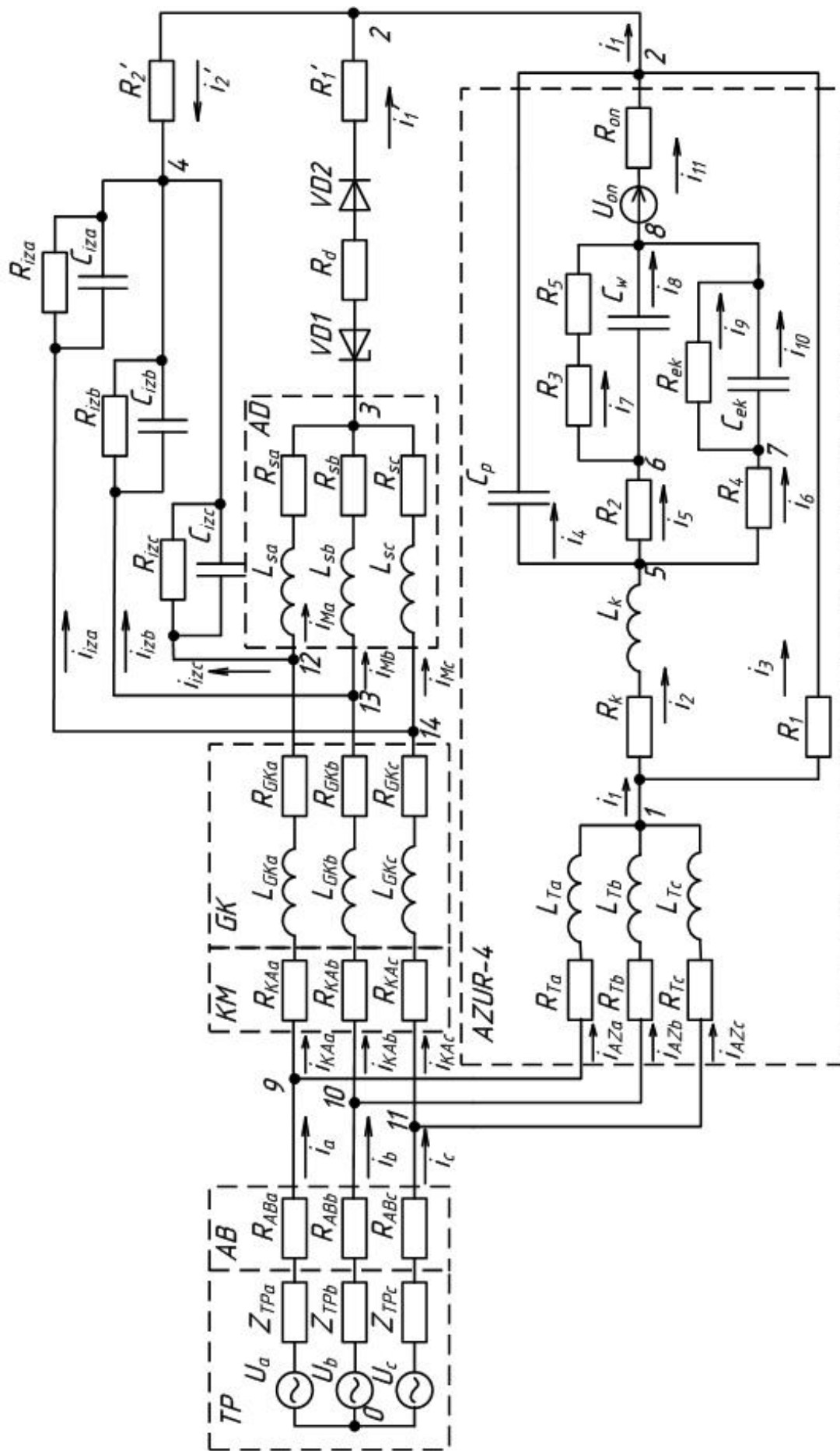


Рисунок 2 – Розрахункова схема заміщення електротехнічного комплексу дільниці шахти напругою 660 В із апаратом захисту від витоків струму на землю АЗУР-4

Співвідношення між струмами мережі відповідно до наведеної на рисунку 2 схеми визначаються першим законом Кірхгофа і представлені наступними рівняннями :

№ вузла	Сила струму	№ вузла	Сила струму
0	$i_a + i_b + i_c = 0$	8	$i_{l1} = i_5 + i_6$
1	$i_{AZa} + i_{AZb} + i_{AZc} = i_1 = i_2 + i_3$	9	$i_a = i_{AZa} + i_{KAa}$
2	$i_1 = i_2' - i_1' = i_3 + i_4 + i_{l1}$	10	$i_b = i_{AZb} + i_{KAb}$
3	$i_{Ma} + i_{Mb} + i_{Mc} = i_1'$	11	$i_c = i_{AZc} + i_{KAc}$
4	$i_{iza} + i_{izb} + i_{izc} + i_2' = 0$	12	$i_{KAa} = i_{Ma} + i_{iza}$
5	$i_2 = i_4 + i_5 + i_6$	13	$i_{KAb} = i_{Mb} + i_{izb}$
6	$i_3 = i_7 + i_8$	14	$i_{KAc} = i_{Mc} + i_{izc}$
7	$i_6 = i_9 + i_{l0}$		

Параметри комутаційного перехідного процесу при ввімкненні та відключенні АД описуються аналітичними залежностями, які дозволяють встановити стан електричних потенціалів між «зіркою» його статора і ланцюгом заземлення:

$$u_{32} = i_1' (R_l' + R_d) = u_{02} - u_{03}. \quad (1)$$

Відповідно до 2-го закону Кірхгофа визначимо падіння напруги u_{03} між вузлами 0 і 3:

$$\begin{cases} u_{03} = -u_a + u_{TPa} + u_{ABa} + u_{KAa} + u_{GKa} + u_{Ma}; \\ u_{03} = -u_b + u_{TPb} + u_{ABb} + u_{KAb} + u_{GKb} + u_{Mb}; \\ u_{03} = -u_c + u_{TPc} + u_{ABc} + u_{KAc} + u_{GKc} + u_{Mc}; \end{cases} \quad (2)$$

де $u_{TPa}, u_{TPb}, u_{TPc}$ – напруга на вторинній обмотці трансформатора КТП:

$$\begin{cases} u_{TPa} = i_a \cdot R_{TPa} + L_{TPa} \cdot \frac{di_a}{dt}; \\ u_{TPb} = i_b \cdot R_{TPb} + L_{TPb} \cdot \frac{di_b}{dt}; \\ u_{TPc} = i_c \cdot R_{TPc} + L_{TPc} \cdot \frac{di_c}{dt}, \end{cases} \quad (3)$$

$u_{ABa}, u_{ABb}, u_{ABc}$ – напруга на фазах АВ – добуток сили струму фази (i_a, i_b, i_c) на опір між контактами вимикача ($R_{ABa}, R_{ABb}, R_{ABc}$);

$u_{KAa}, u_{KAb}, u_{KAc}$ – напруга на опорі між контактами контактора:

$$\begin{cases} u_{KAa} = i_{KAa} \cdot R_{KAa}; \\ u_{KAb} = i_{KAb} \cdot R_{KAb}; \\ u_{KAc} = i_{KAc} \cdot R_{KAc}, \end{cases} \quad (4)$$

$u_{GKa}, u_{GKb}, u_{GKc}$ – падіння напруги в гнучкому кабелі споживача:

$$\begin{cases} u_{GKa} = i_{KAa} \cdot R_{GKa} + L_{GKa} \cdot \frac{di_{KAa}}{dt}; \\ u_{GKb} = i_{KAb} \cdot R_{GKb} + L_{GKb} \cdot \frac{di_{KAb}}{dt}; \\ u_{GKc} = i_{KAc} \cdot R_{GKc} + L_{GKc} \cdot \frac{di_{KAc}}{dt}, \end{cases} \quad (5)$$

u_{Ma}, u_{Mb}, u_{Mc} – напруга на активно-індуктивному навантаженні, що імітує АД:

$$\begin{cases} u_{Ma} = i_{Ma} \cdot R_{Sa} + L_{Sa} \cdot \frac{di_{Ma}}{dt}; \\ u_{Mb} = i_{Mb} \cdot R_{Sb} + L_{Sb} \cdot \frac{di_{Mb}}{dt}; \\ u_{Mc} = i_{Mc} \cdot R_{Sc} + L_{Sc} \cdot \frac{di_{Mc}}{dt}. \end{cases} \quad (6)$$

Падіння напруги u_{02} між вузлами 0 і 2 можна обчислити як суму напруг u_{01} і u_{12} , або u_{04} і u_{42} .

$$\begin{cases} u_{04} = -u_a + u_{TPa} + u_{ABa} + u_{KAa} + u_{GKa} + u_{iza}; \\ u_{04} = -u_b + u_{TPb} + u_{ABb} + u_{KAb} + u_{GKb} + u_{izb}; \\ u_{04} = -u_c + u_{TPc} + u_{ABc} + u_{KAc} + u_{GKc} + u_{izc}, \end{cases} \quad (7)$$

де $u_{iza}, u_{izb}, u_{izc}$ – напруга на паралельно приєднаних активному опорі і ємності ізоляції (відносно землі) гнучкого кабелю, тобто напруга між вузлами 3 і 12, 13 та 14 відповідно схеми заміщення (рисунк 2).

Параметр u_{42} обчислюється за формулою:

$$u_{42} = -i_2' R_2'. \quad (8)$$

Процес ввімкнення та відключення АД імітується стрімкоподібною зміною опору між контактами контактора $R_{KAa}, R_{KAb}, R_{KAc}$. При цьому струм i_1' в ланці VD1-Rd-VD2 відсутній, доки не станеться аварійний процес однофазного (двофазного) замикання на землю та не відкриється стабілітрон VD1 у зворотному напрямку.

Вирази (1) – (8) свідчать, що процеси контакторної комутації супроводжуються короткочасним виникненням напруги у вищевказаній ланці. Практичний інтерес представляє дослідження характеру зміни параметрів цієї напруги у відповідності до факторів впливу. Цими факторами мають бути:

- а) ємнісний опір ізоляції кабелю живлення АД, що визначається довжиною кабелю відповідної марки та його перетином;
- б) активний та індуктивний опори силових жил кабелю відповідної марки, довжини та перетину (вважаємо, що активний опір ізоляції кабелю знаходиться в межах 35...100 кОм /фаза).

Вищевказані елементи ЕТК мають бути узгоджені із потужністю АД, що є навантаженням силового приєднання. При дослідженні комп'ютерної моделі (рисунок 3) приймемо наступні припущення: потужність АД становить 110 кВт (що відповідає двигуну типу ВДКВ250LB4, або аналогічному) [4]; тип дільничної підстанції – КТПВ-630; лінійна напруга мережі ЕТК – 660 В частоти 50 Гц; гнучкий екранований кабель живлення АД (марки КГЕШ) може мати довжину 50...300 м включно і перетин силових жил 35; 50; 70 мм². Це є найбільш типовим для схемотехніки сучасних шахтних дільничних ЕТК.

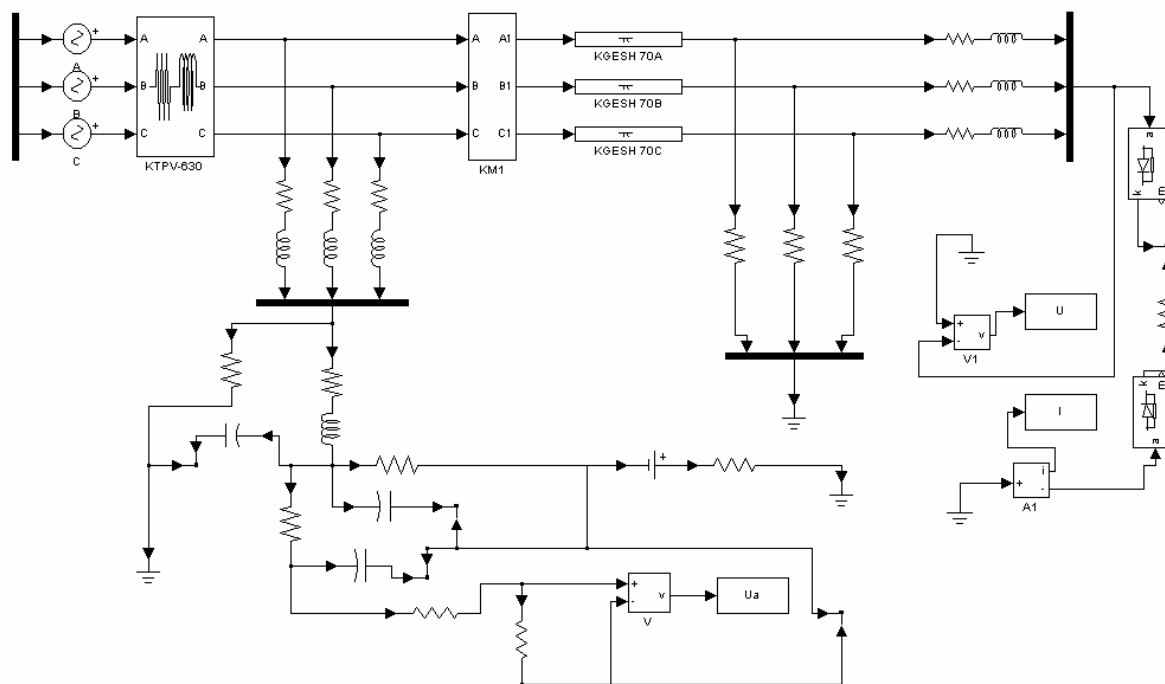


Рисунок 3 - Комп'ютерна модель електротехнічного комплексу дільниці шахти із апаратом захисту від витоків струму на землю АЗУР-4

Комп'ютерна модель дозволяє встановлювати будь-який алгоритм комутації фаз АД. У даному дослідженні доцільним є розгляд двох типових варіантів комутації:

- а) миттєва комутація всіх трьох фаз;
- б) миттєва комутація двох фаз із запізнілим (через 0,05 с) підключенням (відключенням) третьої фази (при застосуванні електромагнітних контакторів).

При дослідженні об'єкту практичний інтерес представляють різниця потенціалів між «зіркою» статора АД та землею, а також струм в ланцюзі між корпусом АД та підключеною до нього заземлюючою жилою кабелю (струм у ланцюзі трансформатора струму в БЗВ, відповідно до рисунку 1). Модель дозволяє розглянути стан, коли металевий корпус АД і заземлююча жила кабелю мають повну електричну провідність із землею, а також

інші вірогідні стани приєднання корпусу АД і заземлюючої жили кабелю до мережі заземлення.

Результати моделювання для окремих параметрів ЕТК з урахуванням впливу довжини кабелю перетином 70 мм^2 представлені на рисунках 4 та 5 (для кожного з процесів 4а, 4б, 5а і 5б дано по два варіанта з різною шкалою часу).

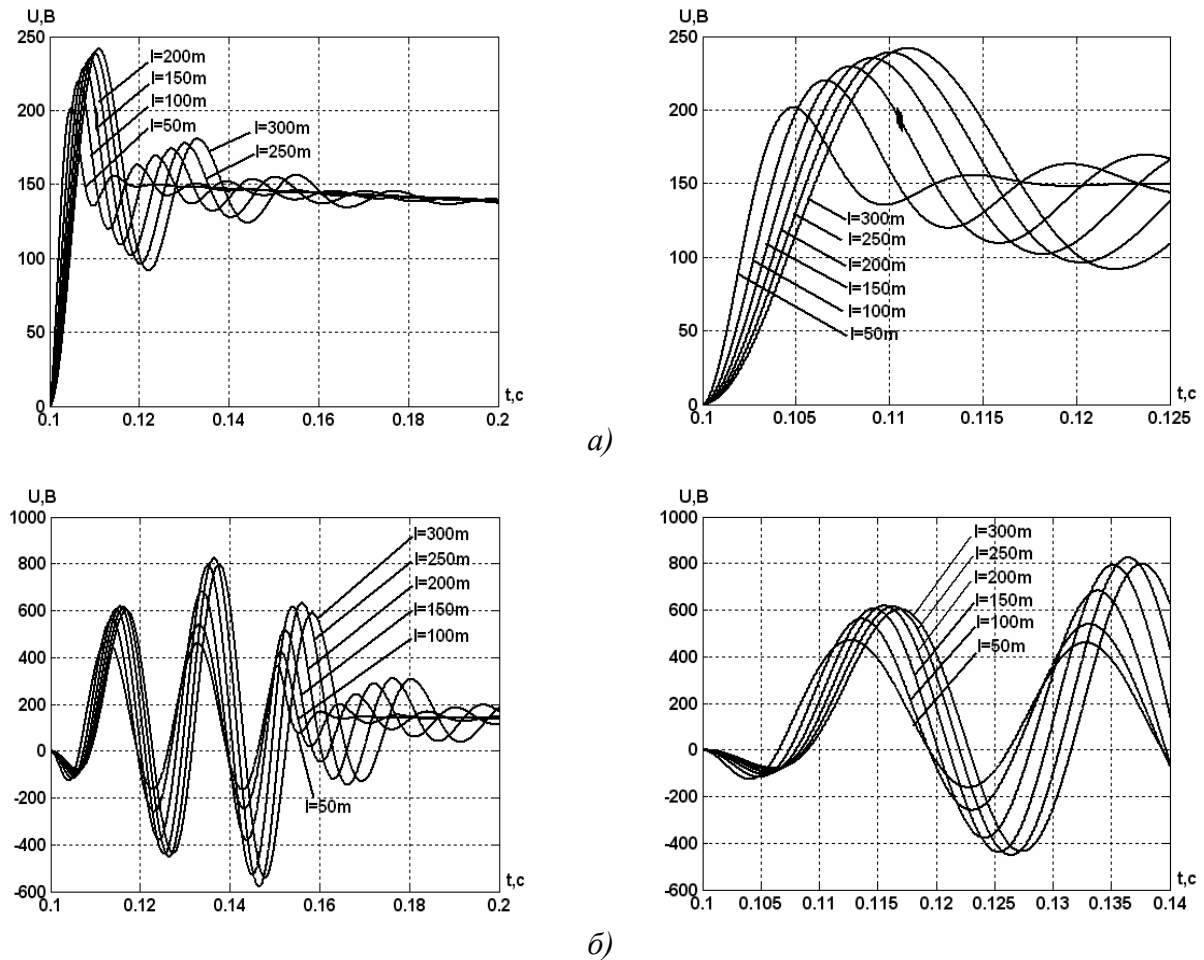


Рисунок 4 - Різність потенціалів між «зіркою» статора АД та землею:
 а) при миттєвому ввімкненні всіх трьох фаз у приєднанні;
 б) при миттєвому ввімкненні двох фаз із запізнілим (через $0,05 \text{ с}$) підключенням третьої фази

Параметри амплітуд напруг і тривалості перехідних процесів в об'єкті дослідження, що виникають у ньому під час комутації АД з урахуванням факторів впливу (обумовлених ємнісними опорами ізоляції кабелю відповідно до його довжини L та перетину) ілюструються наступними діаграмами (рисунки 6 та 7).

Дослідженнями встановлено, що, незважаючи на значний рівень амплітуд напруги між «зіркою» статора АД та землею, сила струму в ланцюзі приєднання заземлюючої жили кабелю до металевого корпусу АД при ко-

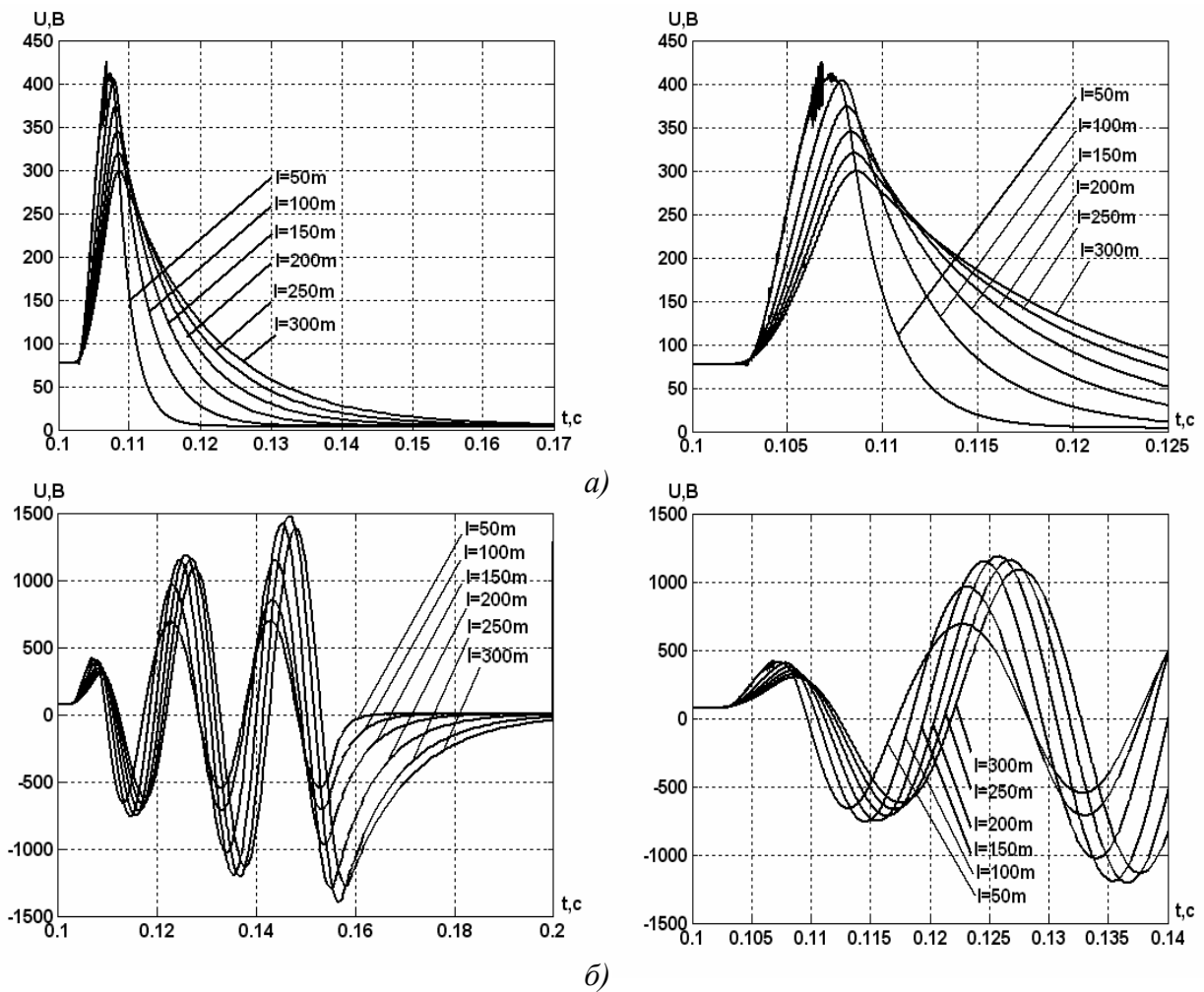


Рисунок 5 - Різність потенціалів між «зіркою» статора АД та землею:
 а) при миттєвому відключенні всіх трьох фаз у приєднанні;
 б) при миттєвому відключенні двох фаз із запізнілим (через 0,05 с) відключенням третьої фази

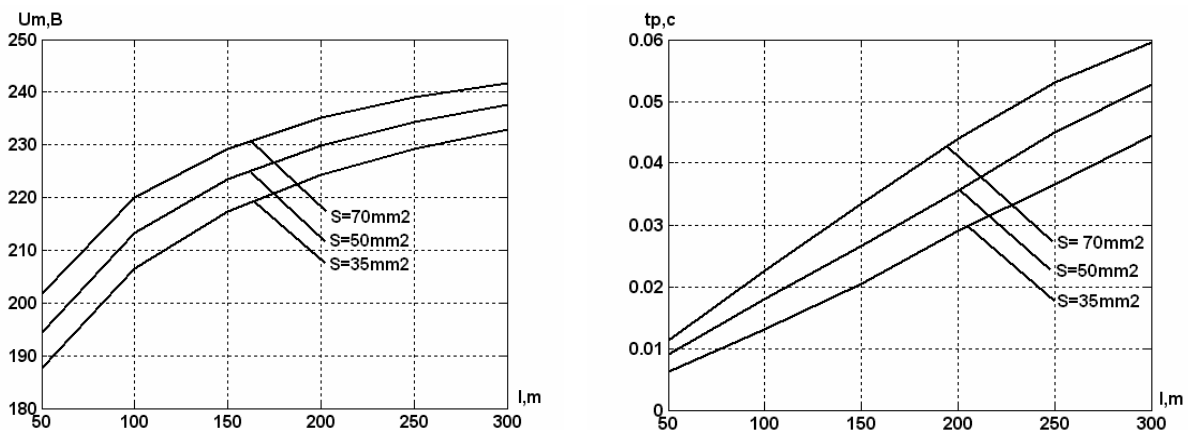


Рисунок 6 – Діаграми амплітуд напруг $U_m = f(L)$ та тривалості $t_p = f(L)$ перехідних процесів під час миттєвого ввімкнення трьох фаз приєднання

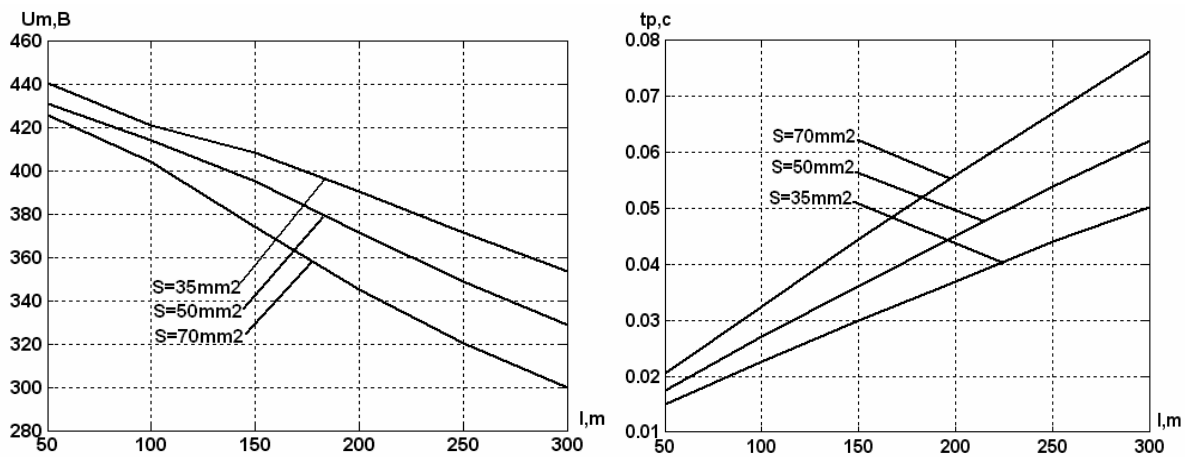


Рисунок 7 – Діаграми амплітуд напруг $U_m = f(L)$ та тривалості $t_p = f(L)$ перехідних процесів під час миттєвого відключення трьох фаз приєднання

мутаційному перехідному процесі є незначною, суттєво меншою за силу струму у цьому ж ланцюзі при виникненні замикання однієї або двох фаз кабелю із його заземлюючою жилою (рисунок 8), що не призведе до хибного спрацьовування ПЗЕП.

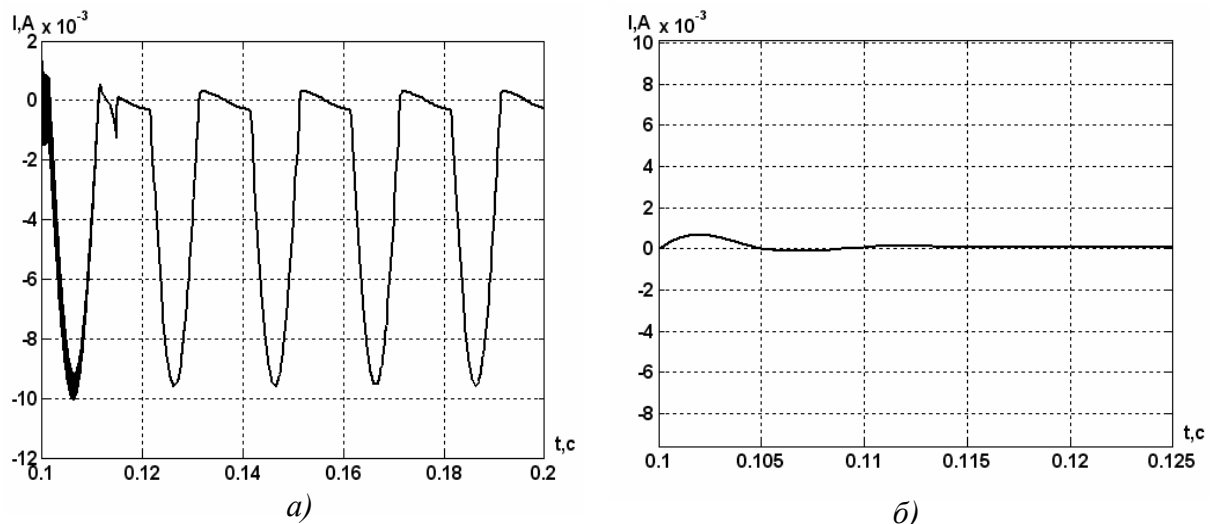


Рисунок 8 – Струм в ланцюзі приєднання заземлюючої жили кабелю до металевого корпусу АД: а) при виникненні двофазного замикання на землю; б) при миттєвому ввімкненні трьох фаз приєднання

В разі необхідності додатковими технічними заходами із поліпшення захисту від хибного спрацьовування ПЗЕП слід вважати наступне. Комутаційний перехідний процес виникає у перший момент ввімкнення АД і має малу тривалість, так, що у цей термін кутова швидкість ротора АД середньої потужності зможе досягти рівня, не більш, як 150 об/хв, тобто значення його зворотної ЕРС не буде створювати небезпечний стан при КЗ в мережі живлення АД в процесі пуску. Таким чином, на інтервалі пуску АД може бути запроваджена затримка часу на початок роботи ПЗЕП. Вона

може бути узгоджена із сигналом датчика швидкості АД, тобто, функціонування ПЗЕП може відбуватися за умови, якщо кутова швидкість ротора АД перебільшила наперед задане мінімальне значення.

Роз'єднання «зірки» статора АД силовими контактами К1, К2 і К3 при комутаційному процесі відключення напруги в разі відмови (хибного спрацьовування ПЗЕП) не зможе спричинити вплив на інші складові ЕТК дільниці шахти, оскільки відповідний процес супроводжується відокремленням силової схеми живлення АД розмиканням відповідного силового комутаційного апарату (магнітного пускача або АВ). Крім того, схема приєднання діоду VD2 унеможливило протікання оперативного струму АЗ по ланцюгу ПЗЕП навіть за наявності зворотного провідного стану стабілітрону VD1. Таким чином, перехідний комутаційний процес контакторного ввімкнення та відключення АД в силовому приєднанні дільничного ЕТК не здатен впливати на параметри стійкості роботи пристрою синхронного двобічного відокремлення впливу зворотних енергетичних потоків на точку ушкодження живлячого кабелю.

Висновки:

1. Засобами математичного і комп'ютерного моделювання визначені параметри комутаційних перехідних процесів в ланцюзі електроживлення АД з урахуванням сукупності факторів впливу, обумовлених опорами трансформатора дільничної КТП та кабельної мережі. Доведено, що зазначені комутаційні перехідні процеси не несуть загрози хибного спрацьовування засобу захисту від впливу зворотного енергетичного потоку АД на точку пошкодження в кабелі живлення і цим не перешкоджатимуть виконанню функції синхронного двобічного відокремлення енергетичних потоків від точки КЗ в кабелі живлення АД.

2. У подальшому актуальною є задача удосконалення і дослідження обґрунтованих математичної та комп'ютерної моделі з урахуванням дугоутворення при виникненні комутаційних перехідних процесів.

Список літератури

1. Дзюбан В.С. Взрывозащищенные аппараты низкого напряжения / В.С. Дзюбан. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 240 с.

2. Справочник энергетика угольной шахты: в 2 т./ [Дзюбан В.С., Ширнин И.Г., Ванеев Б.Н., Гостищев В.М.]; под общ. ред. Ванеева Б.Н. – [2-е изд.]. – Донецк: ООО «Юго-Восток, Лтд», 2001. – Т2. - С.589-590.

3. Заявка на патент України МПК⁸ H02H3/10. Пристрій захисту від впливу асинхронного двигуна на точку короткого замикання в кабелі живлення / Маренич К.М., Ковальова І.В.; заявник Донецький національний технічний університет. - № а 2010 13816; заявл. 22.11.10.

4. Взрывозащищенные асинхронные двигатели: выбор, эксплуатация и ремонт / [В.В. Каика, Т.В. Швецова, А.И. Аниканов и др.]; под общ. ред В.В. Каики.- Донецк: ООО «Юго-Восток, Лтд», 2010. - 360 с.