

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

К.М. Маренич, І.В. Ковальова

**НАУКОВІ ОСНОВИ ВПРОВАДЖЕННЯ
АВТОМАТИЧНОГО ЗАХИСНОГО ДВОБІЧНОГО
ЗНЕСТРУМЛЕННЯ ШАХТНОЇ ДІЛЬНИЧНОЇ
ЕЛЕКТРОМЕРЕЖІ**

МОНОГРАФІЯ

Донецьк
ДВНЗ «ДонНТУ»
2012

УДК 622.012.2:621.316

М 25

Автори:

МАРЕНИЧ Костянтин Миколайович, професор кафедри «Гірнична електротехніка і автоматика ім. Р.М. Лейбова» ДВНЗ „ДонНТУ”, кандидат технічних наук, доцент;

КОВАЛЬОВА Інна Володимирівна, старший викладач кафедри «Гірнична електротехніка і автоматика ім. Р.М. Лейбова» ДВНЗ „ДонНТУ”, кандидат технічних наук.

Рецензенти:

В.С. Дзюбан, заступник директора Дирекції поставок електротехнічної продукції ПрАТ «Донецьксталь» – Металургійний завод» (м. Донецьк), доктор технічних наук, професор;

Ф.П. Шкрабець, завідувач кафедри «Відновлювані джерела енергії» ДВНЗ «Національний гірничий університет» (м. Дніпропетровськ), доктор технічних наук, професор;

С.Ф. Жуков, генеральний директор науково-виробничого центру технологій управління «Квантум» (м. Маріуполь), доктор технічних наук, професор.

Монографія друкується за рішенням Вченої ради ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» (протокол № 10 від 23.11.2012 р.)

Маренич К.М.

М 25 Наукові основи впровадження автоматичного захисного двобічного знеструмлення шахтної дільничної електромережі: монографія / К.М. Маренич, І.В. Ковальова. – Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2012. – 125 с.

ISBN 978-966-377-151-9

Обґрунтовані принципи функціонування та структури автономних пристроїв визначення небезпечного стану кабеля живлення асинхронного двигуна і відокремлення його зворотної ЕРС, напрями удосконалення типових схем електропостачання шахтних технологічних дільниць.

З урахуванням спрацьовування захисних засобів з боку живлячої трансформаторної підстанції та за умови використання в дільничній електромережі екранованих гнучких шахтних кабелів із заземленими заземлюючими жилами застосування запропонованих технічних рішень призводитиме до автоматичного двобічного знеструмлення електричних приєднань шахтної дільниці в момент виникнення небезпечного стану мережі. Зменшення тривалості живлення пошкодженого силового електроустаткування підвищуватиме безпеку експлуатації шахтних дільничних електротехнічних комплексів.

Монографія призначена для науковців, конструкторів і виробничників, що працюють в галузі створення, модернізації і експлуатації рудникового електроустаткування, а також може використовуватися як навчальний посібник: для аспірантів при дослідженні процесів в промислових електротехнічних комплексах; для студентів ВНЗ при вивченні відповідних розділів дисципліни «Електрообладнання та електропостачання гірничих підприємств».

ISBN 978-966-377-151-9

© Маренич К.М., Ковальова І.В., 2012

Вступ	5
1 Улаштування і проблематика експлуатації систем електропостачання шахтних ділень	6
1.1. Загальні принципи побудови схем електропостачання шахтних ділень.....	6
1.2. Огляд функціональних властивостей засобів захисного знеструмлення кола витоку струму на землю.....	14
1.3. Огляд функціональних властивостей засобів знеструмлення мережі при виникненні коротких замикань.....	26
1.4. Зворотні енергетичні потоки асинхронних двигунів в режимі вибігу як фактор підтримання небезпечного стану електромережі.....	39
2 Аналіз процесів в мережі при виникненні пошкодження в кабелі живлення асинхронного двигуна	52
2.1. Зіставлення технічних властивостей засобів відокремлення зворотних ЕРС асинхронних двигунів.....	52
2.2. Математичне моделювання процесів в шахтній діленьничній електромережі, обумовлених впливом зворотних енергетичних потоків.....	54
2.3. Аналіз процесів в мережі статора асинхронного двигуна в контексті пошуку інформаційного сигналу про наявність міжфазного короткого замикання.....	65
2.4. Обґрунтування принципу двобічного знеструмлення місця пошкодження кабелю живлення асинхронного двигуна.....	72
2.5. Аналіз процесів при виникненні міжфазного дугоутворення в мережі живлення асинхронного двигуна в контексті доцільності застосування засобів відокремлення зворотних енергетичних потоків.....	83
3 Технічна реалізація захисного двобічного знеструмлення шахтної діленьничної електромережі	88

3.1. Обґрунтування і діалектика удосконалення автономних засобів відокремлення зворотних енергетичних потоків асинхронних двигунів...	88
3.2. Двобічне знеструмлення мережі при виникненні міжфазного дугоутворення в кабелі живлення асинхронного двигуна.....	98
3.3. Принцип примусового відключення контактора пускача як додатковий засіб підвищення безпеки експлуатації електрообладнання.....	101
3.4. Автономне захисне відокремлення зворотного енергетичного потоку як засіб запобігання електроураження в мережі відключеної обмотки пошкодженого двошвидкісного асинхронного двигуна.....	104
3.5. Загальні принципи удосконалення структури шахтного дільничного електротехнічного комплексу.....	108
Висновки	111
Перелік літератури	112
Додаток А. Схема пристрою РУВ (одна з початкових розробок пристроїв захисту від електроураження в шахтній дільничній мережі).....	117
Додаток Б. Відомості з моделювання.....	118

Експлуатація рудникового електромеханічного обладнання визначається нестационарністю його місцезнаходження, що обумовлює необхідність застосування гнучких кабелів. Однак, в умовах шахти підвищується ймовірність їх механічного пошкодження, що стає причиною виникнення коротких замикань (к.з.), створює умови електроураження людини. Захисна дія засобів максимального струмового захисту і захисту від витоків струму на землю полягає у відокремленні енергетичного потоку з боку дільничної трансформаторної підстанції і є недостатньою, оскільки стан електромережі після вимкнення напруги живлення певний час визначатиметься параметрами зворотних енергетичних потоків асинхронних двигунів споживачів.

Попередніми дослідженнями визначено перебіг аварійних процесів від моменту їх виникнення до моменту захисного відключення мережі. Однак існуючі тенденції щодо суттєвого підвищення потужностей електроприводів гірничих машин обумовлюють актуальність запровадження засобів захисного відокремлення зворотних енергетичних потоків асинхронних двигунів, реагуючих на виникнення аварійного, або небезпечного стану дільничної мережі. Застосування цієї функції у сукупності з дією захисних пристроїв з боку дільничної трансформаторної підстанції дозволить виконати синхронне автоматичне захисне двобічне знеструмлення шахтного дільничного електротехнічного комплексу в разі виникнення його небезпечного стану і цим суттєво зменшити час електроживлення силового аварійного приєднання, зокрема, виключивши вплив зворотних енергетичних потоків асинхронних двигунів після захисного відключення мережі.

В даній роботі міститься наукове обґрунтування способів і улаштування засобів автоматичного двобічного знеструмлення шахтної дільничної мережі на основі застосування автономних пристроїв визначення аварійного стану силових приєднань і відокремлення зворотних ЕРС асинхронних двигунів споживачів.

1. УЛАШТУВАННЯ І ПРОБЛЕМАТИКА ЕКСПЛУАТАЦІЇ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ШАХТНИХ ДІЛЬНИЦЬ

1.1. Загальні принципи побудови схем електропостачання шахтних дільниць

Процес видобутку вугілля на сучасному гірничому підприємстві відбувається за умови функціонування чисельних технологічних установок: очисних і підготовчих комплексів, конвеєрного та локомотивного транспорту, водовідливу, вентиляції, шахтного підйому та ін. Всі ці установки оснащені електроприводами, за звичай, - середньої або великої потужності. Отже, електротехнічні комплекси технологічних дільниць та установок шахти є її найважливішими об'єктами, що забезпечують виконання всіх виробничих процесів.

Структура електротехнічного комплексу видобувної дільниці шахти будується відповідно до положень нормативних документів [1] і вміщує джерело живлення – комплектну трансформаторну підстанцію (КТП), розподільчий пункт дільниці (РП) та асинхронні електродвигуни (М) споживачів (рис. 1.1). У свою чергу, дільничний розподільчий пункт має бути представлений сукупністю магнітних пускачів (П), від яких за радіальною схемою до асинхронних двигунів відповідних споживачів відходить розгалужена мережа гнучких кабелів (ГК) [2-4]. Груповий автоматичний вимикач (АВ) застосовується на ввіді дільничного розподільчого пункту з метою подачі (зняття) напруги на РП вручну та відключення його в автоматичному режимі за умови зникнення напруги в мережі, виникнення короткого замикання у відгалуженні, або за наявності команди зовнішнього технологічного захисту (наприклад, газовий захист). Подача напруги від дільничної підстанції на ввід групового автоматичного вимикача розподільчого пункту відбувається по магістральному кабелю (МК), в якості якого приймають броньовані, або напівгнучкі екрановані кабелі.

Поряд з використанням магнітних пускачів, вся сукупність силових комутаційних апаратів РП дільниці може бути розташована у комплектному розподільчому пристрої – станції управління (рис. 1.2).

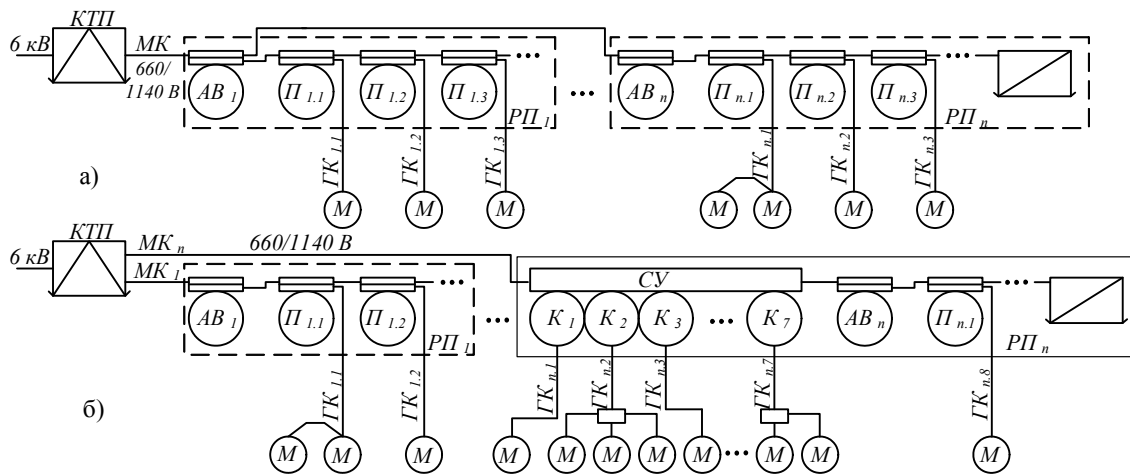


Рисунок 1.1 - Типова схема електропостачання видобувної дільниці шахти на основі застосування пускачів (а); станцій управління (б)

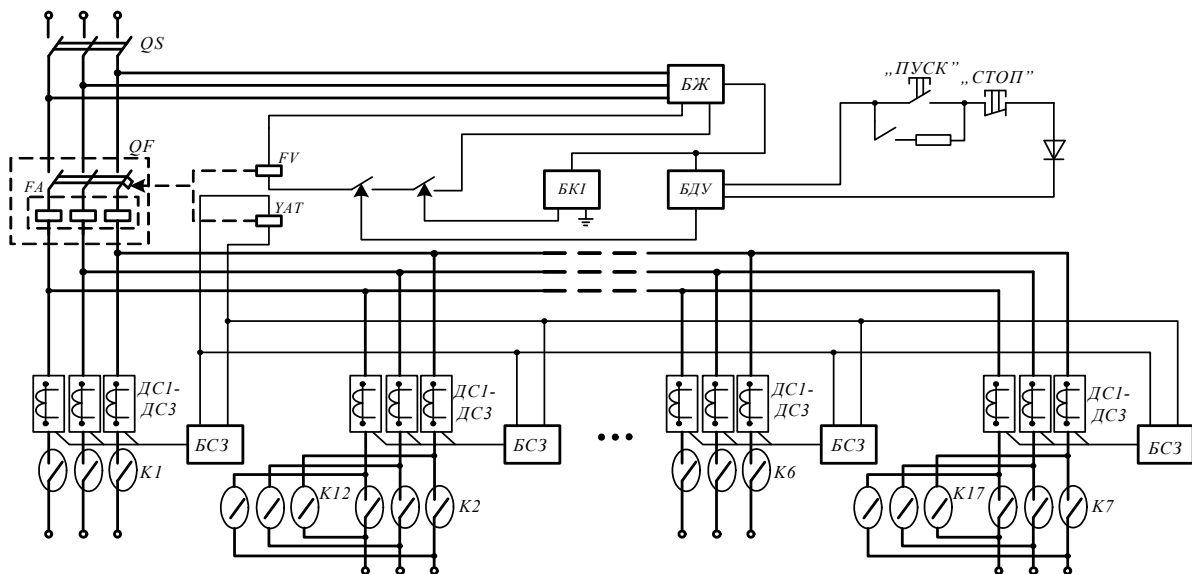


Рисунок 1.2 - Узагальнена структурна схема станції управління типу СУВ-350А (СУВ-630): БЖ – блок живлення; БДУ – блок дистанційного управління; БКІ – Блок контролю ізоляції; БСЗ – блок струмового захисту; ДС1-ДС3 – датчики струму; QS – роз’єднувач; QF – автоматичний вимикач; FA1 – електромагнітний розчеплювач; FV – нульовий розчеплювач; YAT – незалежний розчеплювач; К1-К7 – контактори відходячих приєднань

Сучасні тенденції щодо застосування енергомеханічного обладнання підвищеної потужності обумовлюють необхідність електроживлення таких споживачів напругою підвищеного номінального рівня (1140 В). Як правило, особли-

вістю улаштування схем електропостачання шахтних дільниць є те, що живлення такою напругою застосовують лише для потужних струмоприймачів (комбайн, конвеєр), а інші малопотужні споживачі підключають до джерела лінійної напруги 660 В (рис. 1.3) [5].

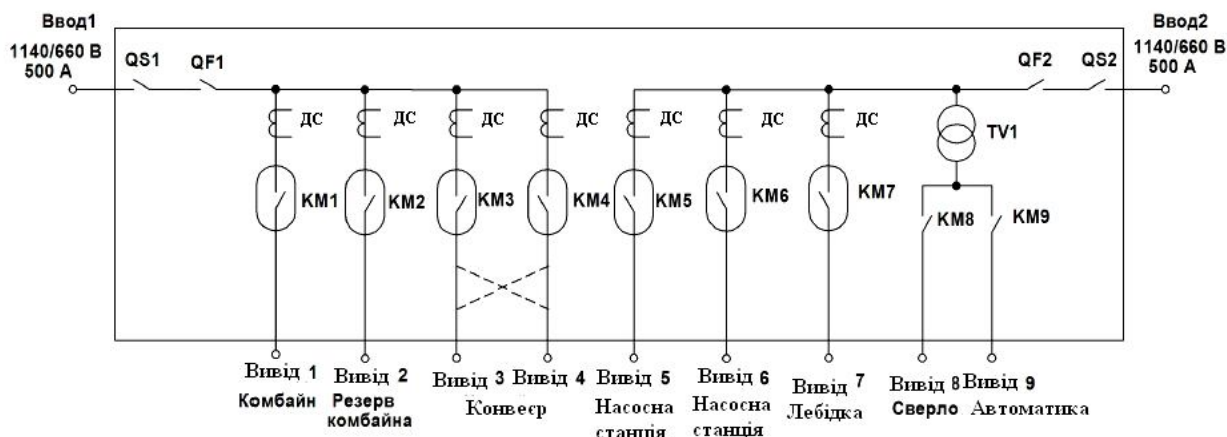


Рисунок 1.3 - Блочно-структурна схема комплектного пристрою управління КУУВ-500/500-2 (забезпечення електроживлення споживачів дільниці напругами двох номінальних рівнів – 660 В і 1140 В)

Отже, джерелом електроживлення споживачів технологічної дільниці є комплектна трансформаторна підстанція (рис. 1.4), яка виконує функцію перетворення напруги високого рівня (6 кВ) у напругу, узгоджену за рівнем з величиною номінальної напруги споживачів дільниці (660 В або 1140 В). Режим нейтралі дільничної електромережі шахти є ізольованим. Функція захисного відключення напруги з вводу РП дільниці реалізується автоматичним вимикачем *QF*, що входить до складу розподільчого пристрою низької напруги (РПНН) КТП і спрацьовує за командами: максимального струмового захисту; апарата захисного знеструмлення кола витoku струму на землю (АЗ) [7-9], інших зовнішніх захистів. Основним призначенням АЗ є захист людини від електроураження при торканні елементів електромережі, що нормально є під напругою (шляхом визначення наявності кола підвищеної провідності між фазою мережі і землею і формування команди на захисне відключення напруги мережі).

Автоматичний вимикач на вводі розподільчого пункту технологічної дільниці є однотипним з відповідним апаратом РПНН дільничної КТП, але на відміну від останнього, не має функціонального зв'язку з дільничним пристроєм

захисного знеструмлення кола витоків струму на землю. Важливою особливістю зазначених вище автоматичних вимикачів (серія А37ХХ) є властивість їхніх механізмів вільного розчеплювання; забезпечити моментальне включення і відключення апарата зі швидкістю, що не залежить від оператора, роду і маси привода; виключити можливість утримання контактів апарата у ввімкненому положенні при спрацьовуванні захистів.

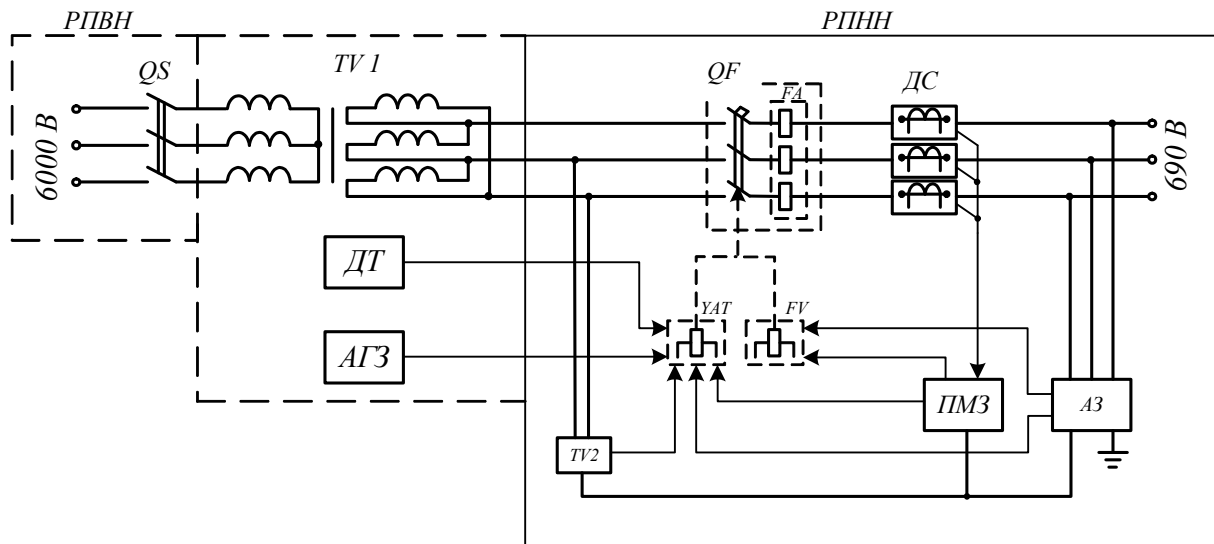


Рисунок 1.4 - Функціональна схема комплектної трансформаторної підстанції: РУВН, РУНН – розподільчі пристрої високої та низької напруги; *QS* – роз’єднувач; *TV1* – силовий трансформатор; *TV2* – трансформатор власних потреб; *ДС* – датчики струму; *ДТ* – датчик температури

Схема і конструкція автоматичного вимикача (рис. 1.5) передбачає застосування електромеханічних засобів керування захисним роз’єднанням його силової трифазної контактної групи, а саме:

- максимальні розчеплювачі *FA1*; *FA2*; *FA3* підключені послідовно в силових фазних приєднаннях і спрацьовують при перевищенні струмом фази визначеного порогового рівня;
- незалежний розчеплювач *YAT* спрацьовує при подачі струму на котушку його електромагніту в разі замикання контактів виконавчих реле зовнішніх технологічних захистів;
- нульовий розчеплювач *FV* спрацьовує при припиненні електроживлення його електромагніту в разі зникнення напруги в електромережі дільниці.

Отже, особливістю функціонування групового автоматичного вимикача РП дільниці є підтримання нульового розчеплювача FV у ввімкненому стані доки матиме місце наявність напруги мережі (достатньої величини) на затисках первинної обмотки трансформатора TL живлення схеми апарата АВ. Тому захисне відключення автоматичного вимикача РПНН дільничної КТП не призводитиме до одночасного відключення групового автоматичного вимикача РП дільниці через наявність зворотних ЕРС асинхронних двигунів споживачів які деякий час після знеструмлення ланки виходу КТП перебуватимуть в режимі вільного вибігу. Цей ефект має бути врахований при аналізі стану системи електропостачання шахтної дільниці в процесі її захисного відключення.

Магнітні пускачі є основним устаткуванням, призначеним для дистанційного включення, відключення і реверсування асинхронних двигунів технологічних машин та установок дільниці шахти. Їхніми основними функціональними вузлами є контактори, які безпосередньо виконують комутацію силових ланцюгів електричних приєднань, за командами від кнопочового поста дистанційного управління або вузлів автоматичного управління технологічним устаткуванням.

До функцій магнітного пускача слід також віднести максимальний струмовий захист відходячого приєднання (з можливістю регулювання уставки спрацьовування захисту); контроль величини опору ізоляції відходячого відключеного приєднання і блокування ввімкнення контактора пускача в разі зменшення цього опору нижче граничної величини; нульовий захист та захист від втрати керованості, захисне відключення навантаження (асинхронного двигуна) при тривалому струмовому перевантаженні [10, 11, 12].

Аналіз типової схеми магнітного пускача (рис. 1.6) дає можливість зробити висновок, що в разі захисного відключення будь-якого з автоматичних вимикачів дільниці пускач деякий час має знаходитися у ввімкненому стані через те, що електричні ланцюги його елементів продовжуватимуть отримувати електроживлення за наявності зворотних ЕРС обертання асинхронних двигунів що перебуватимуть у стані вибігу.

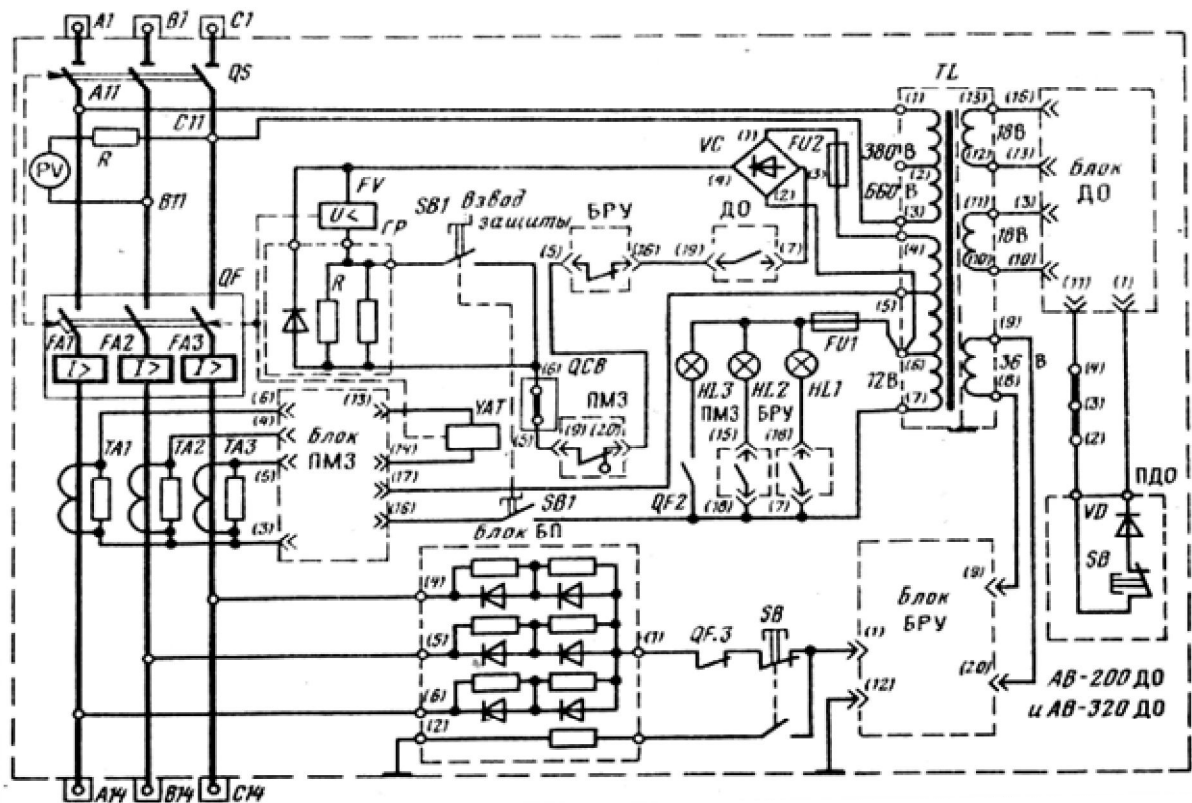


Рисунок 1.5 - Схема автоматичного вимикача серії АВ розподільного пункту технологічної ділянки шахти [10]

Таким чином, фактичне роз'єднання силових відгалужень з АД в електротехнічному комплексі ділянки шахти відбуватиметься не в момент відключення напруги живлення (з боку КТП), а з деяким запізненням, що визначатиметься постійною часу зменшення ЕРС обертання асинхронних двигунів, та параметрами спрацьовування на відключення проміжних реле блоків управління та самих контакторів магнітних пускачів. Цей процес є стохастичним.

Заземлююча мережа шахти побудована на основі використання головних та місцевих заземлювачів, до яких через заземлюючі шини приєднані металеві корпуси всіх електричних установок. Приєднанню до заземлюючої мережі підлягають: броня броньованих кабелів та заземлюючі жили шахтних гнучких екранованих кабелів.

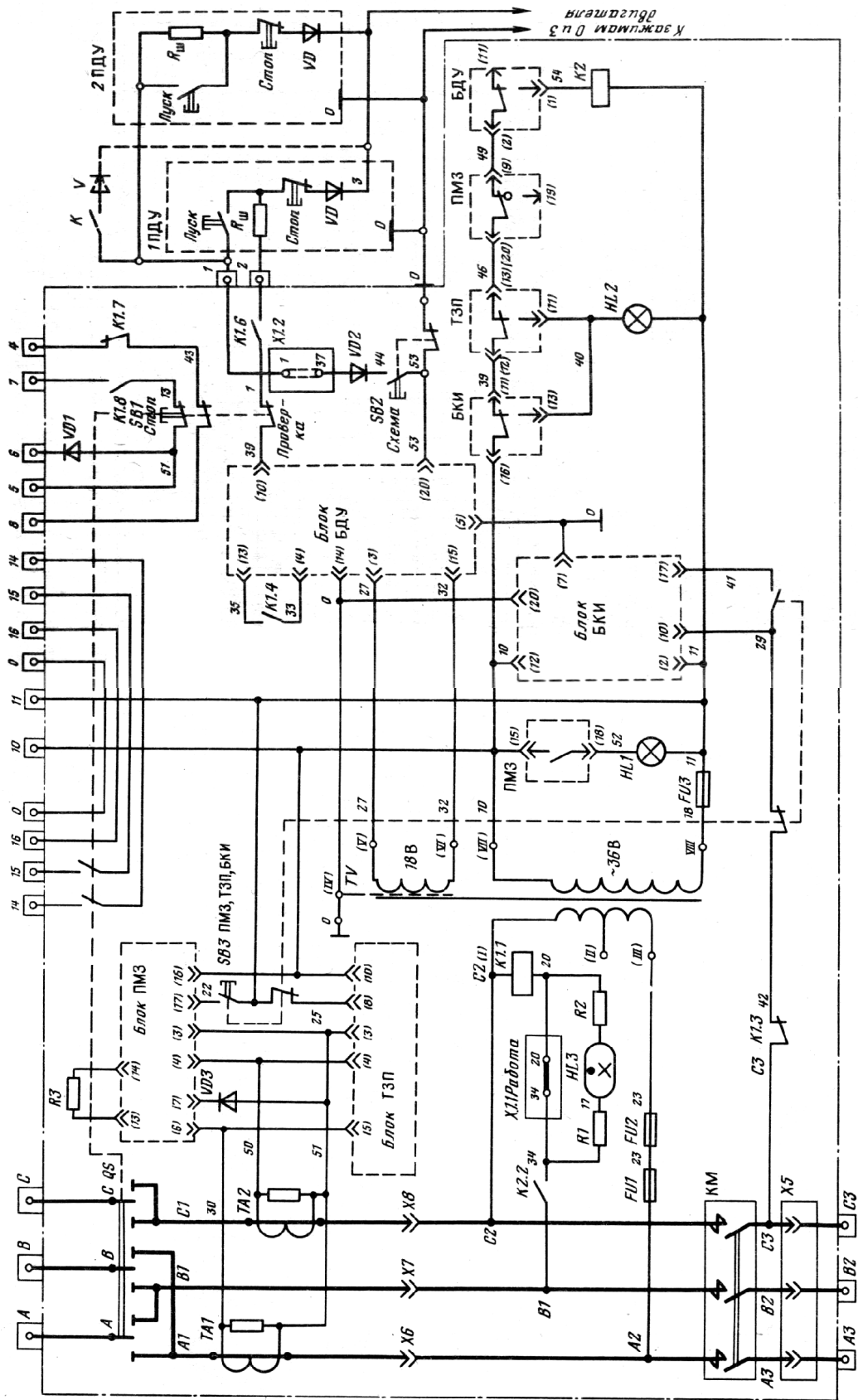


Рисунок 1.6 - Схема магнітного пускача серії ПВІ-320

Захисна функція при застосуванні гнучких шахтних екранованих кабелів (рис. 1.7) обумовлена використанням властивостей апаратів захисного знеструмлення кола витoku струму на землю (АЗ) при штучному створенні такого кола в разі пошкодження ізоляції силового провідника кабеля стороннім предметом 7. В цьому разі ланка підвищеної електричної провідності між фазою (силовою жилою) кабеля і землею має бути утворена екраном 3 ізоляції 2 фазного провідника 1 і заземленою заземлюючою жилою 5 [14]. Наявність кола однофазного витoku струму на землю призводитиме до спрацьовування відповідного засобу захисту і відключення мережі автоматичним вимикачем РПНН КТП. В разі, якщо аварійний стан мережі розвивається, починаючи з пошкодження однієї фази кабеля, така захисна функція дозволяє сформулювати команду на захисне знеструмлення силових відгалужень з випередженням відносно моменту пошкодження двох фаз (і виникнення через це супроводжуваного завеликим струмом міжфазного короткого замикання).

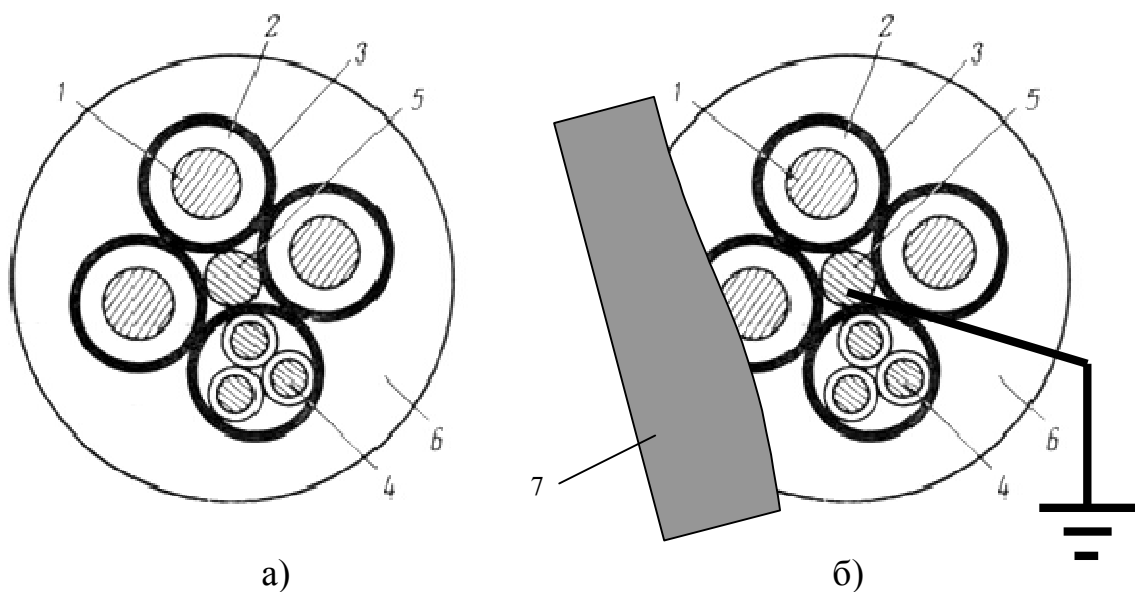


Рисунок 1.7 - Улаштування гнучкого екранованого шахтного кабелю марки КГЕШ (а); ілюстрація захисної функції екрану кабеля при пошкодженні силової жили (б): 1- силова жила; 2 – гумова ізоляція; 3- гумовий провідниковий екран; 4 – сигнальна жила; 5 – заземлююча жила; 6 – оболонка кабелю, 7 - ушкоджуючий предмет

Таким чином, технічні засоби дільничних електротехнічних комплексів шахти дозволяють виконувати наступні захисні функції:

- захист людини від електроураження при торканні корпусів електроустаткування, що можуть знаходитися під напругою через ушкодження ізоляції електропровідників (захист засобами заземлення електроустановок);
- захисне відключення при виникненні міжфазного короткого замикання у відходячому приєднанні (максимальний струмовий захист автоматичного вимикача РПНН КТП, групового автоматичного вимикача, шахтних пускачів, або станцій управління);
- захисне роз'єднання силових контактних груп при зникненні напруги в мережі (нульовий захист силових комутаційних апаратів).
- захисне знеструмлення кола витoku струму на землю в разі торкання людиною струмоведучого провідника, що є під напругою, або пошкодження ізоляції такого провідника (захисна функція пристрою автоматичного захисту відпрацьовується автоматичним вимикачем РПНН КТП);
- захисне відключення силового приєднання (асинхронного двигуна) при тривалому струмовому перевантаженні - непрямий температурний захист на основі моделювання експоненти нагріву двигуна споживаним струмом (реалізується блоком ТЗП магнітного пускача).

Зазначені захисні функції передбачають від'єднання електроспоживачів ділянки від джерела живлення – комплектної трансформаторної підстанції і не поширюються на усунення впливу зворотних енергетичних потоків асинхронних двигунів споживачів, що обумовлені роботою електричних машин в режимі вибігу і здатні підтримувати небезпечний стан мережі після її захисного відключення.

1.2. Огляд функціональних властивостей засобів захисного знеструмлення кола витoku струму на землю

Коло витoku струму на землю в електромережі шахтної ділянки може бути утворене в разі зменшення опору ізоляції між фазою мережі і землею, а також внаслідок торкання людиною струмоведучих елементів або металеві

оболонки електрообладнання, яка випадково опинилась під напругою в результаті ушкодження ізоляції. В електромережі з ізольованою нейтраллю трансформатора небезпека електроураження людини (величина струму витоку на землю, $I_{вум}$) визначається власним опором її тіла ($R_{вум} = 1$ кОм) і величинами активних $R_{із\ \phi}$ та ємнісних $X_{із\ \phi}$ опорів ізоляції кабельної мережі (рис. 1.8):

$$I_{вум} = \frac{U_{\phi}}{R_{вум} \cdot \sqrt{1 + \frac{R_{із.\phi} (R_{із.\phi} + 6R_{вум})}{9R_{вум}^2 (1 + R_{із.\phi}^2 \omega^2 C_{із.\phi}^2)}}} \quad (1.1)$$

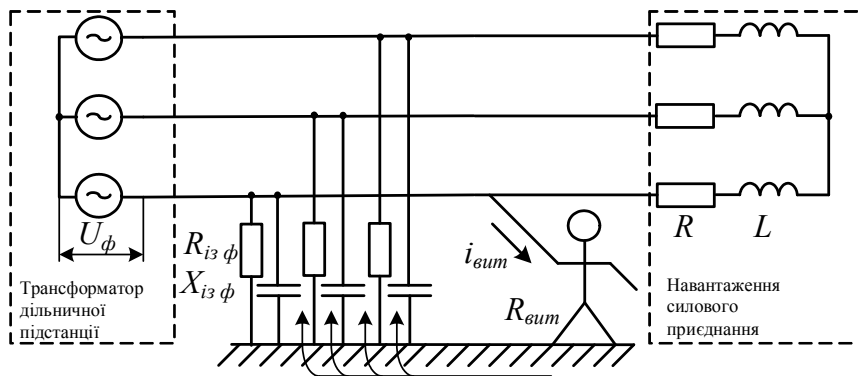


Рисунок 1.8 - Розрахункова схема дільничної електромережі шахти при виникненні однофазного витоку струму на землю через опір тіла людини: U_{ϕ} – фазна напруга у місці витоку

Тому функція засобу захисту від витоків струму на землю має полягати у: контролі рівня струму витоку на землю з подальшим відключенням автоматичного вимикача підстанції живлення при перевищенні струмом витоку на землю гранично припустимої величини 25 мА; в обмеженні кількості електрики в ланцюзі витоку струму на землю на рівні, що не перевищує 50 мА*с [8, 15]. Дієвим заходом, що сприяє струмообмеженню в контурі виникнення підвищеної провідності між фазою і землею є компенсація ємності ізоляції мережі індуктивністю відповідної величини [7, 16, 17].

Існуючі теоретичні засади створення засобів автоматичного захисного знеструмлення кола витоку струму на землю враховують властивості відомих методів визначення небезпечного стану мережі - контроль величини: напруги

нульової послідовності; струму нульової послідовності; постійного оперативного струму в ланці: „джерело струму – фази мережі – опори ізоляції (витоку) – земля”.

Застосування постійного оперативного струму в якості контрольованого параметру знайшло промислове впровадження у схемах апаратів захисту від витоків струму на землю, як сучасного виробництва, так і у попередніх зразках (Додаток А). Принциповими є відмінності у застосуванні вимірювального пристрою. Найпростішим є узагальнення функції виміру оперативного струму і формування команди на захисне відключення дільничної мережі в одному технічному засобі – електромагнітному реле при підключенні його послідовно в ланцюг оперативного струму (рис. 1.9). Незважаючи на простоту виконання, це технічне рішення має очевидні недоліки, які полягають у наявності можливості неспрацьовування захисту через відмову реле, пошкодження ланки оперативного струму, у недостатній точності виміру струму витоку на землю (через надання функції виміру безпосередньо електромагнітному реле).

Цим обумовлені принципові зміни в підході до побудови схеми засобу визначення наявності кола витоку струму на землю, а саме, у запровадженні властивості самоконтролю працездатності схеми. Ці принципові положення реалізовані в схемах апаратів АЗПБ; АЗУР і полягають у створенні керуючого впливу на захисне відключення дільничної мережі в разі відключення виконавчого реле засобу захисту. Визначення наявності ланки з небезпечним струмом витоку на землю виконується шляхом порівняння постійного оперативного струму, що циркулює у фазах мережі, опорах ізоляції та контурі „земля”, з еталонним струмом в самій схемі апарата захисту [2]. Схема апарата захисту має постійно отримувати живлення безпосередньо від трансформатора комплектної підстанції (КТП), а захисна функція полягатиме у відключенні виконавчого реле і впливі на автоматичний вимикач QF КТП (рис. 1.10).

двох функцій – прискоренням визначення і відключення ланки витoku струму на землю і зменшенням величини струму в колі витoku за рахунок компенсації ємнісної складової опору ізоляції. Враховуючи на те, що в процесі експлуатації технологічного устаткування опір ізоляції змінюється із підключенням, або відключенням окремих силових приєднань, доцільним технічним рішенням є автокомпенсація ємності мережі. В апаратах серії АЗУР-1 – АЗУР-3 вона здійснюється зміною постійного струму підмагнічування компенсуючого дроселя в ланцюзі оперативного струму) відповідно до визначеної величини ємності ізоляції фаз мережі.

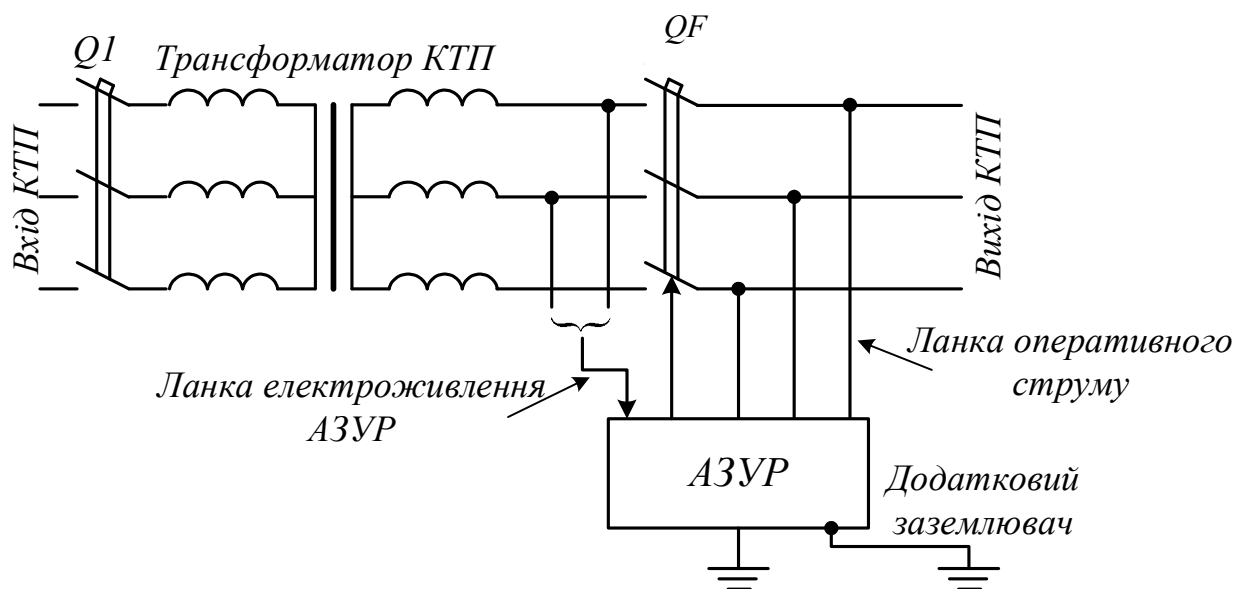


Рисунок 1.10 - Схема підключення функціональних ланцюгів АЗУР до елементів комплектної трансформаторної підстанції

В мережі номінальної напруги 660 В вищезазначені захисні властивості технічних засобів є достатніми, однак інерційність переналаштовування дроселя автокомпенсатора припускає утворення зовеликої кількості електрики (на часових інтервалах переналаштовування) і обумовлює недостатність цієї захисної функції в мережі номінальної лінійної напруги 1140 В. Це обумовлює принципову зміну структури засобу захисту від витoku струму на землю в мережі вказаної напруги, що ілюструється схемою (рис. 1.11).

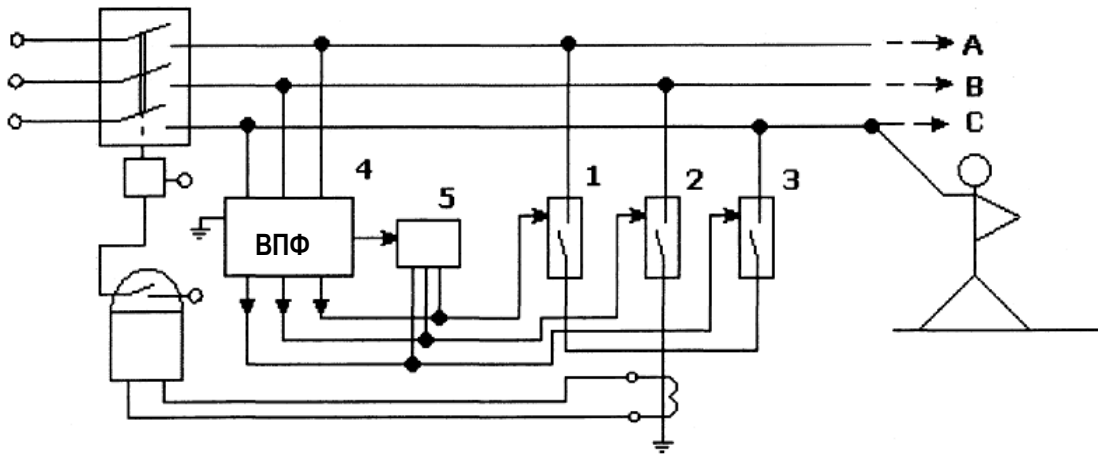


Рисунок 1.11 – Схема пристрою застосування захисного закорочування на землю пошкодженої фази. 1-3 – фазні короткозамикачі; 4 – блок визначення пошкодженої фази; 5 – блок керування короткозамикачами

В захисних засобах мережі напруги 1140 В додатковою захисною функцією слід вважати застосування короткозамикачів пошкодженої фази, що спрацьовують водночас із захисним відключенням мережі [19]. Це дає можливість «шунтування» людини на землю (в процесі захисного відключення мережі) в разі її торкання до струмоведучих елементів мережі 1140 В, що є під напругою. Визначення пошкодженої фази в блоці короткозамикача полягає у зіставленні напруги між фазами мережі і землею з певною еталонною напругою, яка має бути меншою мінімального значення напруги між фазами з непошкодженою ізоляцією і землею, а спрацьовування короткозамикача пошкодженої фази відбувається водночас із захисним відключенням мережі за командою блока визначення кола витoku струму на землю. Доведено, що застосування статичних компенсаторів ємності ізоляції мережі, налаштованих на компенсацію ємності $0,5 \text{ мкФ/фазу}$ є достатнім захисним заходом в мережах сучасних потужностей (напруги 1140 В) за умови запровадження короткозамикання пошкодженої фази. У той же час, перспективи промислового запровадження має удосконалений принцип автокомпенсації ємності ізоляції мережі, якій відрізняється підвищенням швидкодії налаштування і полягає у безперервній компенсації узагальненої ємності 1 мкФ/фазу , створеної, частково, ємністю мережі і, частково, до-

датковими ємностями у схемі апарата за умови швидкодіючої корекції цих додаткових ємностей шляхом комутації їх складових при керуванні процесом від мікропроцесорного засобу виміру ємності мережі (рис. 1.12) [20].

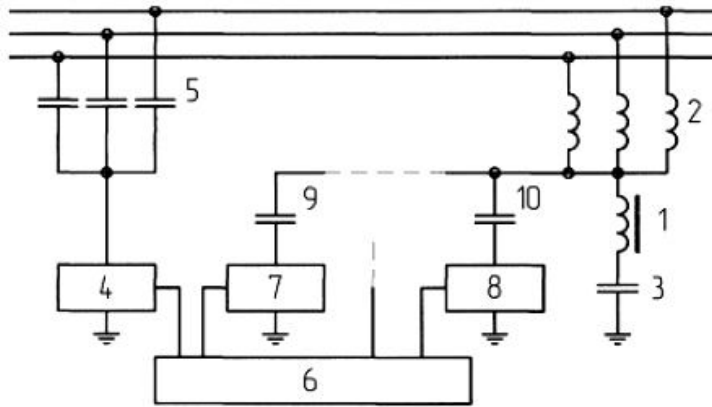


Рисунок 1.12 - Структурна схема пристрою компенсації ємнісних струмів витoku: 1 – компенсуючий дросель з немагнітним зазором; 2, 5 – фільтри; 3, 9, 10 – конденсатори; 4 – генератор струму підвищеної частоти; 6 – блок управління; 7, 8 – комутуючі ключі

З урахуванням застосування різних технічних засобів, узагальнена схема захисту від витoku струму на землю має структуру (рис. 1.13) [7, 8, 19], де позначені: ФП - фільтр приєднання до фаз мережі; ДОН - джерело оперативного струму (або напруги - ДОН); ВБ - вимірювальний блок; ПП - показуючий прилад; ВР - виконавче реле.

Пристрої захисту для мереж

380 В - 1140 В містять компенсатор ємності мережі - К, а для мереж 660 В - 1140 В – можуть містити фазний короткозамикач – ФК.

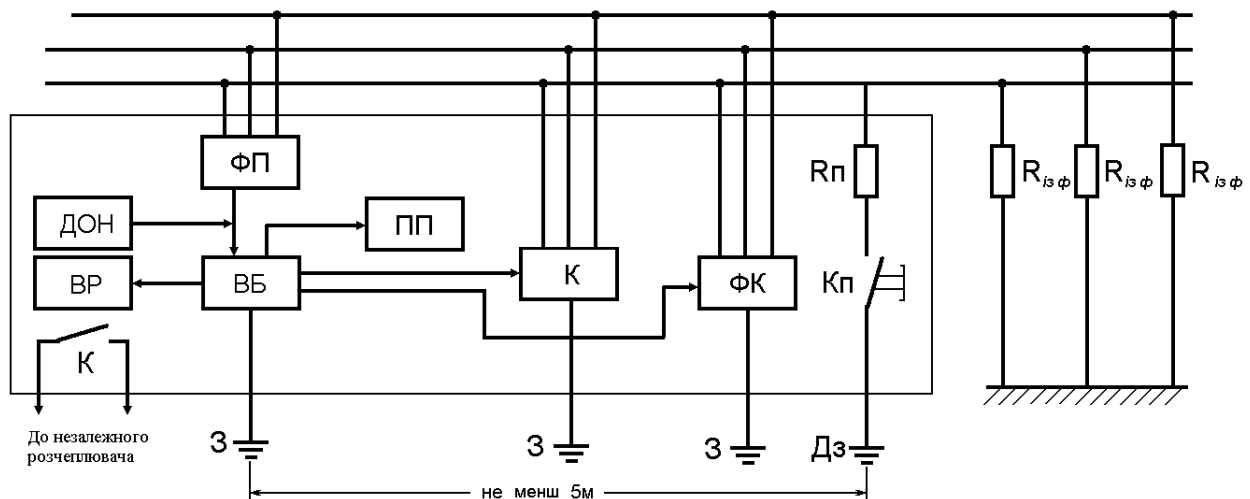


Рисунок 1.13 - Узагальнена структура автоматичного захисту від витоків струму на землю

Окрім шахтних мереж трифазної синусоїдальної напруги, захист від витоків струму на землю поширюється і на комбіновані шахтні дільничні електромережі, до складу яких входять перетворювачі частоти (рис. 1.14) [21; 22].

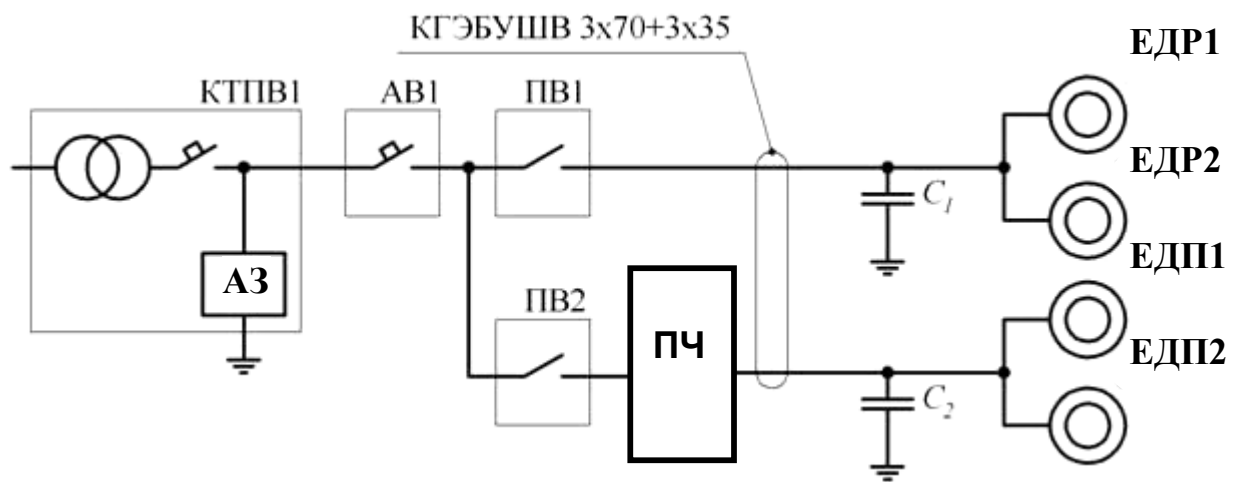


Рисунок 1.14 – Схема електроживлення видобувного комбайна з частотно-керованими асинхронними двигунами подачі (ЕДП) і не керованими асинхронними двигунами різання (ЕДР)

КТПВ – дільнична трансформаторна підстанція; *АВ* – автоматичний вимикач; *ПВ* – вибухозахищений магнітний пускач; *С* – ємність ізоляції кабелів; *АЗ* – апарат захисту від витоків струму на землю; *ПЧ* - перетворювач частоти

Структура ПЧ представлена випрямлячем 1 (ланка постійного струму) з ємнісним фільтром 2 на виході і автономним інвертором 3 напруги, що подається на АД споживача через згладжуючий дросель 4 (рис. 1.15). В процесі формування трифазної системи вихідних напруг перетворювача застосовується принцип широтно-імпульсної модуляції, що обумовлює наявність прямокутних імпульсів в кожній напівхвилі фазної напруги перетворювача (рис. 1.16). Ця прямокутність імпульсів вихідної напруги інвертора обумовлює наявність в них високочастотних гармонічних складових (рис. 1.17), величина і рівень частоти яких знаходяться у залежності від заданої частоти вихідної напруги ПЧ.

Наявність сукупності високочастотних складових у спектрі вихідних напруг інвертора обумовлює суттєве зменшення ємнісного опору ізоляції мережі струмам цих частот, утворює додаткову небезпеку електроураження і потребує вживання спеціальних захисних заходів (рис.1.18) [21; 23-25].

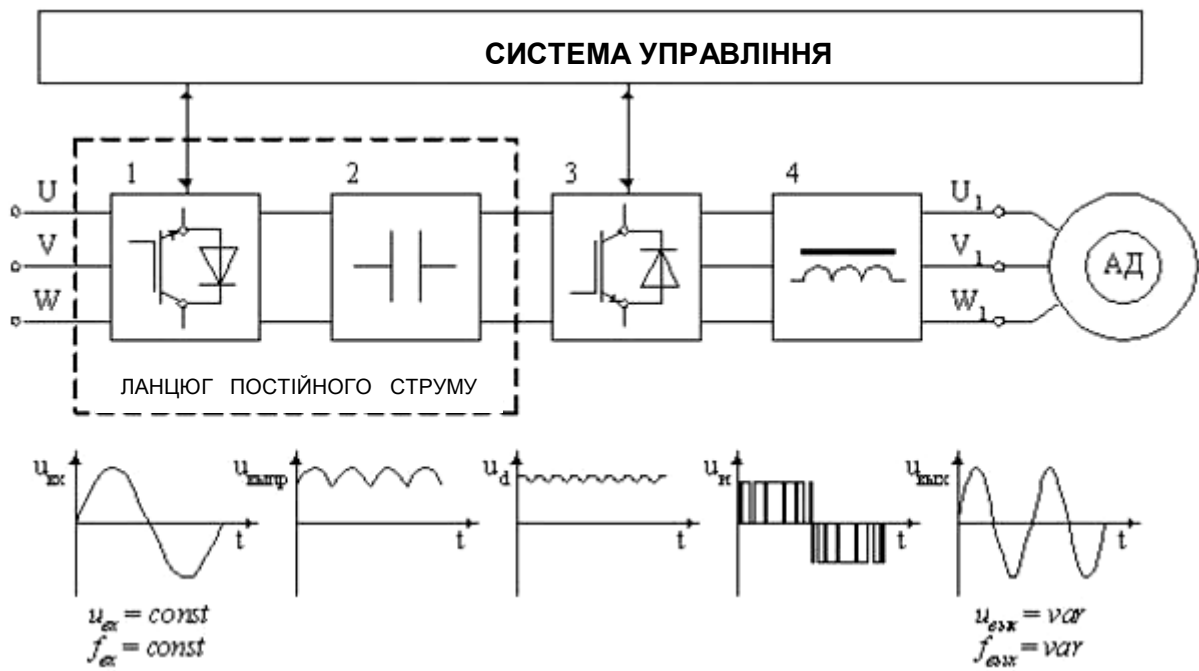


Рисунок 1.15 – Блочно-структурна схема перетворювача частоти ПЧЭШ-60 видобувного комбайна і діаграми напруг відповідних функціональних блоків

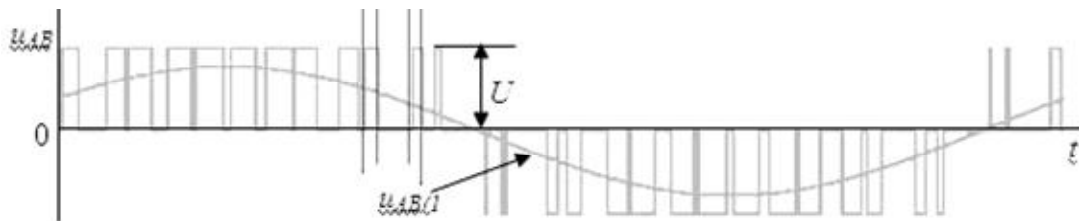


Рисунок 1.16 – Діаграми фазної напруги при реалізації принципу синусоїдальної широтно-імпульсної модуляції вихідної напруги ПЧ

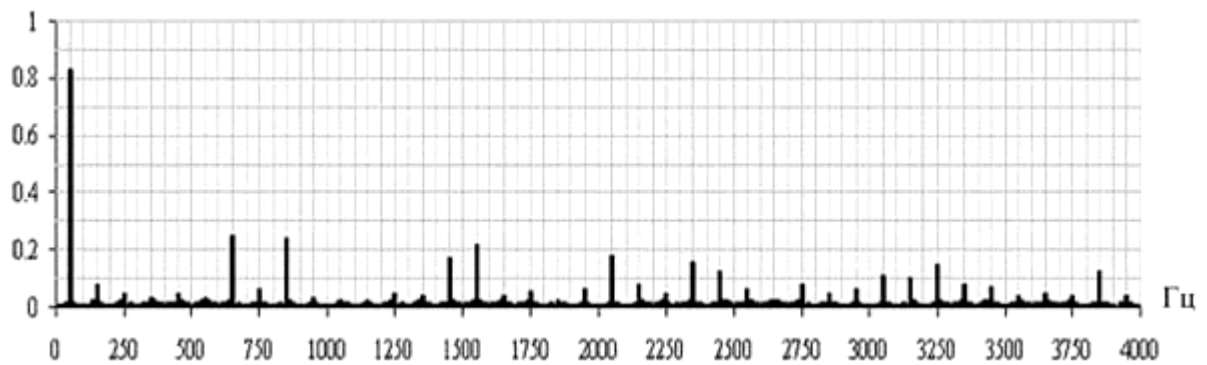


Рисунок 1.17 – Спектр вихідної напруги інвертора у відносних одиницях
Результати отримані в УкрНДІВЕ

Проблема полягає ще й в тому, що при виникненні витоку струму на землю в ланцюзі постійного струму між мережею і землею виникає додаткове джерело постійної напруги, струм якої $I_{вум2}$ може значно перевищити величину оперативного струму I_{on} апарата захисту (АЗ) від витоку струму на землю і цим блокуватиме його роботу (рис. 1.19). Тому в шахтних комбінованих електричних мережах, захист від витоків струму на землю здійснюється спеціальними захисними системами, до яких належить апаратура АЗУР-4ПП (застосовується у комбінованих електромережах напругою до 1140 В, включно) [21].

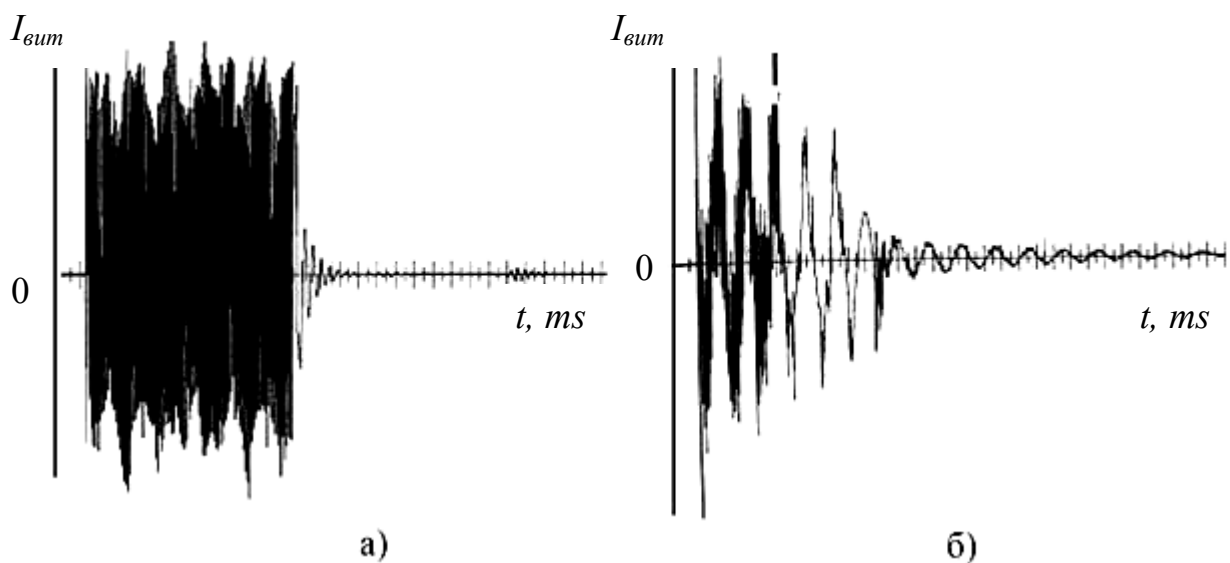


Рисунок 1.18 - Осцилограми струму витоку на землю в дільничній мережі з перетворювачем частоти при частоті його вихідної напруги 5 Гц (а) і 70 Гц (б) [21]

Апаратура АЗУР-4ПП являє собою систему комплексного захисту від витоків струму на землю у комбінованій шахтній дільничній електромережі, яка виконує водночас вплив на автоматичний вимикач дільничної трансформаторної підстанції, на перетворювач частоти і відключає кабельну лінію, що відходить від ПЧ (при винесеному варіанті його розташування). Функціональні взаємозв'язки цієї системи ілюструються її блочно-структурною схемою (рис. 1.20).

В разі виникнення небезпечного витоку струму на землю блок 1 спрацьовує і надсилає команди на відключення комутаційного апарата 4 і на спрацьовування блоку 8 примусового відключення силової напівпровідникової схеми

ПЧ (6). При цьому захисну функцію продовжуватиме виконувати блок 2 компенсації ємнісних струмів витоку, а блок 3 обере пошкоджену фазу і автоматично її підключить на землю через резистор малого опору. Блок 8 формує команду на відключення комутаційного апарату 7 при виникненні струму витоку після силових напівпровідникових елементів ПЧ. У цьому разі комутаційний апарат 7 своїм контактом вмикає короткозамикач 9, який імпульсно, на термін до 1с. замикає між собою три фази на виході ПЧ і, тим самим, припиняє дію зворотної ЕРС асинхронного двигуна гірничої машини.

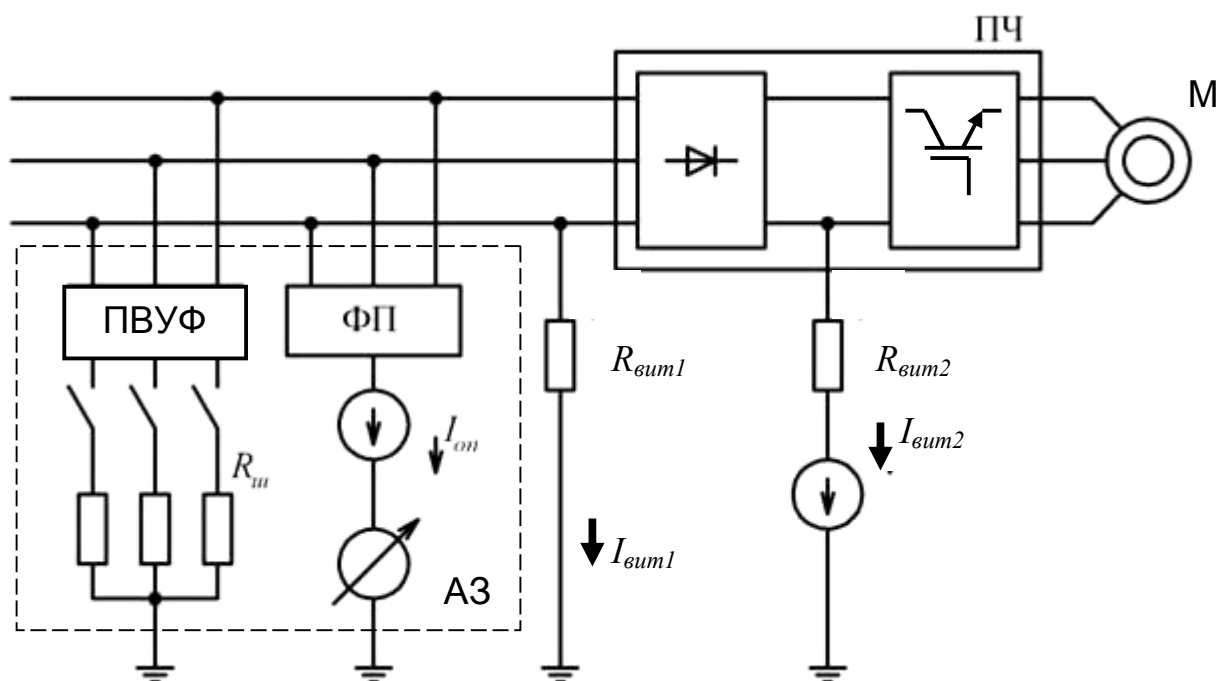


Рисунок 1.19 – Схема утворення впливових факторів з боку перетворювача частоти (ПЧ) в комбінованій електромережі дільниці шахти на роботу апарату захисту (АЗ) від витоку струму на землю
 ПВУФ – пристрій вибору uszkodженої фази; ФП – фільтр присьднання;
 М – асинхронний двигун споживача; $I_{он}$ – оперативний струм АЗ;
 $I_{вум}$ – струм витоку на землю; $R_{вум}$ – опір витоку на землю;
 $R_{ш}$ – шунтуючий опір АЗ

Дільнична мережа поділяється на дві ланки, і блок 3 при цьому не спрацьовує, а блок 2 функціонує у штатному режимі, підтримуючи безпеку експлуатації дільничної мережі при виникненні вказаного аварійного режиму. З метою усунення впливу ланки постійного струму на роботу захисту при виникненні в ній небезпечного струму витоку на землю через появу напруги між фа-

зою мережі і землею, спрямованої на зустріч вимірювальній напрузі апаратури захисту, передбачений блок 10 контролю опору ізоляції ланки постійного струму, який при зменшенні її опору нижче припустимого рівня відключає і блокує комутаційний апарат 7.

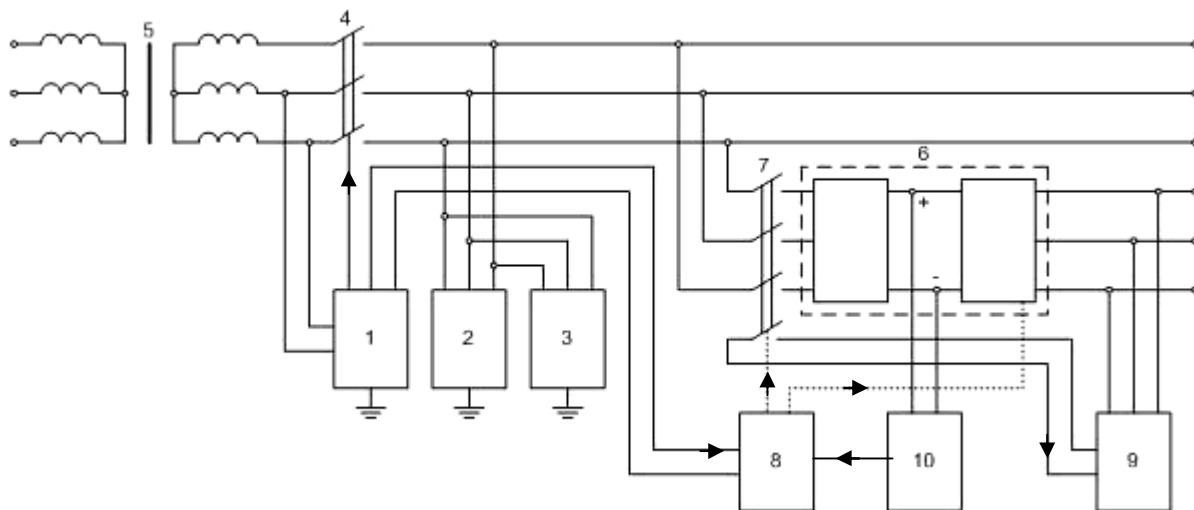


Рисунок 1.20 – Блочно-структурна схема системи АЗУР-4ПП комплексного захисту від витоків струму на землю в мережі з перетворювачем частоти в ланцюзі електроживлення асинхронного двигуна гірничої машини (розробка УкрНДІВЕ)

1 – блок контролю опору ізоляції мережі; 2- блок компенсації ємнісних складових струму витoku на землю; 3 – блок захисного заземлення фази з ушкодженою ізоляцією; 4 – захисний комутаційний апарат; 5 – трансформатор дільничної підстанції; 6 – силова напівпровідникова схема ПЧ; 7 – комутаційний апарат; 8 – блок примусового відключення; 9 – короткозамикач; 10 – блок контролю опору ланки постійного струму

Таким чином, сучасні шахтні дільничні мережі всіх рівнів номінальної напруги захищені засобами захисту від витоків струму на землю, дія яких розповсюджується на відокремлення енергетичних потоків від КТП і супроводжується компенсацією (автокомпенсацією) ємнісної складової опору ізоляції мережі та закорочуванням пошкодженої фази (в мережі напруги 1140 В). Однак, відключенням силових приєднань від джерела живлення не припиняється струм в колі витoku на землю, оскільки залишається впливова функція з боку зворотних ЕРС асинхронних двигунів споживачів, тривалість яких обумовлена постійною часу відповідних електричних машин, що перебуватимуть в стані вільного вибігу після захисного відключення мережі.

1.3. Огляд функціональних властивостей засобів знеструмлення мережі при виникненні коротких замикань

Міжфазне коротке замикання в електромережі з ізольованою нейтраллю трансформатора має наступні характерні ознаки:

- енергетичний потік комплектної трансформаторної підстанції спрямовується в місце виникнення міжфазного короткого замикання, при цьому точка короткого замикання, маючи близьку до нуля величину активного опору, відокремлює цей енергетичний потік від навантаження відповідного силового приєднання (асинхронного двигуна);

- у зв'язку із припиненням електроживлення асинхронного двигуна аварійного приєднання, останній переходить у режим вільного вибігу, генеруючи на статорі трифазну ЕРС обертання, яка утворює зворотний енергетичний потік в бік точки короткого замикання.

Таким чином, розрахункова схема силового приєднання дільничного електротехнічного комплексу в стані короткого замикання має структуру, відповідно до рис. 1.21. і передбачає наявність двох струмів до точки к.з.: з боку комплектної трансформаторної підстанції та струм з боку статора асинхронного двигуна споживача аварійного приєднання. Ознакою перехідного процесу виникнення короткого замикання в мережі з активними (R) та індуктивними (L) елементами (струм з боку КТП) є наявність аперіодичної i_a і періодичної i_n складових струму к.з. i_k , [26, 27]:

$$i_k = i_n + i_a = \sqrt{2}I_n \cdot \sin(\omega t - \varphi + \alpha_k) + i_{a0} \cdot e^{-t/T_a} \quad (1.2)$$

де I_n – діюче значення періодичної складової струму к. з.; i_{a0} – аперіодична складова струму к. з. у початковий момент його виникнення; $\omega = 2\pi f$ – кутова частота; φ – кут фазового зсуву струму в ланцюзі к. з.; α_k – фаза включення к. з.; T_a – постійна часу ланцюга к. з.; f – частота мережі.

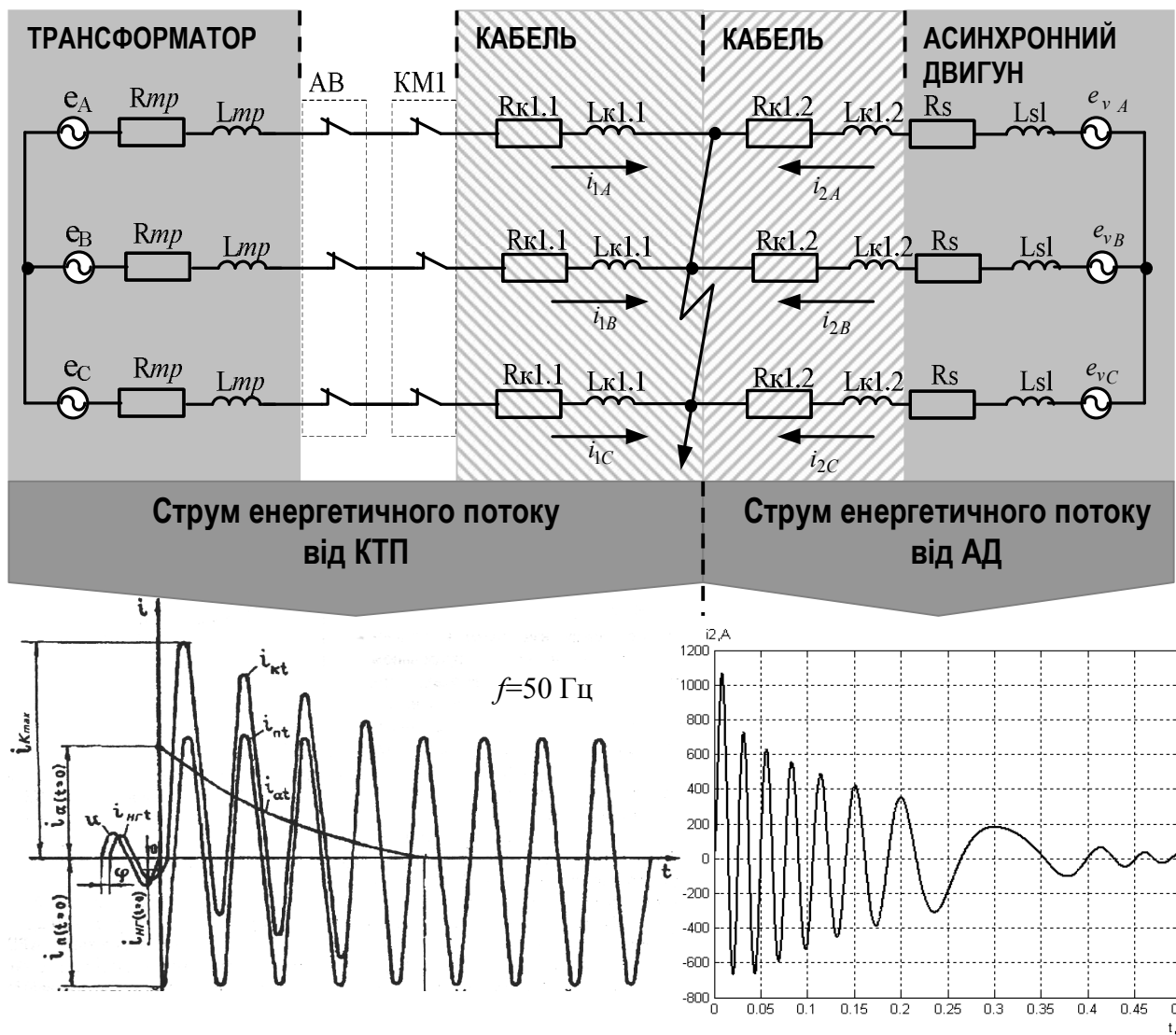


Рисунок 1.21 – Розрахункова схема силового приєднання дільничного електротехнічного комплексу в стані виникнення к.з. в кабелі живлення асинхронного двигуна і діаграми фазного струму к.з., обумовленого енергетичними потоками КТП і АД

Зворотний струм від АД на ділянці між статором двигуна і точкою к.з. обумовлюється зворотною ЕРС обертання асинхронного двигуна:

$$e_{об} = \frac{L_0}{L_r} j(1-S)\omega_o \psi_{op} e^{-\frac{t}{T_p}} e^{j\omega_o(1-S)t} \quad (1.3)$$

де L_0 – індуктивність головного потоку АД; L_r – повна індуктивність ротора; s и ω_o – ковзання та синхронна частота обертання ротора.

Постійна затухання вільного струму ротора, що обумовлює характер зменшення ЕРС обертання АД, визначається виразом:

$$T_r = (L_r / R_r) = U_\phi \cdot K_n / I_0 R_r \omega_0, \quad (1.4)$$

де U_ϕ – фазна напруга статора двигуна в режимі неробочого ходу; $K_n = 1,1$ (для АД з повітряним охолодженням) – коефіцієнт, що враховує насичення магнітної системи АД; I_0 – струм неробочого ходу АД [28]:

Враховуючи на те, що точка короткого замикання являє собою нульовий електричний опір, струм короткого замикання як з боку комплектної трансформаторної підстанції, так і з боку асинхронного двигуна має надзвичайно великий рівень, оскільки струмообмежуючими факторами в цьому випадку залишаються активні та ємнісні опори джерела енергетичного потоку та ланки кабелю до точки к.з. Цим обумовлені вимоги щодо рівня швидкодії (t_k) знеструмування точки короткого замикання за критерієм дотримання термостійкості кабелю (перетином s , з коефіцієнтом тепло розсіювання c) до спалахування від струму к.з. $\left(I_{\max} = c \cdot s / \sqrt{t_k} \right)$ [29]. Тривалість відключення к.з. t_k визначається тривалістю спрацьовування захисту t_z і комутаційного відключаючого силового апарата $t_{ан}$, тобто $t_k = t_z + t_{ан}$. Зважаючи на фактори небезпеки, що мають місце при їх експлуатації в умовах шахти розробка технічних рішень із підвищення швидкодії виявлення стану короткого замикання в дільничній мережі шахти і припинення дії енергетичних потоків в аварійному електричному приєднанні має пріоритетне значення.

Переважає більшість відомих технічних рішень, які можуть бути віднесені до максимального струмового захисту в шахтному дільничному електротехнічному комплексі, відпрацьовують функцію виявлення струму короткого замикання з боку джерела живлення (КТП) та швидкодіюче відключення енергетичного потоку цього джерела від електричного приєднання, у якому виникло міжфазне коротке замикання.

Відповідні виконавчі пристрої та пристрої виявлення струму к.з. можна поділити на пристрої безпосередньої і пристрої непрямой дії (рис. 1.22). Останні дії мають бути приведені в роботу за командами відповідних пристроїв виявлення струму к.з. Основний принцип визначення струму короткого замикання, який відпрацьовується засобами максимального струмового захисту шахтних дільничних мереж є порівняння фактичного струму мережі з наперед заданою уставкою і формування команди на відключення комутаційного апарата в разі перевищення цим струмом величини уставки. Відмінною особливістю пристроїв непрямой дії (УМЗ, ПМЗ та ін.) є те, що вимірювальний параметр утворюється вторинними струмами трансформаторів струмового захисту, порівняльна функція відпрацьовується електричною схемою, у якій передбачена можливість регулювання уставки спрацьовування [4, 26].

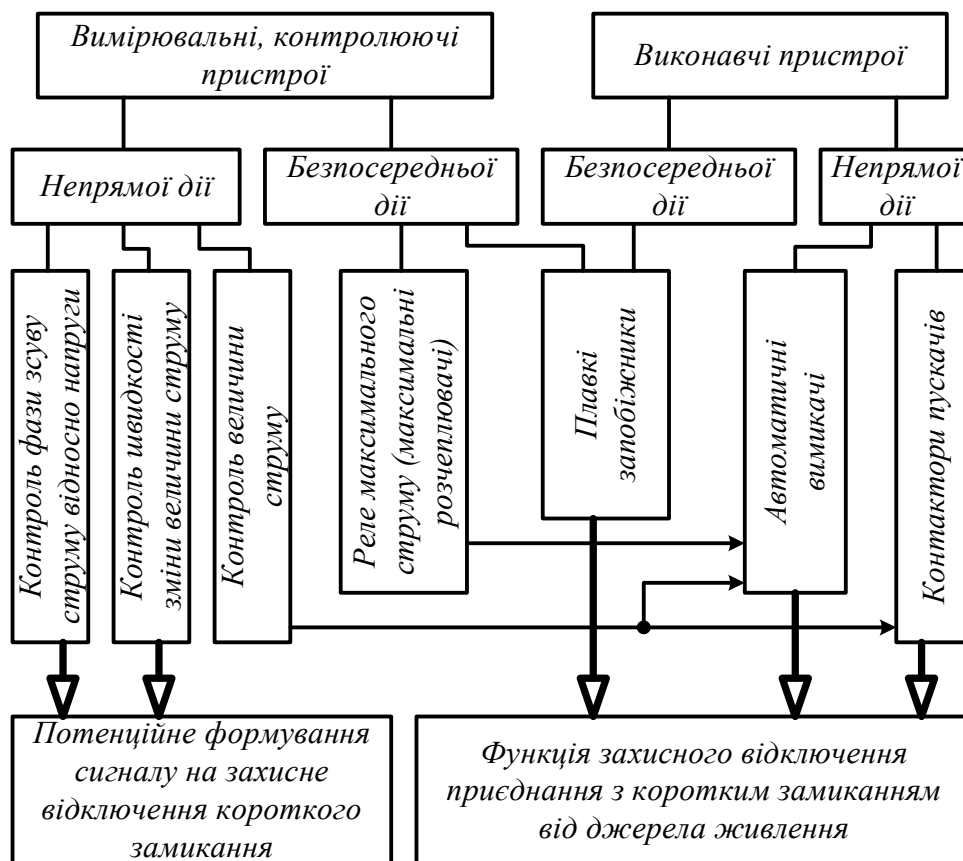
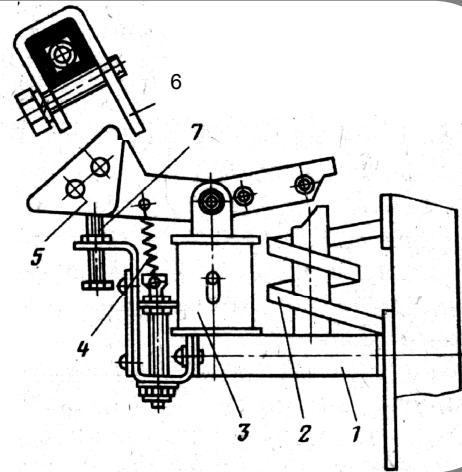
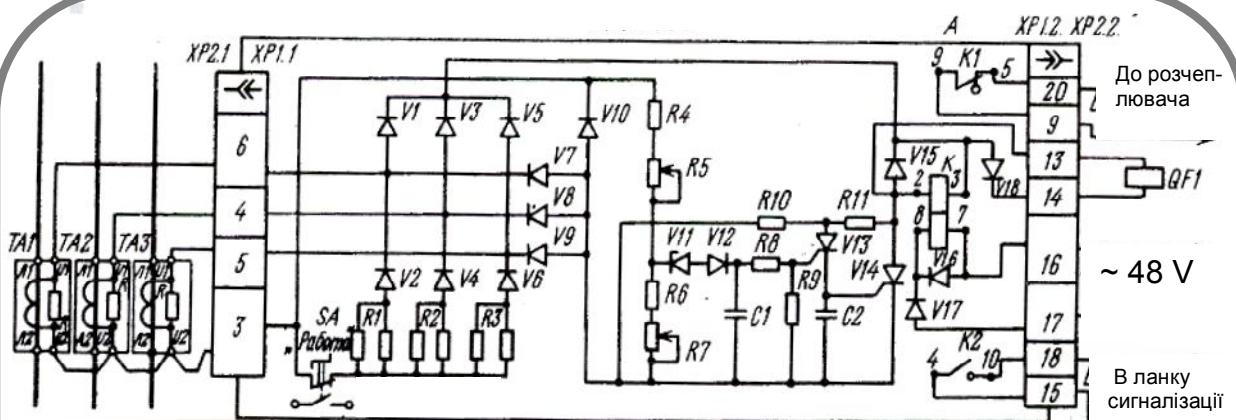
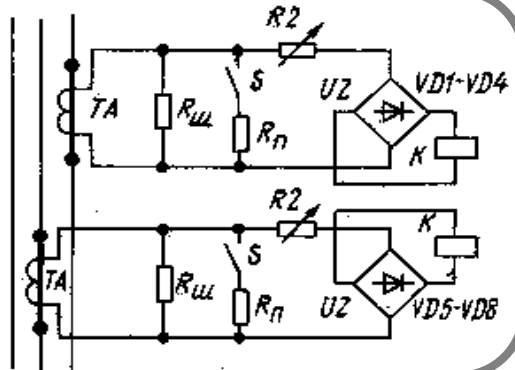


Рисунок 1.22 - Класифікація засобів захисту електротехнічного комплексу дільниці шахти від струму короткого замикання

Максимальний розчеплювач - контролює, безпосередньо, величину струму в електромережі; функція спрацьовування – переміщення якоря під впливом магнітного потоку в магнітопроводі; об'єкт впливу – механізм вільного розчеплення АВ. В сучасних засобах захисту функція регулювання уставки спрацьовування – відсутня
 1 – магнітопровід; 2 – силова шина фази мережі; 3 – перевірна котушка; 4 пружина механізму налаштування уставки спрацьовування; 5 – якорь; 6 ричаг механізму розчеплення АВ



Захист УМЗ – контролює вторинний струмовий параметр – величину вихідного струму трансформаторів струму ТА, функція спрацьовування (реле К) – вплив на схему управління контактором пускача; розчеплювач автоматичного вимикача - відключення відповідного комутаційного апарату. Суттєвий недолік – виконання виміральної функції недостатньо точним засобом - електромагнітним реле



Перевірка

Захист ПМЗ - контролює вторинний струмовий параметр – величину вихідного струму трансформаторів струму ТА, функція спрацьовування (реле К) – вплив на схему управління контактором пускача; розчеплювач автоматичного вимикача - відключення відповідного комутаційного апарату. Функція вимірювання параметра вторинного струму виконується електронною схемою. Електромагнітне реле виконує виключно виконавчу функцію.

Рисунок 1.23 – Аналіз властивостей типових засобів максимального струмового захисту силового рудникового електроустаткування технологічних комплексів шахт

Розглянуті технічні рішення передбачають певний термін спрацьовування захисту, під час якого струмопостачання (і відповідне теплове перевантаження) аварійного силового приєднання буде підтримуватись. Враховуючи на наявність небезпеки вибуху метано-повітряної суміші в умовах шахти від спалаху в місці виникнення короткого замикання, принципово важливою складовою захисної функції слід вважати запобігання відкритого іскро – і дугоутворення, спроможного викликати цей вибух. Напрямами рішення цієї задачі є:

- підвищення швидкодії визначення і знеструмлення ланки короткого замикання;
- удосконалення конструкції гнучкого кабелю в контексті запобігання спалаху його оболонки при виникненні струму к.з. на термін спрацьовування максимального струмового захисту.

Ефективним технічним рішенням в цьому напрямі є запровадження у експлуатації вибухозахищеного шахтного гнучкого екранованого кабелю марки КГЭШуС-ПБ, у якому передбачено шість силових жил, тобто – розщеплення кожної фази на дві жили.(рис. 1.24), Дослідженнями [30] доведено, що кабель з розщепленими силовими жилами спроможен знижувати величину струму двофазного короткого замикання в 1,3 – 1,8 разу відносно величини струму короткого замикання в трифазному кабелі, що досягається шунтуванням дугового проміжку непошкодженою жилою цієї ж фази, встановлено, що при дугових процесах в кабелі продукти термічного розкладання ізоляційного полівінілхлоридного платикату знижують тривалість горіння електричної дуги до 30 мс. Ці властивості дозволяють уникнути спалаху кабелю в разі утворення в ньому ланки двофазного короткого замикання (через пошкодження ізоляції силових жил унаслідок зовнішнього стиснення) у термін - від початку к.з. до спрацьовування максимального струмового захисту. Однак, це не зменшує актуальності пошуку і запровадження технічних рішень із підвищення швидкодії виявлення пошкодження електричної мережі і захисту її від коротких замикань.

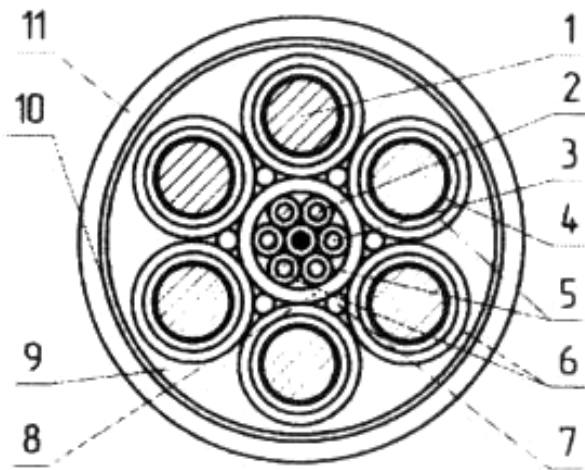


Рисунок 1.24 - Улаштування гнучкого екранованого вибухозахищеного шахтного кабелю марки КГЭШуС-ПБ:
 1- силова жила; 2 – допоміжна жила;
 3- заземлююча жила; 4 – сепаратор;
 5 – ізоляція силових і допоміжних жил;
 6 – електропровідний екран; 7 - зміцнювальні елементи; 8 - електропровідна оболонка; 9 – внутрішня оболонка;
 10 – мідно-сталеве облещення;
 11 – зовнішня оболонка

Прискорення у визначенні режиму короткого замикання може бути отримане на основі виміру швидкості зміни струму у контрольованій мережі. Реалізація цього принципу може бути виконана у різний спосіб, як шляхом безпосереднього визначення швидкості наростання струму в мережі і порівняння цього параметру з контрольною величиною, так і опосередковано.

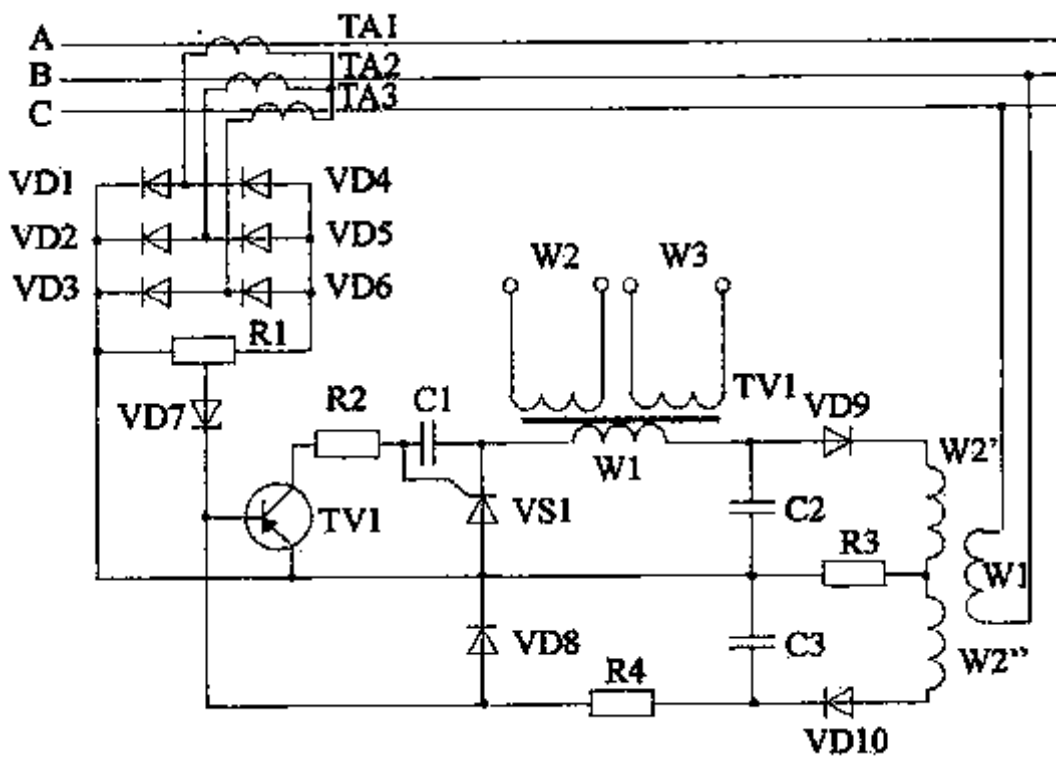


Рисунок 1.25 – Схема швидкодіючого максимального струмового захисту типу БМЗ з функцією реакції на швидкість наростання струму в мережі

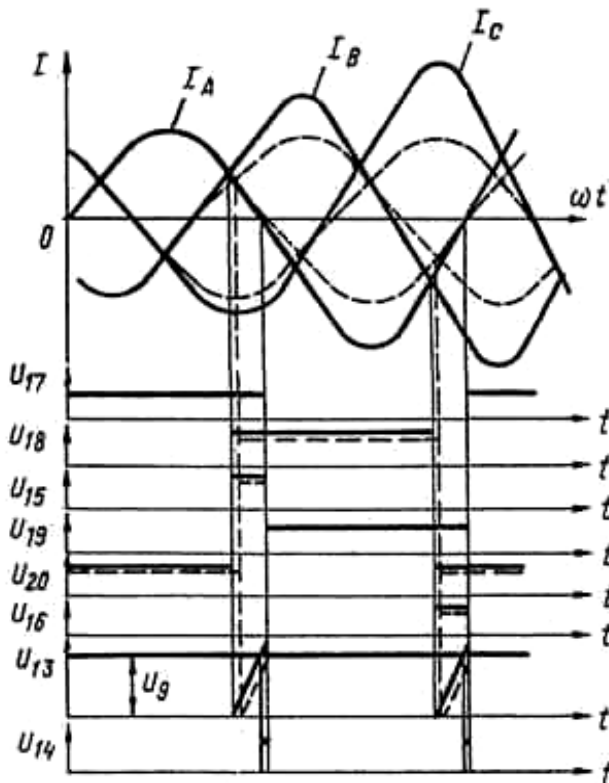


Рисунок 1.26 - Діаграма параметрів пристрою МСЗ за авторським свідоцтвом СРСР № 1377946

Прикладом реалізації контролю швидкості наростання струму в мережі є схема швидкодіючого струмового захисту БМЗ, до передбачена реакція стабілітрона VD7 на величину падіння напруги (що є функцією швидкості наростання струму мережі) на резисторі R1 навантаження мостового випрямляча VD1-VD6 (рис. 1.25) [31]. В інший спосіб процес підвищення струму в промисловій трифазній мережі може бути встановлений шляхом визначення фаз точки

співпадіння миттєвих значень струмів суміжних фаз (i_A та i_B , відповідно до рис. 1.26). Діаграма електричних параметрів вказує на наявність переміщення у часі цієї точки в процесі підвищення струму трифазної мережі [32]. Отже, її аварійний стан може бути визначений набагато раніш, ніж струм досягне амплітудного рівня, або діючого значення.

Іншим способом реагування на швидкість наростання струму є вимір терміну проходження його або пропорційної струмові напруги між двома фіксованими рівнями U_{on1} та U_{on2} (рис. 1.27) [33-35]. Підвищена інтенсивність зростання струму відповідає співпадінню за часом інтервалів існування імпульсу U_9 (перевищення напругою U_7 , що пропорційна струму мережі, граничного значення U_{on2}) і імпульсу U_{11} обмеженої тривалості, сформованого в момент, коли напруга U_7 дорівнює напрузі U_{on1} . Розглянутий спосіб не потребує витримки часу на вимір амплітуди, або дієвого значення струму мережі і тому є принципово придатним для визначення процесу короткого замикання дільничної ме-

режі на початковій стадії. Однак, впливова дія відповідного пристрою захисту поширюватиметься виключно на засоби відокремлення енергетичного потоку з боку живлячої КТП і не може стати на заваді енергетичному потоку з боку асинхронного двигуна (або сукупності двигунів) споживача, що створюється зворотними ЕРС обертання.

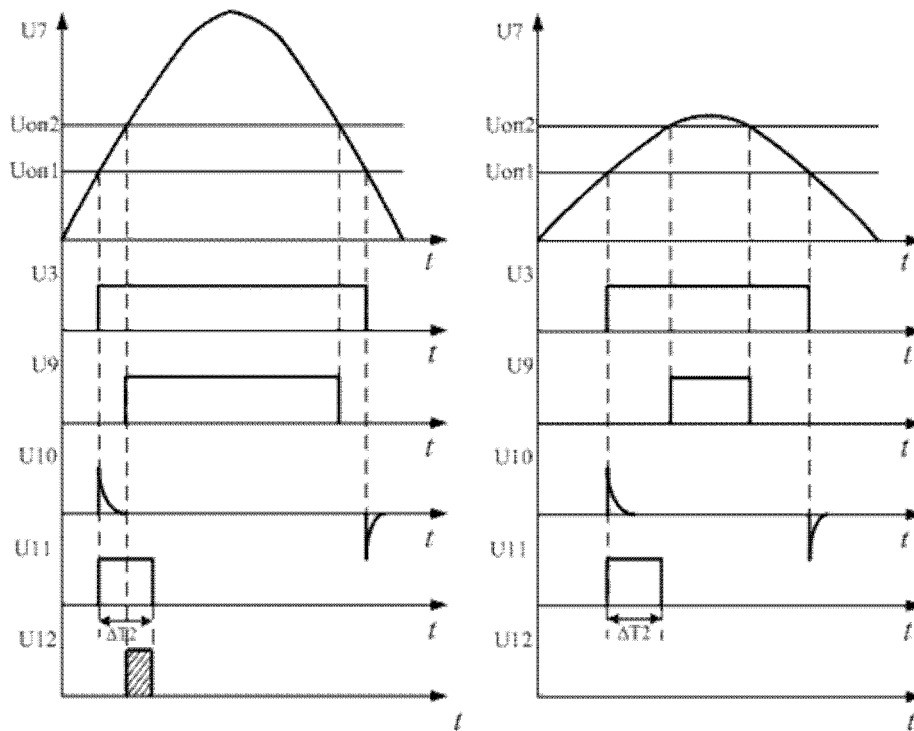


Рисунок 1.27 - Часові діаграми параметрів при визначенні інтенсивності зростання фазного струму мережі

Поряд з розглянутими властивостями засобів виявлення аварійного стану дільничної електромережі наявність процесу міжфазного короткого замикання може бути встановлена за фактом стрибкоподібної зміни фазового зсуву φ фазного струму (відносно фазної напруги) у зв'язку з відповідною зміною співвідношення активних та індуктивних складових електричного приєднання через відокремлення внаслідок короткого замикання частини його активно-індуктивних опорів (відрізок кабелю між точкою к.з. і двигуном, а також, - сам асинхронний двигун).

Однак окреме врахування параметрів швидкості зростання струму (di/dt), або величини фазового зсуву (кута) φ у якості інформаційних параметрів про

виникнення короткого замикання в мережі не є раціональним. Так, причиною збільшення (di/dt) може бути декілька впливових факторів (пуск АД; стопоріння приводу технологічної установки відповідного силового приєднання та ін.), а причиною стрибкоподібної зміни параметру φ може бути приєднання, або відключення асинхронного електроприводу споживача ділянки з відповідним кабелем живлення.

Тому ідентифікація процесу як коротке замикання може мати місце в результаті урахування параметрів (di/dt) і φ в комплексі та визначення їх величин, які відповідають виключно початку процесу короткого замикання в силовому приєднанні. Зокрема, стрибкоподібний фазовий зсув φ фазного струму варто використовувати як команду на вимір di/dt і в якості підтвердження наявності короткого замикання в силовому приєднанні в разі, якщо величина швидкості наростання струму буде знаходитись в межах, визначених відповідно до режиму к.з. відповідного приєднання [34; 35]. Але такий підхід передбачає необхідність ретельного налаштування уставок спрацьовування за (di/dt) і φ з урахуванням цілого комплексу параметрів конкретного електричного приєднання мережі і тому має невеликі перспективи промислового запровадження.

Ефект прискореного відокремлення енергетичного потоку від точки короткого замикання досягається в разі поєднання функції відключення силового комутаційного апарата із закорочуванням (через штучно створену ланку к.з.) його виходу. Досягнутий результат часу знеструмлення силового приєднання з ланкою к.з. ($\Delta t \leq 2,5$ мс) дозволив ставити питання про реальність виконання функції випереджального захисту, тобто, знеструмлення точки короткого замикання за час, не достатній для створення достатньої умови (енергія іскроутворення) вибуху метано-повітряної суміші небезпечної (4% - 15 % метану) концентрації. Технічним засобом реалізації зазначеного принципу захисного відключення мережі є автоматичний швидкодіючий вимикач АБВ-250, оснащений швидкодіючим максимальним струмовим захистом БМЗ та короткозамикачем фаз відходячого приєднання (рис. 1.28) [4, 36].

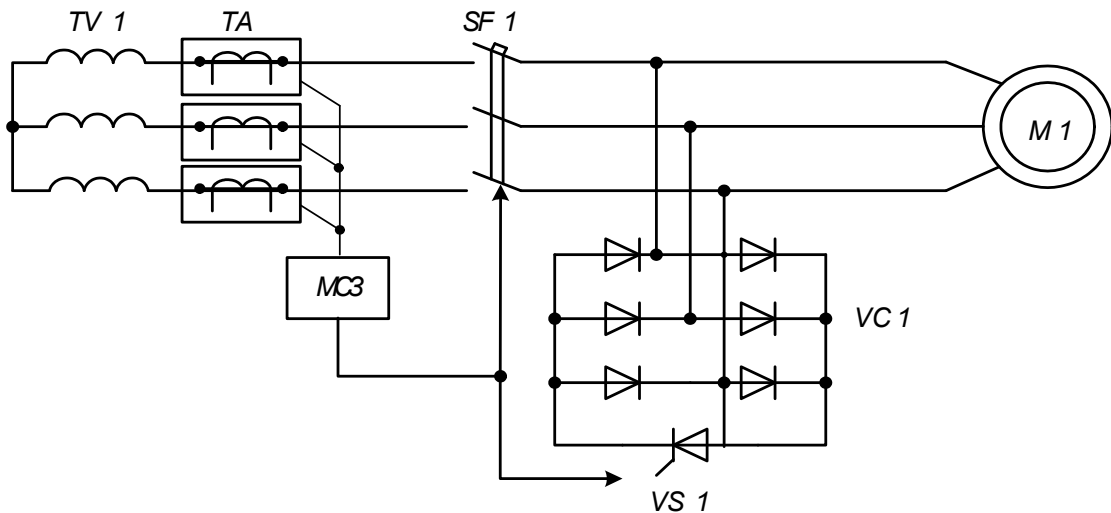


Рисунок 1.28 - Струмний захист закорочуванням виходу АВ

Проблемним питанням застосування цього автоматичного вимикача є наслідки хибного спрацьовування короткозамикача, що є неприпустимим, але теоретично можливим.

Запровадження автоматичних швидкодіючих вимикачів (АБВ-250) стало основою створення системи прискореного знеструмлення дільничної електромережі шахти (рис.1.29), яка отримала визначення як система «випереджально-го» захисту і обумовила відповідне положення нормативного документа (п.5.2.2 ПБ) в частині застосування і швидкодії захисного спрацьовування (2,5мс) в електромережі очисних та підготовчих виробок пластів крутого падіння, небезпечних за раптовими викидами вугілля, породи та газу, електрообладнання з рівнем вибухозахисту РВ [13]. Ця система електропостачання передбачає застосування (окрім автоматичного вимикача АБВ-250) засобів захисного закорочування, безпосередньо, силових введів асинхронних двигунів споживачів (короткозамикачів типу ПМК та ПМКВ) та модифікованих пускачів ПВИ-250 АБВ [37-39]. Однак цьому технічному рішення притаманний ряд недоліків: керування відокремленням зворотного енергетичного потоку асинхронного двигуна в разі пошкодження кабеля живлення відповідно до рис. 1.29 відбуватиметься за командами що мають надходити від автоматичного швидкодіючого вимикача дільниці до короткозамикача статора по сигнальних жилах цього ж кабеля.

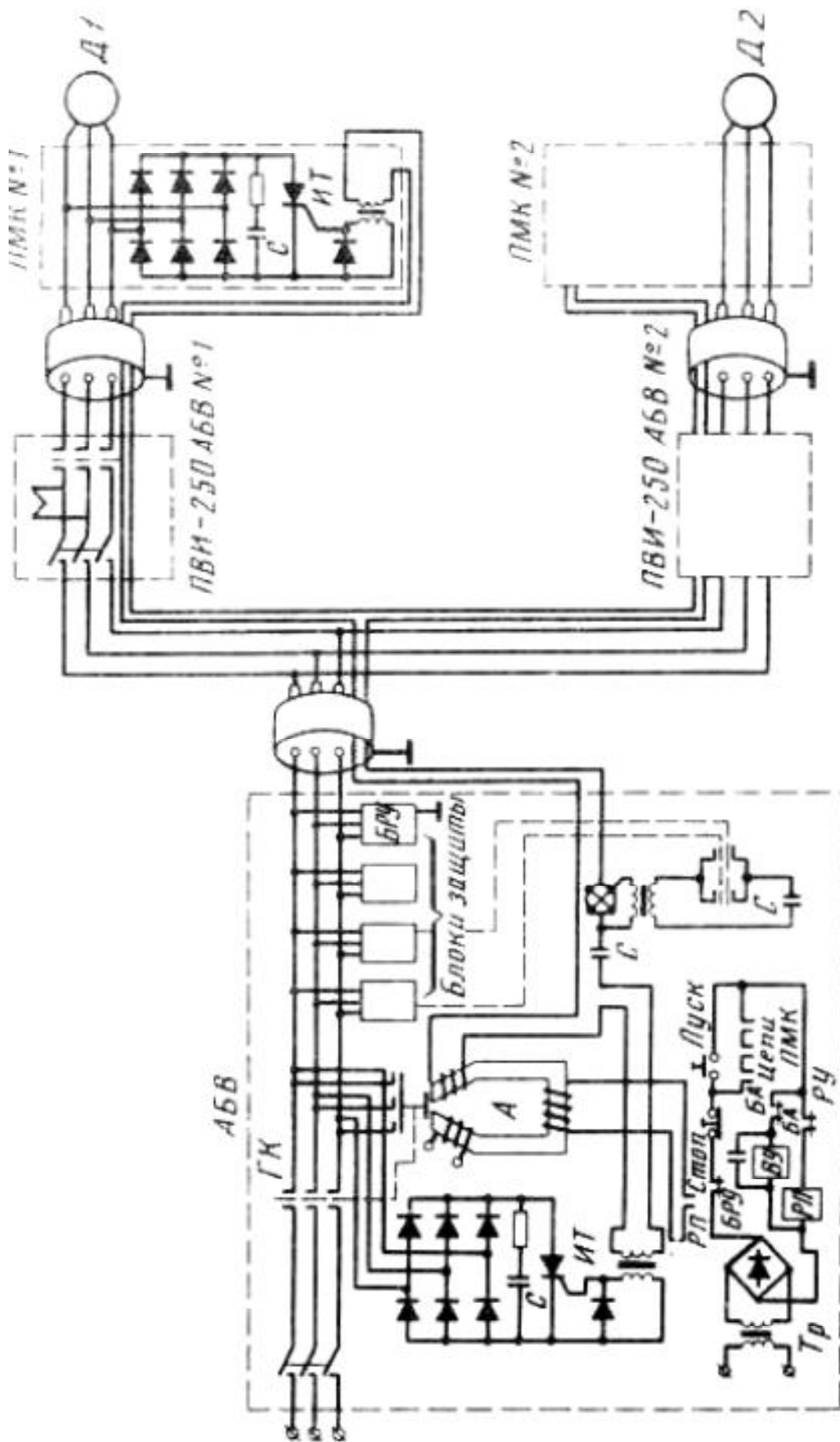


Рисунок 1.29 - Структурна схема системи електропостачання шахтної ділянки з швидкодіючим захисним відключенням

Отже, при його пошкодженні є ймовірність неспрацьовування захисту через пошкодження сигнальних жил водночас із силовими. Це ставить під сумнів доцільність запровадження зазначеної вище структури дільничного електротехнічного комплексу. Іншими проблемними питаннями є:

- відсутність автономності пристрою, тобто ввімкнення короткозамикачів відбувається після спрацьовування автоматичного вимикача, що призводить до деякого запізнення усунення впливу зворотного енергетичного потоку асинхронного двигуна;
- помилка персоналу при підключенні сигнальних жил кабеля до прохідних затисків пускача призведе до розриву каналу передачі керуючих команд;
- вірогідність хибного спрацьовування короткозамикачів призведе до виникнення аварійного стану в шахтній мережі, що є неприпустимим;
- спрацьовування короткозамикачів спричиняє струмові та динамічні перевантаження асинхронного двигуна.

Слід також зазначити, що розглянута система може бути визначена як система «випереджального» захисту виключно у порівнянні із терміном утворення вибуху метано-повітряної суміші від електричної іскри. Стосовно ж до факту виникнення аварійного стану мережі така система може бути визначена тільки як швидкодіюча, оскільки її функціонування передбачає спрацьовування після виникнення міжфазного короткого замикання, а не у випередженні цього небезпечного стану мережі. Представлена на рис. 1.28 система випереджального струмового захисту мала обмежений термін експлуатації у 1980 роки ХХ ст.

Таким чином, засоби максимального струмового захисту, що застосовуються в сучасних шахтних дільничних електромережах відпрацьовують виключно функцію визначення струму короткого замикання з боку живлячої комплектної трансформаторної підстанції дільниці і захисного відключення її енергетичного потоку від мережі аварійного приєднання. Ідея усунення впливу ЕРС всіх джерел в системі електропостачання шахтного дільничного електротехнічного комплексу, включаючи зворотні енергетичні потоки асинхронних двигунів, не тільки не втратила, а набула ще більшої практичної актуальності. оскі-

льки тенденція до застосування електричних машин великої потужності обумовлює відповідні рівні (включаючи термін існування) зворотних енергетичних потоків АД (і їх вплив на точку к.з. після захисного відключення електромережі). Однак, її реалізація потребує принципово нового підходу. Зокрема, технічні засоби визначення пошкодження кабелю живлення асинхронних двигунів споживачів і відокремлення статорів електродвигунів мають біти автономними, не передбачати засобів інформаційного зв'язку із захисними засобами з боку живлячої трансформаторної підстанції. Їх спрацьовування має відбуватись не за фактом спрацьовування захисних засобів розподільчого пункту дільниці, а за фактом виникнення аварійного стану мережі. Їх функціонування не повинно призводити до порушення режиму нейтралі в робочому стані мережі і впливати на роботу засобів захисту від витоків струму на землю.

1.4 Зворотні енергетичні потоки асинхронних двигунів в режимі вибігу як фактор підтримання небезпечного стану електромережі

З метою дослідження впливової функції зворотних енергетичних потоків асинхронних двигунів, кабельна мережа електротехнічного комплексу дільниці шахти має бути представлена з урахуванням розповсюдженого стану його структурних складових (рис. 1.30). Асинхронні двигуни електроспоживачів дільниці на відміну від класичних Г-образних, або Т-образних схем заміщення, доцільно представляти повними трифазними схемами, що вміщують джерела трифазних ЕРС обертання ($e_{об}$), індуктованих в статорі полем обертючих струмів ротора (рис. 1.31), оскільки ці зворотні ЕРС перетворюються на джерело зворотного живлення мережі електротехнічного комплексу після його захисного відключення і обумовлюють відповідні параметри процесів в цьому об'єкті.

Відповідно до наведеної схеми заміщення ЕРС обертання ротора, що індуктується в статорі обертаючим полем ротора, визначається з виразів 1.3; 1.4.

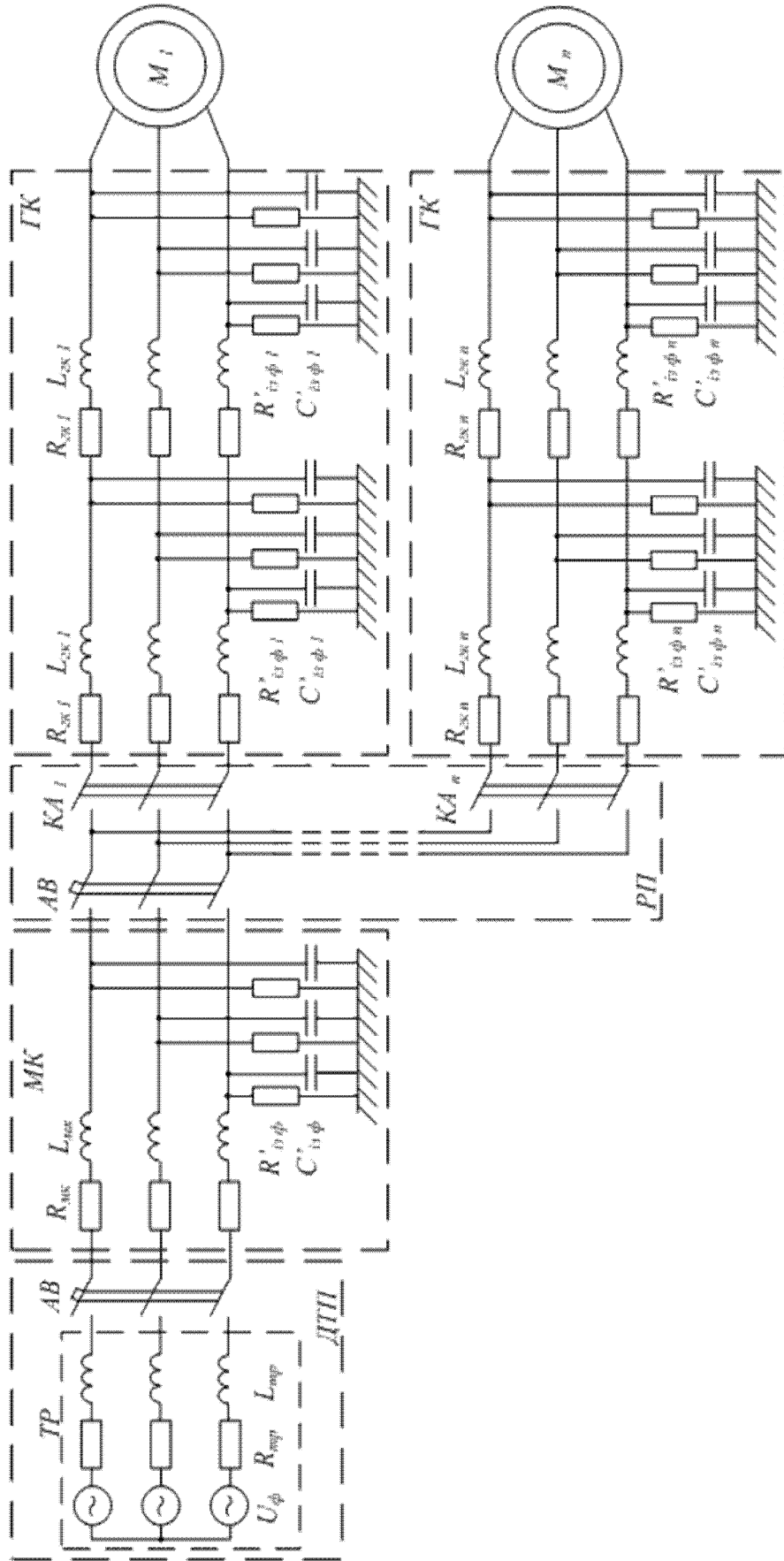


Рисунок 1.30 - Схема замощення шахтного електротехнічного комплексу з розповсюдженими параметрами: АВ – автоматичний вимикач; ГК – гнучкий кабель; ДТП – дільнична трансформаторна підстанція; КА – комутаційний апарат; М – асинхронний двигун; МК – магістральний кабель; РП – розподільчий пункт; ТР - трансформатор

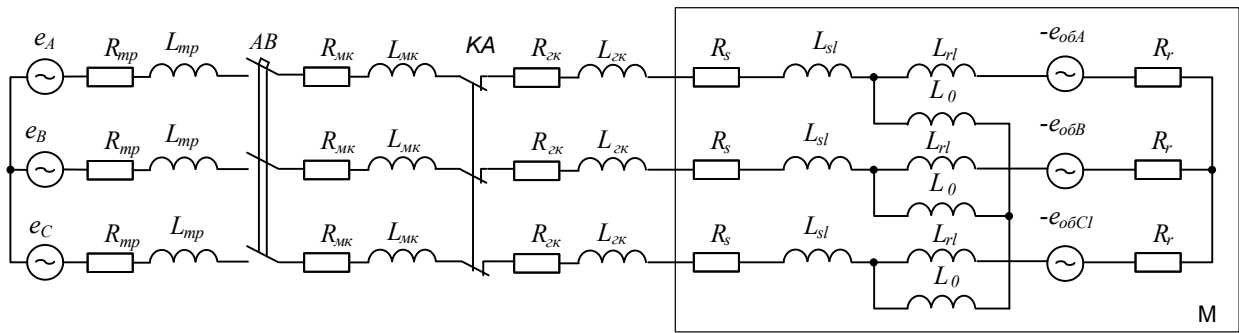


Рисунок 1.31 - Схема заміщення асинхронного двигуна: АВ – автоматичний вимикач; КА – контактор; М – асинхронний двигун; e_A, e_B, e_C - миттєві значення фазних напруг на виході трансформаторної підстанції; $R_{mp}, R_{mk}, R_{zk}, L_{mp}, L_{mk}, L_{zk}$ - активні опори та індуктивності відповідно трансформатора, магістрального та гнучкого кабелів; R_s, R_r, L_{sl}, L_{rl} - активні опори та індуктивності відповідно статора та ротора

Розглядаючи процес утворення зворотної ЕРС АД, слід враховувати вплив моменту інерції J_{np} приводу та статичного моменту опору M_o на тривалість зниження кутової швидкості ротора АД [28]:

$$t_m = J_{np} \int_{\omega_2}^0 \frac{d\omega}{-M_o} = \frac{J_{np} \omega_2}{M_o}, \quad (1.5)$$

де ω_2 – частота обертання ротора двигуна при $M = M_o$.

Із залежностей (1.3)-(1.5) випливає, що миттєві значення ЕРС обертання роторів АД різних потужностей протягом свого зменшення можуть приймати значення, різні за амплітудою, частотою та знаком (рис. 1.32) [40].

В разі групового вибігу двигунів формуватимуться умови підтримання в рухомому режимі окремих АД протягом обмежених інтервалів часу. В цьому випадку двигуни споживачів дільниці сумісно формують у відключеній мережі систему трифазної напруги, яка експоненціально зменшується.

Розглянемо особливості генераторного режиму роботи асинхронної машини. В рухомому режимі роботи АД магнітне поле, що обертається, перетинає

провідники обмоток статора та ротора в однаковому напрямку, тому ЕРС статора E_1 і ротора E_2 співпадають за фазою (рис.1.33,а) В генераторному режимі провідники обмоток статора перетинаються полем, що обертається, у прямому напрямку, а провідники ротора – у зворотному, ЕРС ротора змінює свій знак на зворотний (рис. 1.33,б).

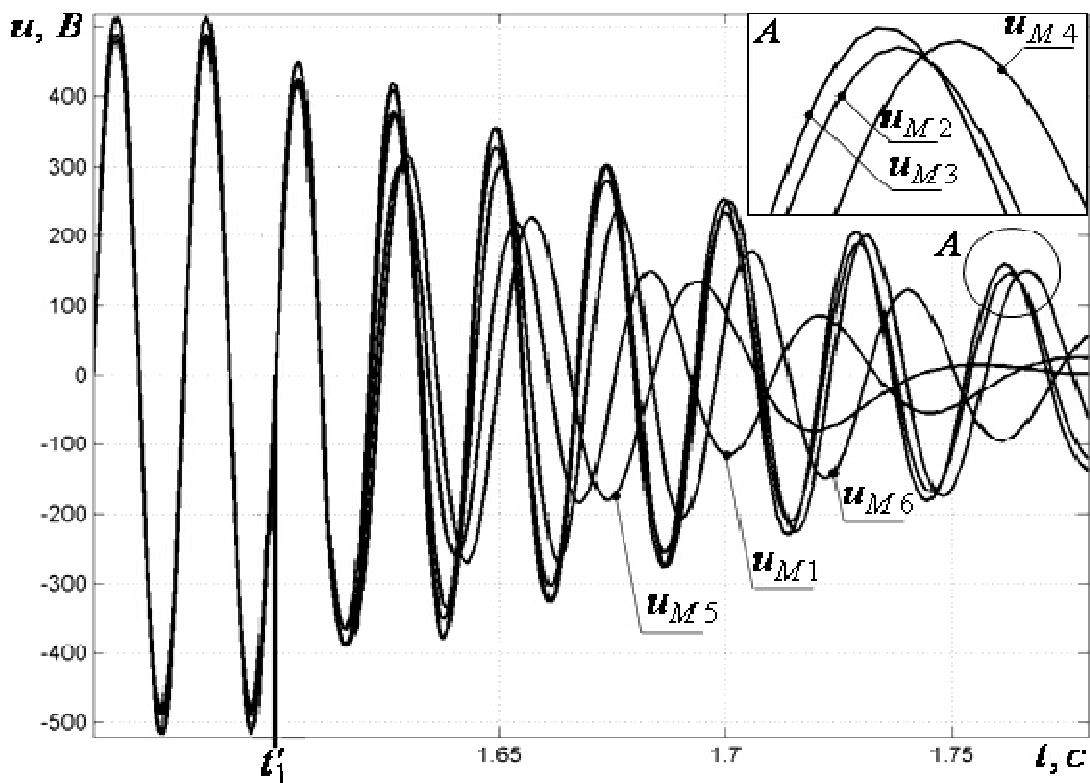


Рис. 1.32. Діаграми моделювання ЕРС обертання двигунів (для однієї фази) розімкненої мережі [40]

Користуючись виразом для струму ротора:

$$I_2' = \frac{E_2' s}{r_2' + jx_2' s} = \frac{E_2' r_2' s}{r_2'^2 + (x_2' s)^2} - j \frac{E_2' x_2' s^2}{r_2'^2 + (x_2' s)^2}, \quad (1.6)$$

можна встановити, що з переходом в генераторний режим змінює свій напрям лише активна складова струму ротора через те, що момент на валу змінює свій знак на зворотний, тобто ковзання s стає від'ємним. При цьому реактивна складова зберігає свій напрямок і при $s < 0$, як видно з виразу (1.6) [41].

Векторна діаграма асинхронного генератора (рис.1.33,б) дозволяє встановити наступне: між \dot{U}_1 та \dot{I}_1 кут зсуву фази дорівнює $\varphi_2 > \pi/2$, що відповідає режимові, в якому причиною виникнення струму I_1 є не напруга живлення мережі, а ЕРС E_1 . Таким чином, відмітною рисою генераторного режиму асинхронного двигуна є повернення до мережі енергії, що виділяється під час гальмування [28]. Такі ж висновки можна зробити в результаті аналізу виразів для активної (електромагнітної) та реактивної потужності (P_{em} та Q_2 , відповідно).

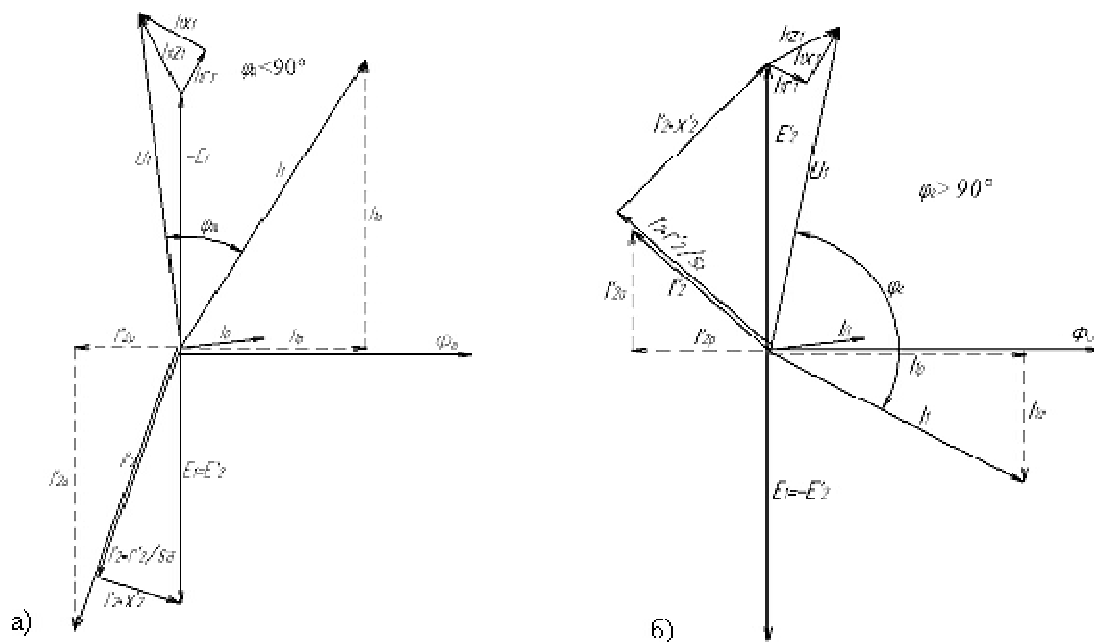


Рисунок 1.33 - Векторні діаграми асинхронного двигуна (а) та генератора (б)

Електромагнітна потужність АД [28]:

$$P_{em} = m_1(I_2')^2 \frac{r_2'}{s} = \frac{m_1 U_1^2 r_2' / s}{(r_1 + r_2' / s)^2 + x_k^2} = \frac{m_1 U_1^2 r_2' s}{(r_1 s + r_2')^2 + (x_k s)^2}. \quad (1.7)$$

Останній вираз свідчить про те, що з переходом до генераторного режиму активна потужність змінює свій знак на зворотний, тобто, генератор віддає активну потужність до мережі.

Реактивна потужність вторинного контуру визначається з виразу [41]:

$$Q_2 = m_1 U_1 I_2' \sin \varphi_2 = \frac{m_1 U_1^2}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r_2'}{s}\right)^2 + x_k^2}} \cdot \frac{x_k}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r_2'}{s}\right)^2 + x_k^2}} = \frac{m_1 U_1^2 x_k s^2}{(r_1 s + r_2')^2 + (x_k s)^2}. \quad (1.8)$$

Отже, можна встановити, що знак реактивної потужності зберігається незалежно від режиму роботи машини, тобто для будь-якого ковзання. Ця обставина свідчить про те, що АД як у руховому, так і в генераторному режимі споживає з мережі реактивну потужність, що необхідна для створення магнітного поля машини. Виходячи зі сказаного, баланс активної потужності системи, що складається з асинхронних двигунів та генераторів, є таким [42]:

$$P_m = \sum P_{\partial i} - \sum P_{\epsilon j} + \sum P_{\epsilon k}, \quad (1.9)$$

де P_m - активна потужність, яку мережа споживає ззовні; $\sum P_{\partial i}$ - сума потужностей, що споживають двигуни; $\sum P_{\epsilon j}$ - загальна активна потужність, яку віддають генератори; $\sum P_{\epsilon k}$ - втрати активної потужності в мережі.

Відповідний баланс реактивної потужності:

$$Q_m = \sum Q_{\partial i} + \sum Q_{\epsilon j} + \sum Q_{\epsilon k}. \quad (1.10)$$

Таким чином, асинхронні двигуна споживачів дільниці у своїй сукупності є джерелом потужних зворотних енергетичних потоків, які матимуть місце у перший термін після відключення електромережі дільниці через перехід двигунів у режим вільного вибігу. Тенденція до підвищення потужностей електромеханічного обладнання і, зокрема, електродвигунів, обумовлює збільшення терміну існування зворотних ЕРС в мережі. Наявність цієї ЕРС підтримує контактори пускачів у ввімкненому стані повний час після відключення напруги живлення мережі, а відмінність потужностей і сталих часу асинхронних двигунів утворює узагальнену зворотну ЕРС і зрівнювальні струми за наявності ввімкненого стану контакторів пускачів.

Враховуючи функцію асинхронного двигуна створювати зворотну ЕРС на початковому етапі роботи в режимі вибігу (після відключення мережі), елект-

ротехнічний комплекс технологічної ділянки шахти має бути представлений як система з двома джерелами електроживлення (енергетичних потоків) близьких за величиною потужностей – діляночною трансформаторною підстанцією і сукупністю асинхронних двигунів споживачів. Виходячи з цього, поширене уявлення про характер протікання короткого замикання в силовому приєднанні ділянки (з урахуванням вимушеної і вільної складових струму з боку трансформаторної підстанції) має бути доповнене складовими параметрів процесу, який розпочинається після захисного відключення мережі і визначається дією зворотних енергетичних потоків асинхронних двигунів.

Можливі варіанти виникнення аварійного стану короткого замикання у силовому відгалуженні мережі ЕТК ділянки шахти наведені на рис. 1.34 [43]. Коротке замикання в гнучкому кабелі споживача (рис. 1.34,а) буде супроводжуватись процесом одиночного вибігу двигуна, в ланцюзі живлення якого сталося к.з. Захисне відключення виконується автоматичним вимикачем (АВ) та засобом максимального струмового захисту магнітного пускача (КА) аварійного приєднання. До аварійної точки буде надходити струм i_{ov} , обумовлений дією ЕРС обертання двигуна, в гнучкому кабелі якого сталося к.з.

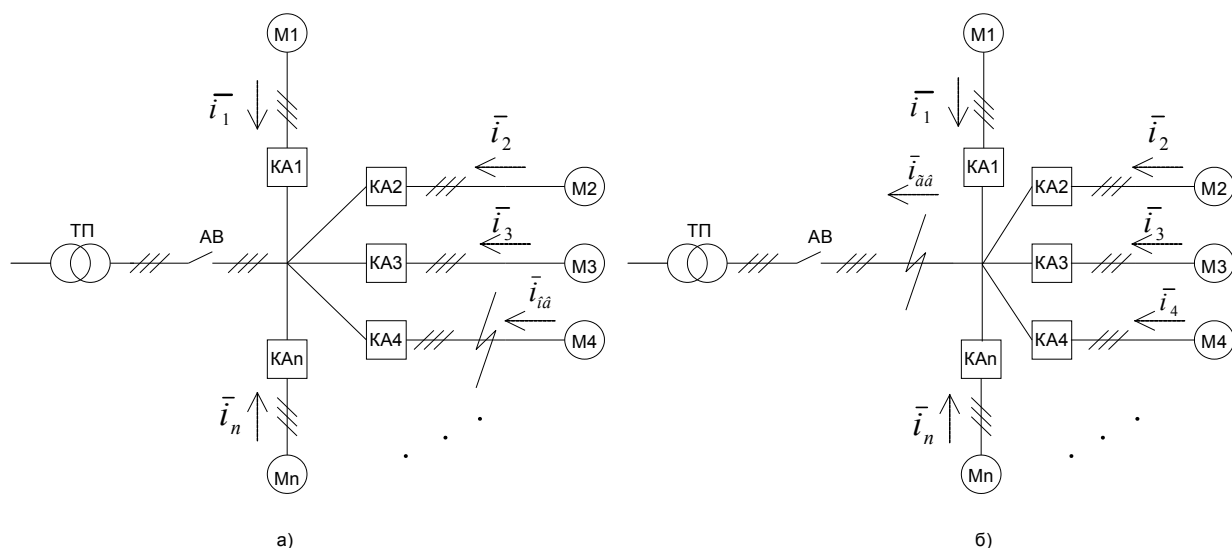


Рисунок 1.34 - Схема імовірних енергетичних потоків до точки к. з. після захисного відключення напруги живлення аварійної ділянки в разі виникнення к.з. в гнучкому кабелі (а); в магістральному кабелі (б)

В разі виникнення короткого замикання в магістральному кабелі (рис. 1.34,б) шахтного ЕТК, захисне відключення виконується автоматичним вимикачем на виході трансформаторної підстанції(ТП) та має місце процес групового вибігу асинхронних двигунів дільниці, що обумовлює існування струму групового вибігу $i_{2\phi}$. Цей стан пояснюється ввімкненим станом комутаційних апаратів (КА) магнітних пускачів до моменту досягнення граничного рівня ($U_{\text{доп}} \geq 0,4U_{\text{н}}$) ЕРС обертання двигунів (при зменшенні).

На рис. 1.35 представлена структура схеми електротехнічного комплексу дільниці шахти в момент виникнення короткого замикання в силовому кабельному приєднанні на виході контактора (пускача) KMn [44].

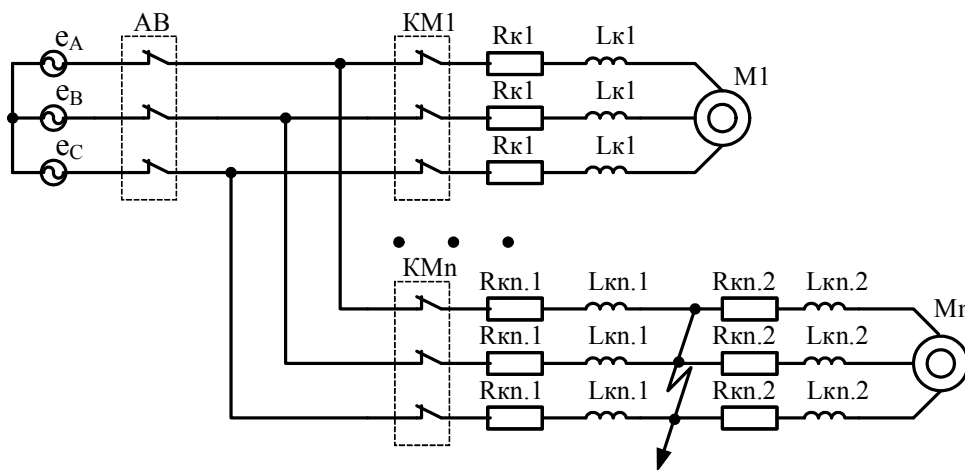


Рисунок 1.35 - Схема заміщення ЕТК дільниці шахти в стані трифазного к.з. приєднанні

Введені наступні позначення: e_A, e_B, e_C - миттєві значення фазної напруги на виході трансформаторної підстанції; $KM1 - KMn$ - контактори магнітних пускачів споживачів; $M1 - Mn$ - асинхронні двигуни споживачів дільниці; $R_{к1}, L_{к1}$ - відповідно, активні опори та індуктивності гнучких кабелів; $R_{кн.1}, L_{кн.1}$ - відповідно, активні опори та індуктивності першої умовної ділянки гнучкого кабеля; $R_{кн.2}, L_{кн.2}$ - теж саме для другої умовної ділянки гнучкого кабеля.

З урахуванням високої ймовірності спрацьовування максимального струмового захисту пускача аварійного приєднання доцільно ввести припущення про відключення контактора KMn водночас із автоматичним вимикачем АВ ді-

льничної підстанції (входу розподільчого пункту дільниці). Таким чином, після захисного відключення дільниці фактором енергетичного впливу на точку к.з. залишатиметься лише асинхронний двигун (група двигунів) споживача аварійного приєднання. Стосовно до схеми (рис. 1.35) це є машина Mn .

З урахуванням викладених вище обґрунтувань і параметрів асинхронних двигунів, включаючи фазні ЕРС обертання, побудована структура комп'ютерної моделі об'єкта дослідження (рис. 1.36) і введені наступні припущення [43]:

- до складу електротехнічного комплексу входить комплектна трансформаторна підстанція з заданими параметрами активних та індуктивних опорів вторинної обмотки трансформатора;
- комутація трифазної силової схеми здійснюється силовим комутаційним апаратом (на рис. 1.36 – позначення «Switch ABC»);
- навантаженням підстанції є асинхронний двигун з короткозамкненим ротором. Модель дозволяє ввести параметри конкретного АД;
- електроживлення АД здійснюється по кабелю довжиною L . Активно-індуктивні опори кабеля визначаються його типом, перетином та довжиною;
- відстань від комутаційного апарата до точки к.з. Ll може змінюватись. Довжина кабеля від точки к.з. до АД складає $(L-l)$ м;
- параметри кабеля між трансформаторною підстанцією і комутаційними апаратами не враховуємо у зв'язку з його малою довжиною;
- інші споживачі дільниці шахти відключаються внаслідок спрацьовування максимального струмового захисту водночас із відключенням «Switch ABC» (0,05 с). Їх вплив на процеси в кабельному приєднанні, що досліджується, не враховуємо.

Точками контролю фазного струму є: А1 – вихід силового комутаційного апарата; А2 – місце короткого замикання; А3 – клема кабельного вводу АД.

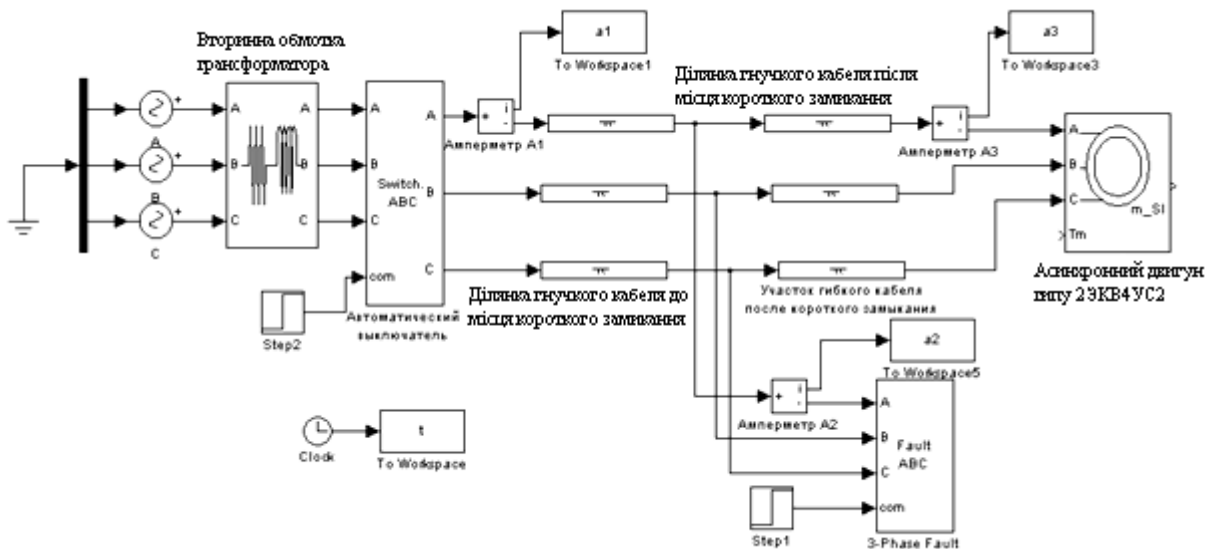


Рисунок 1.36 - Структура комп'ютерної моделі об'єкта дослідження

Струми к.з. у вказаних точках описуються наступними виразами:

- в точці А1:

$$i_k = i_n + i_a = (U_{\max} / Z_k) \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) + i_a(t=0) \exp(-t / T_a) \quad (1.11)$$

де i_k, i_n, i_a - струм к.з. від КТП до точки замикання та його періодична та аперіодична складові, відповідно; Z_k - повний опір ланцюга к.з.; φ_k - кут зсуву струму відносно напруги в цьому ланцюзі; $T_a = x_k / (\omega r_k)$ - постійна часу ланцюга к.з.; α - фаза ввімкнення к.з.; r_k, x_k - відповідно, активний та індуктивний опір ланцюга к.з.;

- в точці А3:

$$(R_k + R_s) \cdot i_k' + (L_k + L_{sl}) \cdot \frac{di_k'}{dt} = e_v \quad (1.12)$$

де e_v - миттєві значення ЕРС обертання АД; i_k' - миттєві значення струму, обумовленого ЕРС обертання АД; R_k, L_k - відповідно, активні опори та індуктивності гнучкого кабелю від АД до точки замикання; R_s, L_{sl} - активний опір та індуктивності статора АД;

- в точці А2 – сума струмів, обумовлених дією напруги живлячого трансформатора та ЕРС обертання АД:

$$i_{кз} = i_{к} + i_{к}' \quad (1.13)$$

Розроблена модель дозволяє отримати результати з урахуванням конкретних введених параметрів елементів дільничного електротехнічного комплексу. Стосовно до параметрів прийнятих функціональних елементів з урахуванням положень теорії моделювання ЕРС вибігу АД [45], отримані діаграми: зворотної ЕРС двигуна в режимі вільного вибігу (рис. 1.37), а також струмів в конкретних точках (рис. 1.38) [44; 46], які свідчать про наявність достатньої енергетичної спроможності асинхронного двигуна підтримувати небезпечні параметри струму в точці короткого замикання після захисного відключення мережі.

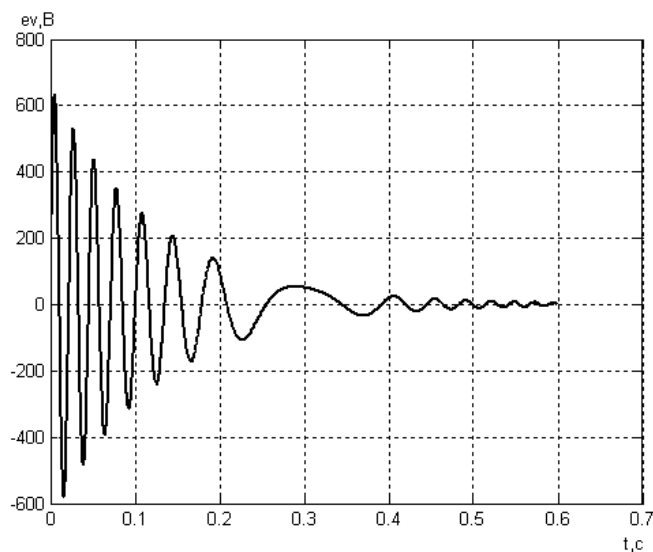


Рисунок 1.37 - Процес формування ЕРС обертання для АД типу 2ЭКВ4УС2

Ще більшу небезпеку представляє стан, коли захисне відключення мережі виконане тільки груповим автоматичним вимикачем (АВ), а відключення контактора аварійного приєднання (КМп) не відбулося. Причиною цього може бути як відмова максимального струмового захисту пускача аварійного приєднання, так і неспрацьовування цього струмового захисту внаслідок підвищення опору в місці контактів у силовій контактній групі контактора (що обумовлено

вірогідністю створення оксидних плівок на поверхні силових контактів внаслідок електрохімічних процесів дугоутворення) [47]. В цьому разі в процесі утворення струму в точці к.з. прийматимуть участь всі АД сукупності споживачів дільниці, що обумовлене підтриманням контакторів всіх пускачів дільниці у ввімкненому стані до моменту достатнього зниження зворотних ЕРС обертання АД [43].

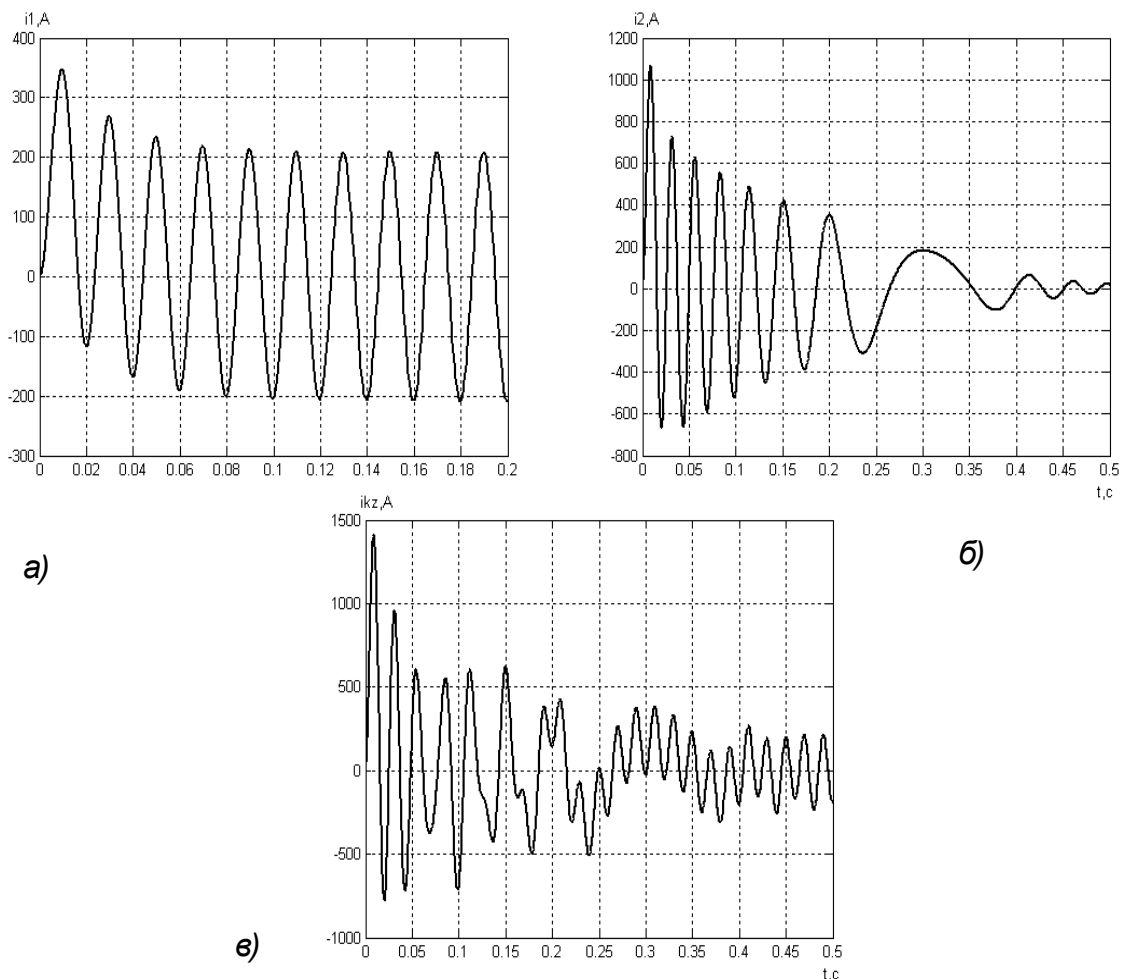


Рисунок 1.24 - Діаграми миттєвих значень струмів: а) обумовленого напругою мережі (існує до моменту захисного відключення живлення); б) обумовленого ЕРС обертання АД; в) повного струму в точці короткого замикання

Отже, процес к.з. може бути представлений сукупністю станів, що змінюють один одного:

- виникнення к.з., протікання струму до точки замикання від трансформатора;

- продовження підживлення точки к.з. від трансформатора і протікання струму до точки к.з. від статора АД аварійного приєднання (процес триває до моменту захисного відключення електроживлення з боку трансформатора);

- поява зрівняльних струмів, обумовлених зворотними ЕРС АД після захисного відключення живлення;

- підживлення точки к.з. тільки від АД аварійного приєднання (процес протікає після відключення контакторів пускачів суміжних приєднань).

Таким чином зворотні енергетичні потоки асинхронних двигунів споживачів дільниці шахти створюють небезпечний стан дільничного електротехнічного комплексу після його захисного відключення, оскільки має місце підтримання струму в точці ушкодження кабелю силового приєднання після захисного відключення напруги мережі. Цим обумовлена і доцільність обґрунтування параметрів і застосування спеціальних технічних засобів усунення дії зворотних енергетичних потоків. З метою мінімізації часу існування небезпечного стану дільничної електромережі дія цих засобів повинна розпочинатись не внаслідок захисного відключення напруги живлення, а у зв'язку з виникненням небезпечного стану в силовому приєднанні електротехнічного комплексу шахтної дільниці.

2. АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ В МЕРЕЖІ ПРИ ВИНИКНЕННІ ПОШКОДЖЕННЯ В КАБЕЛІ ЖИВЛЕННЯ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

2.1. Зіставлення технічних властивостей засобів відокремлення зворотних ЕРС асинхронних двигунів

Відокремлення зворотного енергетичного потоку асинхронного двигуна в разі пошкодження його кабеля живлення має бути здійснене у найкоротший час. Тому постає задача пошуку інформаційного сигналу, який забезпечить автономне виконання цієї функції силовими комутуючими засобами з боку самого асинхронного двигуна аварійного приєднання. Отже, відсутність прив'язки до факту спрацьовування захисних засобів з боку живлячої трансформаторної підстанції дозволить виконати двобічне знеструмлення дільничної мережі шляхом одночасного спрацьовування захисних засобів, як з боку трансформаторної підстанції, так і з боку асинхронних двигунів споживачів. Крім того, відокремлення зворотного енергетичного потоку асинхронного двигуна має бути здійснене і в разі виникнення аварійного стану живлячого кабелю після відключення напруги живлення мережі в разі, якщо двигун перебуває в стані вільного вибігу.

Відокремлення зворотного енергетичного потоку АД може бути здійснено закорочуванням [40; 48] або розмиканням трифазної схеми його статорної обмотки. Однак, перший спосіб має ряд недоліків, що ускладнює його запровадження.

По-перше, закорочування статора АД може бути здійснено тільки після відключення напруги живлення з боку живлячої трансформаторної підстанції. Це призводить до збільшення часу існування аварійного стану та потребує наявності інформаційного зв'язку між автоматичним вимикачем дільниці і засобом управління усуненням зворотного енергетичного потоку асинхронного двигуна.

По-друге, в момент закорочування статорної обмотки працюючого АД (або двигуна, що знаходиться в стані вільного вибігу) виникатимуть короткочасним струмовим і динамічним перевантаженням (рис. 2.1).

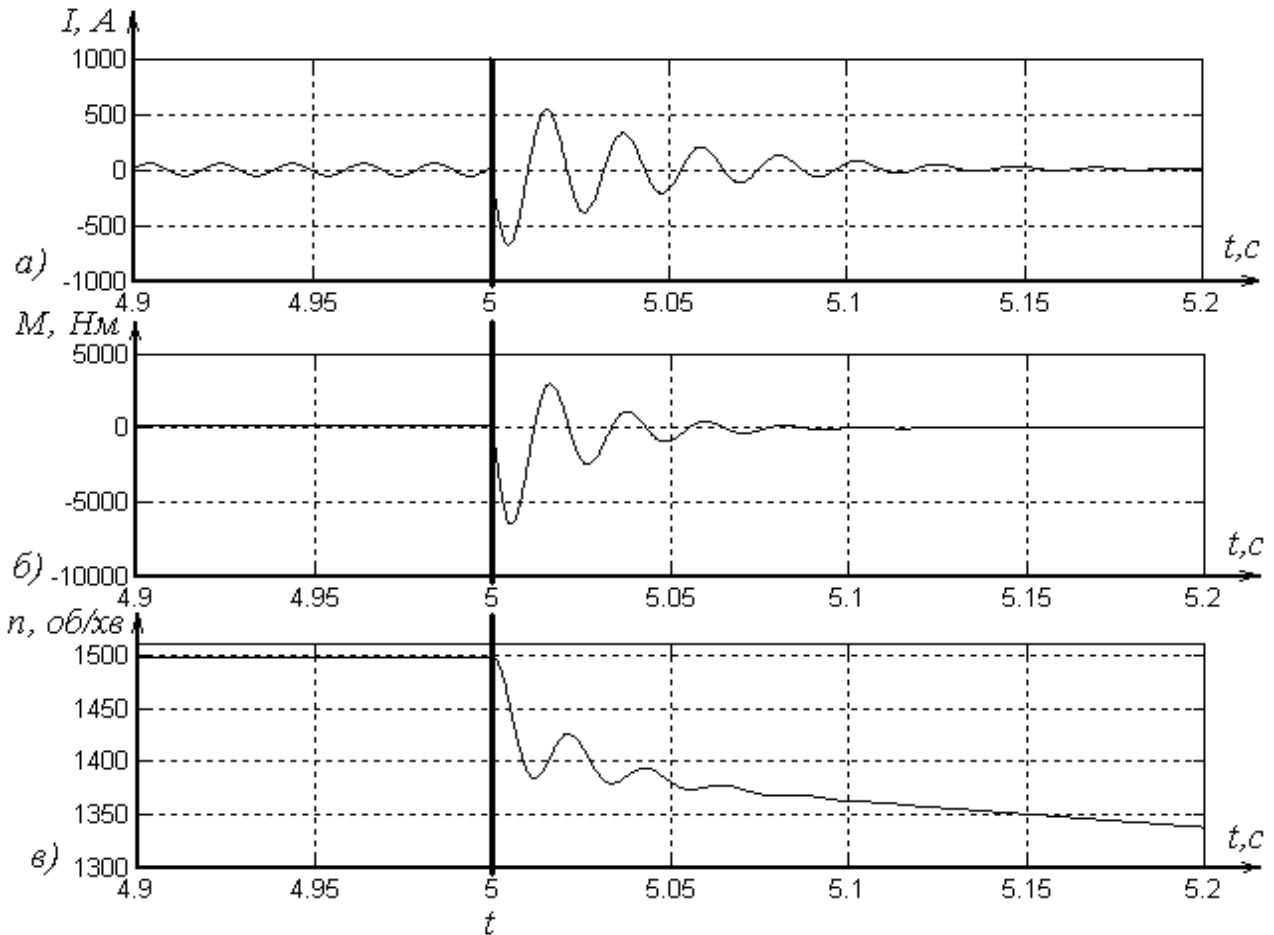


Рисунок 2.1 - Розрахункові діаграми струму I , частоти обертання ротора n та електромагнітного моменту M двигуна потужністю 160 кВт (в мережі напруги 660 В) в момент закорочування статорної обмотки

По-третє, в разі хибного спрацьовування засобу штучного утворення короткого замикання в силових ланцюгах дільничної мережі, що є під напругою, виникатиме аварійний стан. В умовах шахти це є неприпустимим, оскільки створюватиме небезпеку пожежі, або вибуху метано-повітряної суміші.

Оскільки вказаних недоліків позбавлений спосіб роз'єднання трифазної схеми статора, або відключення статора від живлячої мережі, перевагу слід віддати цьому способу. Таке відокремлення може бути застосовано в момент отримання сигналу про наявність аварійного стану дільничної мережі, тобто водночас із захисним відключенням підстанції, або, навіть, випереджати таке

відключення (за умови швидкодіючих засобів визначення інформаційного сигналу).

Параметри швидкодії знеструмлення аварійного приєднання за умови застосування цього способу (рис. 2.2) обумовлюється технічними властивостями силових комутаційних засобів і можуть знаходитись в прийнятному діапазоні величин.

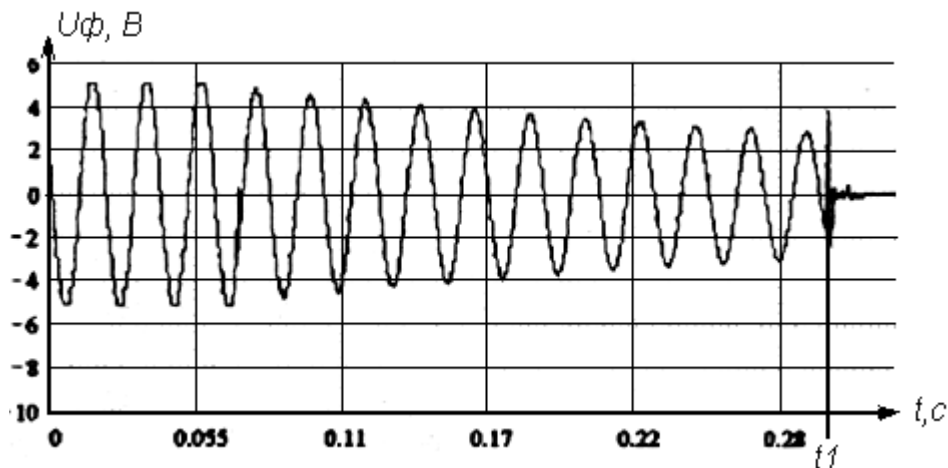


Рисунок 2.2 - Осцилограма фазної напруги (ЕРС обертання) статора АД при роз'єднанні трифазної схеми статора в момент t_1 [49]

2.2. Математичне моделювання процесів в шахтній дільничній електромережі, обумовлених впливом зворотних енергетичних потоків

З метою отримання інформаційного сигналу в силовому ланцюзі АД про наявність у живлячому кабелі міжфазного короткого замикання, або пошкодження ізоляції його силової жили доцільним є дослідження процесів у визначеному об'єкті методами математичного і комп'ютерного моделювання.

Склад шахтного дільничного електротехнічного комплексу, схема якого наведена на рис. 2.3, передбачає наявність трифазного джерела електроживлення TV (трансформаторна підстанція з автоматичним вимикачем SA на виході розподільчого пристрою (РПНН) низької напруги), від якого через магістральний кабель $МК$ та додаткові комутаційні апарати KM_1-KM_n (виконують функції маг-

нітних пускачів) кабелями $ГК_1-ГК_n$ приєднані асинхронні двигуни M_1-M_n споживачів. Введемо припущення, що в схемі статора АД M_1 додатково запроваджений комутаційний апарат SF , який комутує трифазну схему статорної обмотки АД.

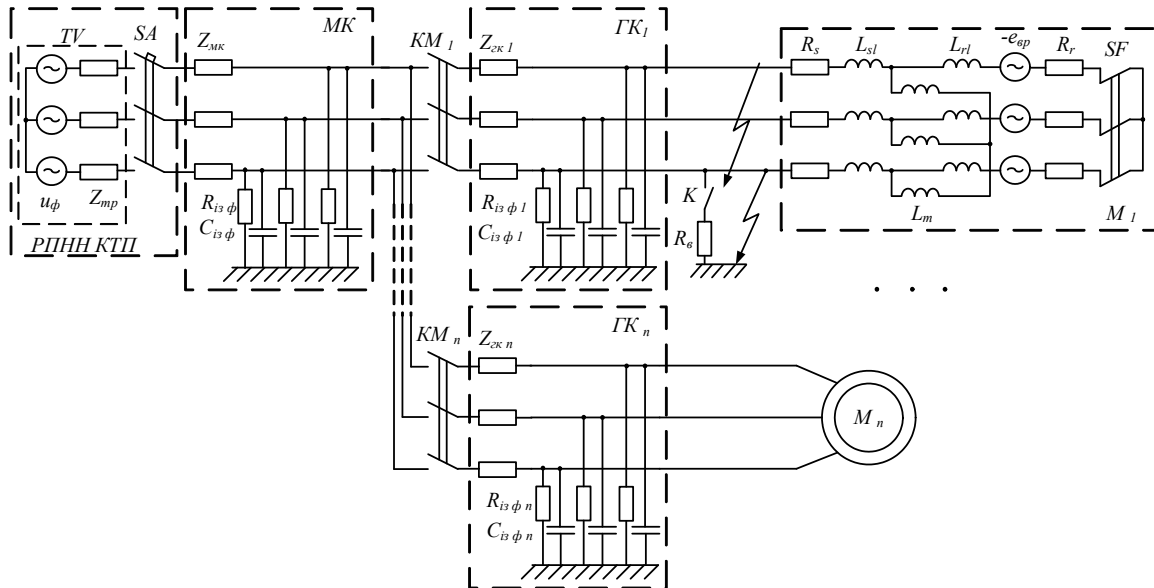


Рисунок 2.3 - Узагальнена схема шахтного дільничного ЕТК прийнятої для моделювання конфігурації

Приймаємо наступні основні припущення:

- режим нейтралі мережі електротехнічного комплексу - ізольований;
- вихідна напруга дільничної трансформаторної підстанції є симетричною трифазною прямої послідовності зі сталими амплітудою і частотою відповідно до номінальних параметрів мережі;
- аварійний процес міжфазного короткого замикання, замикання на землю або неприпустимо низького електричного опору між фазою мережі і землею виникає у гнучкому кабелі між контактором KM_1 і статором АД;
- в момент виникнення аварійного стану асинхронний двигун підключений до мережі електроживлення при номінальному навантаженні і працює на природній механічній характеристиці;
- всі три фази АД – симетричні, ротор короткозамкнений, виконаний в вигляді простої білячої клітки;

- параметрами гнучкого кабелю, що мають враховуватись у дослідженні, є його загальна довжина, відстань від АД до місця пошкодження кабелю, перетин силової жили; ємності та активні опори ізоляції фаз кабельної мережі є симетричними та зосередженими. Ємності ізоляції кабелю відповідають його типу, перетину і довжині, а активні опори ізоляції обумовлюються її технічним станом і вводяться в процесі досліджень в діапазоні реальних величин.

Обґрунтування математичної моделі ЕТК ДШ передбачає використання диференціальних рівнянь елементів об'єкта дослідження. В цьому разі доцільно скористатись методом просторового вектора [45], коли спільна дія всіх трьох фаз виражається єдиною комплексною величиною:

$$\bar{x} = \frac{2}{3} (x_a + a \cdot x_b + a^2 \cdot x_c) \quad (2.1)$$

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. 2.4) позначено: \bar{u}_1 – просторовий вектор напруги мережі; R_k, L_k – активний опір та індуктивність гнучкого кабелю; R_{KM} – 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 – кутова 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). Для двигунів із з'єднанням обмоток за схемою «трикутник» (Δ) необхідно до розрахунків ввести схемний коефіцієнт [45].

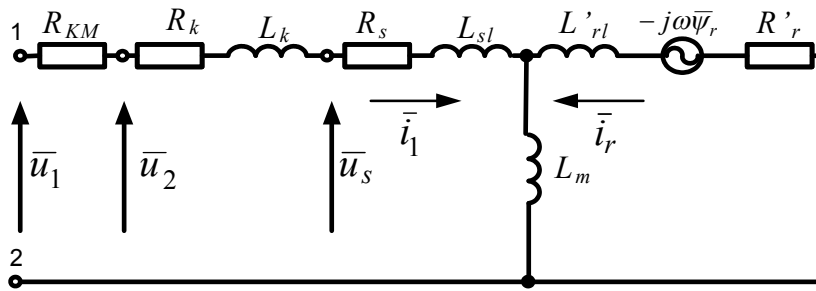


Рисунок 2.4 - Схема заміщення відгалуження асинхронного двигуна

Дослідження процесів в асинхронному двигуні виконується методом складових α і β . 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 [45, 50]:

$$\bar{u}_1 = u_{1\alpha} + j u_{1\beta} \quad (2.2)$$

$$\bar{\psi}_s = \psi_{s\alpha} + j \psi_{s\beta}; \quad \bar{\psi}_r = \psi_{r\alpha} + j \psi_{r\beta} \quad (2.3)$$

$$\bar{i}_1 = i_{1\alpha} + j i_{1\beta}; \quad \bar{i}_r = i_{r\alpha} + j i_{r\beta} \quad (2.4)$$

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

Стосовно до наведеної схеми заміщення (рис.2.4) згідно законів Кірхгофа, запишемо рівняння електричної рівноваги у нерухомій системі координат із додаванням основного рівняння динаміки двигуна [45]:

$$\begin{cases} \psi_{s\alpha} = \int (u_{s\alpha} - i_{1\alpha} R_s) dt + \psi_{s\alpha}(0); \\ \psi_{s\beta} = \int (u_{s\beta} - i_{1\beta} R_s) dt + \psi_{s\beta}(0); \\ \psi_{r\alpha} = \int (-i_{r\alpha} R_r - \omega \psi_{r\beta}) dt + \psi_{r\alpha}(0); \\ \psi_{r\beta} = \int (-i_{r\beta} R_r + \omega \psi_{r\alpha}) dt + \psi_{r\beta}(0); \\ \omega = \frac{1}{J} \int (M - M_c) dt + \omega(0); \end{cases} \quad (2.5)$$

де J – момент інерції двигуна; M_c – момент навантаження; M – електромагніт-

ний момент двигуна:

$$M = \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_s L'_r} \bar{\psi}_r \times \bar{\psi}_s = \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_s L'_r} (\psi_{r\alpha} \psi_{s\beta} - \psi_{r\beta} \psi_{s\alpha}) \quad (2.6)$$

$$L_s = L_{sl} + L_m \quad (2.7)$$

$$L_r = L'_{rl} + L_m \quad (2.8)$$

L'_r - перехідна індуктивність ротора:

$$L'_r = L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \quad (2.9)$$

$$i_{1\alpha} = \frac{L_r \cdot \psi_{s\alpha} - L_m \cdot \psi_{r\alpha}}{L_s \cdot L_r - L_m^2}; i_{1\beta} = \frac{L_r \cdot \psi_{s\beta} - L_m \cdot \psi_{r\beta}}{L_s \cdot L_r - L_m^2} \quad (2.10)$$

$$i_{r\alpha} = \frac{L_s \cdot \psi_{r\alpha} - L_m \cdot \psi_{s\alpha}}{L_s \cdot L_r - L_m^2}; i_{r\beta} = \frac{L_s \cdot \psi_{r\beta} - L_m \cdot \psi_{s\beta}}{L_s \cdot L_r - L_m^2} \quad (2.11)$$

Наведені вирази відповідають двополюсній асинхронній машині. В процесі дослідження багатополусної машини механічні параметри мають бути перераховані до еквівалентної двополюсної машини [45].

Колова швидкість:

$$\omega = p\omega' \quad (2.12)$$

Обертаючий момент:

$$M = M'/p \quad (2.13)$$

Момент інерції:

$$J = J'/p^2 \quad (2.14)$$

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

Просторовий вектор напруги в мережі визначається виразом:

$$\bar{u}_1 = R_{KM} \cdot \bar{i}_1 + R_k \cdot \bar{i}_1 + L_k \frac{d\bar{i}_1}{dt} + \bar{u}_s \quad (2.15)$$

Залежності (2.5)-(2.15) являють собою математичну модель відгалуження ЕТК ДШ, що містить приєднання, навантажене асинхронним двигуном, яка дозволяє обчислювати параметри стану двигуна та досліджувати процеси при виникненні пошкоджень у живлячому кабелі. Структурна схема, що відповідає розробленій математичній моделі наведена на рис. 2.5. На рис. 2.6 наведена розгорнута структурна схема асинхронного двигуна.

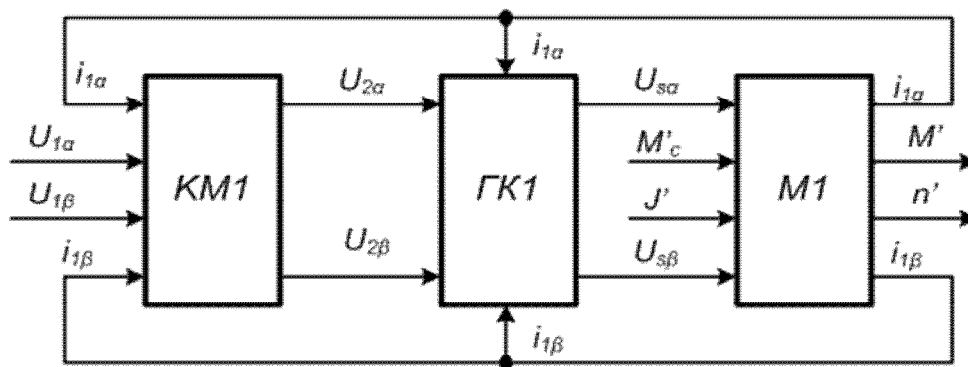


Рисунок 2.5 - Структурна схема математичної моделі відгалуження ЕТК ДШ

Обґрунтуємо математичну модель загальної частини мережі (дільничної трансформаторної підстанції (КТП) з автоматичним вимикачем SA на виході розподільчого пристрою низької напруги та магістрального кабелю), схема заміщення якої наведена на рис. 2.7. На схемі позначено: R_{tr} , L_{tr} – активний опір та індуктивність фази вторинної обмотки силового трансформатора; R_{SA} – активний опір фази автоматичного вимикача SA ; R_{MK} , L_{MK} - активний опір та індуктивність магістрального кабелю.

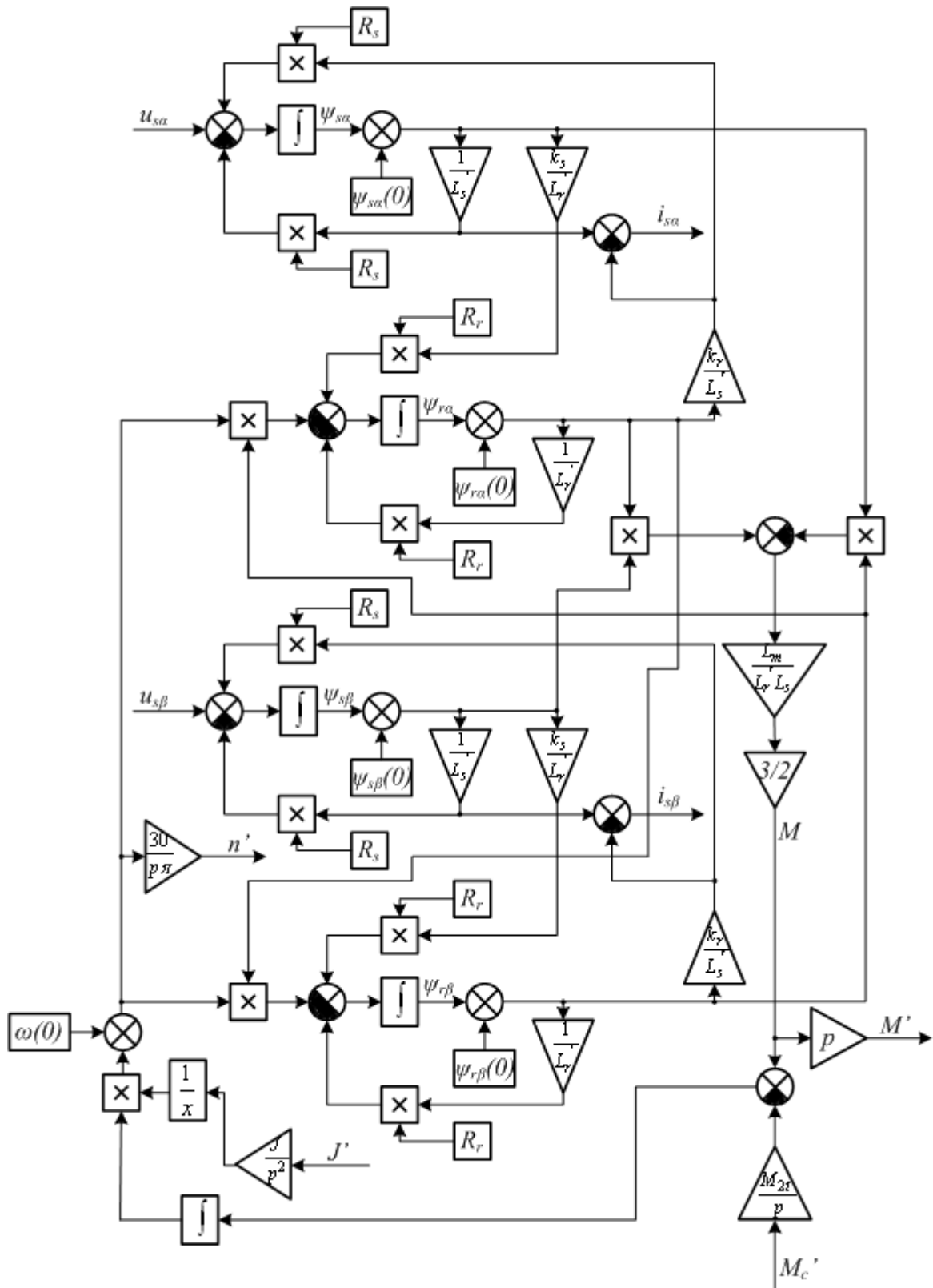


Рисунок 2.6 - Структурна схема математичної моделі АД

Диференційне рівняння, що описує процеси у наведеній схемі заміщення:

$$\bar{u} = (R_{tr} + R_{SA} + R_{MK}) \bar{i}_{\Sigma} + (L_{tr} + L_{MK}) \frac{d\bar{i}_{\Sigma}}{dt} + \bar{u}_1 \quad (2.18)$$

Вважаючи, що на виході дільничного трансформатора має місце симетрична трифазна напруга прямої послідовності та сталої частоти, просторовий вектор напруги \bar{u} визначається виразом:

$$\bar{u} = u_{\alpha} + ju_{\beta} \quad (2.19)$$

$$u_{\alpha} = U_m \cos(\omega t); u_{\beta} = U_m \sin(\omega t) \quad (2.20)$$

де U_m - діюче значення фазної ЕРС, що наводиться у вторинній обмотці силового трансформатора.

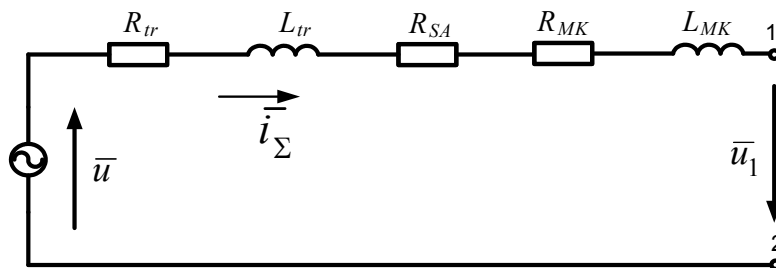


Рисунок 2.7 - Схема заміщення загальної частини мережі (трансформаторної підстанції з автоматичним вимикачем SA на виході розподільчого пристрою низької напруги та магістрального кабелю)

Вирази (2.18)-(2.20) являють собою математичну модель загальної частини мережі, що містить дільничну трансформаторну підстанцію з автоматичним вимикачем SA на виході розподільчого пристрою низької напруги та магістральний кабель. Загальна структурна схема моделі електротехнічного комплексу технологічної дільниці шахти, що містить приєднання, навантажені асинхронними двигунами, наведена на рис. 2.8.

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 короткочасної безструмової паузи на ділянці між точкою пошкодження кабелю та АД.

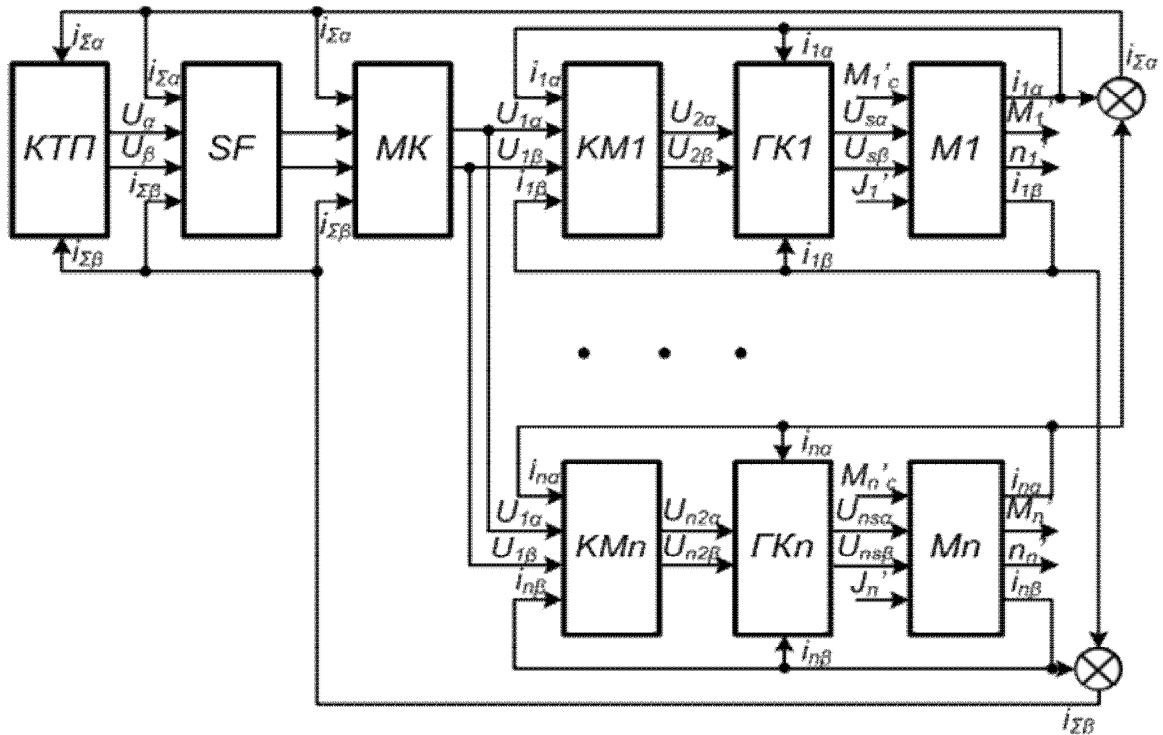


Рисунок 2.8 - Загальна структурна схема моделі електротехнічного комплексу технологічної дільниці шахти, що містить приєднання, навантажені асинхронними двигунами

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 в обмотках статора двигуна не дорівнює нулю, на відміну від сталого струму при трифазному к.з. Двофазне коротке замикання характеризується тим, що фаза А приєднання знеструмлена ($i_{1\alpha} = 0; \bar{i}_1 = j i_{1\beta}$), а напруга між фазами В і С відсутня ($u_{2\beta} = 0; u_b = u_c; \bar{u}_2 = u_{2\alpha}$).

Стан кола однофазного витоку струму на землю досліджується за схемою заміщення, наведеною на рис. 2.9, де позначено: u_ϕ – фазна напруга у місці витоку (в разі представлення всієї системи у вигляді трифазного джерела – U_A, U_B, U_C); R_ϕ – опір кола витоку; C_{i3}, R_{i3} – відповідно, сукупна ємність та активний опір ізоляції трьох фаз мережі ($C_{i3\phi}, R_{i3\phi}$ – відповідно, сукупна ємність та активний опір ізоляції фази кабелів, що мають електричний зв'язок із місцем виникнення витоку струму на землю); i_ϕ – струм витоку. Джерелом напруги до моме-

нту захисного вимкнення мережі є дільнична трансформаторна підстанція, а після цього моменту – ЕРС вибігу двигунів споживачів ЕТК з урахуванням функції створення зрівнювальних струмів.

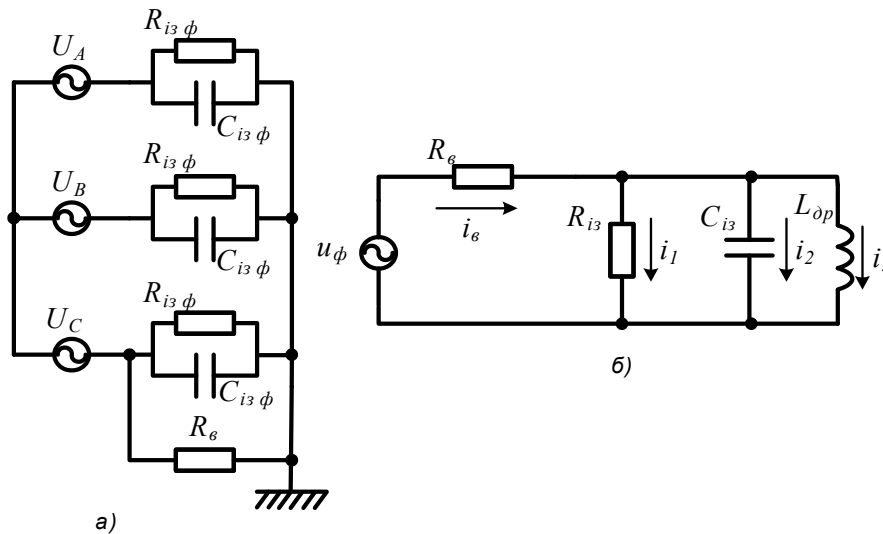


Рисунок 2.9 - Схема заміщення системи (а) та еквівалентна схема заміщення (б) кола однофазного витоку струму на землю

Для наведеної еквівалентної схеми заміщення виконуються наступні співвідношення [7]:

$$C_{i3} = 3C_{i3\phi}; \quad R_{i3} = R_{i3\phi}/3 \quad (2.21)$$

Зв'язок між фактичними та питомими параметрами ізоляції кабелів з урахуванням їх довжини має бути встановлений за наступними залежностями:

$$C_{i3\phi} = \frac{l \cdot C_{i3\phi num}}{1000} \quad (2.22)$$

$$R_{i3\phi} = \frac{1000 \cdot R_{i3\phi num}}{l} \quad (2.23)$$

де $C_{i3\phi num}$ – питома ємність ізоляції кабелю даного типу, Ф/км; $R_{i3\phi num}$ – питомий активний опір ізоляції кабелю даного типу, Ом·км; l – довжина кабелю, м.

Відповідно до наведеної еквівалентної схеми заміщення (рис. 2.9б) згідно законів Кірхгофа запишемо рівняння, що описують процеси в системі:

$$\left\{ \begin{array}{l} i_1 = \frac{1}{R_{i3} C_{i3}} \int i_2 dt \\ i_2 = \frac{1}{R_e} (u_\phi - R_{i3} i_1) - i_1 - i_3 \\ i_3 = \int i_n dt \\ i_n = \frac{1}{L_{op} C_{i3}} \int i_2 dt \\ i_e = i_1 + i_2 + i_3 \end{array} \right. \quad (2.24)$$

Кількість електрики, що пройшла через опір кола однофазного витоку струму на землю з моменту виникнення аварійного стану t' і до моменту зникнення ЕРС обертання АД t'' , обчислюється згідно залежності:

$$q = \int_{t'}^{t''} I_e(t) dt \quad (2.25)$$

де $I_e(t)$ – ефективне значення струму витоку через опір тіла людини, що змінюється з перебігом існування аварійного стану мережі (торкання людиною струмоведучих елементів, що є під напругою).

Наведені вирази (2.11-2.25) являють собою математичну модель кола однофазного витоку струму на землю, яка дозволяє обчислити значення струму витоку від моменту його виникнення до моменту зникнення зворотної ЕРС обертання АД.

Таким чином, з метою пошуку інформаційного сигналу, що однозначно свідчить про наявність ушкодження в кабелі живлення асинхронного двигуна, базуючись на відомих наукових дослідженнях, обґрунтована математична модель електротехнічного комплексу технологічної дільниці шахти, яка враховує вплив параметрів та режимів функціонування асинхронних двигунів споживачів на характер струмів аварійного процесу.

Структурна схема комп'ютерної моделі, що відповідає обґрунтованій математичній моделі наведена в додатку Б.

2.3. Аналіз процесів в мережі статора асинхронного двигуна в контексті пошуку інформаційного сигналу про наявність міжфазного короткого замикання

Задача усунення зворотного енергетичного потоку асинхронного двигуна в разі виникнення аварійного стану в мережі його живлення може бути вирішена за умови застосування відповідного виконавчого засобу безпосередньо в структурі схеми статора АД і отримання інформаційного сигналу щодо стану мережі живлення шляхом безпосереднього аналізу її параметрів. Такий підхід виключає узгодження роботи засобу припинення дії зворотного енергетичного потоку АД із схемотехнікою силових комутаційних апаратів розподільчого пункту технологічної ділянки і, зокрема, їх засобів максимального струмового захисту та захисту від витоків струму на землю.

Цим досягаються два позитивні результати:

- схемотехніка силової комутаційної апаратури розподільчого пункту ділянки не потребує додаткової адаптації до схем виконавчих засобів усунення зворотних енергетичних потоків АД;
- відпадає необхідність ускладнювати схему діляничного електротехнічного комплексу додатковою мережею комунікації між засобами захисту силових комутаційних апаратів розподільчого пункту ділянки і засобами усунення зворотних енергетичних потоків АД.

Цим обумовлена доцільність пошуку інформаційного сигналу про наявність аварійного стану в мережі живлення асинхронного двигуна на основі безпосереднього аналізу параметрів цієї мережі.

Вирішення поставленої задачі може бути виконане на основі комплексного дослідження процесів в ланцюзі статора асинхронного двигуна при виникненні аварійного стану в живлячому кабелі.

Варіантами короткого замикання, що підлягають дослідженню мають бути наступні:

- варіант №1. Коротке замикання є трифазним і виникає миттєво між усіма трьома фазами кабелю;
- варіант №2. Коротке замикання є трифазним і виникає спочатку між двома фазами гнучкого кабелю з подальшим замиканням через термін часу Δt_1 третьої фази до попередніх двох;
- варіант №3. Двофазне замикання у гнучкому кабелі.

Слід очікувати, що в момент виникнення трифазного короткого замикання буде припиняється струм від живлячої трансформаторної підстанції до кола статора двигуна, після чого двигун, як електрогенеруюча машина, розпочне підживлення точки трифазного короткого замикання своїм зворотним енергетичним потоком.

На рис. 2.10 представлені розрахункові діаграми струму в мережі статора двигуна типу 2ЭКВ4УС2 потужністю 220 кВт при номінальному значенні лінійної трифазної напруги мережі 660 В [51], починаючи з моменту пуску ненавантаженого асинхронного двигуна (момент часу t_0). В момент часу t_1 двигун виходить на номінальне навантаження. Трифазне коротке замикання виникає в момент часу t_2 .

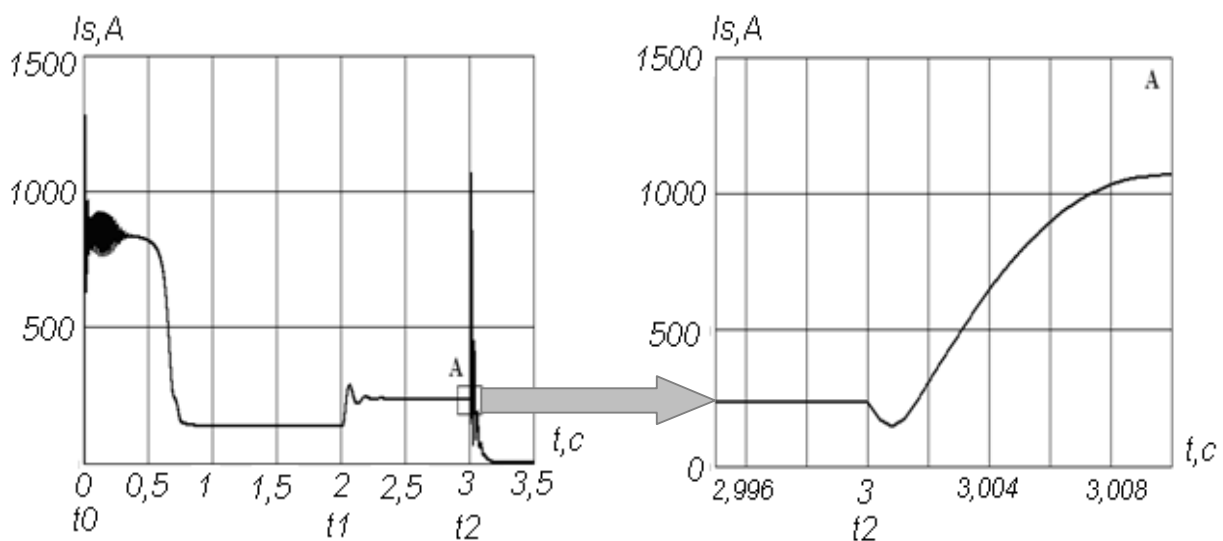


Рисунок 2.10 – Діюче значення струму статора асинхронного двигуна 2ЭКВ4УС2 з урахуванням пускового режиму і виникнення к.з. в живлячому кабелі в момент часу t_2

Детальний розгляд діаграми струму статора АД (на інтервалі, визначеному площиною «А») свідчить про наявність короткочасного (за результатами дослідів – 0,0015 с) зменшення струму в колі статора АД з подальшим інтенсивним його підвищенням.

Це є наслідком перехідного процесу, обумовленого зміною напрямку руху енергетичного потоку в мережі статора АД, що обумовлено перетворенням двигуна з об'єкту енергоспоживання (від живлячої дільничної трансформаторної підстанції) у об'єкт генерації зворотного енергетичного потоку, що супроводжується створенням струму в точці виникнення к.з. у кабелі живлення. Отже, типовим явищем, що характеризує процес виникнення міжфазного к.з. в кабелі живлення АД, можна вважати короткочасне зменшення статорного струму з подальшим інтенсивним його збільшенням. Дослідження закономірностей зміни зазначеного параметру залежно від найрозповсюдженіших потужностей двигунів, перетину та довжини їх живлячих кабелів до місця к.з. (рис. 2.11) дозволило встановити: що амплітудне значення короткочасного інтенсивного зменшення статорного струму змінюється в межах $(0,25 \div 0,7)$ від номінального струму навантаження; тривалість t_p цього зменшення знаходиться в межах $(0,5 \div 0,7)$ мс. Із збільшенням потужності асинхронного двигуна споживача амплітуда струму i_{1m} збільшується, а тривалість t_p – зменшується (рис. 2.12).

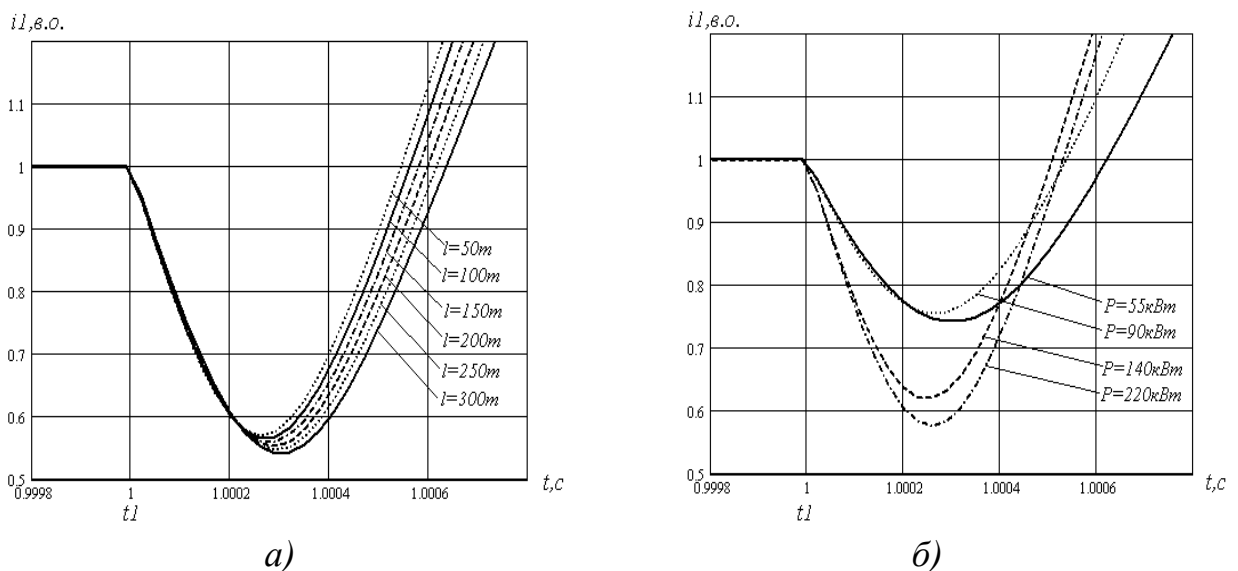


Рисунок 2.11 – Діюче значення струму у статорному колі у момент виникнення трифазного короткого замикання: а) при змінній довжини кабелю ($S=70\text{мм}^2$); б) при змінній потужності АД (к.з. на затискачах двигуна)

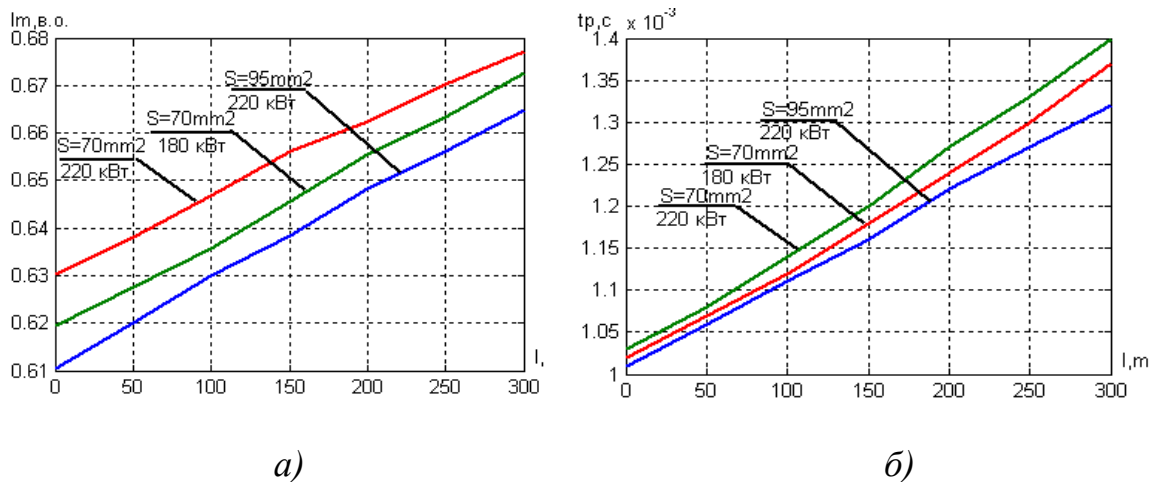


Рисунок 2.12 - Залежності амплітуд $i_{lm}=f(l)$ (а) та тривалостей $t_p = f(l)$ (б) короткочасного інтенсивного зменшення струму у статорному колі АД від довжини кабелю до аварійної точки в момент виникнення трифазного к.з.

Дієвим фактором також є величина попереднього навантаження асинхронного двигуна – із зменшенням моменту опору на валу амплітудно-часові параметри короткочасного інтенсивного зменшення статорного струму істотно знижуються (рис. 2.13).

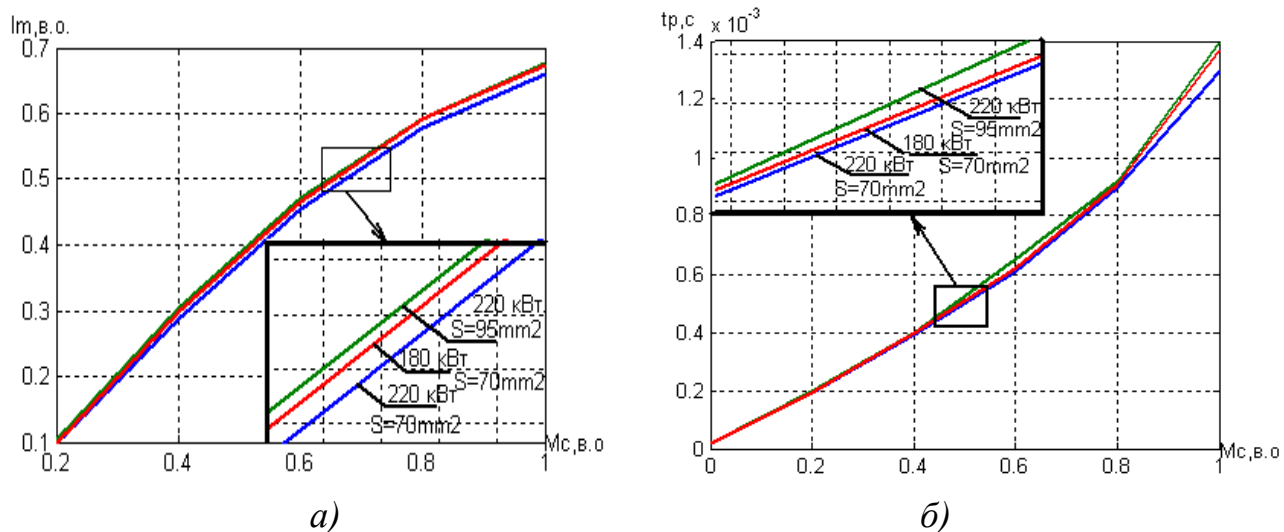


Рисунок 2.13 - Залежності амплітуд $i_{lm}=f(M_c)$ (а) та тривалостей $t_p = f(M_c)$ (б) короткочасного інтенсивного зменшення струму у статорному колі АД від величини попереднього навантаження в момент виникнення трифазного к.з.

Однак, визначений процес є характерним виключно до виникнення трифазного короткого замикання в кабелі живлення і не супроводжує виникнення двофазного к.з.

Це підтверджується результатами моделювання (рис. 2 14) і пояснюється наявністю неповнофазного гальванічного зв'язку з мережею живлення асинхронного двигуна у час між виникненням аварійного стану і моментом подальшого відключення мережі з боку живлячої дільничної трансформаторної підстанції (через нормований термін часу 0,1с).

Моделювання проводилось у проміжок часу від $t_0 = 0$ до $t_n = 4с$ у наступній послідовності: до моменту часу $t_1 = 3с$ двигун працював у штатному режимі. У момент t_1 виникає коротке замикання в кабелі живлення АД. У момент часу $t_2 = 3,1с$ комутаційний апарат відключається за командою від засобу максимального струмового захисту. При виникненні двофазного замикання, що переходить до трифазного - наступне пошкодження третьої фази має місце у момент часу $t_1' = 3,05с$.

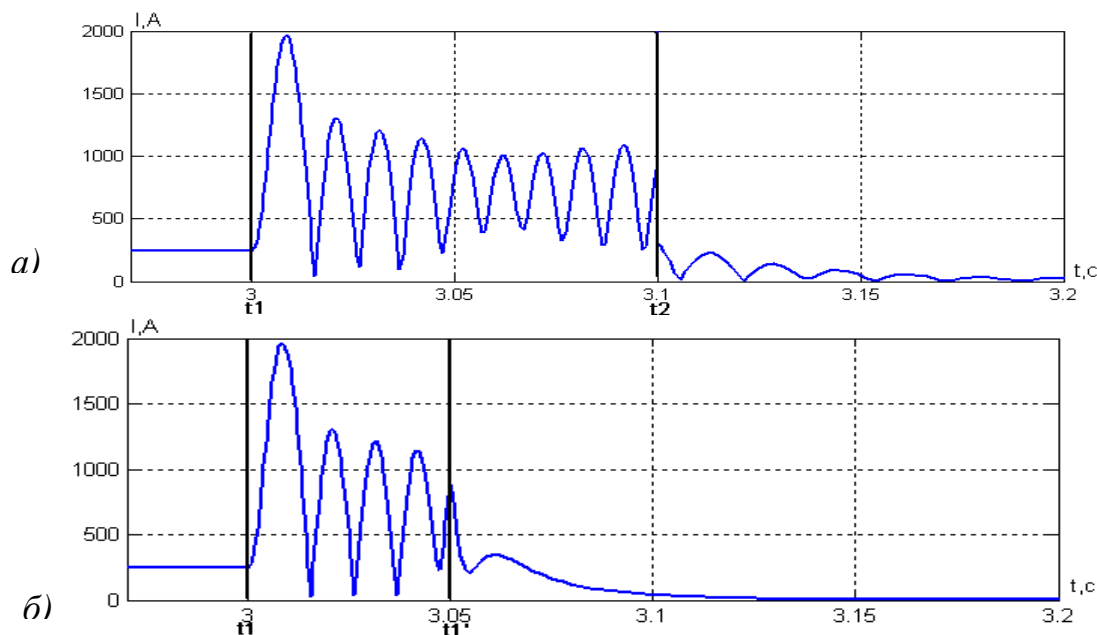


Рисунок 2.14 – Діюче значення струму в колі статора АД: а) отримані в результаті моделювання двофазного к.з. в кабелі; б) отримані в результаті моделювання двофазного та подальшого трифазного к.з. в кабелі живлення споживача

Аналіз отриманих залежностей 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, обумов-

лений напругою живлення електромережі (через неушкоджену фазу А) та параметрами живлячого кабеля і асинхронного двигуна (рис. 2.14а).

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 кабеля живлення. Якщо у момент t_1 відбувається пошкодження третьої фази, двигун одночасно переходить до вищевказаного режиму (рис. 2.14б).

Реалізація пристрою управління усуненням зворотного енергетичного потоку АД при виникненні короткого замикання, що враховує визначений характер зміни величини струму в колі статора асинхронного двигуна є принципово можливою, але потребує складної схемотехніки, що має функціонувати безпосередньо у ланцюгах двигуна, та індивідуального ретельного налагодження кожного захисного пристрою, що є неможливим у виробничих умовах.

Відомо, що в процесі вибігу асинхронного двигуна після захисного відключення мережі груповим автоматичним вимикачем (за сигналом від засобів максимального струмового захисту або апарату захисту від витоків струму на землю) вектор напруги на збірних шинах визначається, окрім параметрів схем заміщення АД, частотами обертання роторів. Таким чином, факт знаходження двигуна в режимі вибігу може бути встановлений шляхом визначення зменшення частоти напруги на його затискачах.

Вирішення поставленої задачі пошуку інформаційного сигналу про виникнення аварійного стану в кабелі живлення асинхронного двигуна може бути виконане на основі застосування функції «реле частоти». На рис. 2.15 наведені діаграми напруг відповідного пристрою визначення зменшення частоти вхідного сигналу U_1 . Принцип його роботи полягає в порівнянні амплітуди пілоподібної напруги U_3 , сформованої, у термін півхвилі негативної полярності вхідного сигналу з амплітудою пілоподібної напруги, що формується на інтервалі існування періоду сигналу U_1 , зменшеною вдвічі (імпульси U_4). За умови коли частота вхідного періодичного сигналу зменшується (момент часу τ_1), півхвиля негативної полярності сигналу U_1 стає більшою половини його періоду, що приз-

водить до перевищення в момент τ_2 імпульсом U_3 величини імпульсу U_4 і формування відповідного сигналу U_5 .

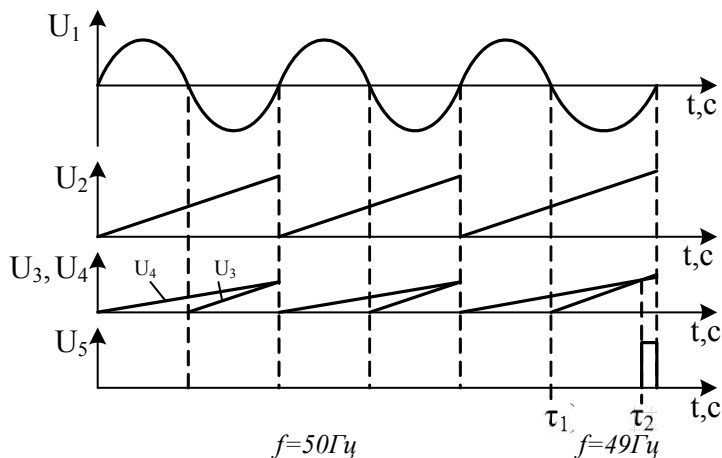


Рисунок 2.15 - Діаграма параметрів пристрою визначення зменшення частоти імпульсів [52]

визначається терміном спрацьовування засобів захисту з боку живлячої трансформаторної підстанції і подальшого відключення напруги мережі. Тобто, реагування пристрою відбуватиметься не на факт виникнення аварійного режиму, а на стан вільного вибігу асинхронного двигуна. В цьому випадку зменшення величини частоти на вводі статора є доволі незначним і стосовно величин номінальних ковзань АД $9,33 < s < 11,33$, (що характерно для більшості двигунів рудникових машин і установок) буде знаходитись в діапазоні $49,533 < f < 49,333$ Гц. Реалізація способу визначення переходу АД в режим вибігу на основі ефекту «реле частоти» потребує використання високоточних засобів визначення величини частотного параметру і не виключає ймовірність помилки у визначенні факту стрибкоподібного зменшення частоти напруги в мережі живлення АД, що не є прийнятним. Тому практичну актуальність набуває задача спрощення технічної реалізації усунення зворотних енергетичних потоків асинхронного двигуна при виникненні пошкодження в кабелі живлення.

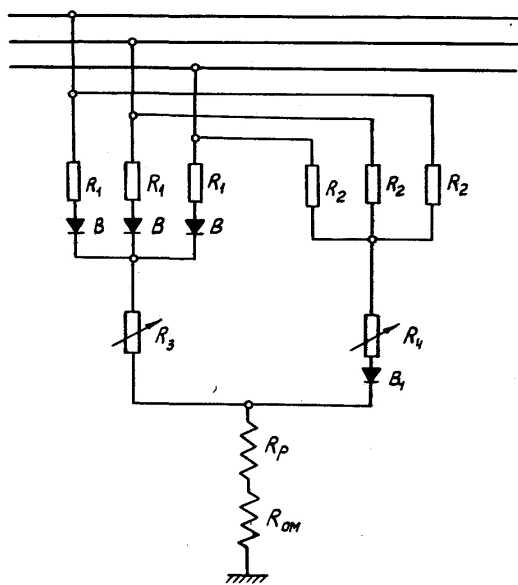
Однак, робота пристрою управління усуненням зворотного енергетичного потоку АД при виникненні короткого замикання за умови застосування функції «реле частоти» супроводжуватиметься певною затримкою у часі, яка ви-

2.4. Обґрунтування принципу двобічного знеструмлення місця пошкодження кабелю живлення асинхронного двигуна

Функціональна обмеженість у застосуванні розглянутих інформаційних сигналів відносно виникнення аварійного стану в кабелі живлення двигуна обумовила продовження досліджень у цьому напрямі з метою пошуку альтернативного технічного рішення. Відповідно до цього необхідно врахувати наступні принципові положення. Дія існуючих пристроїв максимального струмового захисту полягає у відокремленні місця виникнення к.з від джерела живлення з боку дільничної трансформаторної підстанції. Крім цього, непряму захисну функцію виконує дільничний апарат захисту від витоків струму на землю. Він формує команду на відключення дільничної мережі в разі пошкодження ізоляції (замикання на заземлюючу жилу кабеля через провідниковий гумовий екран) навіть однієї фази кабеля. Враховуючи на те, що замикання на землю однієї фази в мережі з ізольованою нейтраллю не створює струмів, небезпечних за займанням обладнання та виходячи з того, що розташування силових жил кабеля перешкоджає виникненню трифазного короткого замикання перш, ніж виникне однофазне, або двофазне замикання на землю, захисне відключення мережі при пошкодженні ізоляції однієї фази може розглядатися як захід випереджального струмового захисту. Ці засоби дозволяють виявити коротке замикання у силовому приєднанні електротехнічного комплексу і відключити останній від джерела електроживлення, але не дозволяють припинити струм у точці к.з., який певний час буде підтримуватись дією зворотного енергетичного потоку асинхронного двигуна, що був ввімкнений в аварійному приєднанні.

Задача обґрунтування способу випереджального струмового захисту з функцією двобічного знеструмлення місця пошкодження кабелю живлення асинхронного двигуна стосується специфічних умов улаштування і експлуатації рудникового (шахтного) дільничного електротехнічного комплексу. Зокрема, обов'язковою умовою є застосування шахтних гнучких екранованих кабелів із підключенням заземлюючої жили кожного з них до засобів заземлення у при-

строях кабельних введів відповідних магнітних пускачів і АД [13]. Тому важливим є наявність автономних технічних засобів визначення процесу виникнення підвищеної провідності між фазою мережі і землею на стороні підключення АД. Серед відомих технічних рішень, спроможних виконувати подібну функцію, можна виділити засіб, визначений, як „Схема 4В” (рис. 2.16) [37-39]. Ця схема складається з випрямляча, підключеного до трьох фаз мережі та паралельно йому підключеного фільтра нульової послідовності.



паралельно йому підключеного фільтра нульової послідовності. Перша частина схеми реагує на загальне зниження опору ізоляції, а друга – на несиметричні зниження, тобто однофазний витік струму.

Цей технічний засіб розроблений як варіант захисту від витоків струму на землю в період, коли були запропоновані перші зразки аналогічних пристроїв (апарати РУВ-1, УАКІ і т.п.). Тому йому притаманні всі недоліки цього класу апаратів (недостатня чутливість, відсутність самоконтролю справності через послідовне підключення реле в мережу оперативного струму, і т.п.). Отже, як захист від витоків струму на землю, „Схема 4В” не може конкурувати з сучасними захисними засобами (апарати „АЗУР” і т.п.) за функціональністю і технічними показниками.

А її застосування в сучасній шахтній дільничній електромережі призведе до втрати захисних властивостей штатних апаратів захисту від витоків струму на землю, що є неприйнятним. Крім того, „Схема 4В” порушує режим ізольованої нейтралі дільничної мережі, оскільки створюється постійне коло протікання струму між фазою і землею.

Однак, має сенс застосування принципу короткочасного утворення кола підвищеної провідності між фазою і землею як умови створення керуючого сигналу на захисне відокремлення зворотного енергетичного потоку асинхронного двигуна в разі виникнення аварійного стану.

В цьому разі інформаційним сигналом про виникнення одно - або двофазного к.з. на землю за умови наявності інформаційного зв'язку між статорною обмоткою та заземленим корпусом АД споживача аварійного приєднання може бути струм в заземлюючій жилі кабеля електроживлення.

Технічне протиріччя між обов'язковістю гальванічного відокремлення кола статора АД від заземленого корпусу двигуна і необхідністю створення вищезазначеного інформаційного зв'язку може бути вирішене в разі створення штучної ланки із з'єднаних зустрічно-послідовно стабілітрона і діода з послідовним підключенням струмообмежуючого резистора між колом статора АД і його заземленим корпусом відповідно до схеми (рис. 2.17) [53].

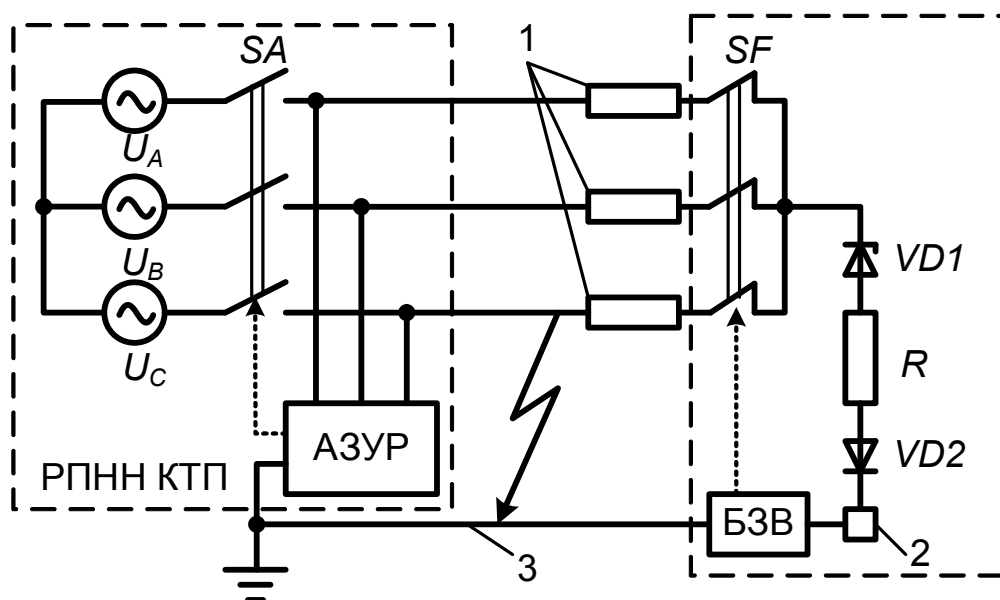


Рисунок 2.17 - Структурна схема пристрою двобічного синхронного знеструмлення місця короткого замикання в кабелі електроживлення АД: 1 – статор АД; 2 – корпус АД; 3 – заземлююча жила кабеля

Ця схема передбачає підключення заземлюючої жили живлячого кабеля в пристрої кабельного вводу АД до заземлюючого болта через трансформатор струму блоку захисного відключення БЗВ, вихід якого призначений для приєднання до входу виконавчого комутаційного апарата *SF*, розмикаючі контакти якого з'єднують обмотки статора двигуна у трифазну схему. Таким чином, наявність струму у вторинній обмотці трансформатора струму є інформаційним

сигналом для спрацьовування комутаційного апарата SF і розмикання його контактів. Цим роз'єднується трифазна схема статорної обмотки двигуна, що перешкоджає протіканню зворотного струму з цієї обмотки на точку к.з. у живлячому кабелі. При цьому, провідний стан кола $VD1-R-VD2$ матиме місце лише за наявності струму (пошкодження) між фазою кабеля і землею [53].

Запропоноване технічне рішення забезпечує відокремлення впливу енергетичного потоку на місце пошкодження живлячого кабелю з боку АД водночас із відключенням напруги автоматичним вимикачем живлячої трансформаторної підстанції. Таке відокремлення за умови реакції захисту на пошкодження ізоляції однієї фази кабеля є випереджальним щодо подальшого розвитку міжфазного короткого замикання. Це пояснюється наступним.

Процес міжфазного короткого замикання в кабелі живлення асинхронного двигуна розпочинається з пошкодження ізоляції однієї, або двох фаз, що за умови застосування гнучкого екранованого шахтного кабеля призводить до металевих контактів жил пошкоджених фаз із заземлюючою жилою. З одного боку, це викликає спрацьовування максимального струмового захисту живлячої трансформаторної підстанції (при міжфазному замиканні) та апарату захисту від витоків струму на землю і відповідного відключення пошкодженого кабелю від цієї підстанції автоматичним вимикачем SA . У той же час, в момент виникнення одно-, або двофазного замикання на землю під дією значної різності потенціалів між заземлюючою жилою та загальною точкою статора двигуна стабілітрон $VD1$ відкриється у зворотному напрямі. Створюється коло протікання струму з живлячої трансформаторної підстанції через пошкоджену жилу (пошкоджені жили) кабелю та його заземлюючу жилу, корпус АД, стабілітрон $VD1$, резистор R , діод $VD2$ – до загальної точки статора. В разі виникнення к.з. в кабелі після відключення мережі за умови знаходження АД споживача в стані вільного вибігу струм буде визначатися величиною ЕРС обертання АД і протікати від його статора за вищезазначеним шляхом. Це призводитиме до виникнення струму у вторинній обмотці трансформатора струму, що знаходиться в приєднанні заземлюючої жили кабеля до металевому корпусу АД. Через це вико-

навчій пристрій SF формує команду на роз'єднання контактами трифазної схеми статора і припинення струму в точці пошкодження кабеля живлення, обумовленого дією зворотного енергетичного потоку АД.

Схема приєднання діода $VD2$ і стабілітрона $VD1$ виключає вплив пристрою на роботу дільничного апарата захисту від витоків струму на землю, оскільки перешкоджає протіканню через землю на статор двигуна постійного оперативного струму цього апарата (що накладається на трифазну електричну мережу). Ця схема приєднання відокремлює статор АД від його заземленого корпусу, що відповідає принципу ізоляції статора двигуна від елементів заземлення мережі у робочому режимі експлуатації.

Наявність кола підвищеної провідності між фазою мережі і землею може розглядатись як окремий випадок неприпустимого до експлуатації стану електротехнічного комплексу дільниці шахти в разі виникнення витoku струму на землю (через торкання людиною елемента мережі, що є під напругою). Тому захисна дія запропонованого засобу може бути поширена у випадку створення кола витoku струму на землю.

З метою обґрунтування математичної моделі однофазного витoku струму на землю з урахуванням функціонування пристрою двобічного знеструмлення пошкодження кабеля живлення асинхронного двигуна скоректовано структуру загальної схеми шахтного дільничного ЕТК (рис. 2.18). Сукупність елементів ЕТК ДШ, що мають електричний зв'язок із аварійною точкою, представлено у вигляді трифазного симетричного джерела напруги, до якого приєднано модель ізоляції кабельної мережі, опір кола витoku та вимірювальне коло пристрою відокремлення енергетичного потоку АД.

Стан кола однофазного витoku струму на землю досліджується, також, за скоректованою схемою заміщення, наведеною на рис. 2.19, де позначено: u_{ϕ} – фазна напруга у місці витoku струму на землю (в разі представлення всієї системи у вигляді трифазного джерела – U_A, U_B, U_C); R_e – опір кола витoku; C_{i3}, R_{i3} – відповідно, сукупна ємність та активний опір ізоляції трьох фаз мережі ($C_{i3\phi}, R_{i3\phi}$ – відповідно, сукупна ємність та активний опір ізоляції фази кабелів, що ма-

ють електричний зв'язок із місцем виникнення витoku струму на землю); R_{δ} – вимірювальний резистор додаткового ланцюга пристрою захисту; i_e – струм витoku. Джерелом напруги до моменту захисного вимкнення мережі є дільнична трансформаторна підстанція, а після цього моменту – ЕРС вибігу двигунів спо-

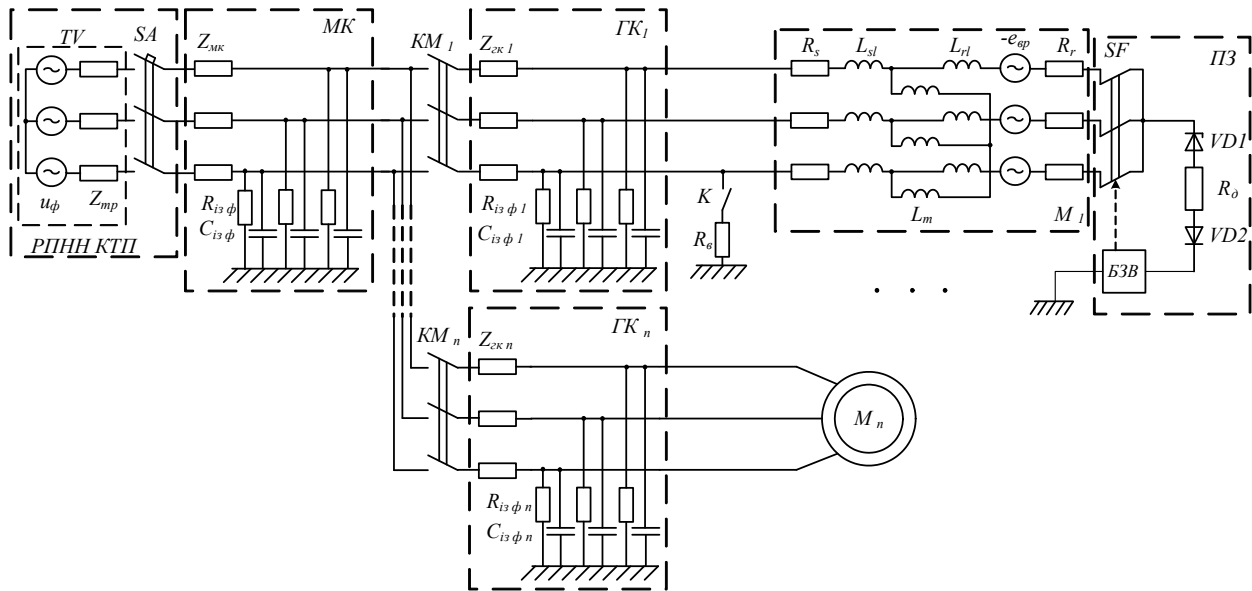


Рисунок 2.18 - Схема шахтного дільничного ЕТК з урахуванням вимірювального кола пристрою захисного відокремлення зворотного енергетичного потоку АД

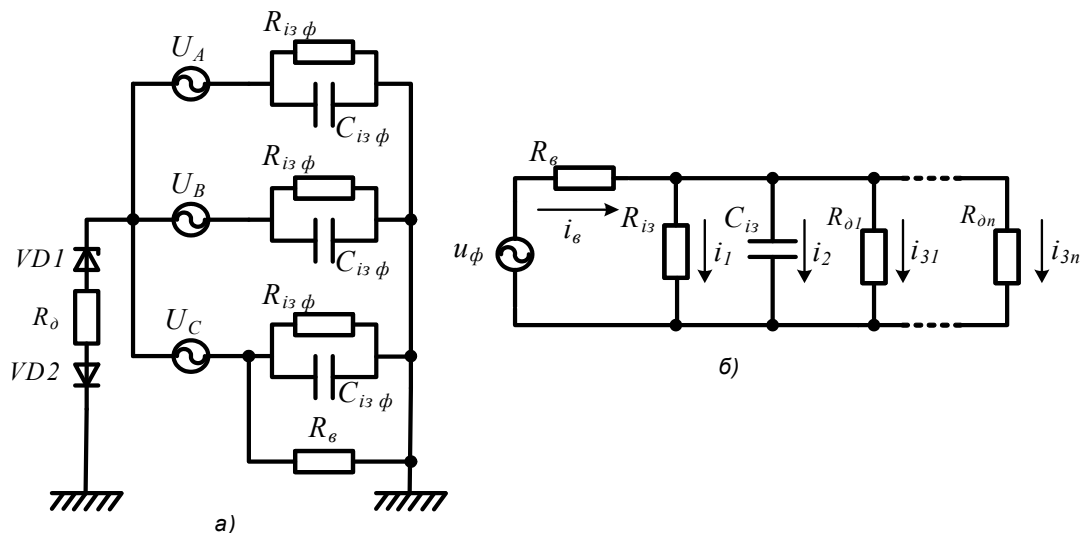


Рисунок 2.19 - Схема заміщення системи (а) та еквівалентна схема заміщення (б) кола однофазного витoku струму на землю з урахуванням вимірювального ланцюга пристрою відокремлення енергетичного потоку АД живачів ЕТК з урахуванням функції створення зрівнювальних струмів [54].

Відповідно до наведеної еквівалентної схеми заміщення (рис. 2.19 б) згідно законів Кірхгофа запишемо рівняння, що описують процеси в системі:

$$\begin{cases} i_1 = \frac{1}{R_{i3} C_{i3}} \int i_2 dt \\ i_2 = \frac{1}{R_g} (u_\phi - R_{i3} i_1) - i_1 - i_3 \\ i_3 = \frac{1}{C_{i3} (R_0)} \int i_2 dt \\ i_g = i_1 + i_2 + i_3 \end{cases} \quad (2.26)$$

Кількість електрики, що пройшла через опір кола однофазного витоку струму на землю з моменту виникнення аварійного стану t' і до моменту зникнення ЕРС обертання АД t'' , обчислюється згідно залежності (2.25).

Наведені вирази являють собою математичну модель кола однофазного витоку струму на землю з урахуванням наявності пристрою відокремлення енергетичного потоку асинхронного двигуна, яка дозволяє обчислити значення струму витоку від моменту його виникнення до моменту зникнення зворотної ЕРС обертання АД, а також величину струму у вимірювальному колі пристрою захисту.

Дослідження виконані з урахуванням до наступних величин активного опору R_g між фазою мережі і землею:

- $R_g = 1$ кОм (опір тіла людини, відповідно до ГОСТ 22929-78 [60]);
- $R_g = 30$ кОм (опір спрацьовування апарата захисту від витоку струму на землю в мережі 660 В);
- $R_g = 50$ кОм (опір спрацьовування апарата захисту від витоку струму на землю в мережі 1140 В).

В результаті досліджень визначена можливість отримання інформаційного сигналу про наявність кола підвищеної провідності між фазою і землею у пристрої відокремлення енергетичного потоку асинхронного двигуна, (відповідно до схеми рис. 2.17).

Величина струму у вимірювальному колі пристрою захисного відокремлення зворотного енергетичного потоку АД (рис. 2.20) з урахуванням відповід-

них величин активного опору між фазою мережі і землею, свідчать про здатність обґрунтованого способу захисту своєчасно визначити аварійний стан витoku струму на землю в кабелі електроживлення асинхронного двигуна.

Таким чином, доведена принципова можливість поширення захисної дії обґрунтованого способу визначення пошкодження кабеля електроживлення асинхронного двигуна у випадку створення кола витoku струму на землю (внаслідок торкання людиною струмоведучих елементів дільничної мережі).

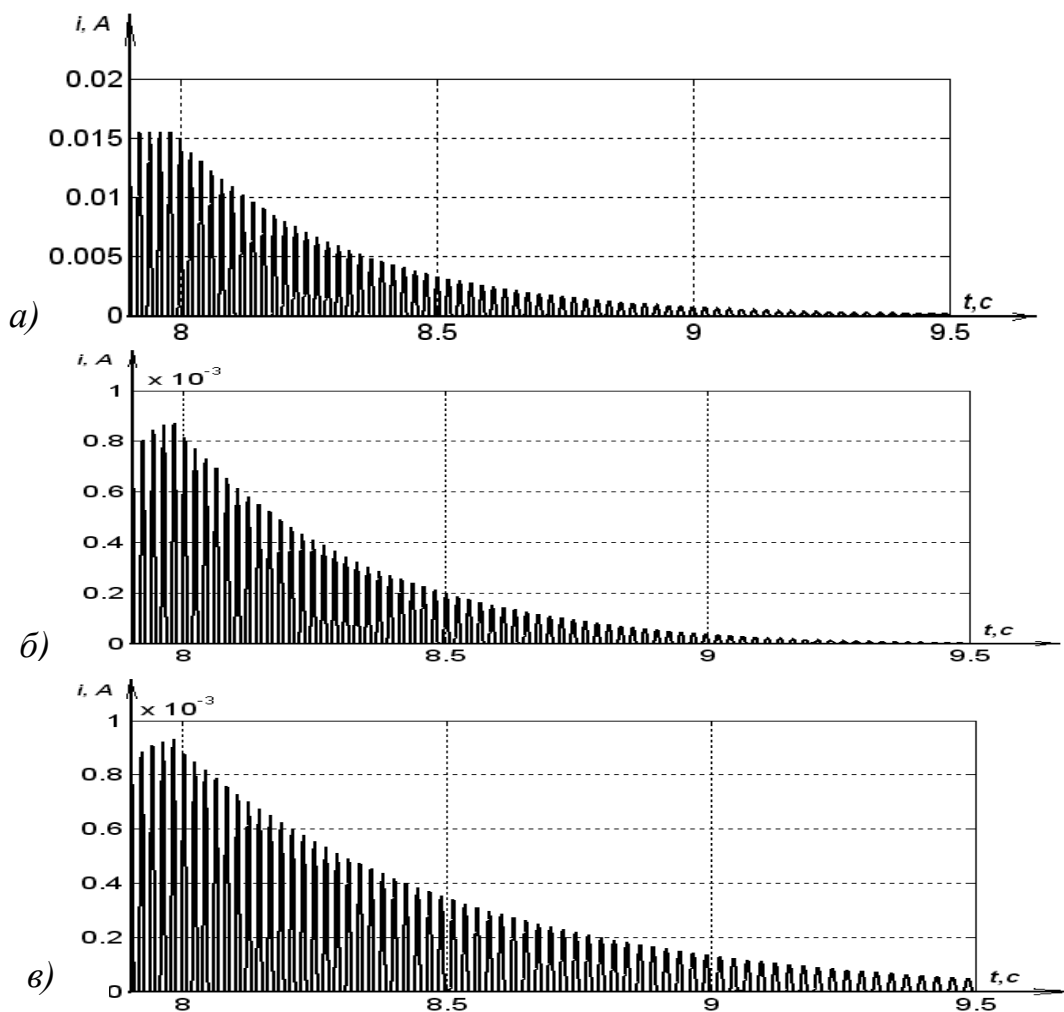


Рисунок. 2.20 - Діаграми струму у вимірювальному колі пристрою захисного відокремлення зворотного енергетичного потоку АД: а) $R_g = 1$ кОм; б) $R_g = 30$ кОм; в) $R_g = 50$ кОм (відключення мережі через 0,1 с)

Однак, підключення додаткових вимірювальних кіл провідності до загальної точки статорів двигунів дільниці створює умови для потенційного підвищення струму витoku та накопичення кількості електрики через опір витoku R_g , що потребує додаткових досліджень.

Моделювання проводилось в наступній послідовності. До моменту часу t_1 всі двигуни споживачів працюють у штатному режимі. У момент t_1 в мережі живлення першого двигуна виникає однофазний витік струму на землю через опір тіла людини ($R_{\text{в}} = 1 \text{ кОм}$). У момент часу t_2 автоматичний вимикач трансформаторної підстанції відключається за командою від апарата захисту від витоку струму на землю.

Розроблена модель типової дільничної мережі (табл. 2.1) дозволила визначити ймовірність проходження через тіло людини неприпустимо великої кількості електрики від зворотних енергетичних потоків АД (рис. 2.21) з урахуванням конкретних параметрів складових електротехнічного комплексу [55].

Таблиця 2.1

Характеристика елементів ЕТК ДШ напругою 660 В

№	Двигун		Гнучкий кабель	
	Тип	Потужність, кВт	Марка	Довжина, м
1	ЭКВК4-220	220	КГЭШ 3х70	250
2	ЭДКОФВ315М4	160	КГЭШ 3х50	200
3	АИУМ225М4	55	КГЭШ 3х35	50

Аналіз результатів моделювання свідчить про наявність деякого підвищення накопичення кількості електрики через коло витоку (рис.2.21а), але цей процес існує тільки до моменту захисного роз'єднання схеми статорів асинхронних двигунів споживачів шахтної дільниці. Таким чином примусове відокремлення зворотних енергетичних потоків АД дозволяє підтримати рівень кількості електрики через людину в мережі 660 В в межах 40 мА·с (рис. 2.21б), в мережі 1140 В в разі відключення контактора за нормативний час 0,06 с в межах 50 мА·с (рис. 2.22), що відповідає вимогам електробезпеки (ГОСТ 22929-78 [18]).

Отримані параметри струму (рис. 2.20) в ланцюзі підключення трансформатора струму заземлюючої жили кабеля у струмоведучому колі „статор – корпус АД” підтверджують здатність пристрою захисту за схемою (рис. 2.17) виявити замикання в кабелі живлення АД після відключення напруги мережі і

знеструмлення місця пошкодження цього кабеля з боку зворотного енергетичного потоку асинхронного двигуна споживача аварійного приєднання.

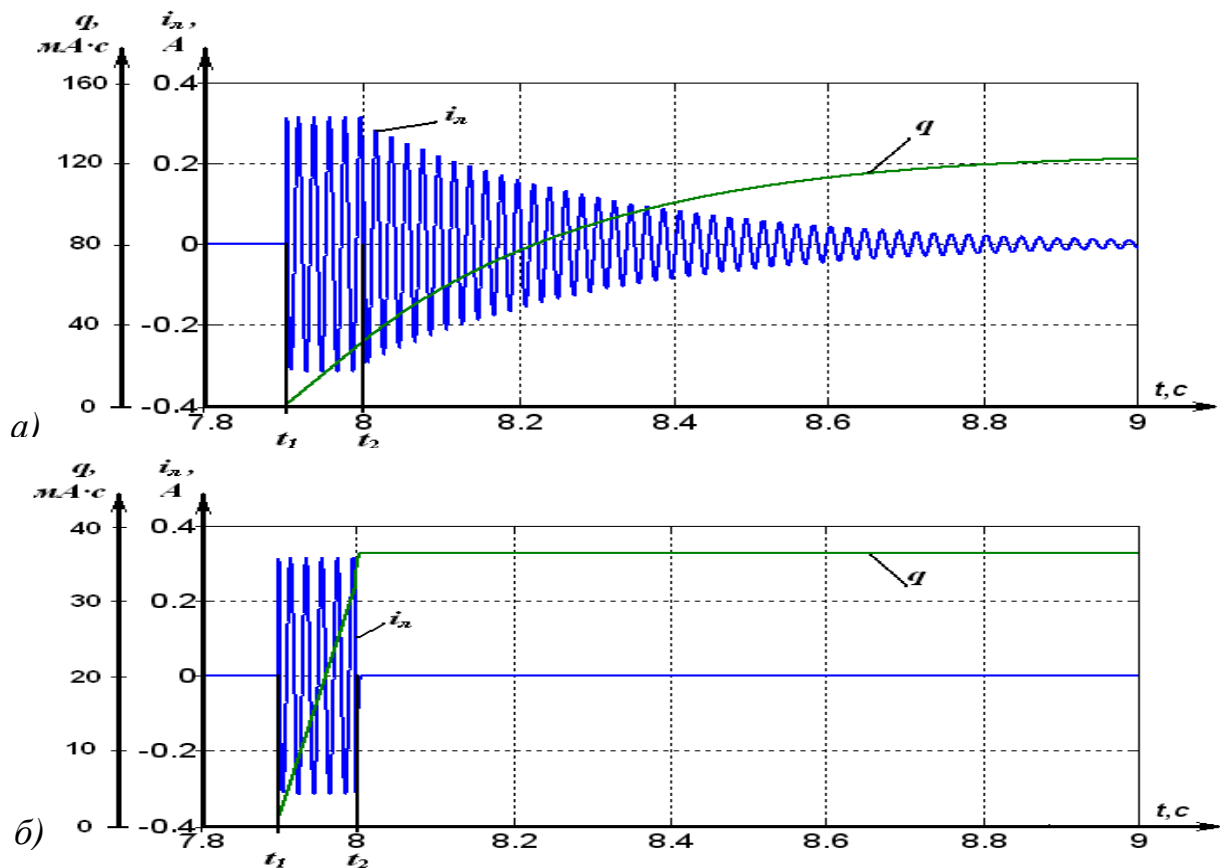


Рисунок 2.21 - Діаграми, що характеризують струму витoku на землю та накопичення кількості електрики через опір кола витoku струму на землю (напруга мережі 660 В): а) при відсутності усунення зворотних ЕРС АД; б) за наявності усунення зворотних ЕРС всіх АД дільниці; пристрій компенсації ємнісної складової струму витoku на землю відсутній

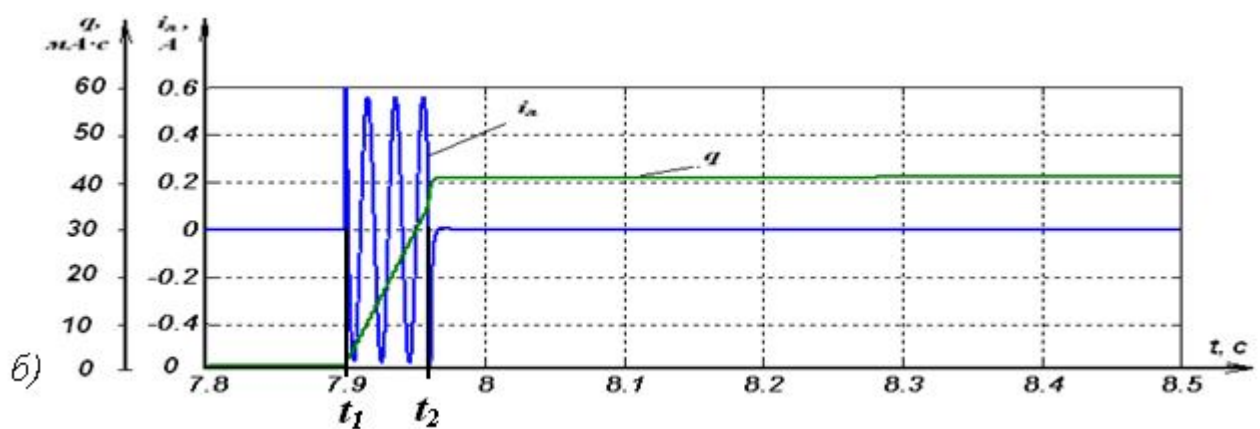


Рисунок 2.22 - Діаграми, що характеризують струму витoku на землю та накопичення кількості електрики через опір кола витoku струму на землю (напруга мережі 1140 В) за наявності примусового відокремлення енергетичних потоків АД всіх споживачів через 0.06с

Додатковою захисною функцією запропонованого технічного рішення слід вважати всебічне знеструмлення місця виникнення електропровідності в колі «фаза-земля» за умови застосування засобу відокремлення зворотного енергетичного потоку у складі електросхем двигунів всіх споживачів технологічної дільниці. Це пояснюється наступним. Якщо в момент виникнення замикання в кабелі живлення АД контактор його пускача залишиться у ввімкненому стані та будуть створені умови для підживлення аварійної точки енергетичними потоками з боку двигунів суміжних споживачів, обґрунтований вище пристрій захисту за схемою (рис. 2.17) буде здатним виконати всебічне знеструмлення пошкодженого кабелю за умови застосування його на всіх асинхронних двигунах споживачів технологічної дільниці.

Таким чином, доведена принципова можливість всебічного знеструмлення пошкодженої точки кабелю на основі контролю струму в штучному ланцюзі між заземленим корпусом двигуна і трьохфазною обмоткою статора за умови застосування екранованого гнучкого кабелю в складі електротехнічного комплексу дільниці шахти і обґрунтоване відповідне технічне рішення.

Окрім того, досліджена проблематика узгодження функціональних властивостей пристрою захисту із параметрами перехідних процесів при контакторному пуску та відключенні АД. Відомо [56], що ці процеси супроводжуються короткочасним підвищенням напруги в окремих складових дільничного електротехнічного комплексу. Принципово важливим є те, що це не спричиняє хибного спрацьовування БЗВ і роз'єднання силових контактів SF .

Навіть в разі відмови у вигляді хибного спрацьовування пристрою захисту роз'єднання «зірки» статора АД силовими силовим комутаційним апаратом SF при комутаційному процесі відключення напруги живлення не зможе спричинити вплив на інші складові електротехнічного комплексу дільниці шахти, оскільки відповідний процес супроводжується відокремленням силової схеми живлення АД розмиканням відповідного силового комутаційного апарату (магнітного пускача, або автоматичного вимикача). Крім того, схема приєднання діоду $VD2$ унеможливує протікання оперативного струму апарата АЗУР по

ланцюгу пристрою захисту навіть за наявності зворотного провідного стану стабілітрону *VDI*.

В разі необхідності, додатковими технічними заходами із поліпшення захисту від хибного спрацьовування пристрою захисту слід вважати наступне. Комутаційний перехідний процес виникає у перший момент підключення АД до живлячої мережі і має малу тривалість, так, що у цей термін кутова швидкість ротора АД середньої потужності зможе досягти рівня, не більш, як 0,1 від номінальної тобто величина зворотної ЕРС АД не буде створювати небезпечний стан при к.з в мережі живлення АД в процесі пуску. Таким чином, на інтервалі пуску АД може бути в принципі запроваджена затримка часу на початок роботи пристрою захисту. Вона може бути узгоджена із сигналом датчика швидкості АД, тобто, функціонування пристрою захисту може відбуватися за умови, що кутова швидкість ротора АД перебільшила наперед задану мінімальну величину.

2.5. Аналіз процесів при виникненні міжфазного дугоутворення в мережі живлення асинхронного двигуна в контексті доцільності застосування засобів відокремлення зворотних енергетичних потоків

Специфічним видом аварійного стану силового приєднання шахтного дільничного електротехнічного комплексу є міжфазне дугоутворення (дугове замикання), що виникає внаслідок погіршення ізоляції між фазами силового приєднання. Одною з причин такого стану є пошкодження гумової ізоляції внутрішніх силових жил кабелю оголеною заземлюючою жилою при зовнішньому надмірному стисненні кабелю, що має місце в складних умовах експлуатації кабельної мережі [30].

Небезпека процесу полягає в тому, що опір електричної дуги не дорівнює нулю і, як правило, є співрозмірним активному опору навантаження силового приєднання (асинхронного двигуна споживача). Отже, процес дугового замикання не може бути визначений засобами максимального струмового захисту

пускатчів (або аналогічної комутаційної апаратури), хоча таке дугоутворення носить всі ознаки небезпеки відкритого спалаху в умовах шахти.

Щонайбільше, захисне відключення мережі в цьому випадку може бути здійснене за командою апарату захисту від витoku струму на землю в разі, якщо внаслідок дугового замикання мало місце утворення ланцюга між фазою мережі і землею.

В іншому випадку, функція захисного відключення силового ланцюга з ланкою міжфазного дугового замикання потребує спеціального захисного засобу. Як варіант, це може бути максимальний струмовий захист зі змінною уставкою, величина якої зменшується після закінчення пуску асинхронного двигуна відповідного приєднання [57].

Однак, враховуючи на небезпеку міжфазного дугоутворення в умовах експлуатації електротехнічного комплексу шахтної дільниці актуальним є дослідження процесів при виникненні дугового замикання в контексті доцільності застосування засобів відокремлення зворотного енергетичного потоку асинхронного двигуна аварійного приєднання.

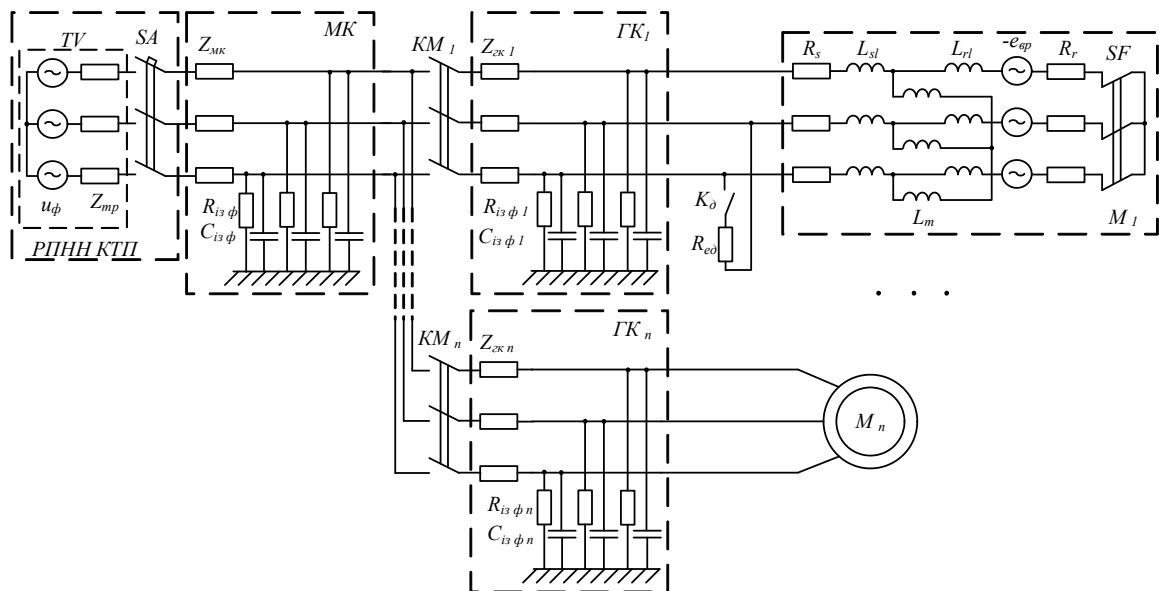


Рисунок 2. 23 - Загальна розрахункова схема ЕТК ДШ при виникненні лугового замикання в кабелі живлення АЛ

Таким чином, в якості об'єкта дослідження обрана розрахункова схема (рис. 2.23), в якій імітація електричної дуги виконується підключенням активного опору R_d контактом $K1$ між двома фазами в мережі живлення АД. Враховуючи на співрозмірність опору дуги і активного опору АД середньої потужності, введемо припущення, що опір дуги знаходиться в межах $0,5 \text{ Ом} < R_{ed} < 2 \text{ Ом}$.



Рисунок 2.24 - Ймовірні стани електротехнічного комплексу, що підлягають дослідженню

Отже, дослідженню підлягли параметри струму в мережі живлення АД, на інтервалі пуску АД, його роботи під номінальним навантаженням, в момент виникнення і у подальший термін існування міжфазного дугоутворення. При

цьому, у загальних координатах часу (t) представлені струми всіх трьох фаз в мережі між дільничною підстанцією та ланкою дугоутворення; між асинхронним двигуном та ланкою дугоутворення, а також в самій ланці дугоутворення.

Також, враховані наступні стани електротехнічного комплексу, що наведені на рис. 2.24.

Результати дослідження наведені у вигляді діаграм струму (рис. 2.25, рис. 2.26) і свідчать про доцільність запровадження засобів примусового відокремлення енергетичного потоку АД аварійного приєднання в разі виникнення міжфазного дугоутворення в мережі електроживлення.

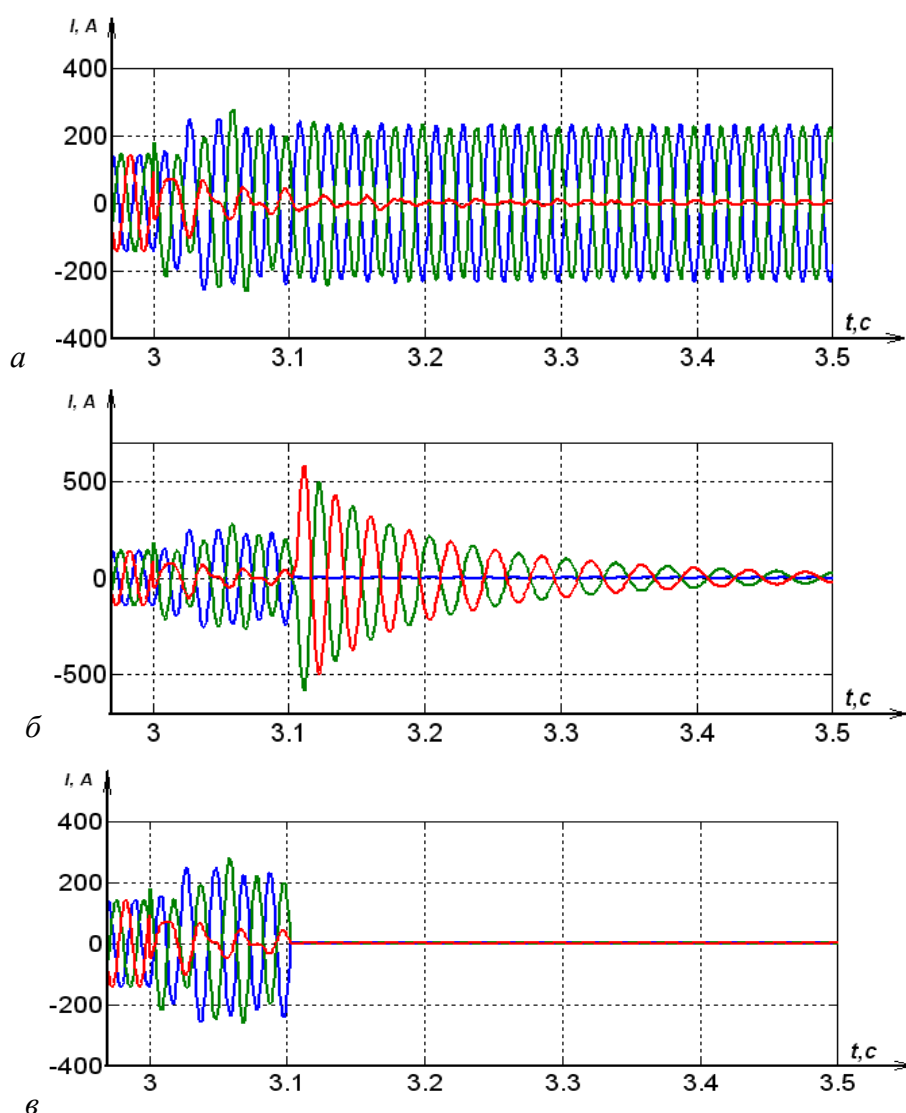


Рисунок 2.25. Діаграми струму в аварійній точці при виникненні дугоутворення в кабелі живлення АД: а) стан №1; б) стан №2; в) стан №3

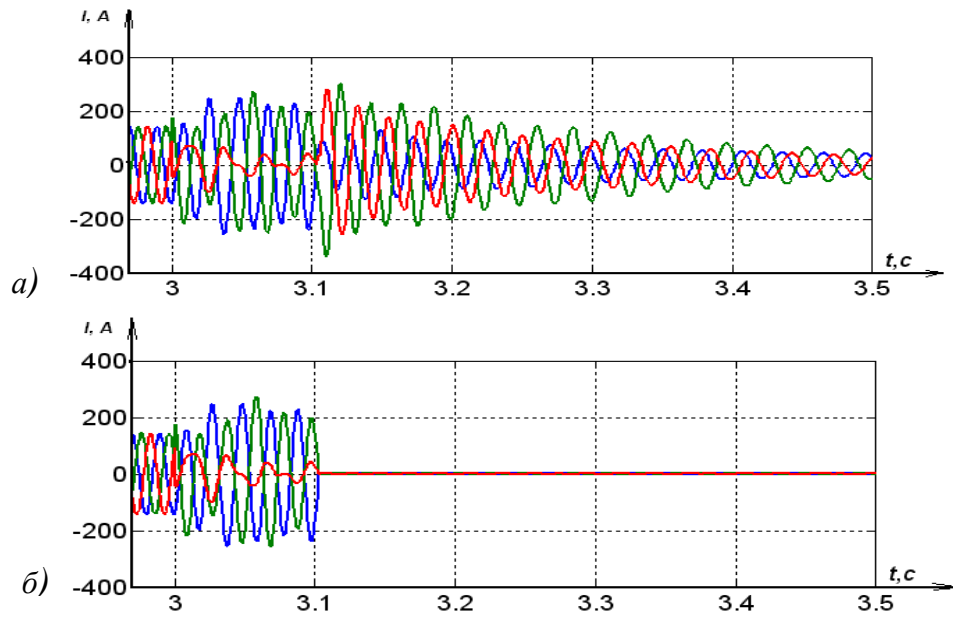


Рисунок 2.26 - Діаграми струму в аварійній точці при виникненні дугоутворення в кабелі живлення АД при роботі всіх споживачів дільниці: а) стан № 4; б) стан №5

3. ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ЗАХИСНОГО ДВОБІЧНОГО ЗНЕСТРУМЛЕННЯ ШАХТНОЇ ДІЛЬНИЧНОЇ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖІ

3.1. Обґрунтування і діалектика удосконалення автономних засобів відокремлення зворотних енергетичних потоків асинхронних двигунів

Обґрунтований в розділі 2.4 принцип двобічного знеструмлення місця пошкодження кабелю живлення асинхронного двигуна передбачає підключення активно-напівпровідникового кола контролю стану живлячого кабелю між корпусом двигуна і загальною точкою його трифазної статорної обмотки і може бути реалізований для АД, схема статора яких з'єднана за схемою «зірка» [53]. В той же час задача відокремлення зворотних енергетичних потоків залишається актуальною і для двигунів, у яких статор з'єднаний за схемою «трикутник».

З метою усунення цього функціонального обмеження засіб для автономного визначення пошкодження кабелю живлення асинхронного двигуна і відокремлення його зворотного енергетичного потоку може бути удосконалений шляхом створення штучної «зірки» резисторів однакового опору, підключених до входу статора АД з подальшим приєднанням напівпровідникового кола з вимірювальним засобом між загальною точкою цієї «зірки» і заземленим корпусом асинхронного двигуна, відповідно до схеми (рис. 3.1). В цьому разі приєднання силових контактів додаткового комутаційного апарату SF безпосередньо з боку силового вводу статора дає можливість не тільки виконувати функцію відокремлення зворотних енергетичних потоків АД не залежно від конфігурації трифазної схеми його статора, але й обмежувати тривалість підключення «зірки» додаткових резисторів $R1 - R3$ захисного засобу між фазами мережі і землею проміжком часу Δt між виникненням ушкодження в кабелі живлення і від'єднанням статора двигуна від мережі у наслідок спрацьовуванні комутаційного апарату SF , що є важливим в контексті забезпечення електробезпеки експлуатації дільничної мережі [58].

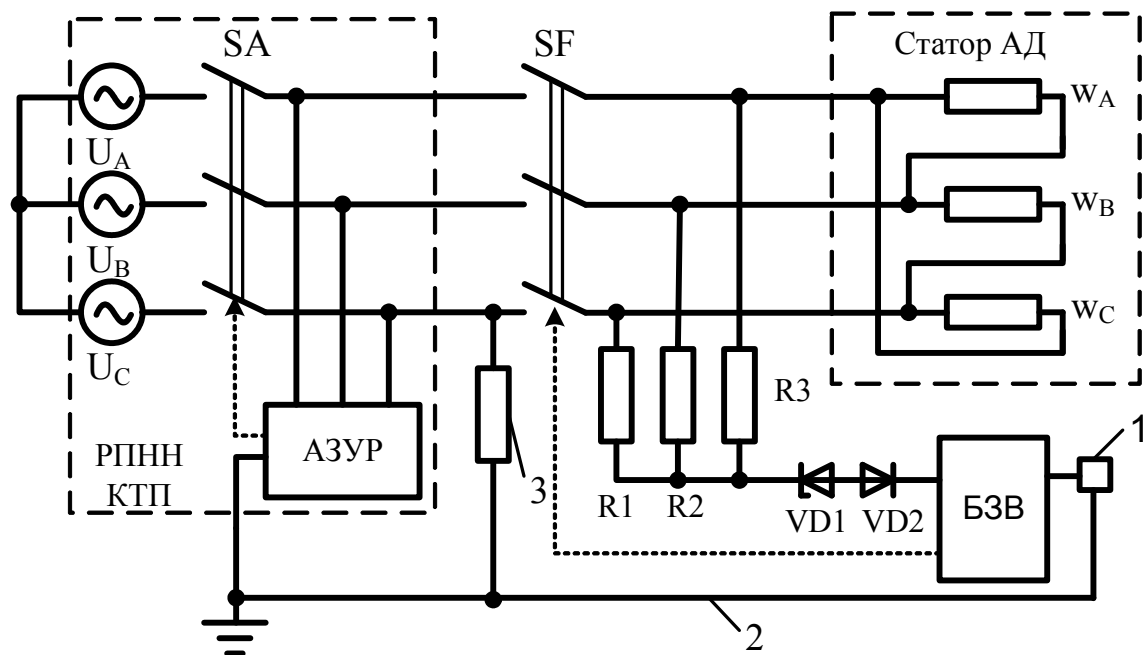


Рисунок 3.1 - Структурна схема пристрою відокремлення зворотного енергетичного потоку асинхронного двигуна в складі електротехнічного комплексу шахтної дільниці: 1 – корпус АД; 2 – заземлююча жила кабелю; 3 – коло підвищеної провідності між фазою кабелю і землею (як ознака аварійного стану дільничної мережі) [58]

Схема визначення аварійного стану живлячого кабелю в цьому разі має певні перетворення. Зокрема, в ланцюзі із зустрічно-послідовним з'єднанням стабілітрона $VD1$ і діода $VD2$ передбачене приєднання катода стабілітрона $VD1$ до фаз електроживлення статора через струмообмежуючі резистори $R1$; $R2$; $R3$ на ділянці між контактами комутаційного апарату SF і, безпосередньо, статорними обмотками двигуна. У той же час, катод діода $VD2$ приєднаний через блок захисного відключення (БЗВ) до заземлюючого болта металевого корпусу 1 двигуна, який підключається у загальну мережу заземлення через заземлюючу жилу 2 кабелю електроживлення. Таким чином, наявність кола R_{sum} підвищеної провідності між фазою мережі і землею (через коротке замикання фази на землю, або через торкання людиною фази мережі, що є під напругою) створюватиме умови для ввімкнення стабілітрона $VD1$ в зворотному напрямі і протікання струму через БЗВ з подальшим відключенням (за командою БЗВ) силових контактів комутаційного апарату SF . Звісно, таке відокремлення зворотного енергетичного потоку АД буде відбуватись водночас із спрацьовуванням дільнич-

ного апарату захисту від витоків струму на землю (АЗУР), за командою якого має відключитися автоматичний вимикач SA у розподільчому пристрої низької напруги (РПНН) дільничної КТП.

Таким чином, запропонований пристрій є автономним засобом визначення аварійного стану кабелю живлення асинхронного двигуна, і його захисна дія (відокремлення зворотного енергетичного потоку асинхронного двигуна) розповсюджується на двигуни з будь-якою схемою з'єднання фазних статорних обмоток («зірка» чи «трикутник»). У сукупності із захисним відключенням мережі з боку КТП це створює ефект двобічного знеструмлення шахтного дільничного електротехнічного комплексу при виникненні аварійного стану.

За умови, що запропонованим захисним пристроєм оснащені всі двигуни споживачів дільниці, виникнення кола підвищеної провідності між фазою і землею викличе одночасне відокремлення зворотних енергетичних потоків всіх цих двигунів. Отже, спрацьовування автономних засобів відокремлення зворотних енергетичних потоків асинхронних двигунів буде супроводжуватись створенням додаткових активних провідностей між фазою мережі і землею, що створює умови підвищення струму в колі витoku на землю (в разі його виникнення через торкання людиною фази мережі, що є під напругою). Тому принципово важливим є запровадження функції захисного відокремлення зворотних енергетичних потоків асинхронних двигунів за умови обмеження кількості електрики, що накопичується в ланцюзі $R_{\text{вум}}$ (тіло людини) на рівні, що не перевищує припустимої за критерієм електробезпеки величини ($q=50 \text{ мА}\cdot\text{с}$) [13].

Стан провідності вимірювального кола з додатковими резисторами $R1 - R3$ створюватиме в проміжок часу Δt підвищення струму в ланцюзі з $R_{\text{вум}}$, а враховуючи на те, що на однофазний витік струму на землю будуть реагувати засоби відокремлення зворотного енергетичного потоку всіх N двигунів дільниці, слід передбачати, що узагальнена провідність кола, утвореного паралельним приєднанням резисторів $R1 - R3$ всіх N захисних засобів буде збільшена у N разів. Оскільки параметри надійності будь-якого технічного засобу не є безмежними, слід передбачати, що в разі відмови виконавчого комутаційного апа-

рату SF хоча б одного силового приєднання, провідний стан провідності відповідного кола визначення оперативного параметру з резисторами $R1 - R3$ буде зберігатися на протязі всього терміну існування зворотного енергетичного потоку асинхронного двигуна після захисного відключення мережі з боку КТП.

Зазначені вище обставини обумовлюють доцільність застосування резисторів $R1 - R3$ з підвищеними значеннями електричних опорів (рис. 3.2). Однак, підвищення опору кожного з них навіть до 100 кОм обумовить величину струму через вимірювальний ланцюг на рівні, який ледь перевищує 3,88 мА (в мережі 660 В при $R_{вум} = 1$ кОм), що вже не збігається з величинами мінімальних струмів стабілізації відомих типів стабілітронів. Отже, виникатиме ймовірність неспрацьовування засобу відокремлення зворотного енергетичного потоку асинхронного двигуна.

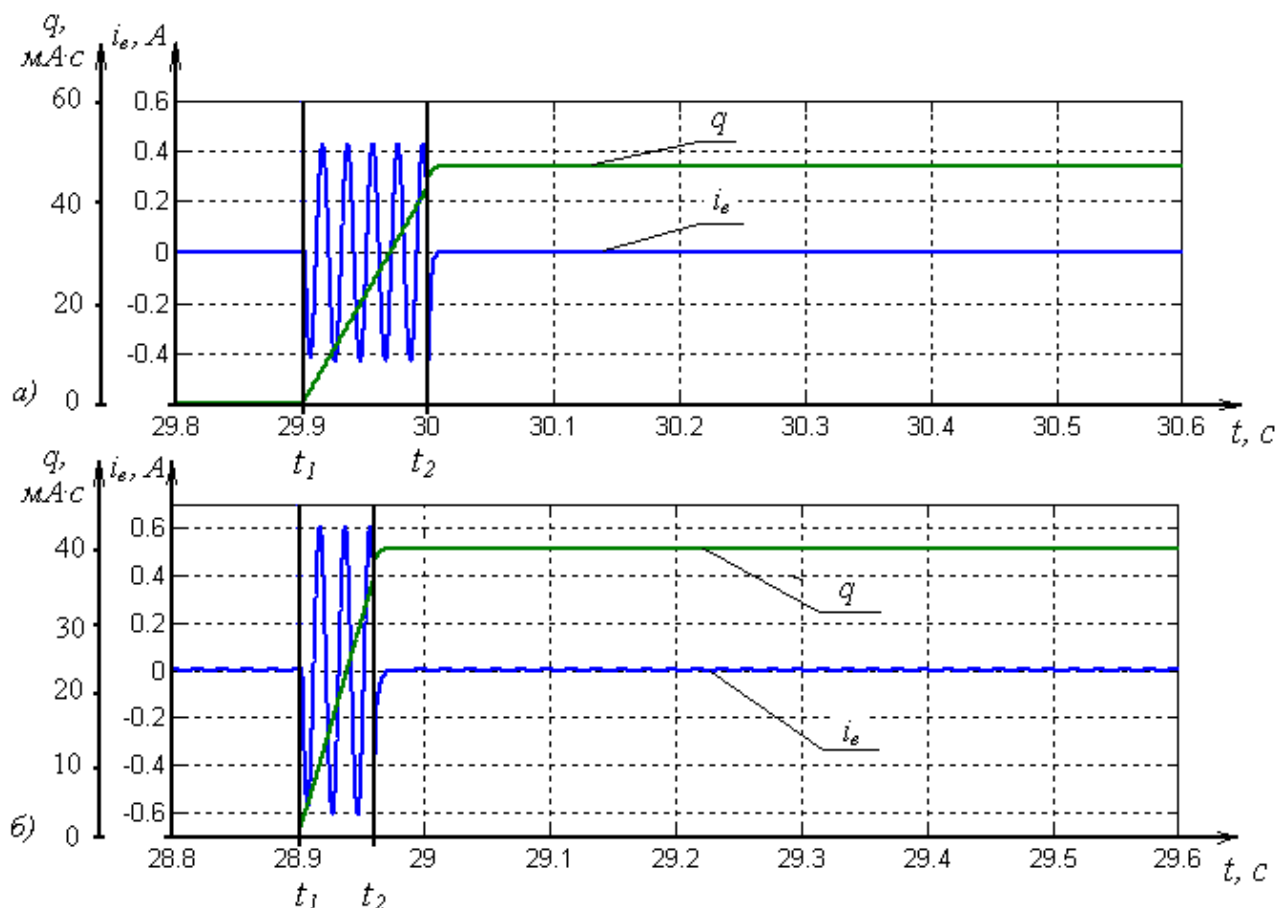


Рисунок 3.2 - Діаграми, що характеризують струм витоку на землю i_e та накопичення кількості електрики q через опір кола витоку в ЕТК ДШ за наявності пристроїв відокремлення зворотного енергетичного потоку АД в кожному відгалуженні: а) напругою 660 В; б) напругою 1140 В; пристрій компенсації ємнісної складової струму на землю відсутній

Рішенням цього технічного протиріччя може бути зміна конфігурації схеми кола визначення оперативного параметру (ЛВП) відповідно до рис. 3.3, де ланка з конденсаторів $C1 - C2$ і діода $VD1$: підтримує режим ізольованої нейтралі мережі за відсутності однофазного витоку струму на землю, унеможливорює протікання постійного струму, включаючи оперативний струм апарата захисту від витоків струму на землю (тобто, не впливає на його захисні функції); в момент t_1 виникнення однофазного витоку на землю (через опір $R_{вит}$) створює імпульс напруги UI обмеженої тривалості на резисторі $R4$, достатній для приведення в дію реагуючого органу (РО) засобу відокремлення зворотного енергетичного потоку асинхронного двигуна (рис. 3.4) [59].

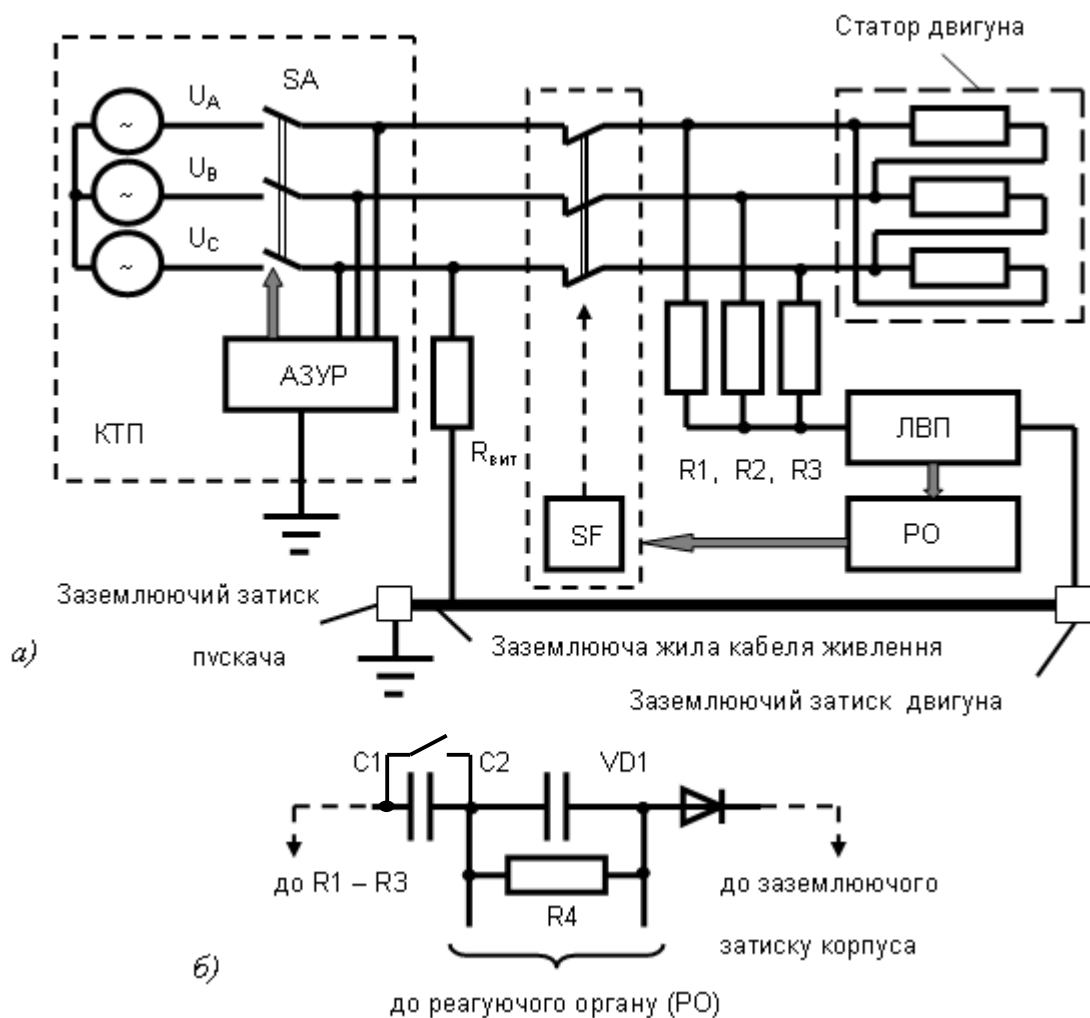


Рисунок 3.3 - Схема підключення засобу відокремлення зворотного енергетичного потоку асинхронного двигуна (а); варіант ланцюга визначення оперативного параметру засобу відокремлення зворотного енергетичного потоку двигуна (б) [59]

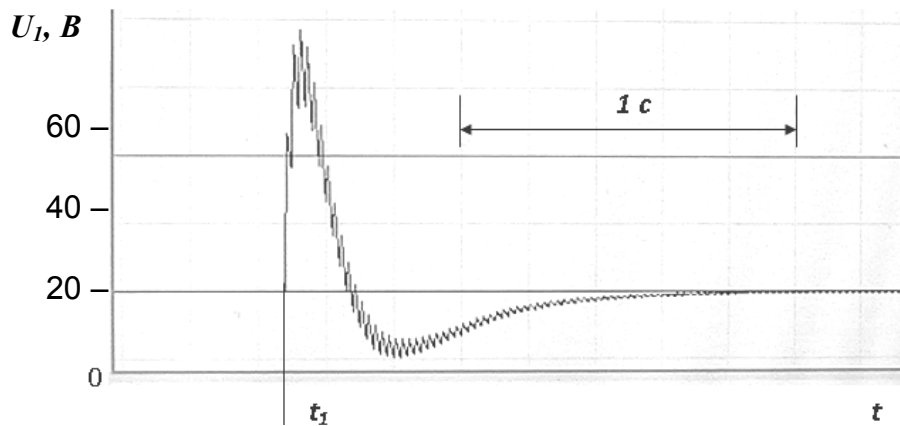


Рисунок 3.4 - Осцилограма напруги на резисторі R4 ланцюга визначення оперативного параметру засобу відокремлення зворотного енергетичного потоку асинхронного двигуна при виникненні в момент t_1 пошкодження живлячого кабелю

Для повернення схеми до первинного стану після спрацьовування виконується шунтування конденсатора $C1$ додатковим контактом $KM2.2$ виконавчого пристрою $KM2$ (рис. 3.5).

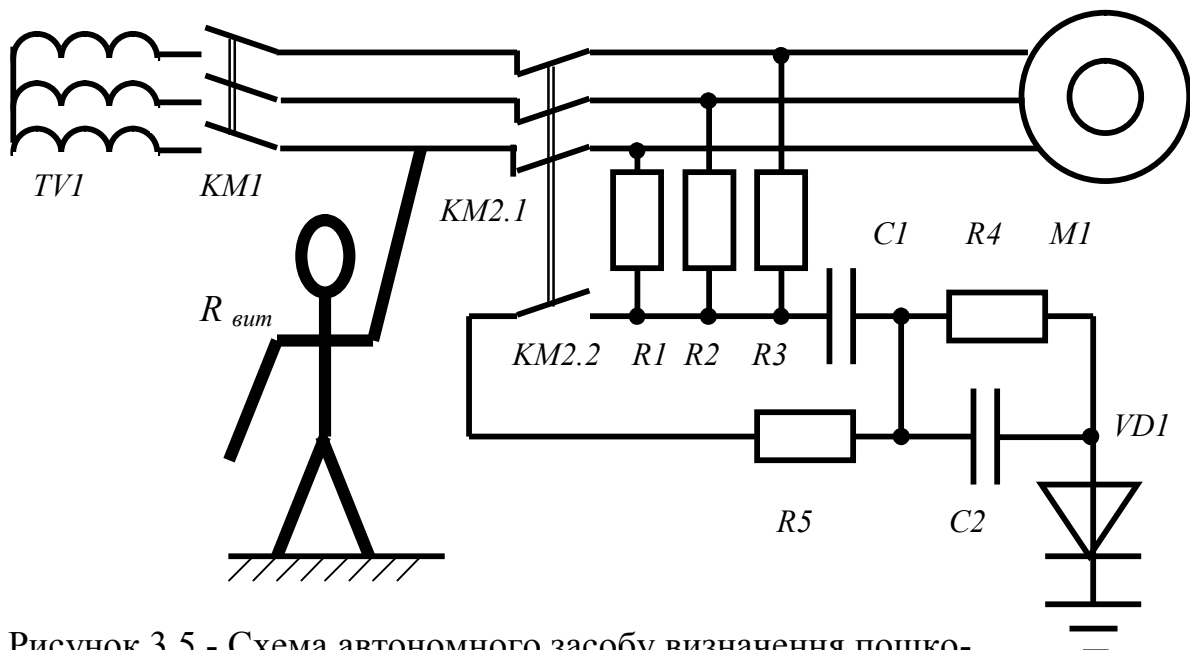


Рисунок 3.5 - Схема автономного засобу визначення пошкодження силової ланки електроживлення асинхронного двигуна і захисного відокремлення його зворотного енергетичного потоку

Незважаючи на обмеженість тривалості провідного стану ЛВП, вплив засобів захисного відокремлення ЕРС обертання АД на величину кількості електрики в ланцюзі підвищеної провідності $R_{вум}$ потребує дослідження.

Ці дослідження доцільно виконати стосовно типової комплектації шахтної видобувної дільниці з урахуванням параметрів відповідних типів асинхронних двигунів, та кабельної мережі, параметри якої узгоджені з розташуванням та потужностями споживачів (Додаток Б, табл. Б.1, табл. Б.2).

Стосовно реалізації функції захисту від витоків струму на землю розглянуті наступні властивості відповідних виконавчих засобів (Додаток Б, табл. Б.3) у залежності від типу застосованого апарату захисного відключення. В узагальненому вигляді структура АЗ наведена на рис. 3.6. Обов'язковими для застосування в структурі АЗ є блок захисного відключення (БЗВ) і компенсатор (К). Схеми апаратів захисного відключення, адаптованих для роботи в мережі 1140 В, передбачають функцію визначення і закорочування на землю ушкодженої фази (блок БКЗ), яка відпрацьовується за командою БЗВ в момент захисного відключення автоматичного вимикача SA1 дільничної КТП [60].

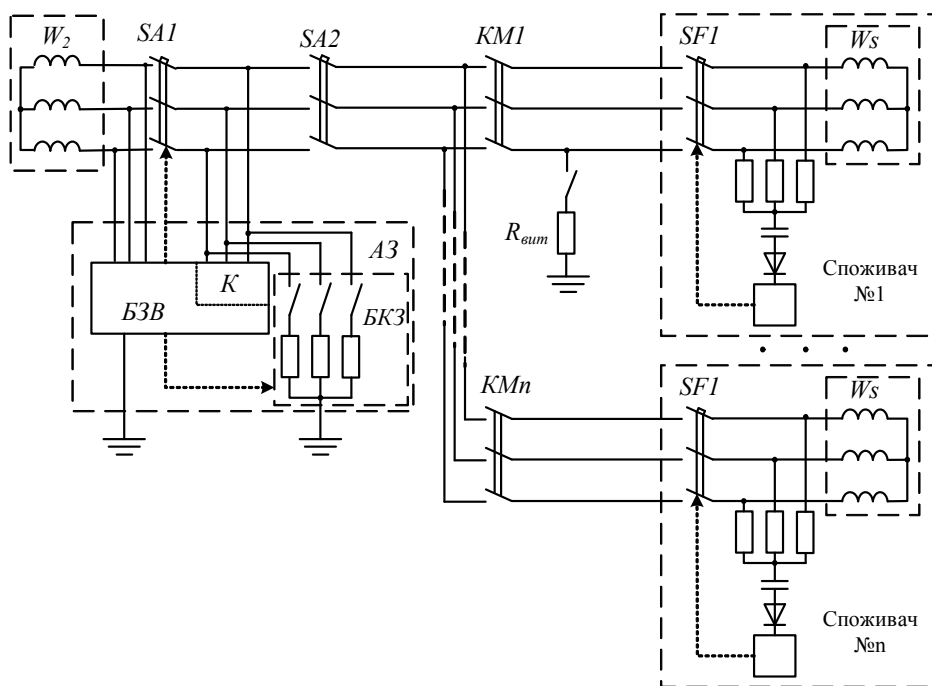


Рисунок 3.6 - Узагальнена схема електротехнічного комплексу шахтної дільниці при застосуванні відокремлення зворотних енергетичних потоків асинхронних двигунів

Таким чином, за умови застосування БКЗ (в АЗ типів РУ-1140 та АЗУР-4) врахований термін знеструмлення ланцюга $R_{зем}$ витoku струму на землю на ін-

тервалі часу замкненого стану відповідного контакту короткозамикача БКЗ з моменту t_2'' його спрацьовування за командою БЗВ (через термін 0,17 с [7]) до моменту t_2' роз'єднання силової контактної групи групового автоматичного вимикача SA2 розподільчого пункту дільниці; або контактора КМ1 пускача аварійного приєднання (в разі, якщо його спрацьовування буде випереджаючим щодо відключення силової контактної групи SA2).

Небезпека підвищення струму через опір витoku за наявності функції шунтування ланцюга витoku струму на землю не є істотною, оскільки деяке підвищення струму в цьому ланцюзі та кількості електрики, що обумовлене додатковими активними опорами, буде мати місце до моменту ввімкнення контакту короткозамикача (0,17 с). Це підтверджується результатами дослідження розрахункової схеми, у якій скоректована схема заміщення кола однофазного витoku на землю враховує ланцюг визначення оперативного параметра та пристрій компенсації ємнісної складової струму витoku (рис. 3.7) [60].

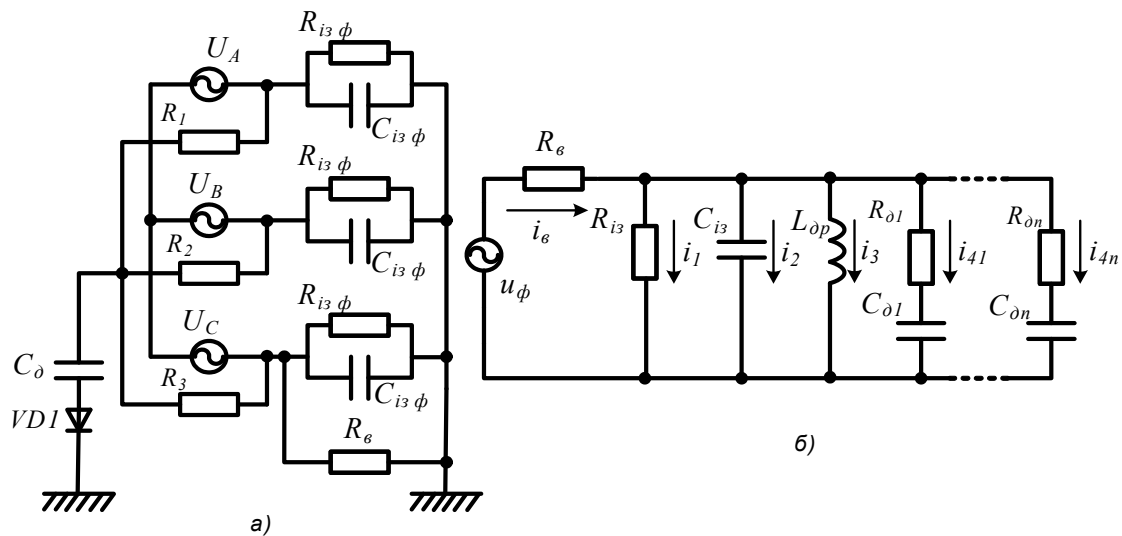


Рисунок 3.7 - Схема заміщення системи (а) та еквівалентна схема заміщення (б) кола однофазного витoku струму на землю з урахуванням ланцюга визначення оперативного параметра та пристрою компенсації ємнісної складової струму витoku

Відповідно до наведеної еквівалентної схеми заміщення (рис. 3.7 б) згідно законів Кірхгофа рівняння, що описують процеси в системі представлені наступними залежностями:

$$\left\{ \begin{array}{l} i_1 = \frac{1}{R_{i3} C_{i3}} \int i_2 dt \\ i_2 = \frac{1}{R_e} (u_\phi - R_{i3} i_1) - i_1 - i_3 - i_4 \\ i_3 = \int i_n dt \\ i_n = \frac{1}{L_{op} C_{u3}} \int i_2 dt \\ i_4 = \frac{1}{R_o} \left(L_{op} i_n - \frac{1}{C_{u3}} \int i_4 dt \right) \\ i_e = i_1 + i_2 + i_3 + i_4 \end{array} \right. \quad (3.1)$$

Структурна схема, що реалізує дану математичну модель, наведена на рис. 3.8 [60].

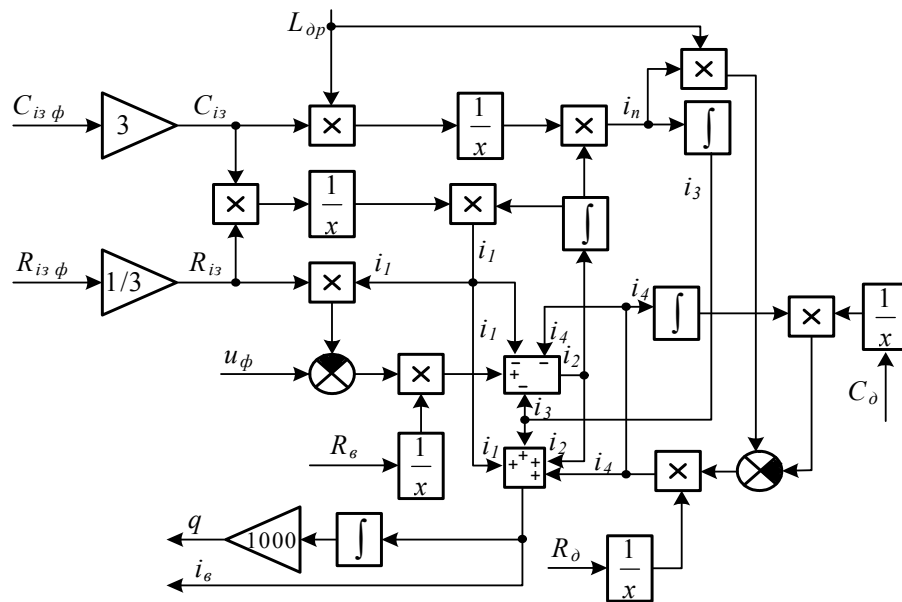


Рисунок 3.8 - Модель кола однофазного витоку струму на землю з урахуванням наявності пристрою відокремлення енергетичного потоку асинхронного двигуна

Параметри комп'ютерних моделей задавалися у діалогових вікнах (Додаток Б). Алгоритм моделювання передбачав: послідовний запуск всіх двигунів мережі з виходом кожного АД на усталену характеристику (механічне навантаження приймається на рівні 10%); виникнення витоку струму на землю в першому силовому приєднанні в момент часу t_1 ; вимкнення АВ за командою АЗ в момент часу t_2 (рис. 3.9, рис. 3.10, рис. 3.11).

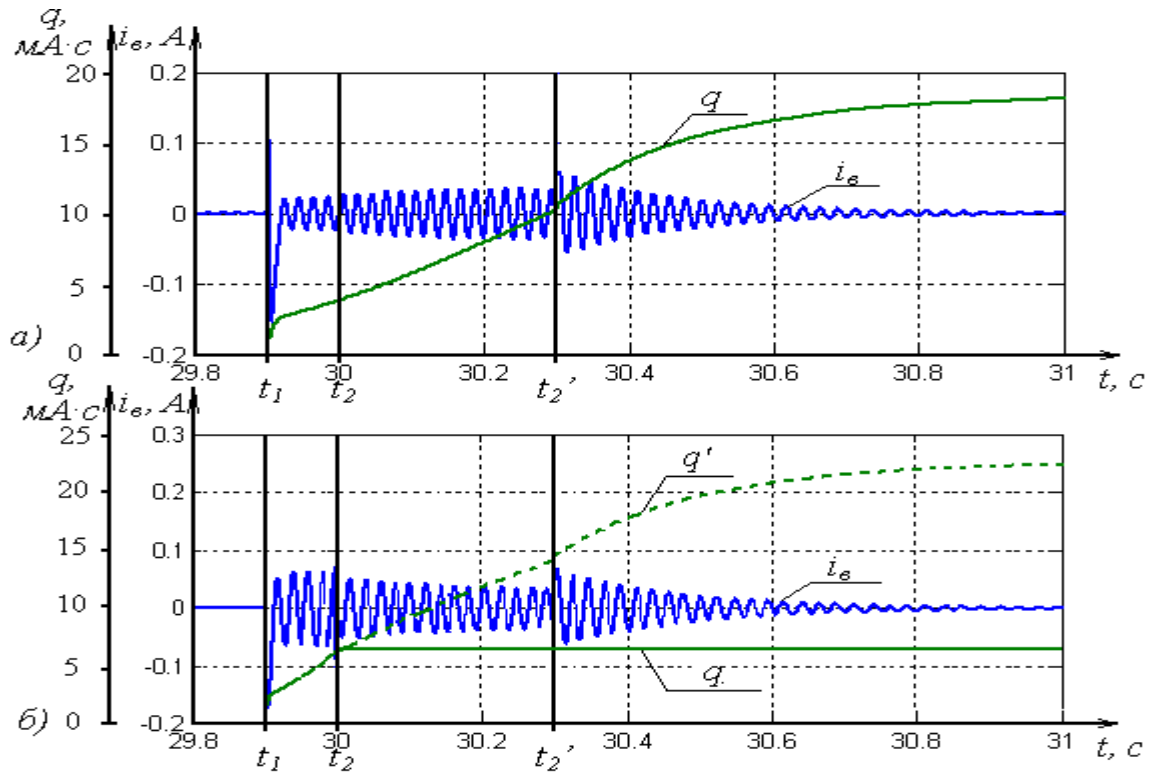


Рисунок 3.9 - Діаграми, що характеризують струм витоку на землю i_g та накопичення кількості електрики q через опір кола витоку в ЕТК ДШ напругою 660 В за наявності автокомпенсації ємнісної складової струму витоку (АРУЗ-1): а) без урахування наявності ЛВП в кожному приєднанні; б) з урахуванням наявності ЛВП в кожному приєднанні

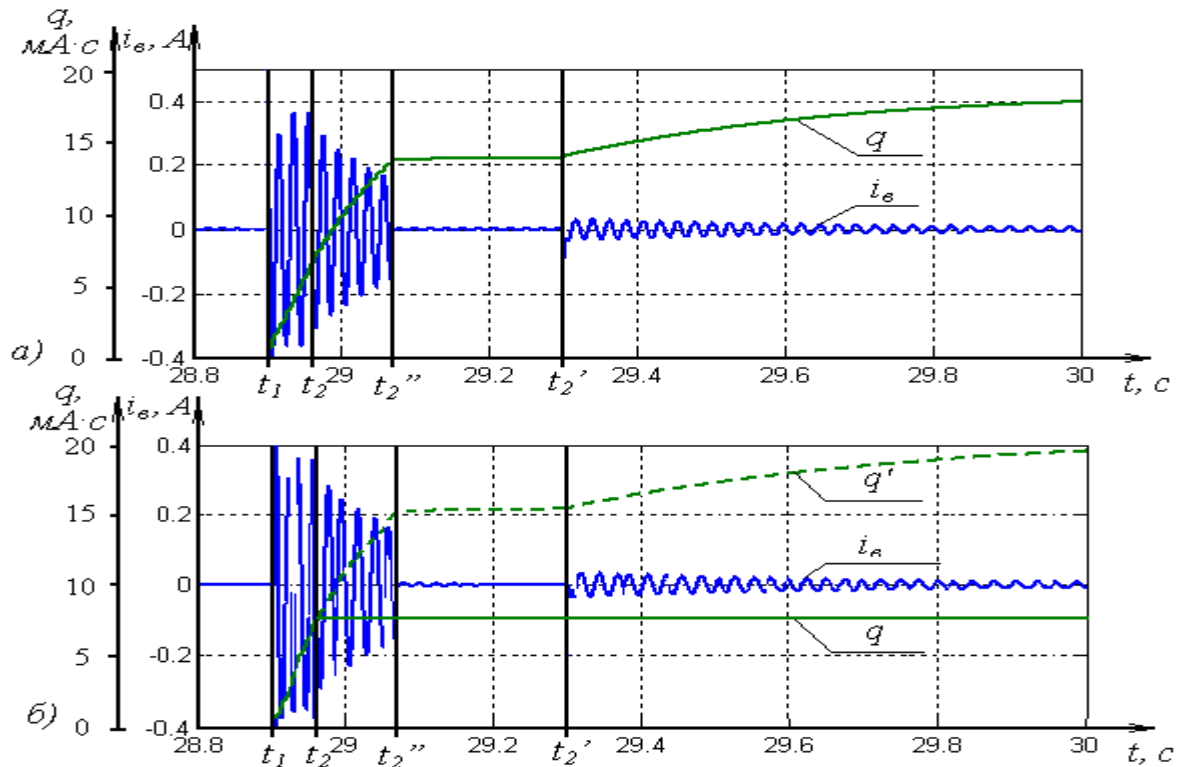


Рисунок 3.10 - Діаграми, що характеризують струм витоку i_g та накопичення кількості електрики q через опір кола витоку в ЕТК ДШ напругою 1140 В за наявності статичної компенсації ємнісної складової струму витоку та функції виявлення та замикання пошкодженої фази на землю (РУ-1140): а) без урахування наявності ЛВП в кожному приєднанні; б) з урахуванням наявності ЛВП в кожному приєднанні

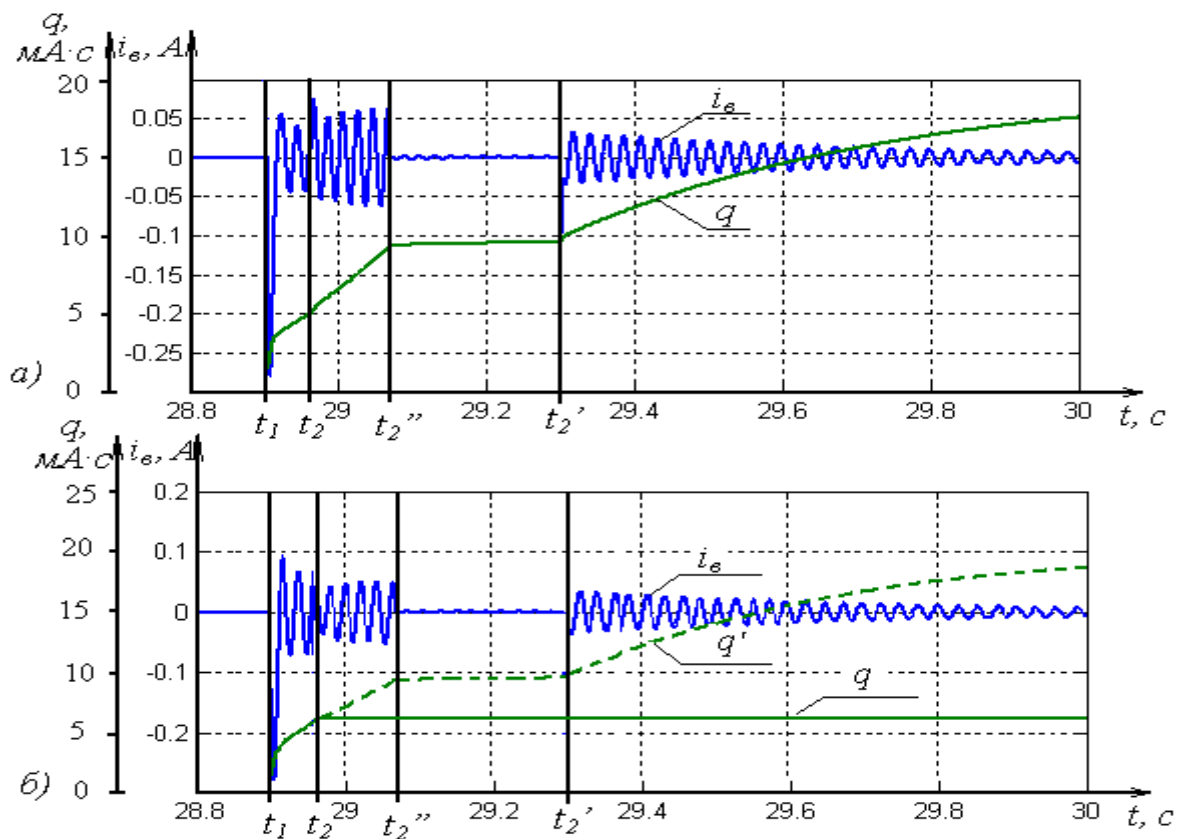


Рисунок 3.11. Діаграми, що характеризують струм витoku на землю i_g та накопичення кількості електрики q через опір кола витoku в ЕТК ДШ напругою 1140 В за наявності автокомпенсації ємнісної складової струму витoku та функції виявлення та замикання пошкодженої фази на землю (АЗУР-4): а) без урахування наявності ЛВП в кожному приєднанні; б) з урахуванням наявності ЛВП в кожному приєднанні

Аналіз діаграм струму витoku на землю i_g та накопичення кількості електрики q через опір кола витoku в ЕТК ДШ за наявності пристроїв відокремлення зворотного енергетичного потоку АД в кожному відгалуженні дозволив зробити висновок про можливість підтримання рівня кількості електрики через людину в мережі 660 В та 1140 В в межах нормованої величини відповідно до вимог електробезпеки (рис. 3.9, рис. 3.10, рис. 3.11) [60].

3.2. Двобічне знеструмлення мережі при виникненні міжфазного дугоутворення в кабелі живлення асинхронного двигуна

Результати теоретичних досліджень, наведених в розділі 2.5 свідчать про доцільність запровадження засобів примусового відокремлення енергетичного

поток АД аварійного приєднання в разі виникнення міжфазного дугоутворення в мережі електроживлення. Технічна реалізація принципу виявлення цього аварійного стану може бути здійснена шляхом визначення різниці величин лінійних струмів у трифазній схемі статора асинхронного двигуна аварійного приєднання з подальшим роз'єднанням цієї трифазної схеми і приєднанням обмотки однієї з фаз статора двигуна до його заземленого корпусу через резистор активного опору. За умови застосування апарату захисту від витоків струму на землю (АЗУР) цим забезпечується швидкодіюче двобічне знеструмлення аварійного місця силового приєднання в дільничному електротехнічному комплексі шахти (водночас із захисним відключенням ЕТК від КТП). Цим має бути досягнуте виконання функції попередження пожежі, обумовленої струмом міжфазного дугового замикання у кабелі живлення АД [61].

Структурна схема відповідного засобу захисту представлена на рис. 3.12.

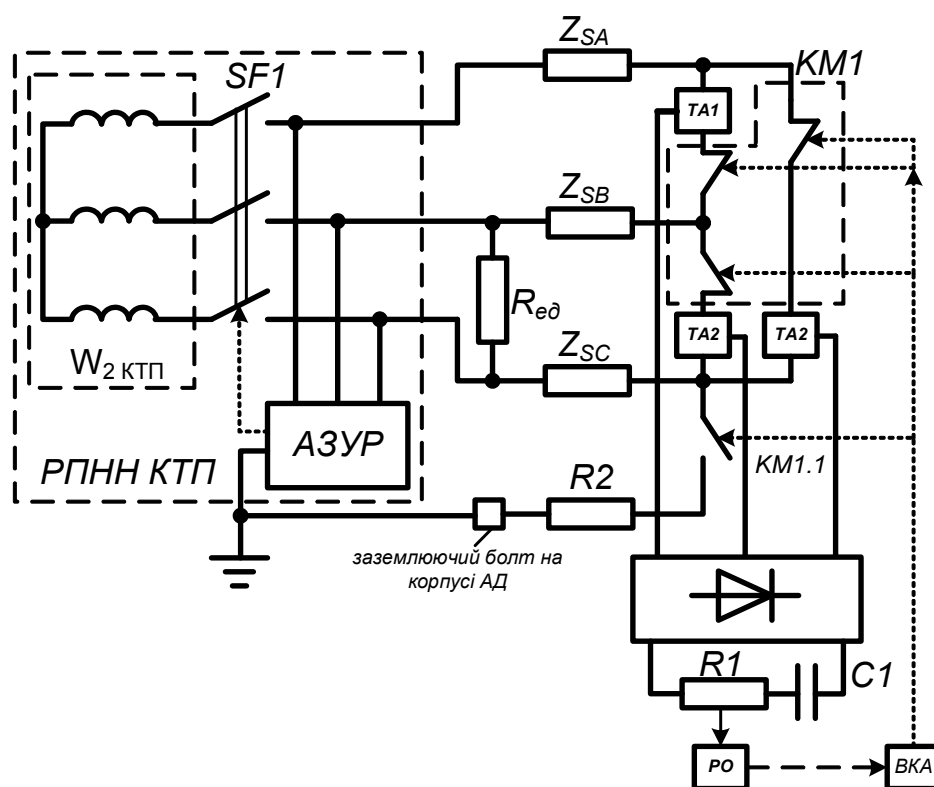


Рисунок 3.12 - Структурна схема засобу відокремлення зворотного енергетичного потоку АД в електротехнічному комплексі дільниці шахти при виникненні міжфазного дугоутворення в кабелі живлення (загальний резистор навантаження випрямляча виконує функцію забезпечення, та з метою спрощення сприйняття на схемі не вказаний)

Пристрій захисту передбачає у своєму складі триполюсний апарат комутації (контактор KMI) трифазної схеми статора $Z_{SA}; Z_{SB}; Z_{SC}$ асинхронного двигуна споживача дільниці.

В колах лінійних струмів статора (у «зірці» статорної обмотки АД) передбачені трансформатори струмів, відповідно, $TA1; TA2; TA3$, що з'єднані виходами зі входом випрямляча VCI . Навантаженням цього випрямляча є коло послідовного з'єднання потенціометра RI і конденсатора CI . Це дає можливість виділити на потенціометрі RI змінну складову випрямленої напруги (з виходу VCI), пропорційної вторинному струму трансформаторів $TA1-TA3$.

У нормальному режимі роботи електротехнічного комплексу, за відсутності дугового замикання в мережі електроживлення асинхронного двигуна всі три лінійні струми його статора, що є з'єднаним у трифазну схему розмикаючими контактами контактора KMI , є однаковими. Вторинні струми трансформаторів струму $TA1-TA3$ теж не відрізняються за величиною один від одного. Будучи поданими на випрямляч VCI , вони створюють на резистивному дільнику напруги (потенціометрі RI) змінну складову напруги стабільної величини та форми.

В разі виникнення міжфазного дугового замикання (позначено резистором R_d) в мережі живлення асинхронного двигуна, лінійний струм його статора, що контролюється трансформатором струму $TA2$, буде суттєво відрізнятися від інших двох лінійних струмів трифазної обмотки статора. Через це матиме місце наявність імпульсів підвищеної амплітуди у змінній складовій вихідної напруги на резисторному дільнику напруги RI активно-ємнісного навантаження випрямляча VCI . Це має призвести до спрацьовування реагуючого органу (PO) та виконавчого комутаційного апарату BKA . Замикаючий контакт $KMI.1$ цього апарату приєднає статорну обмотку асинхронного двигуна до його заземленого корпусу (заземлюючий болт) через резистор $R2$, що є створенням штучного витoku струму на землю і через це має призвести до спрацьовування дільничного апарату захисту від витоків струму на землю (АЗУР) в розподільчому пристрої низької напруги дільничної комплексної трансформаторної підстанції (РПНН

КТП). За командою останнього відключиться автоматичний вимикач *SFI* КТП. Водночас з цим, виконавчий комутаційний апарат (*ВКА*) розімкне свої розмикаючі контакти (трифазна система *КМІ*), чим розірве трифазну схему з'єднання статорних обмоток двигуна, та унеможливить електроживлення пошкодженого місця мережі від зворотного енергетичного потоку асинхронного двигуна.

Цим забезпечується двобічне знеструмлення місця виникнення міжфазного дугоутворення в мережі живлення АД шахтного дільничного електротехнічного комплексу.

В разі виникнення міжфазного дугового замикання в мережі після її відключення за умови знаходження асинхронного двигуна споживача в стані вільного вибігу теж матиме місце неоднаковість лінійних струмів, що контролюються трансформаторами струму *ТАІ-ТАЗ*. Це призведе до спрацьовування реагуючого органу *РО* та виконавчого комутаційного апарату *ВКА*, який відключенням контактів трифазної контактної групи *КМІ* відокремить зворотний енергетичний потік з боку статора асинхронного двигуна і цим знеструмить місце пошкодження (виникнення міжфазного дугоутворення) в мережі його живлення.

3.3. Принцип примусового відключення контактора пускача як додатковий засіб підвищення безпеки експлуатації електрообладнання

Виконаними дослідженнями (розділ 2.4) доведена можливість скорочення терміну протікання струму в мережі при ушкодженні силового приєднання за умови запровадження захисного відокремлення зворотних енергетичних потоків кожного з асинхронних двигунів споживачів. Однак, слід враховувати, що відсутність комплектації таким засобом одного, або групи асинхронних двигунів споживачів призведе до виникнення зворотної ЕРС двигуна, або узагальноної ЕРС від групи двигунів, яка здатна формувати зрівнювальні струми в мережі після її відключення, підтримувати ввімкнений стан контакторів пускачів і

струм в аварійному приєднанні [40]. Тому додатковою захисною функцією слід вважати запровадження примусового відключення контактора пускача в разі відключення мережі електротехнічного комплексу від живлячої КТП.

Засіб керування примусовим відключенням контакторів пускачів в момент спрацьовування захисту від витoku струму на землю представлений схемою (рис. 3.13) [62].

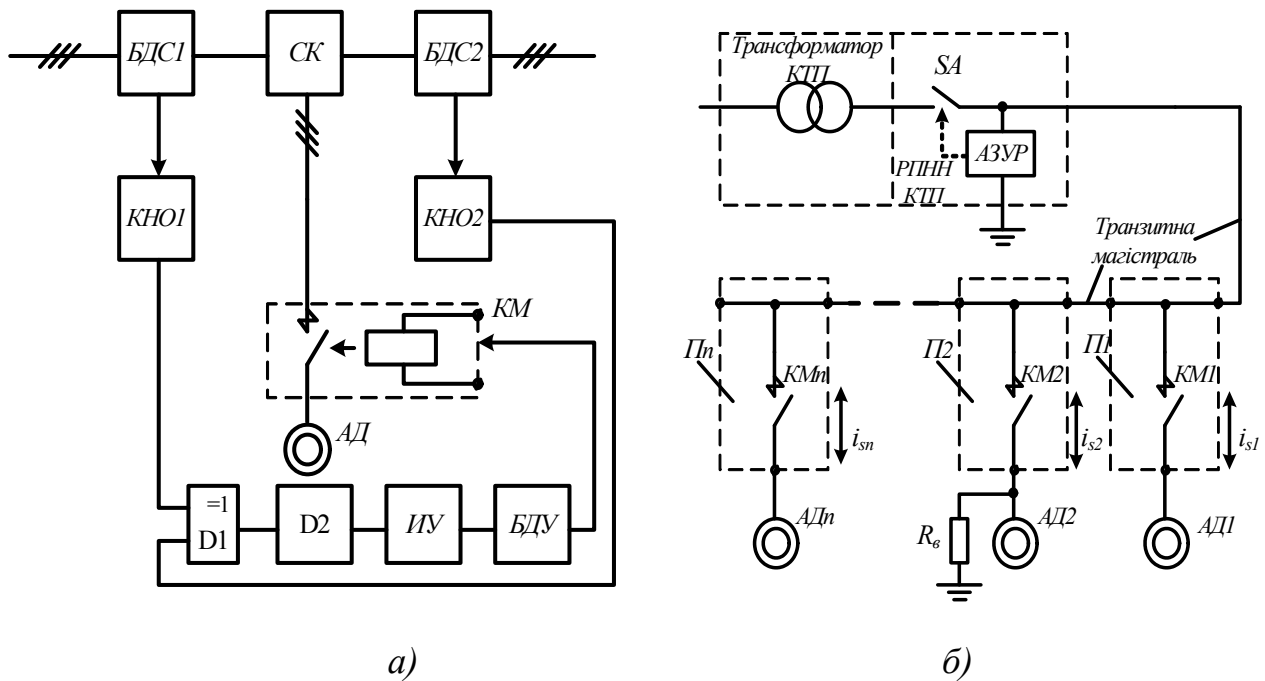


Рисунок 3.13 - Спрощені структурні схеми: а) пристрою примусового відключення пускача; б) електропостачання дільниці шахти

Ця функція має бути реалізована за умови модернізації пускача (рис. 3.14). Зокрема, підключення ввідного та відходячого кабелю транзитної магістралі до силових контактів (СК) приєднання в мереженому відділенні кабельного вводу пускача має бути здійснене послідовно через блоки датчиків струму (БДС1 і БДС2). Компаратори - нуль-органи (КНО1 і КНО2) призначені для формування сигналів логічної «одиниці» в разі наявності струму в кабелі, що контролюється відповідним блоком датчиків струму. При відключенні живлячої трансформаторної підстанції припиняється струм у ввідному кабелі пускача, в той час, як в силовому ланцюзі контактора (КМ) та у відходячому кабелі магістралі буде протікати зрівнювальний струм, створений зворотними ЕРС двигу-

нів споживачів. В цьому разі на виходах блоків *БДС1* і *БДС2* будуть сформовані, відповідно, логічний «нуль» і логічна «одиниця». Ці сигнали подаються на входи елемента «Виключне АБО» (D1) і обумовлюють формування логічної «одиниці» на його виході та імпульсу заданої тривалості на виході одно вібратора (D2). Це дає можливість виконавчому пристрою (ВП), виконаному за релейною, або напівпровідниковою ключовою схемою, розірвати ланцюг живлення котушки контактора КМ в блоці дистанційного управління (БДУ) і, тим самим, здійснити примусове відключення контактора пускача в момент відключення напруги мережі з боку живлячої трансформаторної підстанції [62].

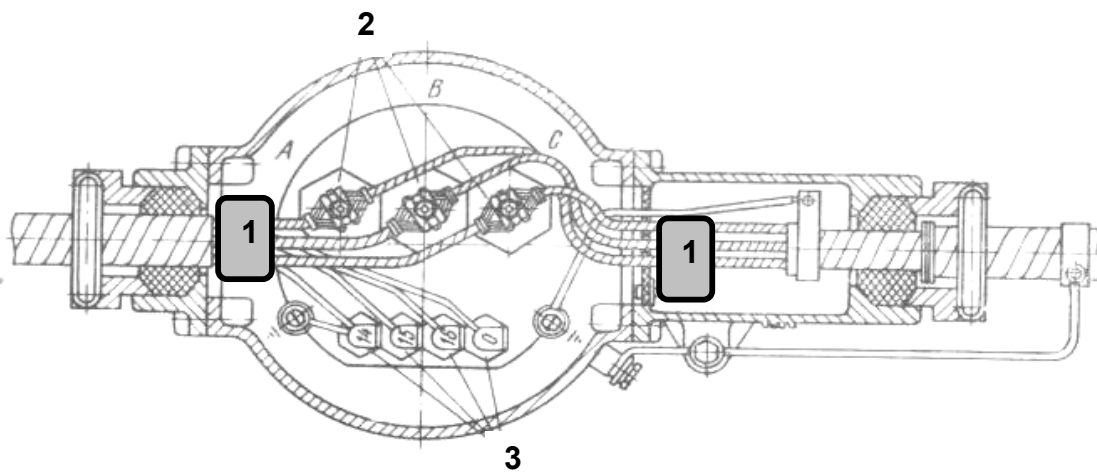


Рисунок 3.14. Приклад розміщення блоків датчиків струму (БДС) 1 за-
собу примусового відключення контактора в мережевому відділенні
пускача: 2 – силові прохідні затиски кабельного вводу; 3 - прохідні за-
тиски для приєднання контрольних ланцюгів

Реалізація принципу відключення зворотних енергетичних потоків АД дозволить знеструмити ланцюг витoku струму на землю після захисного відключення дільничної електромережі і цим не допустити збільшення кількості електрики в цьому ланцюзі внаслідок дії зворотних ЕРС АД.

3.4. Автономне захисне відокремлення зворотного енергетичного потоку як засіб запобігання електроураження в мережі відключеної обмотки пошкодженого двошвидкісного асинхронного двигуна

В гірничій промисловості широко застосовуються двошвидкісні асинхронні двигуни в складі електроприводу скребкових конвеєрів, що дозволяє отримати номінальний та знижений фіксовані рівні кутової швидкості. Однак, наявність двох відокремлених обмоток на одному магнітопроводі створює трансформаторний ефект при включенні однієї з обмоток, що може призвести до виникнення такого небезпечного стану, як електроураження людини в разі торкання фази відключеної обмотки статора. Цей вид небезпеки має місце, незважаючи на наявність в шахтній дільничній електромережі засобів захисту від витоків струму на землю, оскільки дія цих засобів не розповсюджується на контроль стану відключеної обмотки статора двошвидкісного двигуна через відсутність електричного зв'язку між обмотками його статора (рис. 3.15). Отже, актуальним є визначення рівня небезпеки електроураження людини від трансформаторної ЕРС відключеної обмотки статора двошвидкісного АД.

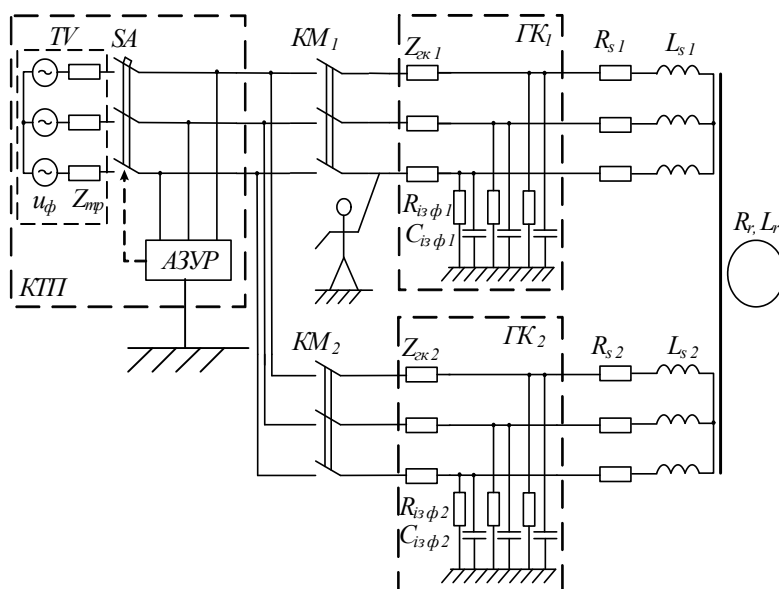


Рисунок 3.15 – Утворення витоку струму на землю в приєднанні статора двошвидкісного АД

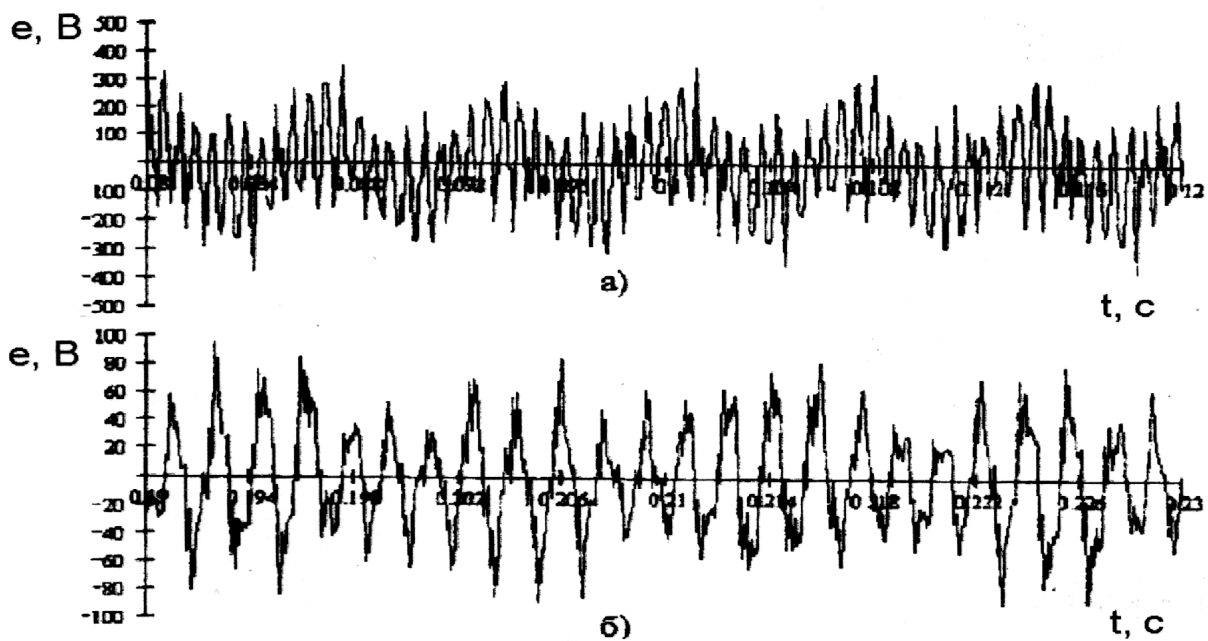


Рисунок 3.16 - Осцилограми вторинних ЕРС АД в обмотках зниженої (а) і номінальної (б) швидкостей

Експериментальними дослідженнями [63] отримані діаграми зміни ЕРС АД типу ЕКВФ-355L12/4 (рис. 3.16) у відключеній обмотці статора при електроживленні іншої. Так, при роботі двигуна з номінальною кутовою швидкістю в обмотці зниженої швидкості (ОЗШ) генерується трифазна ЕРС, яка представляється двома складовими: високочастотною з частотою $f_1 = 1650$ Гц та амплітудою $U_{m1} \approx 100$ В, та несучою з частотою $f_2 = 143$ Гц та амплітудою $U_{m2} \approx 142$ В (рис. 3.16а). При підключенні ОЗШ до живлячої мережі в обмотці номінальної швидкості (ОНШ) генерується ЕРС частотою $f = 650$ Гц (рис. 3.16б) Визначені діючі значення індуктованих ЕРС у фазах відключених від мережі живлення обмоток статора є наступними: в обмотці зниженої швидкості $E_{ОЗШ} = 145$ В; в обмотці номінальної швидкості $E_{ОНШ} = 33$ В. Цих даних достатньо для встановлення середніх величин діючого струму в колі витоку на землю (за наявності такого між фазою кабеля відключеної обмотки статора і контуром „земля”). Однак, коректніше електричні параметри у приєднанні відключеної обмотки статора двошвидкісного АД (при електроживленні іншої обмотки можуть бути

визначені шляхом дослідження моделі, утвореної структурою силового кабельного приєднання з активними опорами ізоляції в межах значень, реальних для шахтного дільничного електротехнічного комплексу і ємнісними опорами ізоляції, відповідними до перерізу і довжини кабелю, опором витоків на землю ($R_{вум} = 1 \text{ кОм}$) та трифазним джерелом електроживлення, в кожній фазі якого послідовно підключені джерела ЕРС високої та несучої частоти з параметрами, що визначені як результат аналізу осцилограм експерименту. Зокрема, на рис. 3.17 предсталена форма змодельованої фазної ЕРС, індуктованої в обмотці зниженої швидкості двошвидкісного АД типу ЕКВФ-355L12/4 [64].

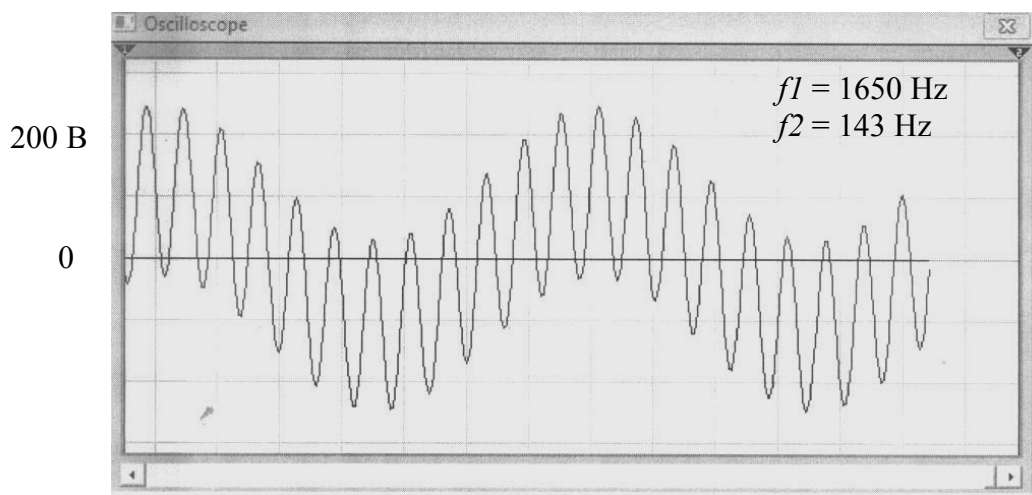


Рисунок 3.17 – Змодельована осцилограма фазної ЕРС у відключеній обмотці зменшеної швидкості двошвидкісного АД типу ЕКВФ-355L12/4

На рис. 3.18 і рис. 3.19 представлені величини, відповідно, струму і кількості електрики в колі витоків на землю у відключеному приєднанні обмотки зменшеної швидкості за умови електроживлення обмотки номінальної швидкості АД типу ЕКВФ-355L12/4 у залежності від довжини та перерізу кабелю живлення, отримані шляхом моделювання. Наявністю небезпечних станів відключеного приєднання двошвидкісного АД обумовлена необхідність заходів контролю опору його ізоляції, захисного знеструмлення мережі при виникненні кола витоків струму на землю у відключеній обмотці статора двошвидкісного АД доцільність автоматичного двобічного знеструмлення цих силових приєднань.

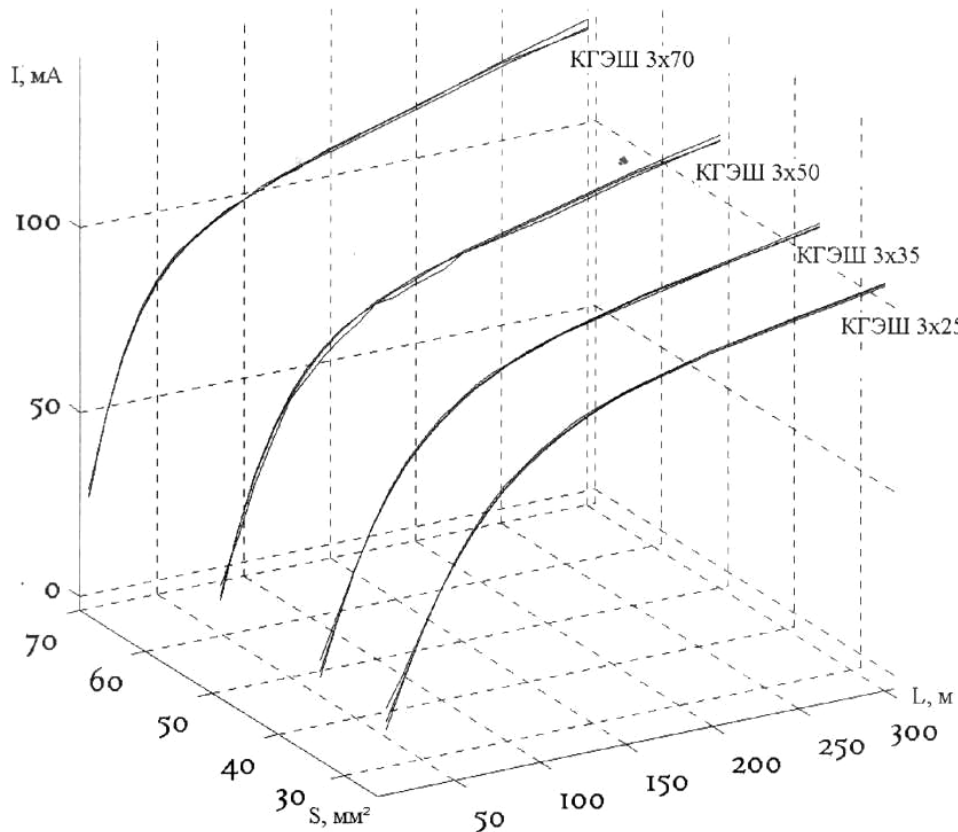


Рисунок 3.18 – Діаграми струму витоку на землю у приєднанні відключеної ОЗШ двошвидкісного АД типу ЕКВФ-355L12/4 при електроживленні обмотки номінальної швидкості, у залежності від довжини і перерізу кабеля, отримані моделюванням [64]

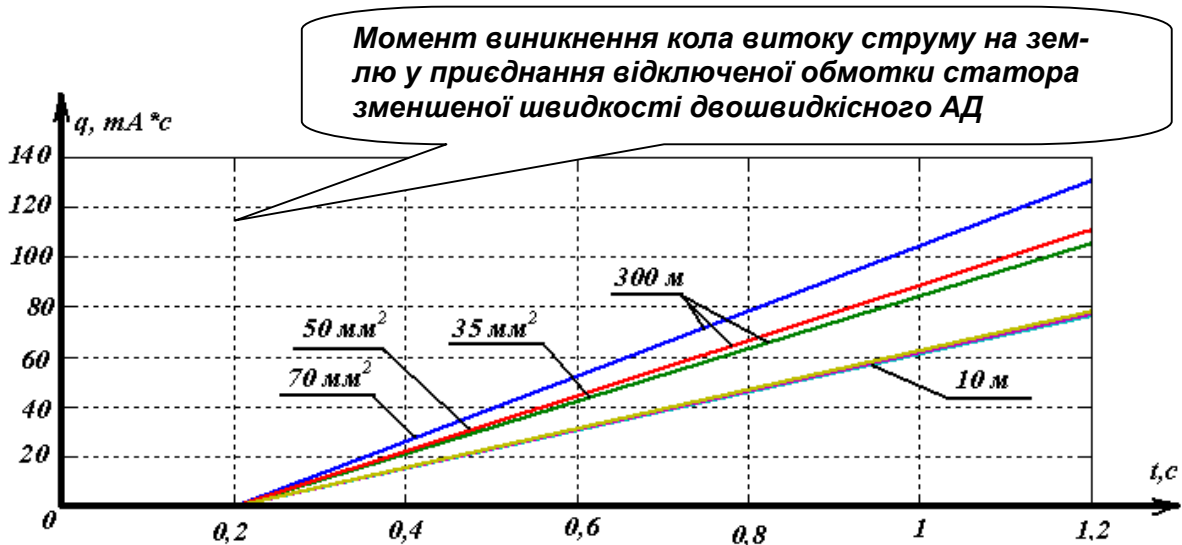


Рисунок 3.19 - Діаграми зміни кількості електрики в колі витоку струму на землю у відключеній обмотці двошвидкісного асинхронного

3.5. Загальні принципи удосконалення структури шахтного дільничного електротехнічного комплексу

Обґрунтована доцільність запровадження функції захисного відокремлення зворотного енергетичного потоку асинхронного двигуна (як складової двобічного знеструмлення мережі шахтного дільничного електротехнічного комплексу в разі виникнення її аварійного стану) передбачає використання відповідних виконавчих технічних засобів і коригування структури шахтного дільничного електротехнічного комплексу, у цілому. Тому доцільним є розгляд можливих принципових положень, які можуть бути вжиті у напрямку удосконалення системи електропостачання технологічної дільниці шахти.

Отримані результати досліджень, узагальнені в обґрунтуванні відповідних технічних рішень [53, 58, 59, 61, 62], у своїй сукупності обумовлюють запровадження структурних змін в електротехнічному комплексі технологічної дільниці шахти стосовно застосування виконавчих засобів відокремлення зворотних енергетичних потоків асинхронних двигунів споживачів (з відповідними пристроями керування) безпосередньо в схемах силових приєднань їх статорів (рис. 3.20). Крім того, з метою вирішення задачі примусового відключення контакторів пускачів в момент відключення напруги живлення дільничної трансформаторної підстанції схеми пускачів потребують відповідних технічних засобів, дія яких основана на зіставленні струмів ввідного та відходячого приєднань пускача. У сукупності та з урахуванням наявності засобу захисту від витoku струму на землю, екранованих гнучких кабелів у складі дільничної мережі та наявності заземлення їх заземлюючих жил, ці технічні рішення забезпечують виконання функції двобічного відокремлення енергетичних потоків від місця ушкодження в електротехнічному комплексі дільниці шахти (як з боку живлячої комплектної трансформаторної підстанції, так і з боку асинхронних двигунів споживачів).

Важливим є те, що технічні заходи удосконалення шахтного дільничного електротехнічного комплексу не потребують запровадження засобів передачі

інформаційних сигналів від підстанції дільниці, автоматичного вимикача, або пускачів дільничного розподільчого пункту на засоби відокремлення зворотних енергетичних потоків асинхронних двигунів споживачів дільниці і цим не ускладнюється її схема.

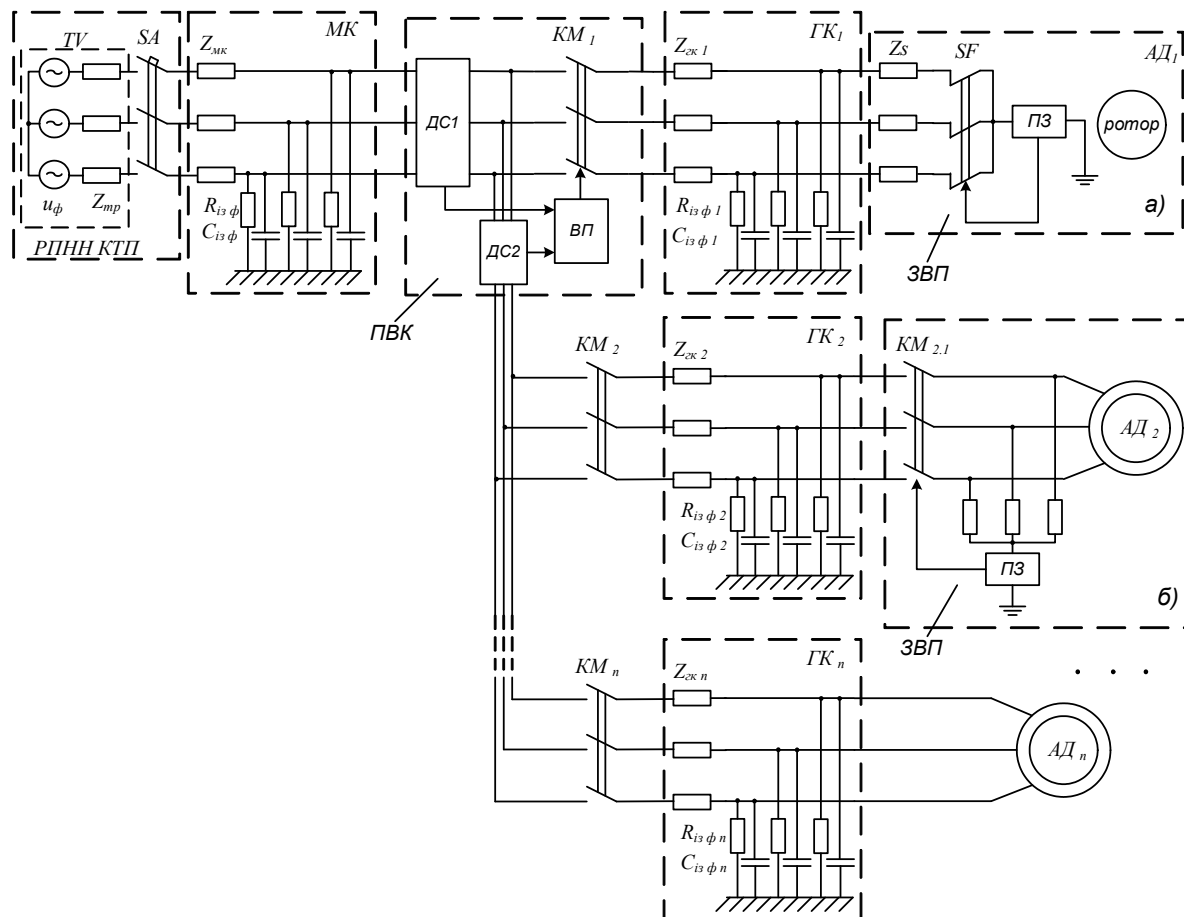


Рисунок 3.20 - Варіанти застосування технічних рішень із удосконалення електротехнічного комплексу шахтної технологічної дільниці на основі використання відокремлення зворотних енергетичних потоків (ЗВП) асинхронних двигунів та примусового відключення контакторів (ПВК) магнітних пускачів: а) визначення інформаційного параметру між «зіркою» обмоток статора і землею; б) визначення інформаційного параметру між «зіркою» резисторів мережі статора і землею

Технічна реалізація запропонованих способів знеструмлення місця пошкодження в електротехнічному комплексі дільниці шахти передбачає розробку

відповідних електричних схем, які можуть відрізнитись за структурою у залежності від особливостей застосованих компонентів.

Таким чином, удосконалена структура електротехнічного комплексу технологічної дільниці шахти відрізняється запровадженням: автономних засобів відокремлення зворотних енергетичних потоків при виникненні міжфазних ланцюгів підвищеної провідності та витоків струму на землю в кабелях живлення асинхронних двигунів і може бути доповнена засобами примусового відключення контакторів магнітних пускачів при відключенні напруги живлення з боку комплектної трансформаторної підстанції шахтної дільниці.



Обґрунтовані раціональні способи визначення небезпечного стану в мережі живлення асинхронного двигуна і принципи захисного відокремлення його зворотного енергетичного потоку дозволили вирішити актуальну науково-практичну задачу запровадження автономно діючих захисних засобів безпосередньо в силових ланцюгах приєднань двигунів споживачів технологічної ділянки шахти.

На відміну від відомих розробок, виконаних у попередні роки, момент спрацьовування пристрою захисного відокремлення зворотного енергетичного потоку асинхронного двигуна визначатиметься не командою з боку автоматичного вимикача електротехнічного комплексу ділянки, а безпосередньо, - фактом виникнення небезпечного стану діляничної електромережі.

Функціонування запропонованих захисних пристроїв узгоджено з вимогами щодо дотримання режиму ізольованої нейтралі трансформатора при експлуатації шахтної діляничної електромережі; відсутності впливу на параметри її ізоляції (відносно землі) і оперативний параметр пристрою захисту від витоків струму на землю.

З урахуванням функцій захисних засобів, що передбачені в структурі комплектної трансформаторної підстанції і силових комутаційних пристроїв розподільчого пункту шахтної ділянки, при обов'язковому застосуванні шахтних гнучких екранованих кабелів, максимального струмового захисту і захисту від витоків струму на землю застосування автономних засобів автоматичного захисного відокремлення зворотних ЕРС асинхронних двигунів призводить до одночасного автоматичного двобічного відокремлення енергетичних потоків від точки виникнення аварійного стану в шахтній діляничній електричній мережі.

1. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів. Затв. 25.07.2006 № 258/ Міністерство палива та енергетики України. Х. Індустрія. 2007. – 272 с.
2. Saccomanno F. Electric Power Systems: analysis and Control / F. Saccomanno. – Wiley-IEEE Press, 2003. – 744 p.
3. Meier A.V. Electric Power Systems: A Conceptual Introduction / A.V. Meier. – Wiley-IEEE Press, 2006. – 328 p.
4. Справочник энергетика угольной шахты: в 2 т. / [Дзюбан В.С., Ширнин И.Г., Ванеев Б.Н., Гостищев В.М.]; под ред. Б.Н. Ванеева. – [2-е изд., перераб. и доп.]. – Донецк: ООО «Юго-Восток, Лтд», 2001. – Т.1.: (Гл.1-21). – 477 с.; Т.2.: (Гл.22-44). – 440 с.
5. Савицкий В.Н. Комплексное устройство управления высокопроизводительными угледобывающими комплексами КУУВ-500/500 / В.Н. Савицкий, С.Н. Окорочков, И.И. Иващик // Взрывозащищенное электрооборудование: сб. науч. трудов УкрНИИВЭ. – Донецк: ООО «Юго-Восток, Лтд», 2011. – С. 93–99.
6. High voltage mining equipment for use underground: handbook. – Sydney, N.S.W.: Standards Australia, 2007. – 68 p.
7. Дзюбан В.С. Аппараты защиты от токов утечки в шахтных электрических сетях / В.С. Дзюбан. – М.: Недра, 1982. – 152 с.
8. Ягудаев Б.М. Защита от электропоражения в горной промышленности / Б.М. Ягудаев, Н.Ф. Шишкин, В.В. Назаров. – М.: Недра, 1982. – 152 с.
9. Nelson J.P. System Grounding, Ground Fault Protection and Electrical Safety. IEEE Press Series on Power Engineering / J.P. Nelson, P.K. Sen. – Wiley-IEEE Press, 2009. – 500 p.
10. Дзюбан В.С. Взрывозащищенные аппараты низкого напряжения / В.С. Дзюбан. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 240 с.
11. Справочник по взрывозащищенному электрооборудованию / [Пархоменко А.И., Дзюбан В.С., Ширнин И.Г., Маслий А.К.]; под ред. Пархоменко А.И. – К.: Техника, 1990. – 198 с.
12. Руководство по ревизии, наладке и испытанию подземных электроустановок шахт / [Чумаков В.А., Глухов М.С., Осипов Э.Р. и др.]; под ред. Дехтярева В.И. – М.: Недра, 1989. – 614 с.
13. Правила безпеки у вугільних шахтах [Електронний ресурс]: затверджено наказом Державного комітету України з промислової безпеки, охорони праці та гірничого нагляду 22.03.2010 N 62. – К., 2010. – Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/z0398-10>.
14. Сычев Л.И. Шахтные гибкие кабели / Л.И. Сычев, Л.З. Реут - М.: Недра, 1971. – 64 с.
15. Электробезопасность в горнодобывающей промышленности / [Гладилин Л.В., Щуцкий В.И., Бацежев Ю.Г., Чеботаев Н.И.] – М.: Недра, 1986. – 364 с.

16. Вареник Є.О. Забезпечення безпеки та ефективності шахтних електроустановок / [Вареник Є.О., Випанасенко С.І., Дзюбан В.С., Шидловська Н.А., Шкрабець Ф.П.]; під ред. Півняка Г.Г.- Дніпропетровськ: НГУ, 2004. – 334 с.
17. Колосюк В.П. Техника безопасности при эксплуатации рудничных электроустановок / В.П. Колосюк – М.: Недра, 1987. – 407 с.
18. Аппараты защиты от токов утечки рудничные для сетей напряжением до 1200 В. Общие технические условия: ГОСТ 22929-78. С изменениями согласно ИУС 11-80, 7-81, 11-83. Соответствует СТ СЭВ 2309-80. – [Вступил в силу 01.01.79]. – М.: Издательство стандартов, 1978. – 13 с. – (Межгосударственный стандарт).
19. Колосюк В.П. Защитное отключение рудничных электроустановок / В.П. Колосюк – М.: Недра, 1980. – 334 с.
20. Патент на корисну модель 46748 (UA), МПК (2009) H02J 3/00 Спосіб автоматичної компенсації ємнісних струмів витоку в трифазних електричних мережах з ізольованою нейтраллю / В.М. Савицький, О.І. Белошистов, О.В. Савицький. – u 2009 04385. Заявл. 05.05.2009. Опубл 11.01.2010. Бюл. №1.
21. Савицький В.Н. Защита от токов утечки в комбинированных распределительных сетях угольных шахт / Савицький В.Н., Стадник Н.И.- 13 с. http://ukrniive.com.ua/ru/article/current_leakage.htm.
22. Бабокин Г.И. Частотно-регулируемый электропривод механизмов подачи очистных комбайнов / Бабокин Г.И., Щуцкий В.И. // Горные машины и автоматика.- 2001, № 8.- С.38-40.
23. Киампо Е.М. Токи утечки в комбинированной электрической сети горных машин / Киампо Е.М., Коровкин В.А. // Известия вузов. Горный журнал.- 1986.- №2.- С.97-99.
24. Белошистов А.И. Проблемы защиты от утечек тока на землю распределительных сетей угольных шахт, содержащих силовые полупроводниковые элементы // Белошистов А.И., Савицький В.Н. Взрывозащищенное электрооборудование: Сб. науч. тр. УкрНИИВЭ. – Донецк: ООО «Юго-Восток, Лтд», 2004. – С. 78-83.
25. Колосюк В.П. Токи утечки на землю в системе электроснабжения комбайнов с регулируемым приводом / Колосюк В.П., Товстик Ю.В. // Уголь Украины. – 2005. – №6. – С. 35-39.
26. Рима́н Я.С. Защита шахтных участковых сетей от токов короткого замыкания / Я.С.Рима́н – [2-е изд., перераб. и доп.]. – М.: Недра, 1985, – 88 с.
27. Перехідні процеси в системах електропостачання: підручник для вузів. / [Г.Г Півняк, В.М.Винославський, А.Я. Рибалко, Л.І. Несен]; під ред. Г.Г. Півняка. – [2-е вид., доправ. та доп.]. – Дніпропетровськ: НГУ, 2002. – 579 с.
28. Андреев В.П. Основы электропривода / В.П. Андреев, Ю.А. Сабинин – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 209 с.
29. Справочник по электроустановкам угольных предприятий / [В.В. Дегтярев, В.И. Серов, Г.Ю. Цепелинский]; под ред. В.В. Дегтярева. – М.: Недра, 1988. – 727 с.

30. Демченко О.А. Обоснование мер предотвращения взрывов при эксплуатации гибких силовых кабелей на угольных шахтах: дис. ...канд. техн. наук: 05.26.01 / Демченко Олег Александрович. – Макеевка, 2011. – 194 с.
31. Классификация и маркировка рудничного электрооборудования <http://leg.co.ua/info/spravka/klassifikaciya-i-markirovka-rudnichnogo-elektrooborudovaniya.html>
32. А. с. 1377946 СССР, МПК⁴ H02H3/08. Устройство для защиты трехфазной электроустановки от аварийных режимов / И.Т. Сидоренко, К.Н. Маренич, Б.Д. Борисов (СССР). – № 3989837/24-07; заявл. 17.12.85; опубл. 29.02.88. Бюл. №8.
33. А. с. 1680977 СССР, МПК⁵ E21C35/24. Устройство для выявления аварийных режимов эксплуатации приводов / И.Т. Сидоренко, К.Н. Маренич, С.В. Дзюбан, И.С. Кибрик, А.П. Быковский, В.С. Бакуменко (СССР). – № 4738242/03; заявл. 10.07.89; опубл. 30.09.91. Бюл. №36.
34. Маренич К. Н. О технических возможностях выявления начального этапа короткого замыкания в электросети участка шахты / К. Н. Маренич, И. В. Ковалёва // Праці Луганського відділення Міжнародної академії інформатизації. – Луганськ: СНУ ім. В. Даля, 2010. – №2 (22). – С. 26-30.
35. Патент на корисну модель 50773 (UA), МПК (2009) H02H 3/00 Спосіб захисту від струмів короткого замикання в мережі живлення асинхронного двигуна / К.М. Маренич, І. В. Ковальова. u 2009 13013. Заявл. 14.12.2009. Опубл 25.06.2010. Бюл. №12.
36. Колосюк В.П. Повышение взрывопожаробезопасности шахтных систем электроснабжения / В.П. Колосюк, П.К. Жуйков // Взрывозащищенное электрооборудование: сб. науч. трудов УкрНИИВЭ. – Донецк: ООО «Юго–Восток, Лтд», 2008. – С. 99–116.
37. Шишкин Н.Ф. Быстродействующая защита шахтных сетей от замыкания на землю / Н.Ф. Шишкин – М.: Госгортехиздат, 1960. – 53 с.
38. Шишкин Н.Ф. Быстродействующая защита от токов утечки на землю в сетях с изолированной нейтралью напряжением до 1000В / Н.Ф. Шишкин – М.: ИГД, 1960. – 50 с.
39. Шишкин Н.Ф. Основные направления электрификации современных шахт / Н.Ф. Шишкин, В.Ф. Антонов – М.: Наука, 1981. – 116 с.
40. Маренич К.М. Зворотні енергетичні потоки асинхронних двигунів як фактор небезпеки в електромережі шахти: монографія / К.М. Маренич, С.В. Василець.- Донецьк: ДВНЗ „ДонНТУ”, 2012.- 206 с.
41. Брускин Д.Э. Электрические машины: [учебник для вузов] / Д.Э. Брускин, А.Е. Зорохович, В.С. Хвостов. – М.: Высшая школа, 1979. – 288 с.
42. Маренич К.М. Проблематика спільної роботи групи двигунів в електричній мережі технологічної дільниці гірничого підприємства / К.М. Маренич, С.В. Василець // «Форум гірників – 2005»: між нар. конф., 12 – 14 жовтня 2005р.: – Д: НГУ, 2005. – Т. 3. – С.123-131.
43. Маренич К.Н. Обоснование структуры модели процесса короткого замыкания в низковольтной электросети участка шахты / К.Н. Маренич, И.В.

Ковалёва // Наукові праці ДонНТУ, серія гірничо-електромеханічна. – Донецьк: ДонНТУ, 2006. – Вип. 12(113). – С.179-185.

44. Маренич К. Н. Моделирование процесса короткого замыкания в низковольтном электротехническом комплексе участка шахты с учетом влияния электропотребителя / К. Н. Маренич, И. В. Ковалёва // Наукові праці Донецького національного технічного університету, серія електротехніка і енергетика. – Донецьк: ДонНТУ, 2007. – Вип. 7(128). – С.146-149.

45. Ковач К.П. Переходные процессы в машинах переменного тока / К.П. Ковач, И. Рац. – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 744 с.

46. Маренич К.Н. Моделирование процесса короткого замыкания в электросети участка шахты после ее защитного отключения / К.Н. Маренич, И.В. Ковалёва // Взрывозащищенное электрооборудование: сб. науч. трудов УкрНИИВЭ. – Донецк: ООО «Юго–Восток, Лтд», 2008. – С. 231–235.

47. Ковалёва И.В. Анализ факторов воздействия при дугообразованиях в контексте моделирования коммутационных переходных процессов в силовой цепи электротехнического комплекса участка шахты / И. В. Ковалёва, В. В. Соболев // Наукові праці Донецького національного технічного університету, серія обчислювальна техніка та автоматизація. – Донецьк: ДонНТУ, 2010. – Вип. 19(171). – С.198-205.

48. Фролкин В.Г. Быстродействующая защита шахтных участковых сетей / В.Г. Фролкин. – М.: Недра, 1986. – 125 с.

49. Маренич К.Н. Об актуальности применения контакторов серии SPVC в схеме трансформаторной подстанции участка шахты / К.Н. Маренич // Наукові праці Донецького національного технічного університету, серія гірничо-електромеханічна. – Донецьк: ДонНТУ, 2002. – Вип. 42. – С.173-177.

50. Казовский Е.Я. Переходные процессы в электрических машинах переменного тока / Е.Я. Казовский. – М.–Л.: Изд–во АН СССР, 1962. – 624 с.

51. Маренич К. Н. Обоснование информационного параметра функционирования устройства автоматического подавления ЭДС двигателей при аварийном отключении электросети / К. Н. Маренич, И. В. Ковалёва // «Автоматика – 2008»: міжнар. конф. з авт. управл., 23–26 вересня 2008р.: матеріали конф. – Одеса.: ОНМА, 2008. – С.352-354.

52. А. с. 1564344 СССР, МПК⁵ E21C35/24. Устройство для защиты горной машины от динамических перегрузов / И.Т. Сидоренко, К.Н. Маренич, В.С. Бакуменко (СССР). – № 4395115/31-03; заявл. 21.03.88; опубл. 15.05.90. Бюл. №18.

53. Патент на винахід 95757 (UA), МПК (2006.01) H02H 3/10 H02H 7/08 Пристрій захисту від впливу асинхронного двигуна на точку короткого замикання в кабелі живлення / К.М. Маренич, І. В. Ковальова, І. О. Лагута, С.В. Василець. – а 2010 13816. Заявл. 22.11.2010. Опубл 25.08.2011. Бюл. №16.

54. Маренич К.М. Обґрунтування ефективності нейтралізації зворотної ЕРС двигунів як способу підвищення безпеки експлуатації електротехнічного комплексу дільниці шахти / К.М. Маренич, С.В. Василець // Технічна електродинаміка. – 2009. – №2. – С. 42-47.

55. Маренич К. Н. Технические возможности автоматического отключения пускателя / К. Н. Маренич, И. В. Ковалёва // Уголь Украины: научный журнал. – Киев, 2011. – Вып. №10. – С.33-36.

56. Маренич К.Н. Исследование влияния переходных процессов при коммутации присоединения в электротехническом комплексе на устойчивость к ложным срабатываниям аппарата АЗУР-4 / К.Н. Маренич, С.А. Руссиян // Праці Луганського відділення Міжнародної академії інформатизації. – Луганськ: СНУ ім. В. Даля, 2009. – №1 (18). – С. 52-57.

57. А. с. 1494103 СССР, МПК⁵ H02H7/08. Устройство для максимальной токовой защиты электродвигателей / И.Т. Сидоренко, К.Н. Маренич, С.В. Дзюбан (СССР). – № 4300883/24-07; заявл. 02.06.87; опубл. 15.07.89. Бюл. №26.

58. Патент на корисну модель 71661 (UA), МПК (2012.01) H02H 3/00 Пристрій захисту від впливу зворотного енергетичного потоку асинхронного двигуна на точку короткого замикання в кабелі живлення / І.О. Лагута, І. В. Ковальова, К.М. Маренич. – u 2011 14935. Заявл. 16.12.2011. Опубл 25.07.2012. Бюл. №14.

59. Патент на корисну модель 73720 (UA), МПК (2006.01) H02H 3/08 Пристрій захисту від впливу зворотного енергетичного потоку асинхронного двигуна на точку короткого замикання в кабелі живлення / К.М. Маренич, І. В. Ковальова, І.О. Лагута. – u 2012 01848. Заявл. 20.02.2012. Опубл 10.10.2012. Бюл. №19.

60. Маренич К.М. Удосконалення засобу відокремлення зворотного енергетичного потоку асинхронного двигуна / К.М. Маренич, І.В. Ковальова // Наукові праці ДонНТУ. Випуск 1(12)-2(13), серія «Електротехніка і енергетика». - Донецьк: ДонНТУ, 2012. - С. 166-171.

61. Патент на винахід 97592 (UA), МПК (2006.01) H02H 3/10 H02H 7/08 H02H 7/09 Спосіб струмового захисту в мережі живлення асинхронного двигуна в складі гірничого дільничного електротехнічного комплексу / К.М. Маренич, І. В. Ковальова, С.В. Василець. – а 2011015324. Заявл. 20.12.2010. Опубл 27.02.2012. Бюл. №4.

62. Патент на корисну модель 67902 (UA), МПК (2012.01) H02H 3/00 Пристрій контакторної комутації асинхронного двигуна в електромережі дільниці шахти / К.М. Маренич, І. В. Ковальова. – u 2011 09579. Заявл. 01.08.2011. Опубл 12.03.2012. Бюл. №5.

63. Маренич К.Н. Анализ параметров эксплуатационной безопасности двух-скоростного асинхронного двигателя шахтного скребкового конвейера / К.Н. Маренич // Наукові праці Донецького держ. техн. університету. Серія гірничо-електромеханічна. Вип. 35.- Донецьк, ДонДТУ, 2001.- С.127-131.

64. Мартынюк Л.В. Исследование возможности электропоражающего фактора отключенной обмотки двухскоростного асинхронного двигателя при его эксплуатации в шахтной электросети / Л.В. Мартынюк, К.Н. Маренич // Автоматизація технологічних об'єктів та процесів. Пошук молодих: XII міжнар. наук.-техн. конф., 17-20 квітня 2012р.: зб. наук. праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2012. – С.349-351.

Додаток А

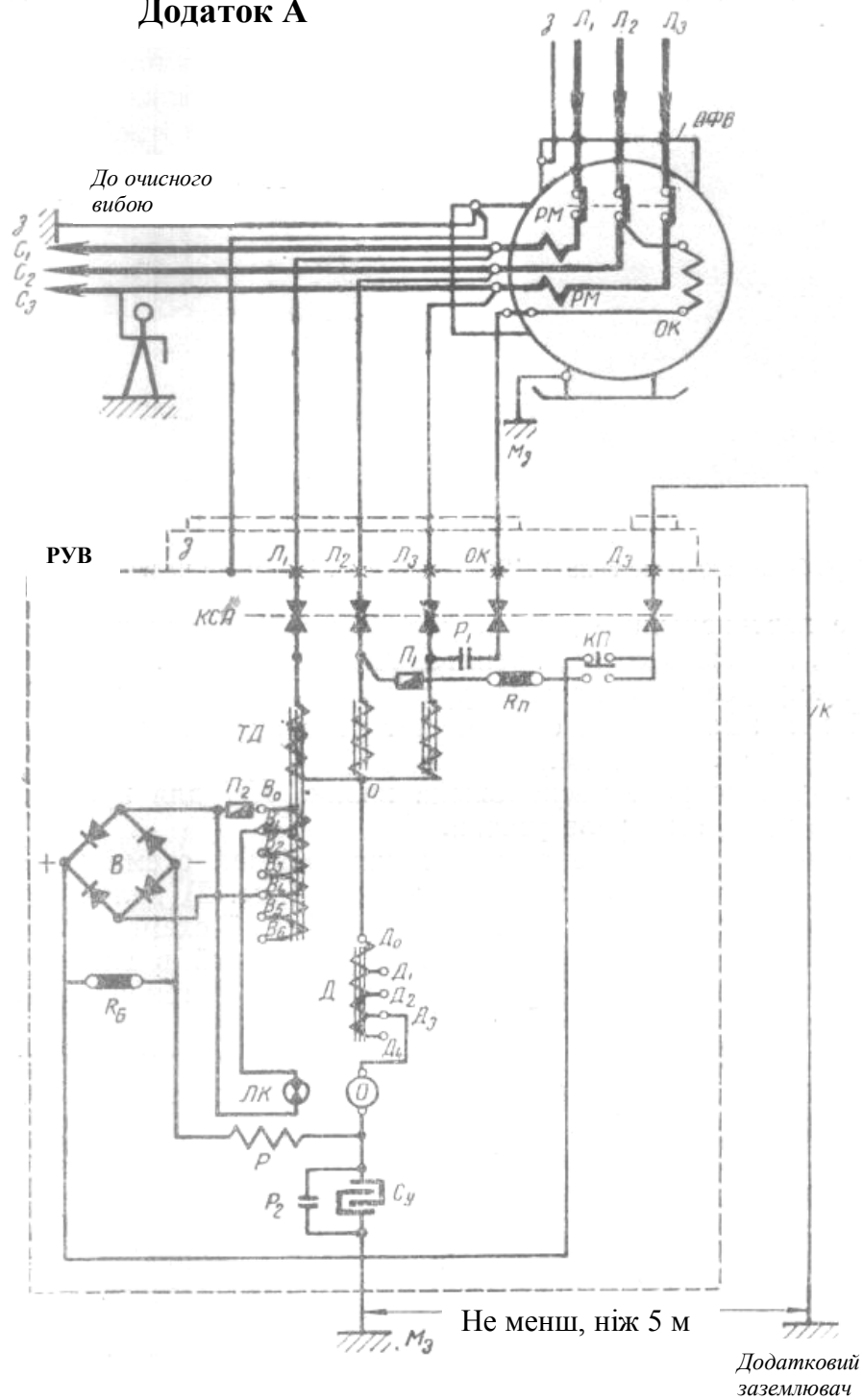


Схема пристрою РУВ (одна з початкових розробок пристроїв захисту від електроураження в шахтній дільничній мережі, скан-копія з видання: Лейбов Р.М. Взрывобезопасное реле утечки типа РУВ /Р.М. Лейбов, М.: Углетехиздат, 1953.- 32 с.)

Додаток Б

Відомості з моделювання

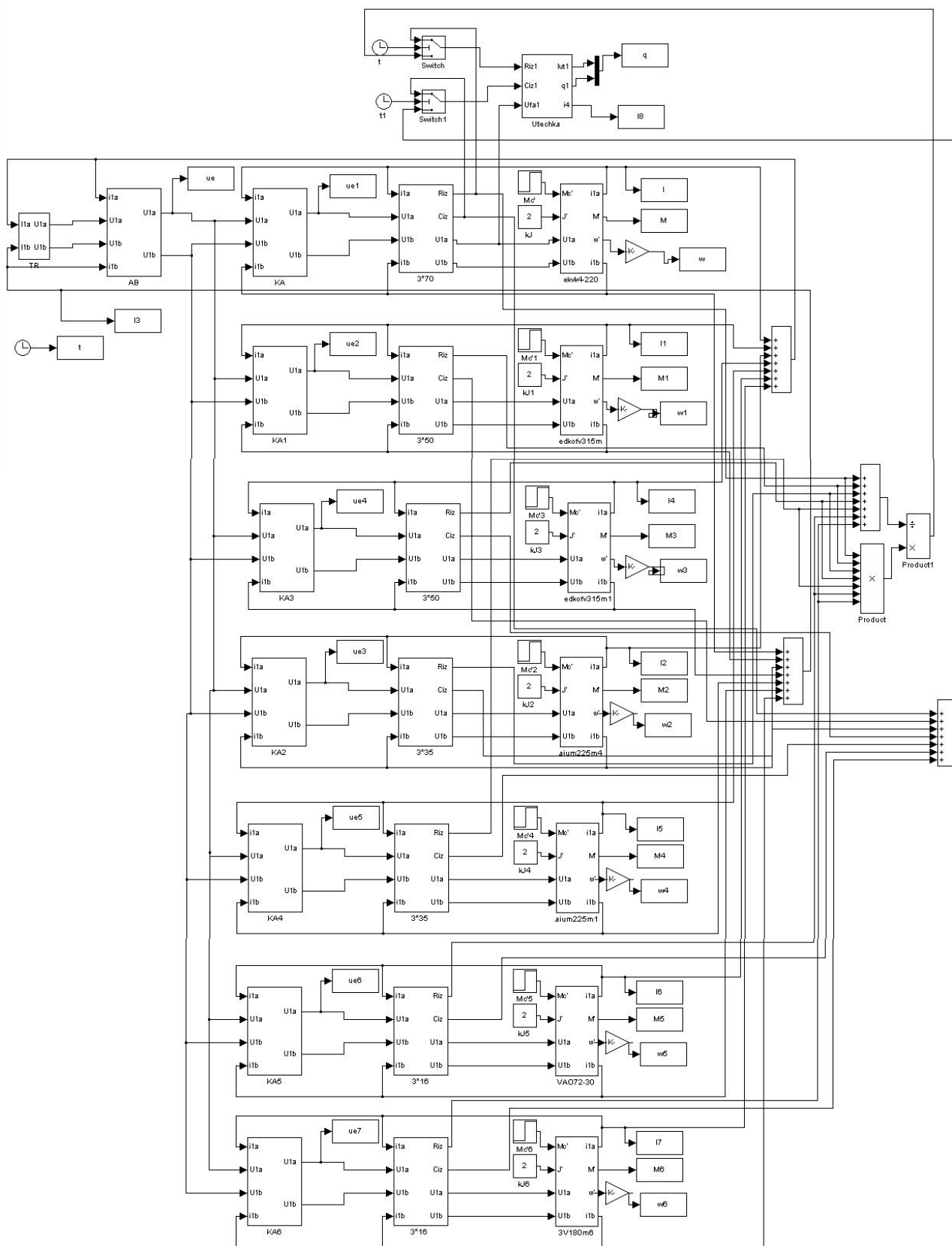


Рис. Б.1. Структурна схема комп'ютерної моделі ЕТК ДШ напругою 660 В

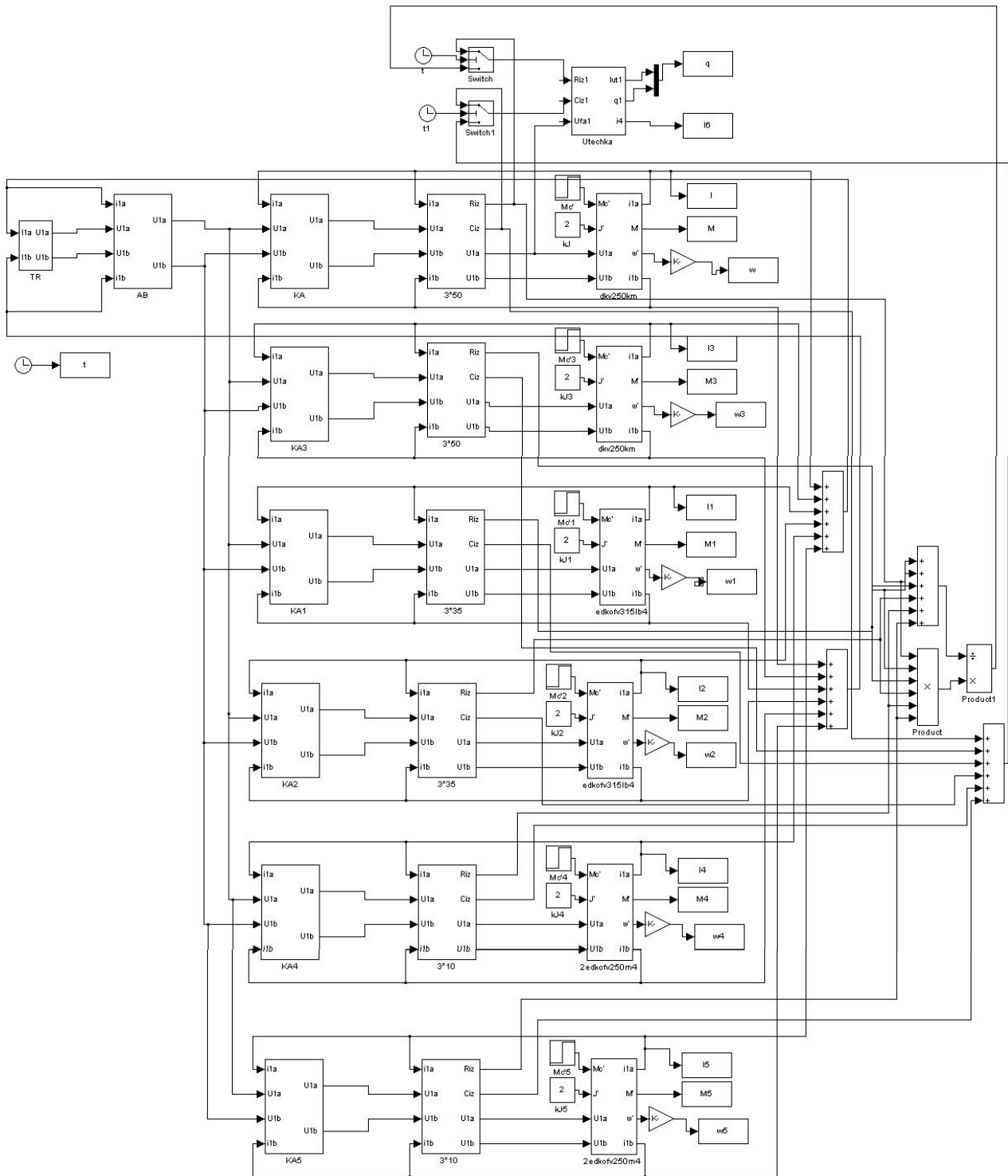


Рис. Б.2. Структурна схема комп'ютерної моделі ЕТК ДШ напругою 1140 В

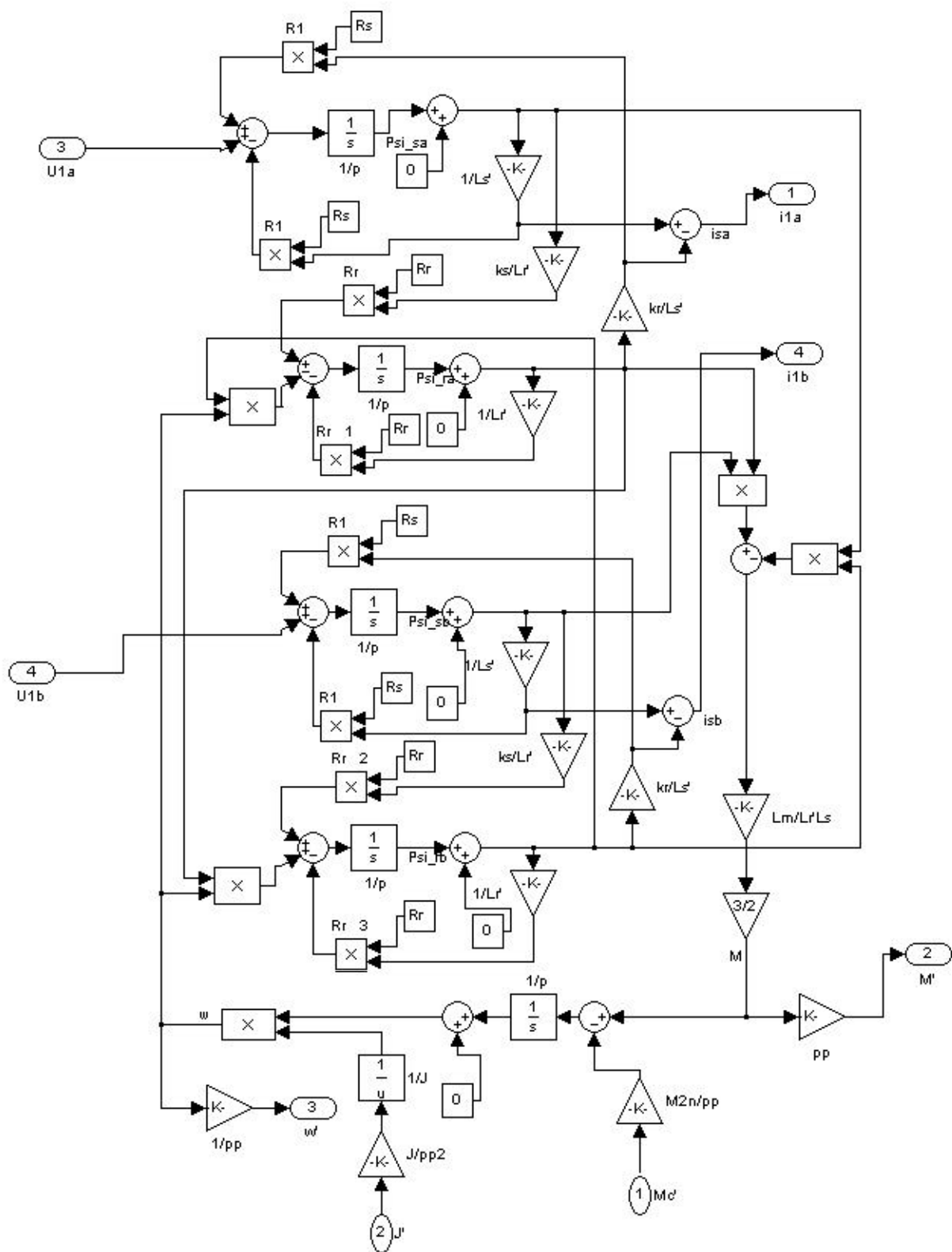


Рис. Б.3. Структурна схема комп'ютерної моделі асинхронного двигуна

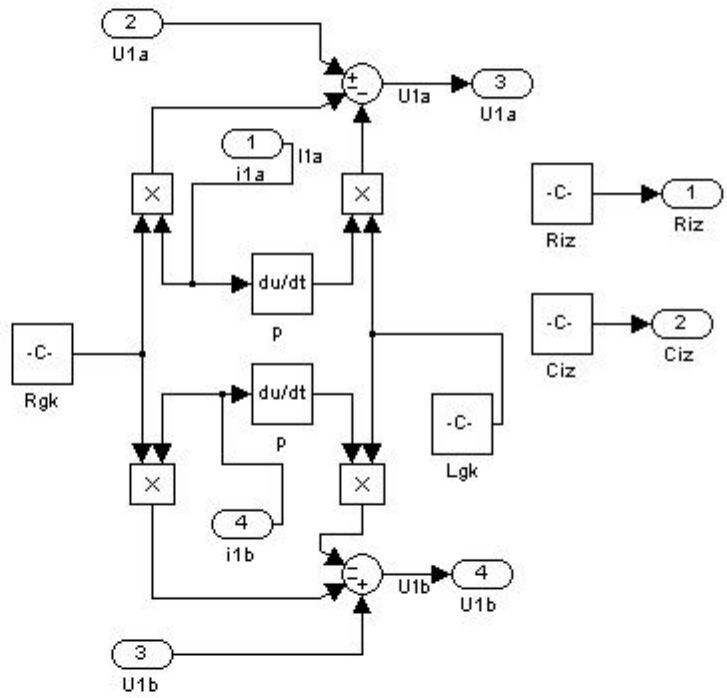


Рис. Б.4. Структурна схема комп'ютерної моделі кабеля живлення

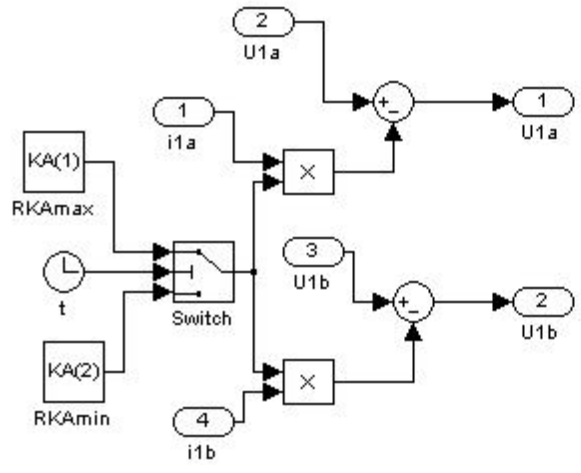


Рис. Б.5. Структурна схема комп'ютерної моделі комутаційного апарату

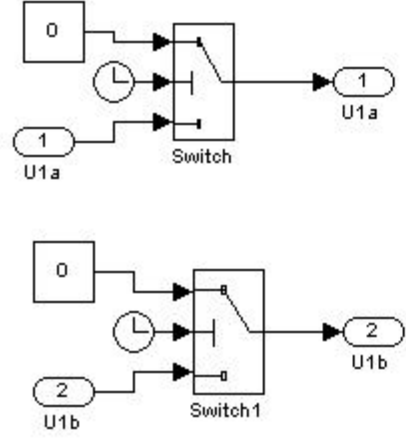


Рис. Б.6. Структурна схема комп'ютерної моделі міжфазного замикання

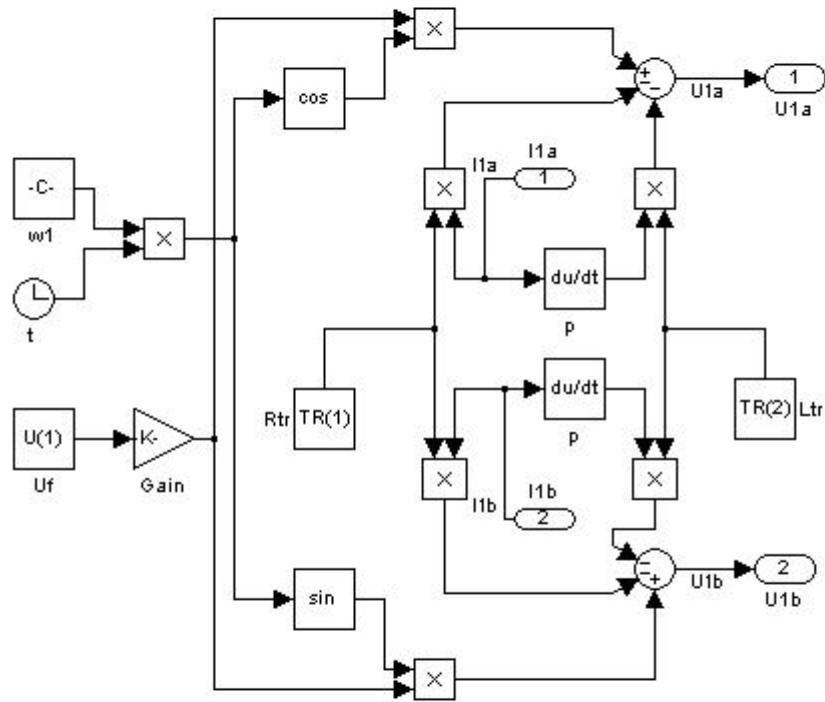


Рис. Б.7. Структурна схема комп'ютерної моделі трансформаторної підстанції

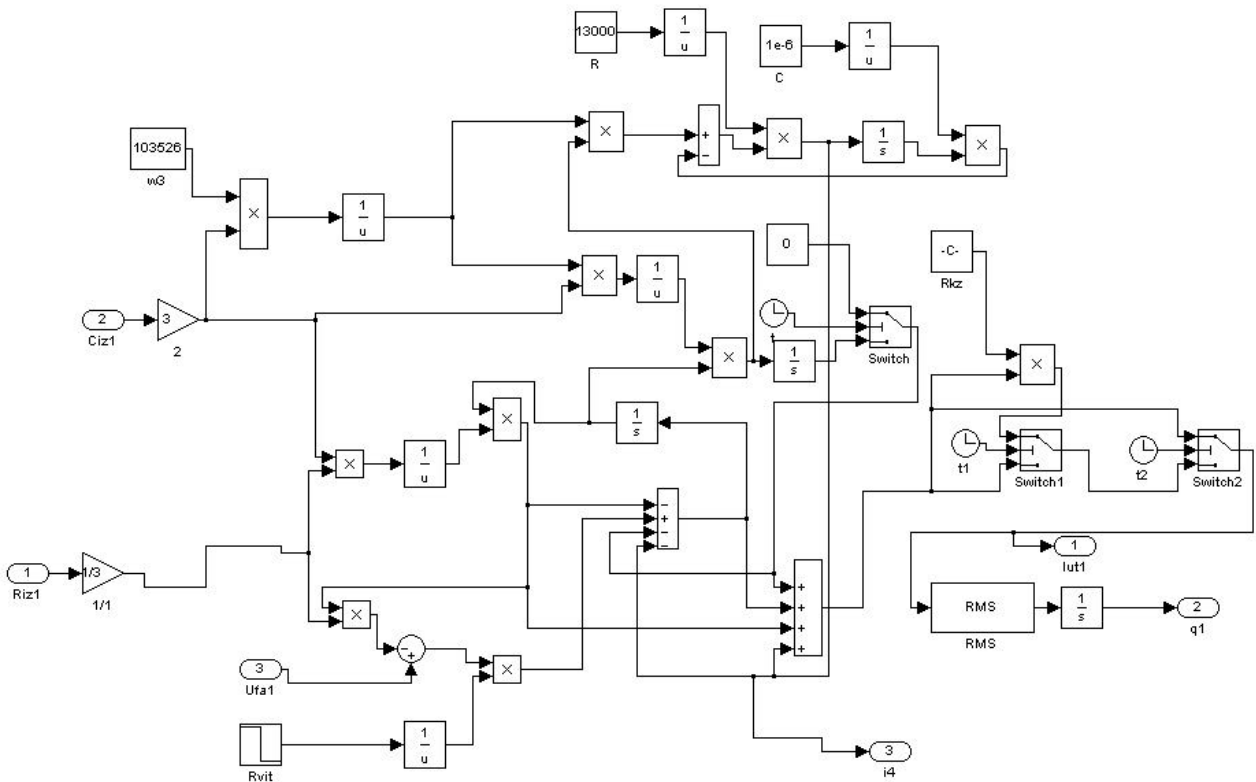
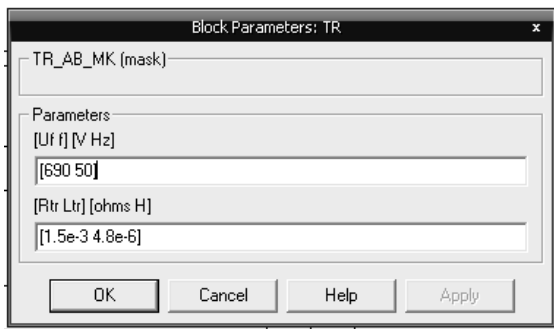
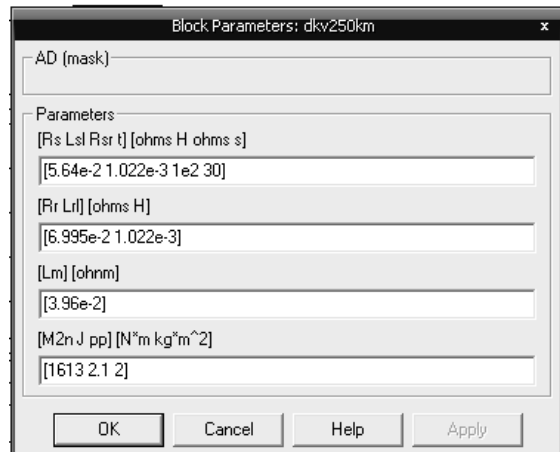


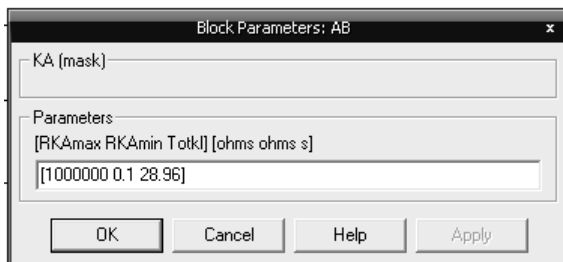
Рис. Б.8. Структурна схема комп'ютерної моделі кола витoku на землю



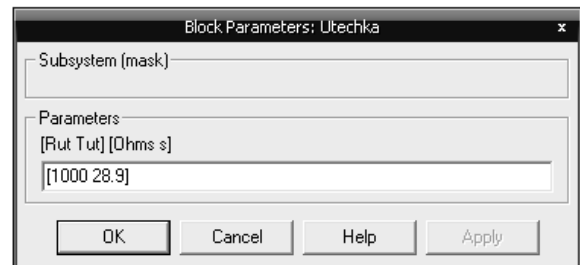
а)



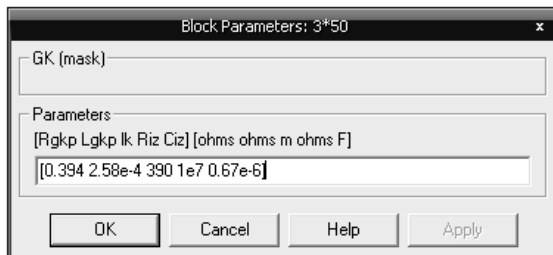
б)



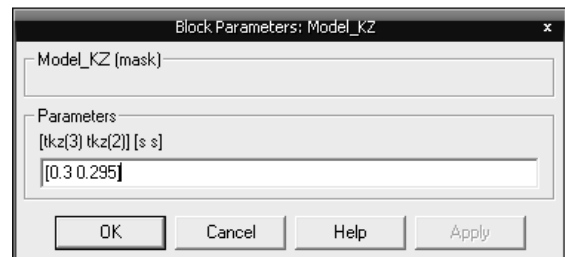
в)



г)



д)



ж)

Рис. Б.9. Діалогові вікна для завдання параметрів комп'ютерних моделей: а) трансформаторної підстанції; б) асинхронного двигуна; в) комутаційного апарату; г) кола витoku; д) кабельної лінії; ж) короткого замикання

Таблиця Б.1

Параметри елементів електротехнічного комплексу шахтної дільниці напругою 660В, що враховані при розрахунку накопичення кількості електрики в ланцюзі витоку струму на землю

№	Споживач	Тип двигуна	Потужність Двигуна, кВт	Кабель КГЕШ	
				Перетин силової жили, мм ²	Довжина, м
1	Комбайн ГШ-500	ЭКВ4-250	250	3×95	210
2	Конвеєр СПЦ-230	ЭДКОФВ315М4	160	3×50	210
3		ЭДКОФВ315М4	160	3×50	210
4	Маслостанція СНТ-32	АИУМ255М4	55	3×25	50
5		АИУМ255М4	55	3×25	50
6	Станція зрошення	ВАО72-30	32,5	3×16	50
7	Лебідка	ЗВ180М6	18,5	3×16	50

Таблиця Б.2

Параметри елементів електротехнічного комплексу шахтної дільниці напругою 1140В, що враховані при розрахунку накопичення кількості електрики в ланцюзі витоку струму на землю

№	Споживач	Тип двигуна	Потужність Двигуна, кВт	Кабель КГЕШ	
				Перетин силової жили, мм ²	Довжина, м
1	Комбайн «Кузбас-500»	ДКВ250КМ	250	3×50	390
2		ДКВ250КМ	250	3×50	390
3	Конвеєр СП330	ЭДКОФВ315ЛВ4	250	3×35	390
4		ЭДКОФВ315ЛВ4	250	3×35	390
5	Маслостанція СНД200/32	2ЭДКОФВ250М4	55	3×10	55
6		2ЭДКОФВ250М4	55	3×10	55

Таблиця Б.3

Параметри елементів електротехнічного комплексу шахтної дільниці, що враховані при дослідженні показників накопичення кількості електрики в ланцюзі витоку струму на землю

№	Тип АЗ	Напруга мережі, В	Компенсація ємності ізоляції	Коротке замикання пошкодженої фази на землю
1	АЗУР-1	380/660	Автоматична	Відсутнє
2	АЗУР-1М		Швидкодіюча автоматична	
3	РУ-1140	1140	Статична компенсація С=0,5мкФ/фазу	Наявне
4	АЗУР-4	660/1140	Статична, С=0,5мкФ/фазу	

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

МАРЕНИЧ Костянтин Миколайович
КОВАЛЬОВА Інна Володимирівна

**НАУКОВІ ОСНОВИ ВПРОВАДЖЕННЯ
АВТОМАТИЧНОГО ЗАХИСНОГО ДВОБІЧНОГО
ЗНЕСТРУМЛЕННЯ ШАХТНОЇ ДІЛЬНИЧНОЇ
ЕЛЕКТРОМЕРЕЖІ**

Монографія

Коректор *С.В. Василюк*

Редакційно-технічне оформлення, комп'ютерна верстка *І.В. Ковальова*

Дизайн обкладинки *К.М. Маренич*

Підписано до друку 21.11.2012. Формат 60x84/16.

Папір PolSpeed. Друк різнографія.

Ум. друк. арк. 9,19 Обл.-вид. арк. 8,54

Тираж 300 прим. Замовлення № 1459

Видавництво Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет». Україна, 83001, м. Донецьк, вул. Артема, 58. Тел.: (062) 301-08-67.

Свідоцтво про державну реєстрацію суб'єкта видавничої справи:
серія ДК № 2982 від 21.09.2007 р.

Надруковано: ТОВ «Друк-Інфо», 83001, м. Донецьк, вул. Артема, 58, к. 1.113
тел. (062) 335-64-55