

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

К.М. Маренич, С.А. Руссіян

**КОМУТАЦІЙНІ ПРОЦЕСИ В ШАХТНІЙ ДІЛЬНИЧНІЙ
ЕЛЕКТРОМЕРЕЖІ ЯК ФАКТОР
ВПЛИВУ НА СТІЙКІСТЬ РОБОТИ ЗАСОБІВ
ЗАХИСНОГО ЗНЕСТРУМЛЕННЯ**

МОНОГРАФІЯ

Донецьк
ДВНЗ «ДонНТУ»
2012

УДК 622.012.2:621.311.1
М 25

Монографія друкується за рішенням Вченої ради ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» (протокол № 10 від 23. 11. 2012 р.)

Автори:

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

РУССІЯН Станіслав Анатолійович, доцент кафедри «Вища математика ім. В.В. Пака» ДВНЗ „ДонНТУ”, кандидат технічних наук.

Рецензенти:

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

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

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

Маренич К.М.

М 25 Комутаційні процеси в шахтній дільничній електромережі як фактор впливу на стійкість роботи засобів захисного знеструмлення / К.М. Маренич, С.А. Руссіян. – Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2013. – 117 с.

ISBN 978-966-377-154-0

Обґрунтована математична модель комплексного дослідження перехідних процесів в електротехнічному комплексі шахтної дільниці, включаючи урахування структури і параметрів засобу визначення і захисного знеструмлення кола витоку струму на землю. Досліджені властивості комутаційних перехідних процесів в шахтній дільничній мережі стосовно впливу на величину оперативного параметру засобу захисту від витоку струму на землю і визначені прийнятні заходи із забезпечення стійкості захисного засобу проти хибного спрацьовування внаслідок впливу комутаційного перехідного процесу.

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».

УДК 622.012.2:621.311.1

© Маренич К.М., Руссіян С.А. 2013

© ДВНЗ «ДонНТУ», 2013

ISBN 978-966-377-154-0

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень.....	5
Вступ	6
1 Вплив умов експлуатації на стійкість проти хибних спрацьовувань засобів захисного знеструмлення мережі.....	7
1.1 Улаштування і властивості засобів захисного знеструмлення мережі з ланкою витоку струму на землю.....	7
1.2 Експериментальне визначення впливової функції комутаційних перехідних процесів стосовно формування оперативного параметру захисного засобу.....	18
2 Аналіз перехідних комутаційних процесів в шахтній дільничній мережі методами математичного моделювання.....	27
2.1 Математична модель шахтного дільничного електротехнічного комплексу з урахуванням сукупності факторів.....	27
2.2 Аналіз функціонування засобів захисного знеструмлення кола витоку струму на землю в умовах виникнення комутаційних перехідних процесів мережі.....	42
2.3 Визначення ймовірності хибного спрацьовування засобу захисного знеструмлення кола витоку струму на землю.....	52
2.4 Аналіз функціонування засобів захисного знеструмлення кола витоку струму на землю в умовах застосування засобів регульованої комутації асинхронних двигунів споживачів.....	57
2.5 Результати експериментальних досліджень процесів при керованій комутації силового приєднання	62
3 Раціональні рішення із удосконалення схемотехніки засобів захисного знеструмлення мережі з колом витоку струму на землю	68
3.1 Необхідні технічні властивості і проблематика застосування засобів захисту від електроураження в шахтних дільничних мережах підвищеного рівня номінальної напруги	68
3.2 Дослідження впливових властивостей комутаційних процесів електротехнічного комплексу при напрузі 3300 В стосовно стійкості функціонування апарата АЗУР-5.....	71
3.2.1 Структура та параметри математичної моделі електротехнічного комплексу при застосуванні апарата захисту типу АЗУР-5.....	73
3.2.2 Аналіз результатів математичного моделювання перехідних процесів у ланці реагуючого органу апарата захисту від витоків струму на землю типу АЗУР-5	82
3.3 Аналіз результатів промислових випробувань дослідного зразка апарата АЗУР-5 з урахуванням впливу комутаційних процесів в електротехнічному комплексі дільниці шахти.....	85
4 Раціональні рішення із удосконалення способу управління засобами регульованої комутації асинхронних двигунів споживачів	89

4.1 Обґрунтування доцільності застосування пристроїв регульованої комутації відповідно до параметрів мережі шахтного дільничного електротехнічного комплексу.....	89
4.2 Дослідження процесів в системі «тиристорний регулятор напруги – асинхронний двигун» в контексті реалізації принципу регульованої комутації силового приєднання	92
4.3 Обґрунтування способу технічної реалізації принципу регульованої комутації силового приєднання електротехнічного комплексу дільниці	103
Висновки	107
Додаток А. Схеми апаратів захисту від витоку струму на землю АЗУР-1 і АЗУР-4	108
Додаток Б. Параметри комп’ютерної моделі електричної мережі дільниці шахти напругою 660 В і вибірні максимальні значення струму через контролюємий орган АЗУР-1 при відключенні відгалуження отримані шляхом моделювання	110
Перелік літератури	112

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

- АВ – автоматичний вимикач;
АД – асинхронний двигун;
АЗ – апарат захисту від витоків струму на землю (апарат захисного відключення);
АПШ – агрегат пусковий шахтний;
ГК – гнучкий кабель;
ДШ – дільниця шахти;
ЕРС – електрорушійна сила;
ЕТК – електротехнічний комплекс;
КА – комутаційний апарат;
КМ – магнітний контактор;
КТП – комплектна трансформаторна підстанція;
МК – магістральний кабель;
П – пускач;
РП – розподільчий пункт;
РПВН – розподільчий пристрій високої напруги;
РПНН – розподільчий пристрій низької напруги;
СТК – силовий тиристорний комутатор;
ТР – трансформатор;
ТРН – тиристорний регулятор напруги
ТА – трансформатор струму;
ТВ – трансформатор напруги;
ЦПП – центральна підземна підстанція шахти

ВСТУП

Сучасне гірниче виробництво являє собою комплекс взаємоузгоджених технологічних процесів, переважна більшість з яких виконується потужними електромеханічними засобами. Забезпечення ефективної, безаварійної, безпечної роботи електричного устаткування шахтних ділянок значною мірою обумовлене: режимом ізольованої нейтралі трансформатора; використанням екранованих кабелів для електроживлення нестационарного обладнання, обов'язковістю застосування засобів автоматичного захисного знеструмлення мережі при виникненні кола витоку струму на землю.

Дослідженнями, виконаними у попередні роки, отримані наукові положення і науково-технічні рішення, застосування яких створило умови для підвищення безпеки експлуатації силового електроустаткування умовах шахти. Найважливішим є створення і розвиток теорії захисту людини від електроураження, запровадження системи нормативів щодо апаратного забезпечення цієї захисної функції; створення і подальше удосконалення засобів захисту від витоків струму на землю. Однак функціонування останніх має відбуватися в умовах виникнення перехідних процесів, які супроводжують контакторну комутацію електроспоживачів.

Це створює ймовірність впливу комутаційних перехідних процесів на параметри стійкості роботи апаратів захисту від витоків струму на землю, що підтверджується випадками їх хибного спрацьовування в моменти комутації силових приєднань діляночної мережі. Тенденція щодо підвищення потужності гірничих технологічних установок, застосування у мережі кабелів збільшених перерізів і довжин, створює умови для більш суттєвого впливу комутаційних перехідних процесів на величину параметрів спрацьовування апаратів захисту від витоків струму на землю. Цим обумовлена актуальність наукового обґрунтування заходів із обмеження впливу комутаційних процесів на функціонування засобів захисту від витоків струму на землю в шахтній діляночній електромережі.

1 ВПЛИВ УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ НА СТІЙКІСТЬ ПРОТИ ХИБНИХ СПРАЦЬОВУВАНЬ ЗАСОБІВ ЗАХИСНОГО ЗНЕСТРУМЛЕННЯ МЕРЕЖІ

1.1 Улаштування і властивості засобів захисного знеструмлення мережі з ланкою витoku струму на землю

Основою схеми електротехнічного комплексу технологічної дільниці шахти є низьковольтний розподільчий пункт, представлений сукупністю магнітних пускачів (П) з груповим автоматичним вимикачем (АВ) на вході, або станцією управління, до виходів силових комутаційних апаратів, якого радіально приєднані асинхронні двигуни $M_1 - M_n$ споживачів (рис. 1.1).

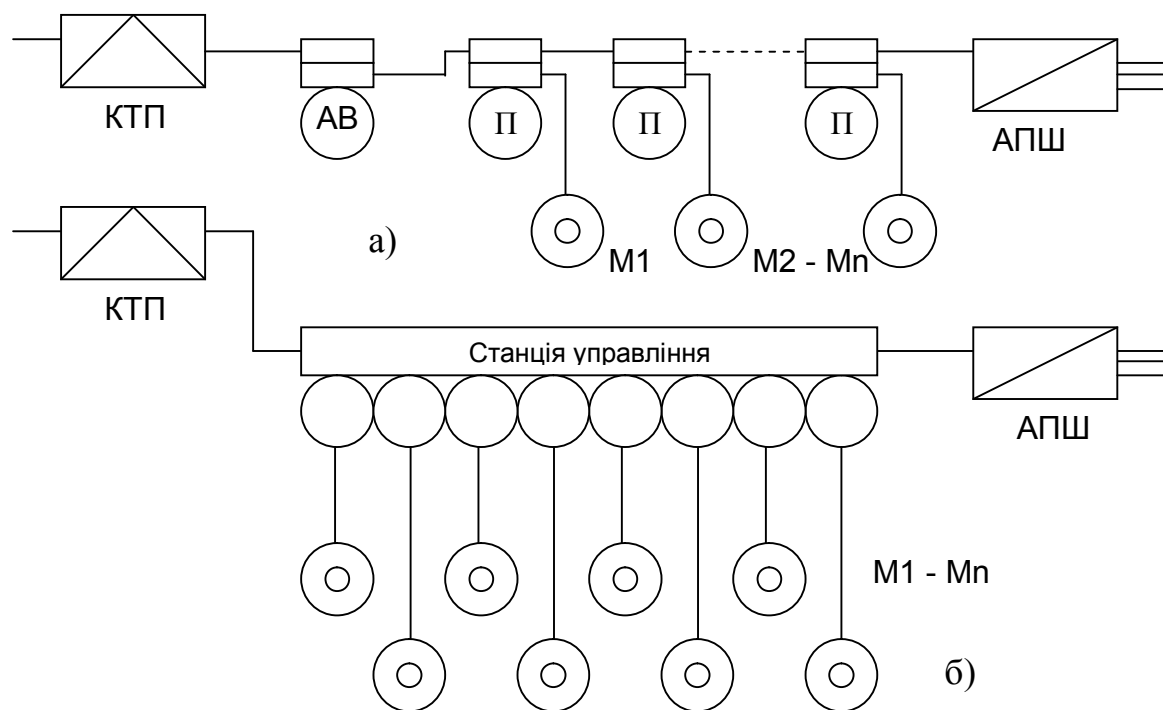


Рисунок 1.1 – Типові схеми шахтних дільничних електротехнічних комплексів з використанням: пускачів (а); станцій управління (б)

Наявність нестационарного технологічного устаткування обумовлює необхідність застосування гнучких кабелів між пускачами та асинхронними двигунами, що в умовах шахти створює підвищену небезпеку електроураження внаслідок підвищеної ймовірності пошкодження ізоляції кабелів. Дієвими заходами із підвищення електробезпеки експлуатації рудникового

електроустаткування є обов'язковість застосування: у якості гнучких – шахтних кабелів з екранованими силовими жилами і заземленням заземлюючої жили, а також дільничних апаратів захисту від витoku струму на землю за умови дотримання режиму ізольованої нейтралі шахтних підземних електромереж. Захисною функцією останніх є утворення команди на відключення автоматичних вимикачів розподільчих пристроїв низької напруги комплектних трансформаторних підстанцій (КТП) і відокремлення, тим самим, енергетичного потоку підстанції від дільничної електромережі в разі виникнення в ній кола витoku струму на землю небезпечно великої провідності.

За умови торкання людиною фазного провідника, що є під напругою, небезпека електроураження обумовлена наявністю ланки електропровідності, через активні R_{i3} та ємнісні X_{ci3} опори ізоляції мережі (рис. 1.2) і низьким рівнем ($R_{\text{виг}} = 1,0$ кОм), власне, активного опору людині (витoku струму на землю) [1]. Наявність ланки витoku струму на землю може бути представлена схемою заміщення і векторною діаграмою (рис. 1.3), аналіз якої свідчить про порушення симетрії напруг фаз мережі. Відповідно до цього, струм, що протікає через тіло людини (струм витoku на землю) визначається формулою:

$$I_{\text{виг}} = \frac{U_{\phi}}{R_{\text{виг}} \cdot \sqrt{1 + \frac{R_U (R_U + 6R_{\text{виг}})}{9R_{\text{виг}}^2 (1 + R_U^2 \omega^2 C^2)}}} \quad (1.1)$$

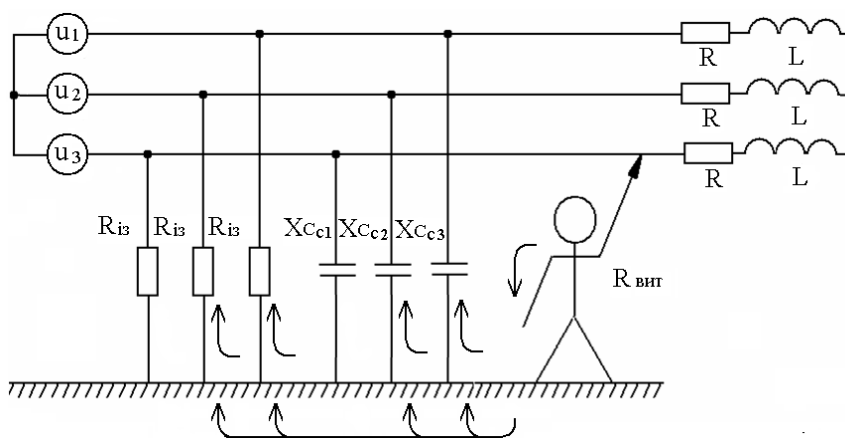


Рисунок 1.2 - Розрахункова схема при торканні людиною до однієї з фаз електромережі; u_1, u_2, u_3 – миттєві значення фазних напруг мережі

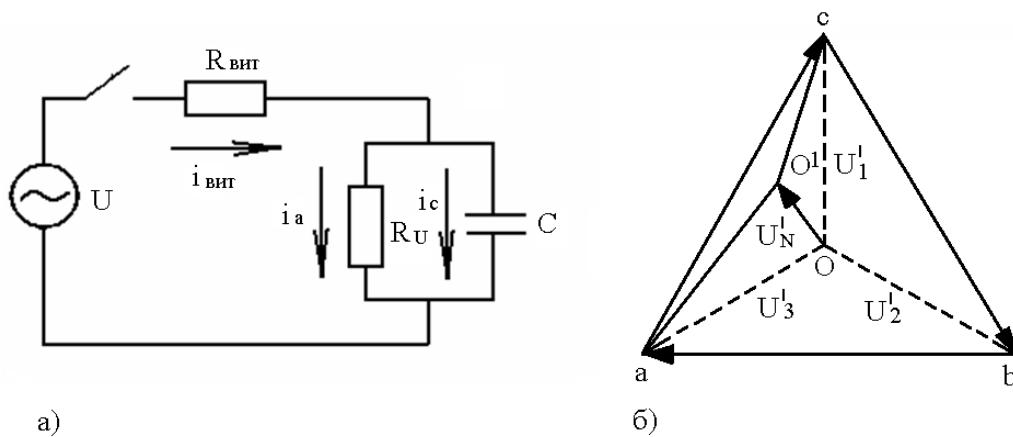


Рисунок 1.3 - Схема заміщення дільничної мережі при торканні людини до однієї з фаз електромережі (а) та, відповідно, векторна діаграма (б)

- обмеження кількості електрики через тіло людини, що проходить від моменту торкання елементів мережі до моменту відключення напруги, на рівні:

$$Q_{прин} = I * t = 50 \text{ мА} * \text{с}, \quad (1.2)$$

Ці параметри можуть бути досягнуті сукупністю наступних заходів:

- підтримання високого активного опору ізоляції дільничної мережі суворим дотриманням норм і правил технічної експлуатації електроустановок [2];

- достатня точність контролю величини струму витоку на землю і швидкодія формування команди на захисне відключення мережі;

- застосування компенсації ємнісних струмів витоку на землю випровадженням дросельних елементів (в розрахунку на нормовану максимальну ємність дільничної мережі – 1,0 мкФ/фазу);

- автоматичне закорочування на землю пошкодженої фази в момент захисного відключення мережі.

Попередніми дослідженнями доведено, що визначення величини струму витоку на землю може бути здійснено наступними способами [3, 4]:

- контроль величини напруги нульової послідовності;
- контроль величини струму нульової послідовності;

- контроль величини 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 захисного відключення як сучасного виробництва, так і у попередніх зразках.

Принциповими є відмінності у застосуванні вимірювального пристрою. Так, можна виділити впроваджене у промисловості технічне рішення, відповідно до якого вимірювальний пристрій є водночас пристроєм формування команди на захисне відключення мережі. Його функцію виконувало електромагнітне реле підключене послідовно в ланку постійного оперативного струму (рис. 1.4) [5]. Запровадження двообмоткового реле (апарат УАКІ) в якості вимірювального засобу мало на меті підвищення точності виміру величини оперативного струму. Але принципово ця задача застосуванням релейних елементів не вирішувалась через їх низьку точність у порівнянні з напівпровідниковими схемами контролю [6; 7]. Іншим суттєвим недоліком послідовного підключення релейного вимірювально-виконавчого елемента в ланку оперативного струму є відсутність самоконтролю справності схеми апарата захисту, оскільки відмова реле, або порушення цілісності ланки оперативного струму призводитиме до неможливості виконання функції виявлення виникнення витоку струму на землю із подальшим захисним відключенням ділячної мережі.

Одним з ефективних засобів зниження короточасних струмів витоку є компенсація їх ємною складовою через підключення індуктивності між фазами мережі і землею (паралельно ємностям фаз відносно землі). Ця індуктивність утворює з вказаними ємностями коливний контур і створює ефект компенсації ємності ізоляції мережі шахтної ділянки $\omega L = 1/(\omega C)$ [6; 8].

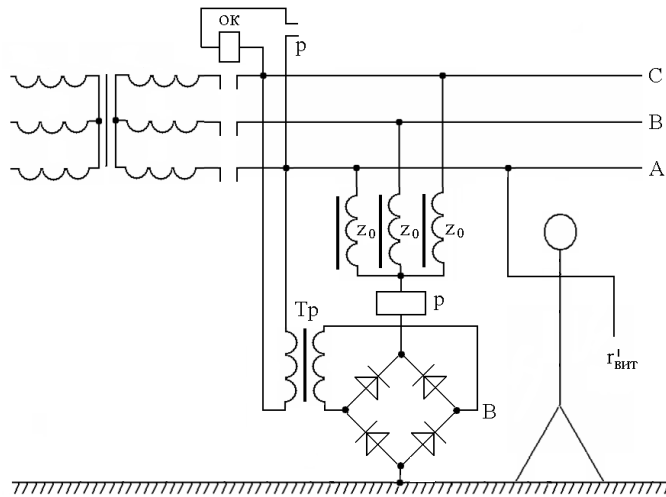


Рисунок 1.4 - Схема послідовного підключення релейного контролюючого органу до ланки постійного оперативного струму

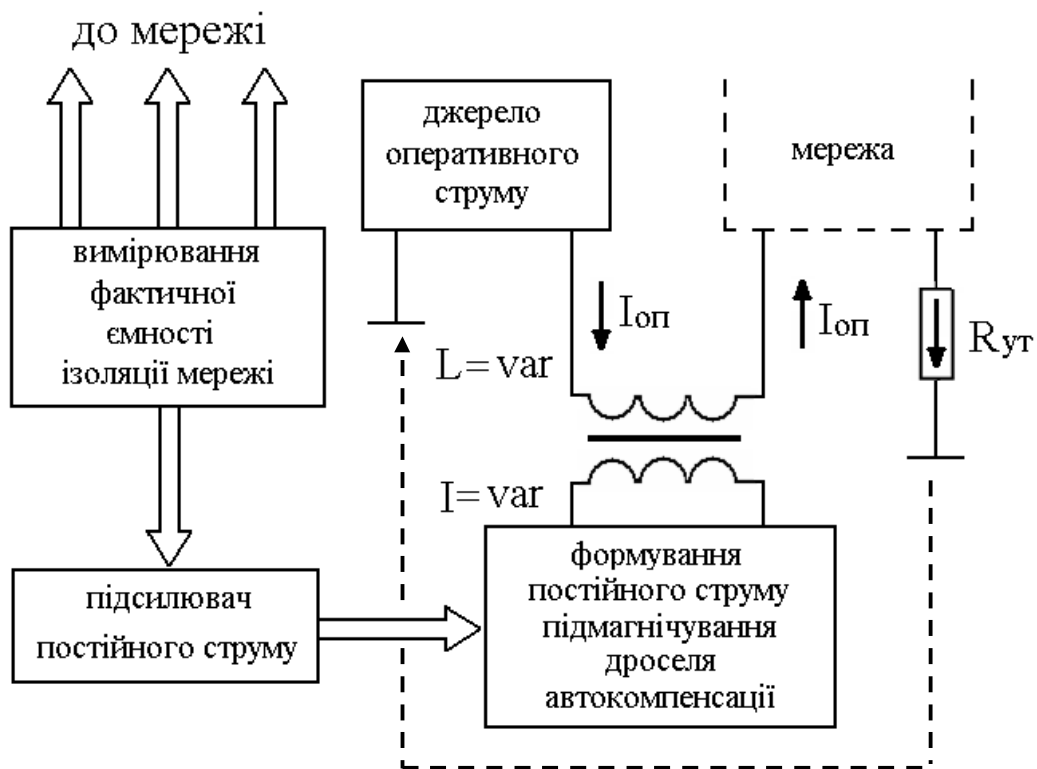


Рисунок 1.5 - Структура пристрою автоматичної компенсації ємнісних складових струму витоків на землю

Технічна реалізація дросельної компенсації впроваджена у статичних та автоматичних пристроях. Недолік статичного способу компенсації полягає у

неможливості зміни індуктивності дроселя відповідно до зміни ємності мережі в процесі підключення або відключення окремих кабелів споживачів.

Цього недоліку позбуті захисні засоби із автоматичною компенсацією ємності ізоляції мережі в діапазоні 0 - 1,0 мкФ/фазу (апарати АЗАК, АЗПБ, АЗУР) [6]. В узагальненому вигляді цей принцип ілюструється схемою (рис. 1.4). Компенсація ємнісних складових струмів мережі здійснюється на основі застосування регульованого дроселя. Налаштування компенсатора на фактичну ємність мережі відбувається зміною постійного струму в його обмотці керування в залежності від величини ємності мережі що вимірюється структурою коливального контуру, частиною якого є ємності мережі дільниці.

Суттєвою позитивною відмінною характеристикою апарата АЗУР-1 є функція самоконтролю параметрів і підвищення точності контролю струму витоку на землю, що пояснюється наступним:

- визначення величини струму витоку на землю (оперативного струму апарату) виконує напівпровідниковий пристрій шляхом зіставлення оперативного та еталонного струмів;

- виконавче реле реалізує виключно функцію виконавчого елемента захисту і у вихідному стані є постійно ввімкненим. Таким чином, захисне відключення дільничної мережі відбувається як за умови перевищення оперативним постійним струмом величини еталонного струму, так і в разі відмови виконавчого реле, або знеструмлення ланцюга його електроживлення.

Факторами обмеження області застосування апарату захисного відключення АЗУР-1 є певна тривалість процесу переналаштовування індуктивності автокомпенсуючого дроселя, в термін якого (при некомпенсованій мережі) при лінійній напрузі 1140 В величина безпечної нормованої кількості електрики ($50 \text{ мА} \cdot \text{с}$) може бути перевищеною. Через це додатковою захисною функцією реалізованою в апаратах захисту РУ-1140 (при номінальній лінійній напрузі мережі 1140 В) слід вважати застосування короткозамикачів пошкодженої фази, що спрацьовують за командою засобу

визначення витоку струму на землю водночас із захисним відключенням мережі (рис 1.6) [6]. 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 БКЗ-1140, який входить до складу апарату захисту РУ-1140 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 [5, 6, 7]. Встановлено, що фази з напругою, що є більш, ніж еталонна, мають нормальну ізоляцію, а у фазі, напруга якої є меншою, ніж еталонна, має місце небезпечний струм витоку на землю.

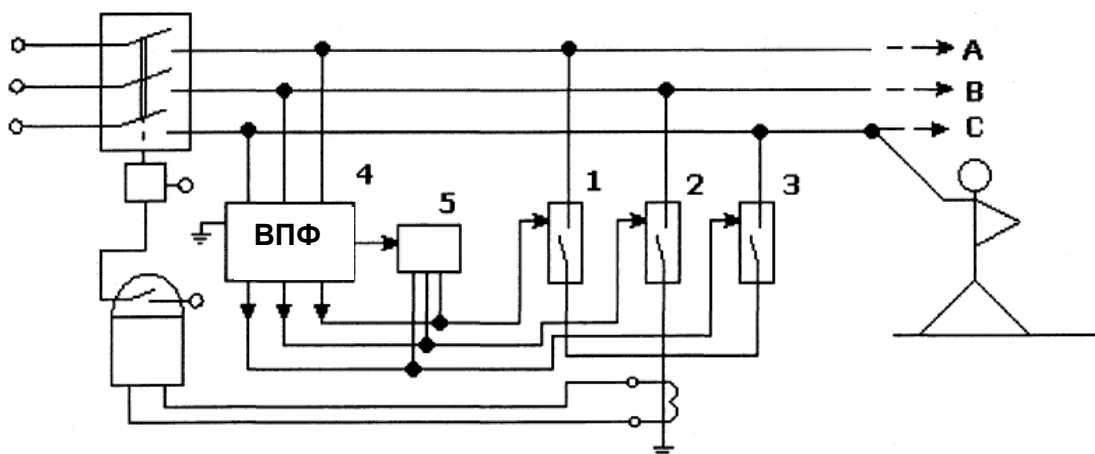


Рисунок 1.6 – Схема пристрою застосування захисного закорочування на землю пошкодженої фази. 1-3 – фазні короткозамикачі; 4 – блок визначення пошкодженої фази; 5 – блок керування короткозамикачами

Проте, при експлуатації протяжних електричних мереж, коли їх ємкісна провідність відносно землі значно перевищує активну провідність, існує вірогідність хибного закорочування фази, що пояснюється графіками залежності відношення напруги фаз мережі відносно землі до фазної напруги від опору однофазного витоку при ємкості мережі 1,0 мкФ/фазу (рис. 1.7) [6]. Аналіз графіку показує, що при величині опору витоку на землю $R_{вум} \geq 1,6$ кОм має місце вірогідність хибного закорочування фази 2. У цьому разі умови

безпеки експлуатації мережі будуть суттєво погіршені, оскільки людина, що торкнулась фазного провідника, буде знаходитись під дією лінійної напруги.

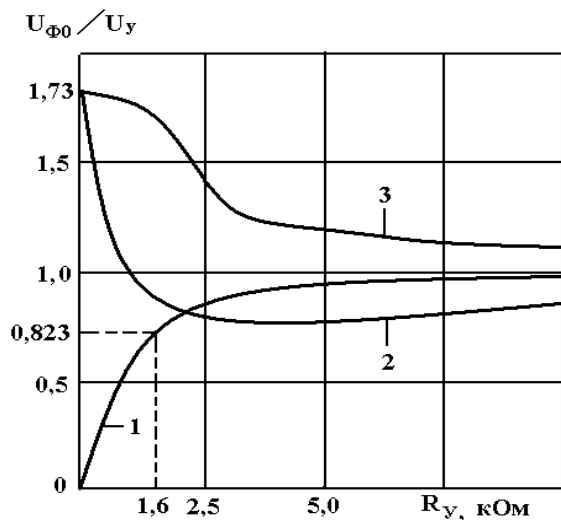


Рисунок 1.7 – Графіки залежності відношення напруги фаз мережі 1, 2, 3 відносно землі до фазної напруги від опору однофазного витоку при $C_M=1,0$ мкФ/фазу

Апарат захисного відключення АЗУР-4 інтегрує в собі позитивні властивості попередніх схем (рис. 1.8). Команда на захисне відключення мережі формується внаслідок визначення наявності кола з витоком струму на землю (шляхом порівняння оперативного параметру апарата з еталонним). Однак, його захисна функція підсилюється дією фазного короткозамикача [9]. Дія останнього оснований на роботі фазних пристроїв визначення (і закорочування на землю) фази з пошкодженою ізоляцією.

Отже, апарат АЗУР-4 на сьогодні є найбільш функціонально насиченим засобом захисту від витоків струму на землю в шахтній дільничній мережі при напрузі 660 В та 1140 В і має бути прийнятий для подальшого розгляду в контексті дослідження процесів у електротехнічному комплексі. Його спрощена принципова схема (рис 1.9) є адаптованою для подальшої побудови комп'ютерної моделі об'єкта дослідження. Функція визначення струму витоку на землю і формування команди на захисне відключення дільничного електротехнічного комплексу в апараті АЗУР-4 полягає у порівнянні напруги на резисторах $R43$ і $R45$ пропорційної оперативному струму із імпульсною напругою U_{em} , пропорційною за величиною еталонному струму, що надходить на інвертуючі входи компараторів $DA4$ і $DA5$ (додаток А).

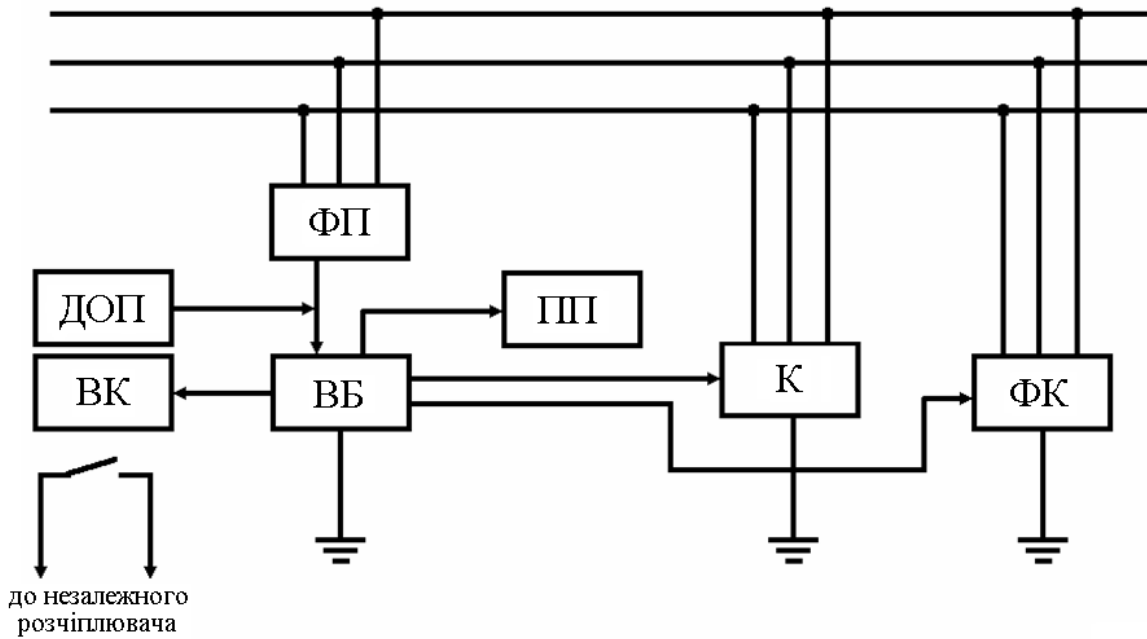


Рисунок 1.8 – Функціональна схема засобу захисного відключення АЗУР-4: ДОП – джерело оперативного параметру; ФП – фільтр приєднання до фаз мережі; ВБ – вимірювальний блок; ВР – виконавче реле; К – компенсатор ємності мережі; ФК – фазний короткозамикач; ВП - вимірювальний прилад

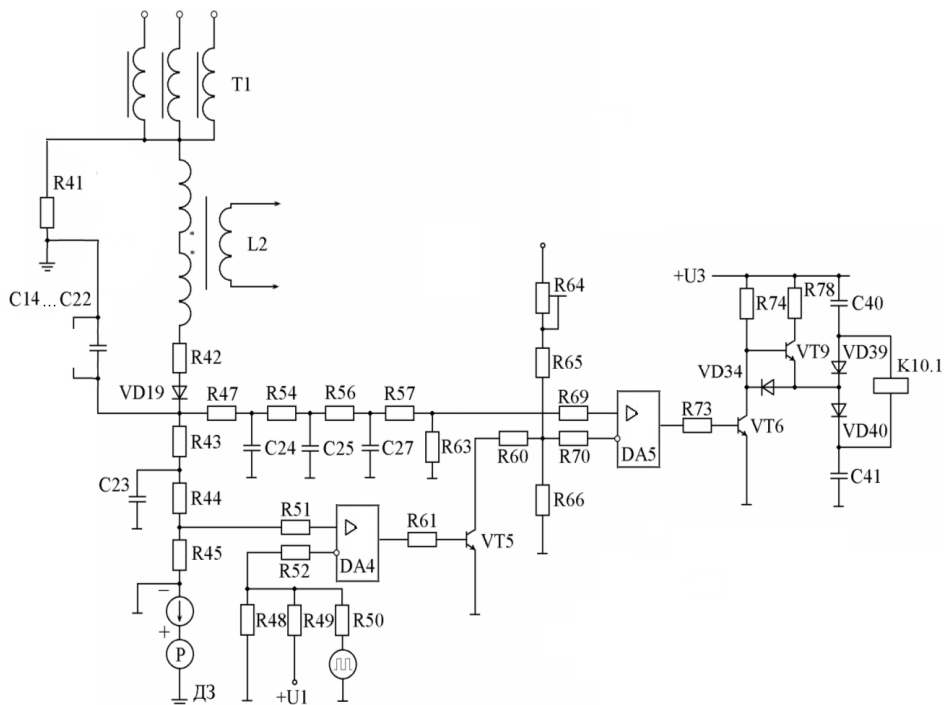


Рисунок 1.9 – Спрощена принципова схема пристрою контролю опору ізоляції мережі, як складова схеми апарата АЗУР-4

Отже, за умови неперевикнення оперативним струмом величини еталонного струму, на виході компаратора $DA5$ має місце змінна напруга високої частоти, внаслідок чого напруга прикладається до конденсаторів $C40$ і $C41$ і створюються умови підтримання виконавчого реле $K10.1$ у ввімкненому стані. Стану, коли оперативний струм стає більшим, ніж еталонний, відповідає збільшення падіння напруги на резисторах $R43$ та $R45$ і припинення, через це, формування імпульсів на виході компаратора $DA5$ (що призводитиме до відключення реле $K10.1$).

Серед перспективних напрямів із удосконалення схемотехніки і функціональних властивостей апаратів захисту від витоків струму на землю слід відзначити інший підхід стосовно компенсації ємності ізоляції мережі, який покладений в основу схеми апарата АЗУР-1М, а саме [10]:

- застосування компенсатора з індуктивністю, налаштованою на компенсацію максимальної ємності ізоляції мережі (відповідно до положень діючих нормативів, $C=1,0$ мкФ/фазу [1]);

- визначення реальної величини ємності ізоляції мережі і швидкодіюче підключення до неї залишку ємності до створення сукупної величини $C=1,0$ мкФ/фазу, що повністю компенсується індуктивністю дроселя.

Таким чином, загальною особливістю улаштування дільничної електромережі є застосування технічного засобу її захисного знеструмлення в разі виникнення в силовому приєднанні кола витоків струму на землю. Виконавчими засобами цієї захисної функції є устаткування розподільчого пристрою низької напруги КТП (рис. 1.10), а саме, апарат захисту від витоків струму на землю (АЗУР), спрацьовування якого спричиняє вплив на нульовий (YAT) та незалежний (FV) розчеплювачі автоматичного вимикача QF КТП і його відключення. Відповідно до схеми, АЗУР отримує електроживлення безпосередньо з вторинної обмотки трансформатора TV підстанції і знаходиться у робочому стані незалежно від стану автоматичного вимикача QF ; його ланцюг оперативного струму підключено до трифазної мережі, що відходить

від автоматичного вимикача QF , і до заземлення підстанції, а контакти виконавчого реле впливають на розчеплювачі цього ж вимикача QF .

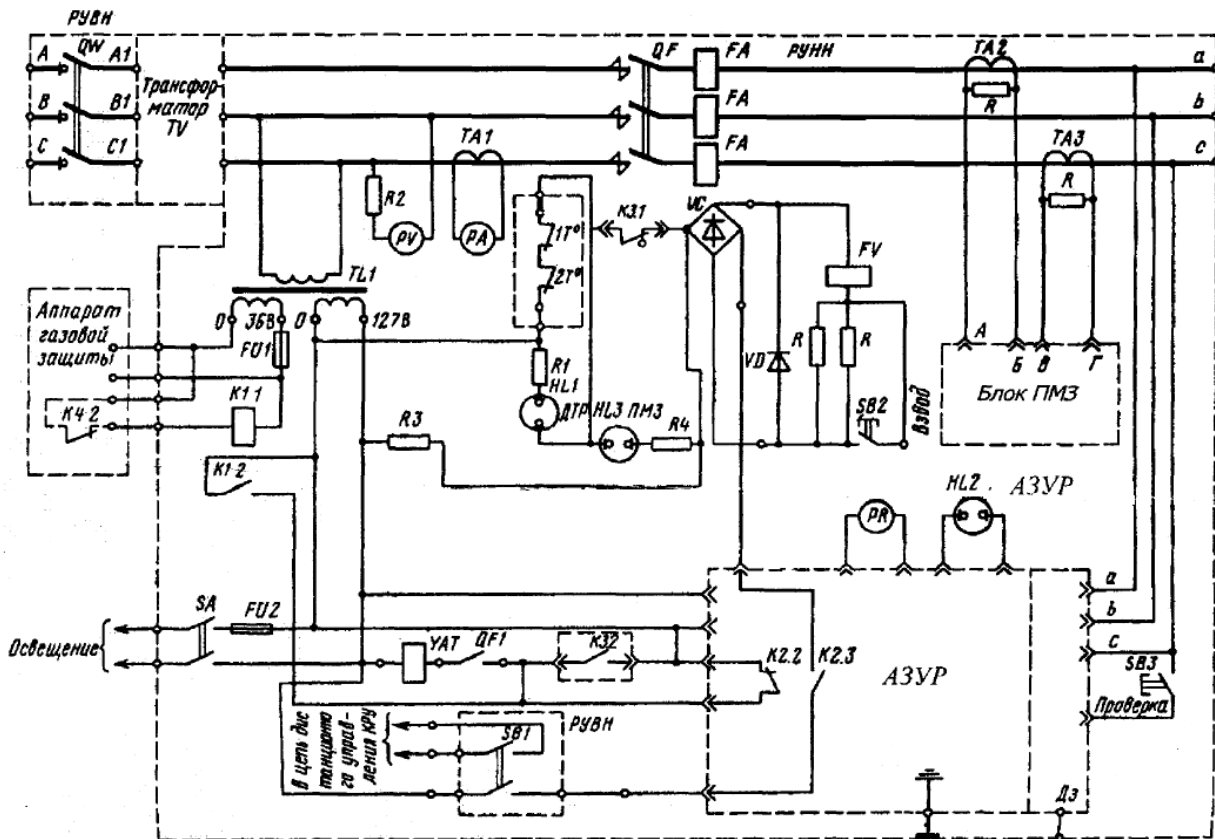


Рисунок 1.10 – Принципова електрична схема комплектної трансформаторної підстанції дільниці шахти

Враховуючи на безпосереднє приєднання ланки оперативного струму апарата АЗУР до дільничної електромережі, наявність в її складі кабельних приєднань із активно-ємнісними опорами ізоляції та контакторні засоби комутації цих приєднань, варто зробити попередній висновок про наявність впливу цієї контакторної комутації на величину оперативного параметру АЗУР і ймовірність хибного спрацьовування останнього, що має бути розглянуте детальніше.

1.2 Експериментальне визначення впливової функції комутаційних перехідних процесів стосовно формування оперативного параметру захисного засобу

Дослідженнями [11] встановлено, що обумовлені контакторною комутацією силових приєднань перехідні процеси в шахтній дільничній мережі сприяють підвищенню оперативного параметра в апараті захисту від витоку струму на землю до величини, співрозмірної з параметром його спрацьовування, що може викликати хибне відключення дільничної трансформаторної підстанції. Окремі випадки таких хибних спрацьовувань захисту фікціюються енергомеханічними службами шахт. Це негативно впливає на продуктивність роботи, ускладнює експлуатацію обладнання і потребує заходів із удосконалення схемотехніки засобів захисту.

Отже, має місце технічне протиріччя, що полягає у наступному. Електробезпека експлуатації дільничного електротехнічного комплексу значною мірою обумовлена швидкодією визначення витоку струму на землю і швидкістю відповідної реакції апарата захисного відключення. Але, з метою не допущення хибного спрацювання цього апарату внаслідок виникнення комутаційного перехідного процесу функцію формування апаратом команди на захисне відключення мережі доцільно уповільнювати.

Крім того, тенденція до збільшення потужностей дільничних електротехнічних установок є об'єктивною і передбачає відповідне підвищення перерізів гнучких кабелів, збільшення протяжності очисних вибоїв. Це, у свою чергу, призводитиме до підвищення довжин кабелів мережі дільниці. У сукупності, зазначені фактори обумовлюють підвищення ємності ізоляції мережі, що, у свою чергу, є фактором збільшення амплітудно-часових характеристик параметрів комутаційних перехідних процесів в дільничному електротехнічному комплексі. Існуюча тенденція до збільшення номінальної напруги дільничної електромережі (з 660 В до 1140 В, а у подальшому – до 3300 В) обумовлює перспективу ще більшого підвищення зазначених параметрів. Все це обумовлює суттєве збільшення ймовірності хибного

спрацювання апарата захисту від витоків струму на землю і доцільність досліджень і розробок із забезпечення стійкості роботи засобів автоматичного захисного відключення шахтних дільничних електротехнічних комплексів.

Актуальність цього напрямку досліджень може бути, зокрема, підтверджена експериментальним визначенням умов і параметрів функціонування шахтного дільничного електротехнічного комплексу, при яких підвищення амплітуди оперативного параметру в апараті захисту від витоків струму на землю (під впливом комутаційного перехідного процесу) досягає величини, найближчої до параметра спрацьовування, або, безпосередньо, мають місце випадки хибного спрацьовування цього захисного засобу.

Електротехнічний комплекс, як об'єкт експериментального дослідження, має бути представлений структурою стенда відповідно до схеми (рис. 1.11), яка складається з типових компонентів шахтного дільничного електротехнічного комплексу, а саме: силовий трансформатор номінальною потужністю 400 кВА (як складова дільничної підстанції ТСВП-400); автоматичний вимикач АВ-400; апарат захисту від витоків струму на землю (досліди проводилися стосовно апаратів АЗУР-1, та АЗУР-4); багатоканальний цифровий осцилограф «Рекон»; силовий контактор КВ-1,14-2,5/33-36АС; набір активних опорів і ємностей для імітації параметрів провідності ізоляції електричної мережі відносно землі (що визначається ГОСТ 22929-78, п.5.2) [1]. В якості силового навантаження, що є об'єктом контакторної, або регульованої комутації, застосований асинхронний двигун з короткозамкненим ротором типу ЭДКОФ250М4 номінальною потужністю 55 кВт. Схема вторинної обмотки трансформатора КТП підстанції забезпечує живлення її силового приєднання в режимі ізольованої нейтралі.

Використання цифрового багатоканального осцилографа створює можливість отримання діаграми зміни в часі наступних величин: u_A , u_B , u_C напруги фаз А-С мережі; $U_{зм.н}$ - напруги зсуву нейтралі; $U_{p.e.1}$ - напруги на реагуючому елементі АЗ (1-й вимірювальний канал); U_{on1} - опорної напруги 1-го вимірювального каналу АЗ; $U_{p.e.2}$ - напруги на реагуючому елементі АЗ (2-й

вимірювальний канал); U_{on2} - опорної напруги 2-го вимірювального каналу АЗ;
 U_K - напруги виходу компаратора АЗ; U_{AB} - сигналу про спрацювання
автоматичного вимикача SF мережі (додаток А).

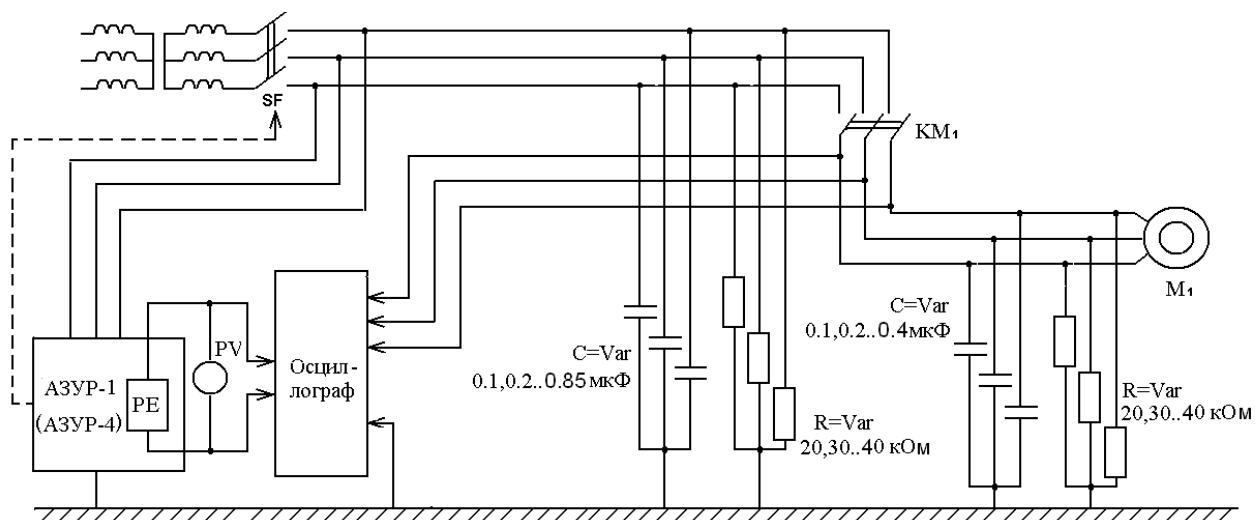


Рисунок 1.11 - Схема стенда для дослідження впливу комутаційних перехідних процесів на параметри контрольованого сигналу в схемі апарата захисту від витоків струму на землю типу АЗУР

З метою дослідження перехідного процесу в ланцюзі оперативного струму АЗ при керованій комутації АД в схемі стенда (рис. 1.11) замість контактора КМ1 використовувався пристрій типу КУУВПП – 250М для уповільнення пуску двигунів, основу якого складає симетрична трифазна схема тиристорного комутатора (регулятора напруги промислової частоти), що функціонує в режимі фазового регулювання [12]. Застосування в якості об'єктів дослідження апаратів захисту від витоків струму на землю типів АЗУР-1 та АЗУР-4 обумовлене їх широким використанням у вугільній промисловості.

Для встановлення характеру впливу комутаційних перехідних процесів у електромережі дільниці шахти на параметри стійкості функціонування АЗ мають бути запроваджені наступні заходи:

- фіксація рівня напруги і струму на реагуючому елементі АЗ при виникненні комутаційного перехідного процесу в контрольованій апаратом електричній мережі;

- визначення фактичних параметрів сигналів на реагуючому елементі АЗ і визначення умов його хибного спрацьовування при комутаціях навантаження в контрольованій електромережі при ємкостях опору ізоляції відгалуження кабельної мережі, що перевищують 0,1 мкФ/фазу;

- фіксація рівня напруги на реагуючому елементі АЗ при найбільш критичних параметрах комутаційних перехідних процесів в електромережі: розряд заздалегідь зарядженою до напруги $0,825 U_H$ трифазної групи ємкостей на коло оперативного струму АЗ;

- встановлення характеру зміни параметрів сигналу на реагуючому елементі АЗ при керованому включенні і відключенні асинхронного двигуна електроспоживача в контрольованій електромережі.

Мінімальний обсяг вибірки при точності $n=0,25$ та статистичній надійності $\gamma=0,95$, необхідний для оцінки стандартного відхилення, складає

$$n = 1 + 0,5 \left(\frac{z_{\alpha}}{d} \right)^2 = 1 + \left(\frac{1,96}{0,25} \right)^2 \approx 30, \quad (1.3)$$

де z_{α} - нормована нормально розподілена змінна, значення якої для $\alpha = 1 - \gamma = 0,05$ становить 1,96. Згідно залежності (1.3) кожен з перелічених у експериментів проводився 30 разів для отримання достовірних результатів [13].

Кожна реалізація з визначених експериментів (в електричній мережі лінійної напруги 660 В з загальною ємністю ізоляції мережі відносно землі до 1,0 мкФ/фазу) передбачає програмне виконання наступної послідовності:

- виявлення спрацьовувань АЗ при контакторній комутації споживача (при величині однофазного активного витоку на землю 30 кОм) і ємностях ізоляції одного відгалуження від 0,05 мкФ/фазу до 0,15 мкФ/фазу;

- виявлення спрацьовувань АЗ при контакторній комутації споживача при величині однофазного активного витоку на землю від 20 кОм до 40 кОм і ємностях ізоляції кабелю від 0,15 мкФ/фазу до 0,4 мкФ/фазу включно;

- виявлення спрацьовувань АЗ при регульованій комутації споживача при величині однофазного активного витоку на землю від 20 кОм до 40 кОм і ємностях ізоляції кабелю від 0,05 мкФ/фазу до 0,4 мкФ/фазу.

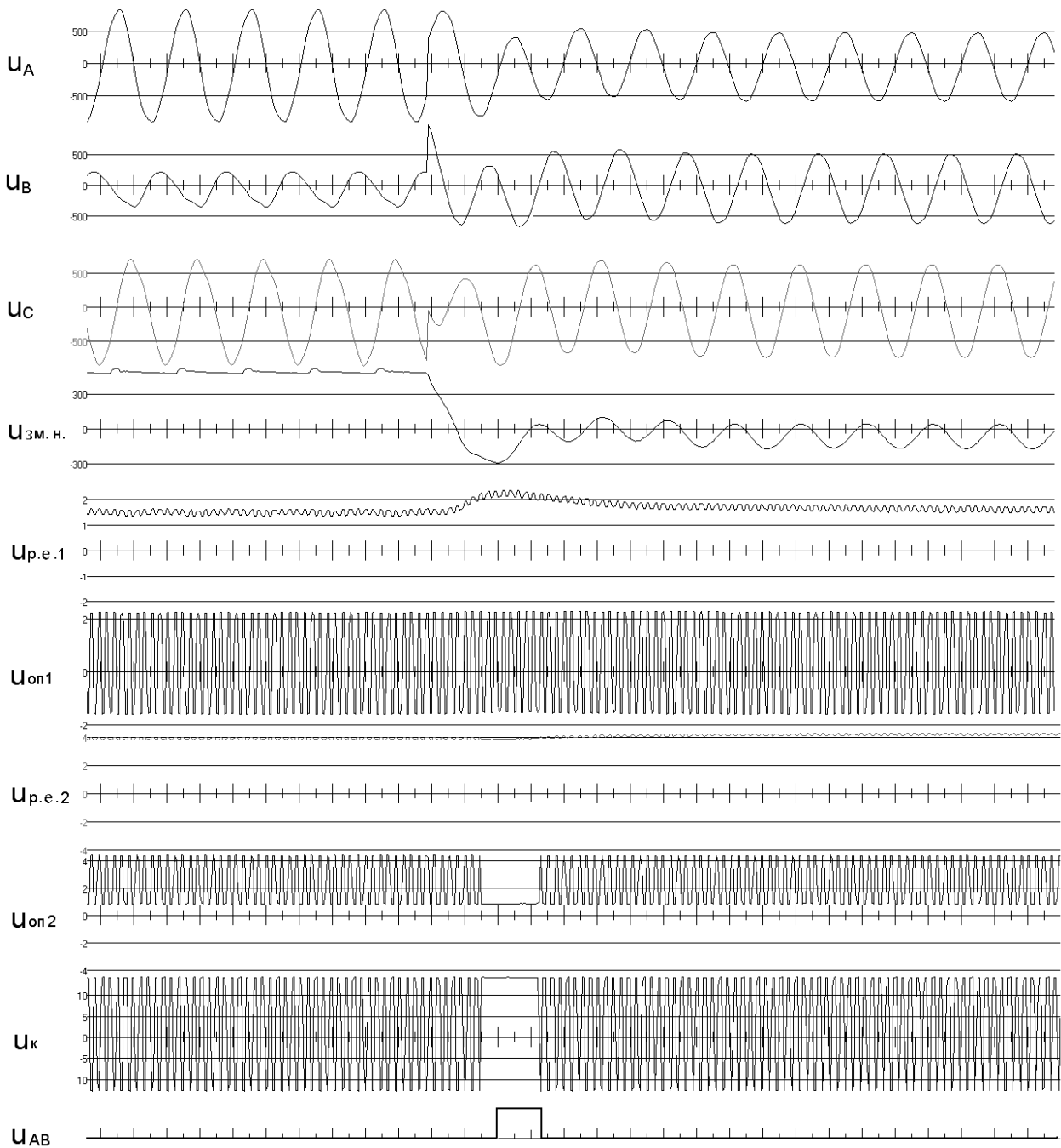
Регулювання напруги при включенні електроспоживача створюється пристроєм уповільнення пуску двигунів від фіксованого зниженого рівня ($0,2 U_H$) до номінального (U_H) значення. Регульоване відключення споживача здійснюється тим же пристроєм уповільнення пуску шляхом зменшення напруги на споживачі за лінійним законом від номінального значення до нуля.

Імітація активного опору витоків на землю створюється підключенням згідно рис. 1.9 активного опору в діапазоні від 20 кОм/фазу до 40 кОм/фазу з кроком 0,1 кОм/фазу між «фазою» і «землею». Імітація ємкостей ізоляції: від 0,05 мкФ/фазу до 1,0 мкФ/фазу виконується з кроком зміни 0,05 мкФ/фазу.

Експериментальні дослідження виконані в умовах, що регламентовані ГОСТ 22929-78 [1] (максимальна сумарна ємність ізоляції мережі 1,0 мкФ/фазу; максимальна ємність ізоляції комутуємого приєднання, 0,15 мкФ/фазу). У ході досліджень виконувалася контакторна комутація відгалуження мережі при різних опорах ізоляції відповідних приєднань і аналізувався характер перехідних процесів.

У мережі напруги 660 В із загальною ємністю ізоляції кабелів 1,0 мкФ/фазу і ємністю ізоляції кабелю одного приєднання від 0,16 мкФ/фазу до 0,25 мкФ/фазу зафіксоване формування апаратами АЗУР-1 і АЗУР-4 короткочасних імпульсів на відключення автоматичного вимикача при контакторних комутаціях силового ланцюга споживача (рис. 1.12). У деяких випадках зафіксовані відключення автоматичного вимикача SF мережі в результаті формування короткочасних команд АЗ достатнього терміну існування для відпрацювання функції захисного відключення АВ КТП.

При виконанні контакторної комутації в мережі напруги 660В з ємністю ізоляції одного приєднання щодо землі від 0,25 мкФ/фазу до 0,4 мкФ/фазу (сумарна ємність ізоляції мережі ділянки 1,0 мкФ/фазу) зафіксовані стійкі хибні спрацьовування АЗ від витоків струму на землю (рис. 1.13; рис.1.14, табл. 1.1).



Рисунки 1.12 - Осцилограми параметрів у контрольованих точках ($C_C = 0,2$ мкФ/фазу, $R_b = 32$ кОм/фазу): u_A , u_B , u_C - напруга фаз А, В, С; $U_{zm.n.}$ - напруга зсуву нейтралі; $U_{p.e.1}$ - напруга на реагуючому елементі АЗУР (1-й вимірювальний канал); U_{on1} - опорна напруга 1-го вимірювального каналу АЗУР; $U_{p.e.2}$ - напруга на реагуючому елементі АЗУР (2-й вимірювальний канал); U_{on2} - опорна напруга 2-го вимірювального каналу АЗУР; U_k - напруга виходу компаратора АЗУР; U_{AB} - напруга датчика спрацьовування автоматичного вимикача мережі

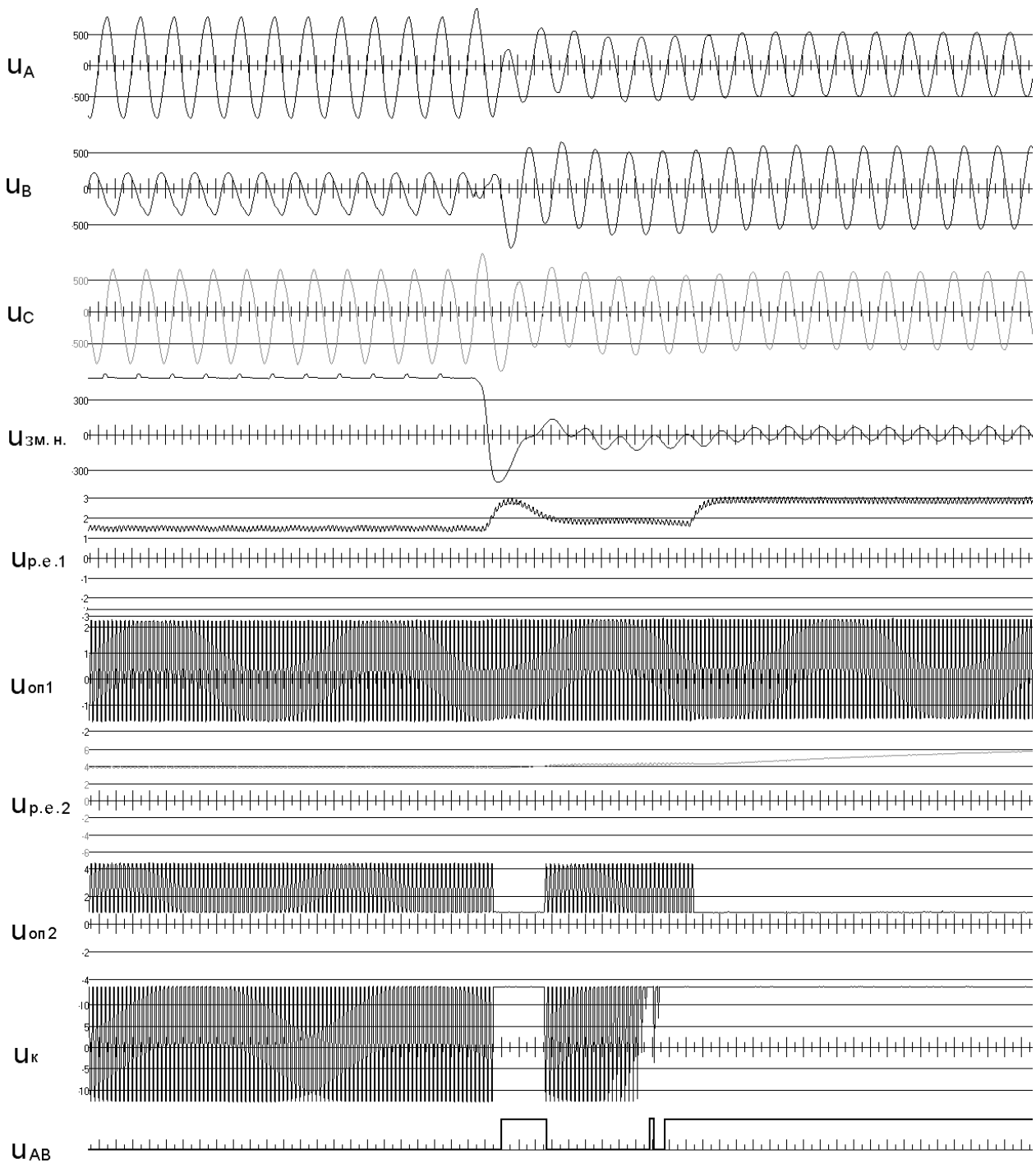


Рисунок 1.13 - Осцилограми параметрів у контрольованих точках ($C_C = 0,25$ мкФ/фазу, $R_B = 32$ кОм/фазу): u_A , u_B , u_C - напруга фаз А, В, С; $U_{з.н.}$ - напруга зсуву нейтралі; $U_{р.е.1}$ - напруга на реагуючому елементі АЗУР (1-й вимірювальний канал); $U_{он1}$ - опорна напруга 1-го вимірювального каналу АЗУР; $U_{р.е.2}$ - напруга на реагуючому елементі АЗУР (2-й вимірювальний канал); $U_{он2}$ - опорна напруга 2-го вимірювального каналу АЗУР; U_K - напруга виходу компаратора АЗУР; U_{AB} - напруга датчика спрацьовування автоматичного вимикача мережі

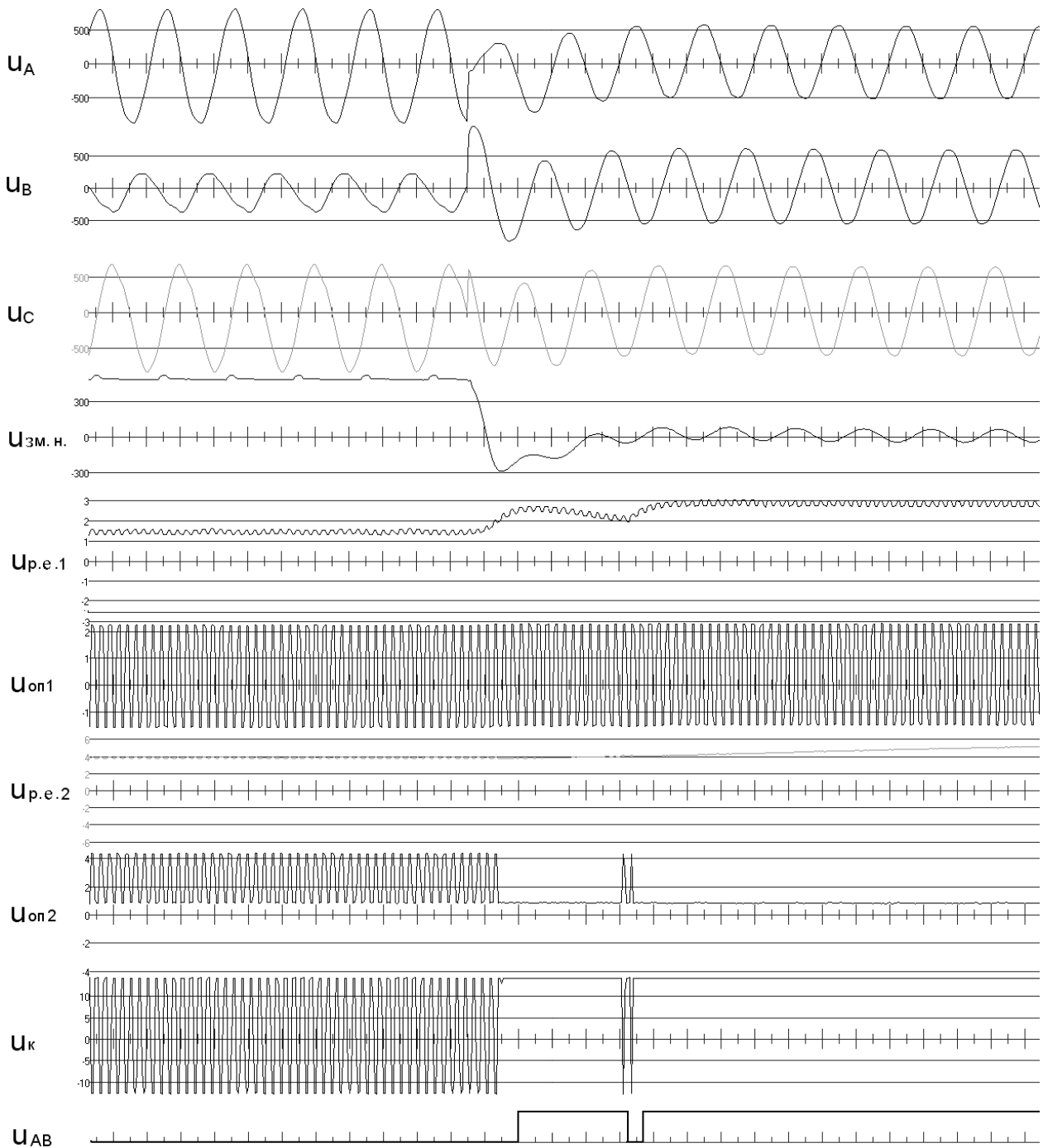


Рисунок 1.14 - Осцилограми параметрів у контрольованих точках ($C_C = 0,4$ мкФ/фазу, $R_B = 32$ кОм/фазу): u_A , u_B , u_C - напруга фаз А, В, С; $U_{зм.н.}$ - напруга зсуву нейтралі; $U_{p.e.1}$ - напруга на реагуючому елементі АЗУР (1-й вимірювальний канал); U_{on1} - опорна напруга 1-го вимірювального каналу АЗУР; $U_{p.e.2}$ - напруга на реагуючому елементі АЗУР (2-й вимірювальний канал); U_{on2} - опорна напруга 2-го вимірювального каналу АЗУР; U_K - напруга виходу компаратора АЗУР; U_{AB} - напруга датчика спрацьовування автоматичного вимикача мережі

Таблиця 1.1

Результати експериментів із визначення факту хибного спрацьовування апаратів АЗУР-1 і АЗУР-4 при комутації відгалуження мережі

Параметри мережі		Тривалість імпульсу на реагуючому елементі АЗУР-1 (факт спрацьовування АВ)	Тривалість імпульсу на реагуючому елементі АЗУР-4 (факт спрацьовування АВ)
R_{iz} , кОм/фазу	C_c , мкФ/фазу		
30	0,15	14 мс (відсутнє)	11 мс (відсутнє)
	0,2	спрацьовування	20 мс (відсутнє)
	0,25	спрацьовування	спрацьовування
	0,4	спрацьовування	спрацьовування
32	0,15	17 мс (відсутнє)	8 мс (відсутнє)
	0,2	19 мс (відсутнє)	16 мс (відсутнє)
	0,25	спрацьовування	спрацьовування
	0,4	спрацьовування	спрацьовування
40	0,15	10 мс (відсутнє)	8 мс (відсутнє)
	0,2	14 мс (відсутнє)	9 мс (відсутнє)
	0,25	спрацьовування	
	0,4	спрацьовування	спрацьовування

Аналіз отриманих результатів дозволяє встановити наступне. Зі збільшенням ємності ізоляції мережі вибіркові значення напруги на реагуючому органі АЗ типу АЗУР зростають. Для АЗУР-1 при підвищенні ємності мережі від 0,1 мкФ/фаза до 0,4 мкФ/фаза вибіркове емпіричне математичне очікування амплітуд: струму у реагуючому органі збільшилось до 4,67мА, а для АЗУР-4 – напруги на реагуючому органі - до 1,92В, відповідно, що наближується до параметрів спрацьовування відповідних захисних засобів.

2 АНАЛІЗ ПЕРЕХІДНИХ КОМУТАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ В ШАХТНІЙ ДІЛЬНИЧНІЙ МЕРЕЖІ МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

2.1 Математична модель шахтного дільничного електротехнічного комплексу з урахуванням сукупності факторів

Складність електромагнітних перехідних процесів, що мають місце при функціонуванні електротехнічного комплексу дільниці шахти, обумовлює доцільність використання методів математичного і засобів комп'ютерного моделювання [14], апробованих методів дослідження стану електротехнічних об'єктів [15]. Структура цього комплексу представлена схемою заміщення (рис.2.1) і вміщує наступні елементи: А0 – вторинна обмотка трансформатора КТП і автоматичний вимикач (АВ); А1 – апарат захисту від витоку струму на землю АЗУР-1; А2 – активно-ємнісний опір ізоляції магістрального кабелю; А3; А6 – комутаційні апарати, відповідно, 1-го і 2-го приєднань; А4; А7 – активно-індуктивне навантаження, відповідно 1-го і 2-го приєднань (імітація асинхронних двигунів М1 і М2); А5; А8 – активно-ємнісний опір ізоляції гнучкого кабелю, відповідно, 1-го і 2-го приєднань; А9 – опори землі між заземленими точками схеми [16].

Прийmemo припущення, що магістральний та гнучкі кабелі електротехнічного комплексу представляються трифазними системами активних та ємнісних опорів їхньої ізоляції на землю. Активно-індуктивними опорами силових жил кабелю нехтуємо через їх малі значення. Кожне силове приєднання має бути представлене гнучким кабелем визначеного перетину та довжини, підключеним до вводу АД, параметри якого враховуються трифазною системою активних і індуктивних опорів (відповідно до типу конкретного двигуна).

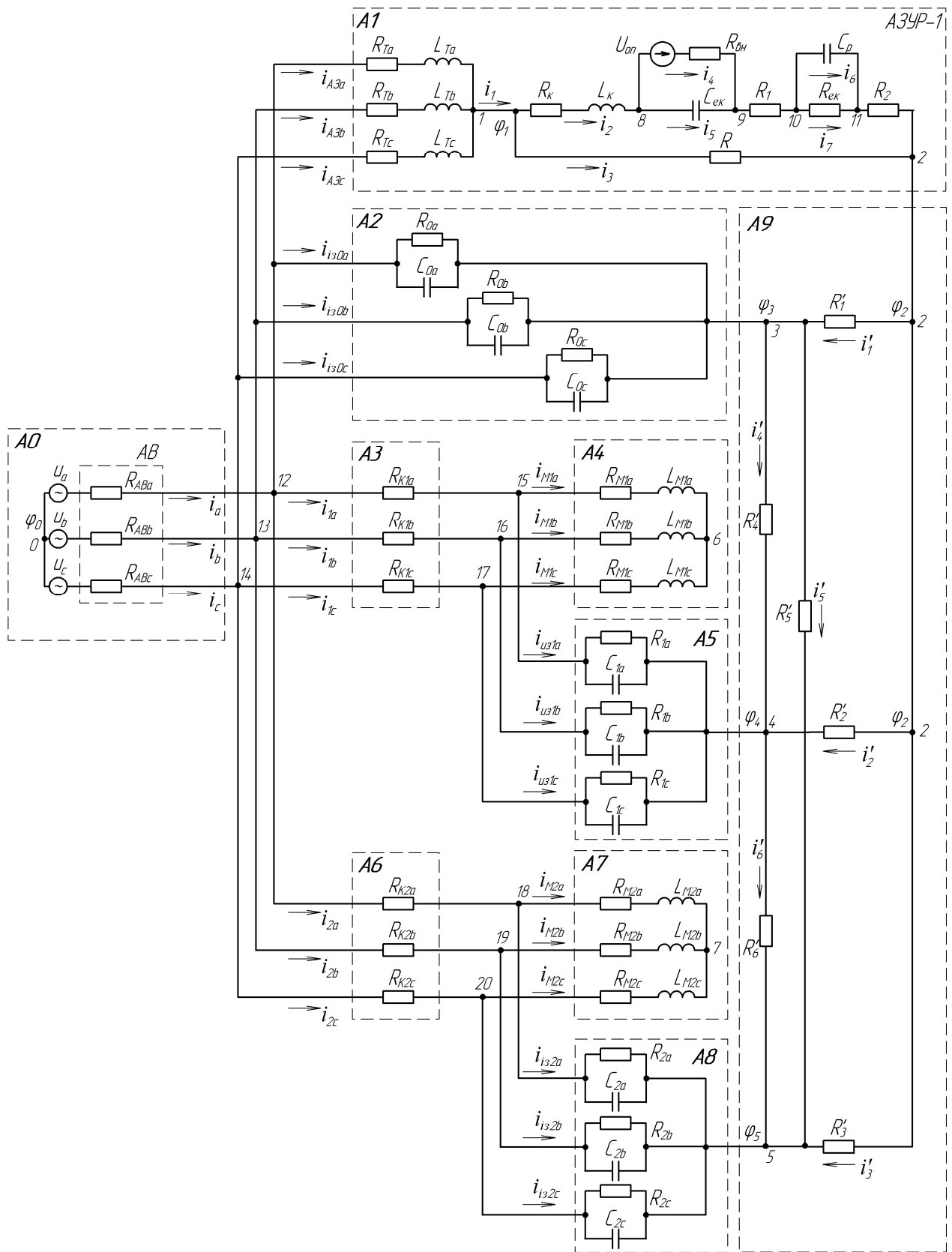


Рисунок 2.1 - Схема заміщення шахтної дільничної електромережі напругою 660В з апаратом захисту від витоків струму на землю АЗУР-1, де $C_{ек}$ - еквівалентна ємність, $R_{ек}$ – еквівалентний опір

В процесі створення математичної моделі такої системи мають бути визначені вузли схеми і прийняті наступні співвідношення між потенціалами відповідних точок (0-7):

$$\varphi_0 > \varphi_1 > \dots > \varphi_7. \quad (2.1)$$

Різниця потенціалів між вузлами 0 - 7 визначається виразами:

$$u_{12} = \varphi_1 - \varphi_2; \quad (2.2)$$

$$u_{01} = \varphi_0 - \varphi_1; \quad (2.3)$$

$$u_{02} = \varphi_0 - \varphi_2 = \varphi_0 - \varphi_1 + \varphi_1 - \varphi_2 = u_{01} + u_{12}; \quad (2.4)$$

$$u_{03} = \varphi_0 - \varphi_3; \quad (2.5)$$

$$u_{04} = \varphi_0 - \varphi_4; \quad (2.6)$$

$$u_{05} = \varphi_0 - \varphi_5. \quad (2.7)$$

$$u_{06} = \varphi_0 - \varphi_6; \quad (2.8)$$

$$u_{07} = \varphi_0 - \varphi_7; \quad (2.9)$$

$$u_{23} = \varphi_2 - \varphi_3 = i'_1 R'_1 = \varphi_0 - \varphi_3 + \varphi_2 - \varphi_0 = u_{03} - u_{02}; \quad (2.10)$$

$$u_{24} = \varphi_2 - \varphi_4 = i'_2 R'_2 = \varphi_0 - \varphi_4 + \varphi_2 - \varphi_0 = u_{04} - u_{02}; \quad (2.11)$$

$$u_{25} = \varphi_2 - \varphi_5 = i'_3 R'_3 = \varphi_0 - \varphi_5 + \varphi_2 - \varphi_0 = u_{05} - u_{02}; \quad (2.12)$$

$$u_{34} = \varphi_3 - \varphi_4 = i'_4 R'_4 = \varphi_0 - \varphi_4 + \varphi_3 - \varphi_0 = u_{04} - u_{03}; \quad (2.13)$$

$$u_{35} = \varphi_3 - \varphi_5 = i'_5 R'_5 = \varphi_0 - \varphi_5 + \varphi_3 - \varphi_0 = u_{05} - u_{03}, \quad (2.14)$$

де $R'_1 - R'_5$ - опори землі між заземленими вузлами схеми.

Струми, що протікають у землі між вузлами 2-5, відшукаємо зі співвідношень (2.10)-(2.14):

$$i'_1 = \frac{u_{03} - u_{02}}{R'_1}; \quad (2.15)$$

$$i'_2 = \frac{u_{04} - u_{02}}{R'_2}; \quad (2.16)$$

$$i'_3 = \frac{u_{05} - u_{02}}{R'_3}; \quad (2.17)$$

$$i'_4 = \frac{u_{04} - u_{03}}{R'_4}; \quad (2.18)$$

$$i'_5 = \frac{u_{05} - u_{03}}{R'_5}; \quad (2.19)$$

$$i'_6 = \frac{u_{05} - u_{04}}{R'_6}. \quad (2.20)$$

Структурна схема комп'ютерної моделі контуру «земля», що реалізує залежності (2.15)-(2.20), наведена на рис. 2.2. Числові значення параметрів елементів шахтної електромережі, що передбачені в даній і наступних моделях, наведені табл. Б.1 додатку Б.

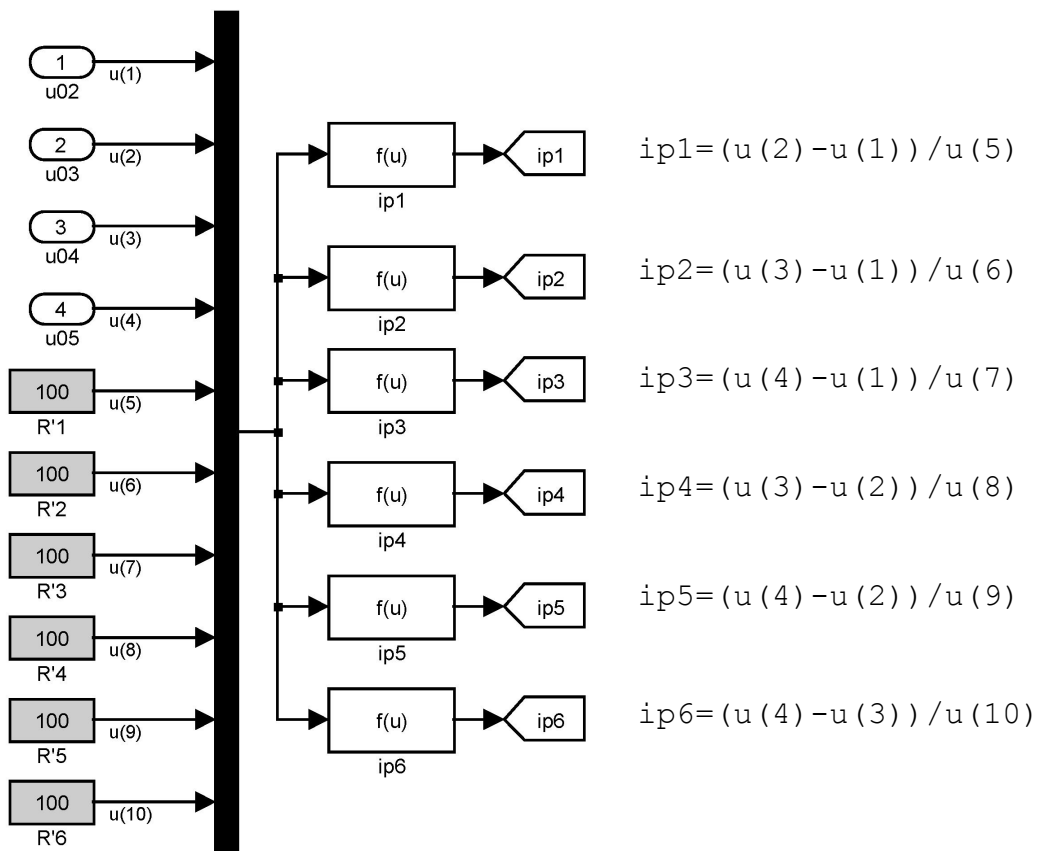


Рисунок 2.2 - Структурна схема комп'ютерної моделі контуру «земля» (блок А9)

Залежності згідно першого закону Кірхгофа, що встановлюють співвідношення між струмами у вузлах 0 - 20 мережі, наведені нижче:

$$\text{Вузол } 0 \quad i_a + i_b + i_c = 0; \quad (2.21)$$

$$\text{Вузол } 1 \quad i_{A3a} + i_{A3b} + i_{A3c} = i_1 = i_2 + i_3; \quad (2.22)$$

$$\text{Вузол } 2 \quad i_1 = i'_1 + i'_2 + i'_3; \quad (2.23)$$

$$\text{Вузол } 3 \quad i_{i30a} + i_{i30b} + i_{i30c} + i'_1 = i'_4 + i'_5; \quad (2.24)$$

$$\text{Вузол } 4 \quad i_{i31a} + i_{i31b} + i_{i31c} + i'_2 + i'_4 = i'_6; \quad (2.25)$$

$$\text{Вузол } 5 \quad i_{i32a} + i_{i32b} + i_{i32c} + i'_3 + i'_6 + i'_5 = 0; \quad (2.26)$$

$$\text{Вузол } 6 \quad i_{M1a} + i_{M1b} + i_{M1c} = 0; \quad (2.27)$$

$$\text{Вузол } 7 \quad i_{M2a} + i_{M2b} + i_{M2c} = 0; \quad (2.28)$$

$$\text{Вузол } 8, 9 \quad i_2 = i_4 + i_5; \quad (2.29)$$

$$\text{Вузол } 10, 11 \quad i_2 = i_6 + i_7; \quad (2.30)$$

$$\text{Вузол } 12 \quad i_a = i_{A3a} + i_{i30a} + i_{1a} + i_{2a}; \quad (2.31)$$

$$\text{Вузол } 13 \quad i_b = i_{A3b} + i_{i30b} + i_{1b} + i_{2b}; \quad (2.32)$$

$$\text{Вузол } 14 \quad i_c = i_{A3c} + i_{i30c} + i_{1c} + i_{2c}; \quad (2.33)$$

$$\text{Вузол } 15 \quad i_{1a} = i_{M1a} + i_{i31a}; \quad (2.34)$$

$$\text{Вузол } 16 \quad i_{1b} = i_{M1b} + i_{i31b}; \quad (2.35)$$

$$\text{Вузол } 17 \quad i_{1c} = i_{M1c} + i_{i31c}; \quad (2.36)$$

$$\text{Вузол } 18 \quad i_{2a} = i_{M2a} + i_{i32a}; \quad (2.37)$$

$$\text{Вузол } 19 \quad i_{2b} = i_{M2b} + i_{i32b}; \quad (2.38)$$

$$\text{Вузол } 20 \quad i_{2c} = i_{M2c} + i_{i32c}. \quad (2.39)$$

Із залежностей (2.22), (2.24), (2.25), (2.26) виразимо миттєві значення струмів по фазі С:

$$i_{A3c} = i_1 - i_{A3a} - i_{A3b} = (i'_1 + i'_2 + i'_3) - i_{A3a} - i_{A3b}; \quad (2.40)$$

$$i_{i30c} = (-i'_1 + i'_4 + i'_5) - i_{i30a} - i_{i30b}; \quad (2.41)$$

$$i_{i31c} = (-i'_2 - i'_4 + i'_6) - i_{i31a} - i_{i31b}; \quad (2.42)$$

$$i_{i32c} = (-i'_3 - i'_5 - i'_6) - i_{i32a} - i_{i32b}. \quad (2.43)$$

З метою визначення струму у фазах дроселя приєднання апарата захисту, відповідно до другого закону Кірхгофа, визначимо падіння напруги u_{01} між вузлами 0 і 1:

$$\begin{cases} u_{01} = -u_a + u_{ABa} + u_{Ta}; \\ u_{01} = -u_b + u_{ABb} + u_{Tb}; \\ u_{01} = -u_c + u_{ABc} + u_{Tc}, \end{cases} \quad (2.44)$$

де u_{Ta} , u_{Tb} , u_{Tc} - напруга на фазах дроселя приєднання АЗУР-1; u_a , u_b , u_c - фазні напруги джерела живлення; u_{ABa} , u_{ABb} , u_{ABc} - напруги на силових ланцюгах автоматичного вимикача.

Виразимо u_{Ta} і u_{Tb} з перших двох рівнянь системи (2.44):

$$\begin{cases} u_{Ta} = (u_a - u_{ABa}) + u_{01}; \\ u_{Tb} = (u_b - u_{ABb}) + u_{01}; \\ u_{01} = -u_c + u_{ABc} + u_{Tc}. \end{cases} \quad (2.45)$$

Миттєві значення u_{Ta} , u_{Tb} , u_{Tc} можуть бути виражені через параметри дроселя приєднання АЗУР-1 до мережі:

$$\begin{cases} u_{Ta} = i_{A3a} R_{Ta} + L_{Ta} \frac{di_{A3a}}{dt}; \\ u_{Tb} = i_{A3b} R_{Tb} + L_{Tb} \frac{di_{A3b}}{dt}; \\ u_{Tc} = i_{A3c} R_{Tc} + L_{Tc} \frac{di_{A3c}}{dt}, \end{cases} \quad (2.46)$$

звідки можна визначити миттєві значення струмів i_{A3a} , i_{A3b} у фазах А і В дроселя приєднання апарата захисту від витоків струму на землю:

$$\begin{cases} \frac{di_{A3a}}{dt} = \frac{u_{Ta} - i_{A3a}R_{Ta}}{L_{Ta}}, \\ \frac{di_{A3b}}{dt} = \frac{u_{Tb} - i_{A3b}R_{Tb}}{L_{Tb}}, \end{cases} \quad (2.47)$$

$$\begin{cases} i_{A3a} = \int \frac{u_{Ta} - i_{A3a}R_{Ta}}{L_{Ta}} dt + i_{A3a}(0); \\ i_{A3b} = \int \frac{u_{Tb} - i_{A3b}R_{Tb}}{L_{Tb}} dt + i_{A3b}(0). \end{cases} \quad (2.48)$$

Миттєве значення струму у фазі С дроселя i_{A3c} визначається співвідношенням (2.40). На вхід даної підсистеми подаються сигнали від підсистеми, що містить модель вторинної обмотки трансформатора дільничної КТП та автоматичний вимикач. Напруги на силових ланцюгах фаз автоматичного вимикача u_{ABa} , u_{ABb} , u_{ABc} обчислюються як добуток струму відповідної фази (i_a , i_b , i_c) на опір між контактами контактора (R_{ABa} , R_{ABb} , R_{ABc}):

$$u_{ABa} = i_a \cdot R_{ABa}; \quad u_{ABb} = i_b \cdot R_{ABb}; \quad u_{ABc} = i_c \cdot R_{ABc}. \quad (2.49)$$

З метою створення математичної моделі вимірювальної частини апарата захисту від витоків струму на землю АЗУР-1, має бути визначена напруга між вузлами 1 і 2 схеми заміщення (рис. 2.1):

$$u_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 = i_2(R_1 + R_2 + R_K) + L_K \frac{di_2}{dt} + u'_1 + u'_2, \quad (2.50)$$

де u'_1 - напруги між вузлами 8 і 9 схеми заміщення; u'_2 - напруги між вузлами 10 і 11 схеми заміщення.

Струм i_2 визначається за першим законом Кірхгофа для вузла 1:

$$i_2 = i_1 - i_3. \quad (2.51)$$

Миттєві значення струму i_3 визначаються відповідно до закону Ома:

$$i_3 = \frac{u_{12}}{R}. \quad (2.52)$$

Тоді струм i_2 можна виразити, як:

$$i_2 = i_1 - \frac{u_{12}}{R}. \quad (2.53)$$

Напруга u'_1 між вузлами 8 і 9 знаходиться за формулою:

$$u'_1 = i_4 R_{\text{вн}} - U_{\text{он}}, \quad (2.54)$$

де $U_{\text{он}}$ - постійна опорна напруга.

У вузлах 8 і 9 співвідношення струмів є наступним:

$$i_2 = i_4 + i_5. \quad (2.55)$$

Струм i_5 через ємність $C_{\text{ек}}$ становить:

$$i_5 = C_{\text{ек}} \frac{du'_1}{dt}. \quad (2.56)$$

Із співвідношення (2.55) струм i_4 дорівнює:

$$i_4 = i_2 - i_5 = i_2 - C_{\text{ек}} \frac{du'_1}{dt}. \quad (2.57)$$

З урахуванням (2.57) з (2.54) маємо:

$$u'_1 = R_{\text{вн}} \left(i_2 - C_{\text{ек}} \frac{du'_1}{dt} \right) - U_{\text{он}}. \quad (2.58)$$

Після зображення останнього диференціального рівняння у формі Коші та інтегрування його за часом, отримаємо:

$$u'_1 = \int \frac{R_{\text{вн}} i_2 - U_{\text{он}} - u'_1}{C_{\text{ек}} R_{\text{вн}}} dt + u'_1(0). \quad (2.59)$$

Напруга між вузлами 10 і 11 u'_2 визначається на основі закону Ома:

$$u'_2 = R_{\text{ек}} i_7. \quad (2.60)$$

Струм i_6 , що протікає через ємність C_p , визначається з виразу:

$$i_6 = C_p \frac{du'_2}{dt}. \quad (2.61)$$

У вузлах 10 і 11 виконується наступне співвідношення для струмів:

$$i_2 = i_6 + i_7, \quad (2.62)$$

звідки, з урахуванням (2.61), струм i_7 дорівнює:

$$i_7 = i_2 - i_6 = i_2 - C_p \frac{du'_2}{dt}. \quad (2.63)$$

Тоді з (2.60) з урахуванням (2.63) напруга u'_2 становить:

$$u'_2 = R_{ек} (i_2 - C_p \frac{du'_2}{dt}). \quad (2.64)$$

Проінтегруємо останнє диференціальне рівняння:

$$u'_2 = \int \frac{i_2 - u'_2 / R_{ек}}{C_p} dt + u'_2(0). \quad (2.65)$$

Вирази (2.50), (2.53), (2.59), (2.65) являють собою математичну модель вимірювальної частини АЗУР-1.

З метою створення математичного опису параметрів ізоляції магістрального кабелю відносно землі має бути визначена різниця потенціалів u_{03} між вузлами 0 і 3 схеми (рис. 2.1):

$$\begin{cases} u_{03} = -u_a + u_{ABa} + u_{0a}; \\ u_{03} = -u_b + u_{ABb} + u_{0b}; \\ u_{03} = -u_c + u_{ABc} + u_{0c}, \end{cases} \quad (2.66)$$

де u_{0a} - напруга на паралельно приєднаних активному опорі і ємності ізоляції (відносно землі) магістрального кабелю по фазі А, тобто напруга між вузлами 12 і 3 схеми заміщення (рис. 2.1); u_{0b} , u_{0c} - аналогічні величини для фаз В і С.

З перших двох залежностей системи (2.66) мають бути визначені величини u_{0a} і u_{0b} :

$$\begin{cases} u_{0a} = (u_a - u_{ABa}) + u_{03}; \\ u_{0b} = (u_b - u_{ABb}) + u_{03}; \\ u_{03} = -u_c + u_{ABc} + u_{0c}. \end{cases} \quad (2.67)$$

Струм i_{i30a} через активно-ємнісні опори ізоляції фази А магістрального кабелю відносно землі складається з активної i'_{i30a} і ємнісної i''_{i30a} складових:

$$i_{i30a} = i'_{i30a} + i''_{i30a}, \quad (2.68)$$

які визначаються наступними виразами:

$$i'_{i30a} = \frac{u_{0a}}{R_{0a}}, \quad (2.69)$$

$$i''_{i30a} = C_{0a} \frac{du_{0a}}{dt}. \quad (2.70)$$

Тоді загальний (спільний) струм фази А i_{i30a} , і, аналогічно, струм фази В i_{i30b} , визначаються диференціальними рівняннями першого порядку:

$$\begin{cases} i_{i30a} = \frac{u_{0a}}{R_{0a}} + C_{0a} \frac{du_{0a}}{dt}; \\ i_{i30b} = \frac{u_{0b}}{R_{0b}} + C_{0b} \frac{du_{0b}}{dt}. \end{cases} \quad (2.71)$$

Миттєві значення струму i_{i30c} визначаються із співвідношення (2.41).

Структурна схема комп'ютерної моделі ізоляції магістрального кабелю наведена у додатку Б, рис. 4.

Для розрахунку струмів, що протікають у фазах приєднаного до мережі двигуна першого відгалуження, що представлений активно-індуктивним навантаженням R_{M1} , L_{M1} , визначимо різницю потенціалів між вузлами 0 і 6:

$$\begin{cases} u_{06} = -u_a + u_{ABa} + u_{K1a} + u_{M1a}; \\ u_{06} = -u_b + u_{ABb} + u_{K1b} + u_{M1b}; \\ u_{06} = -u_c + u_{ABc} + u_{K1c} + u_{M1c}, \end{cases} \quad (2.72)$$

де u_{M1a} - напруга на активно-індуктивному опорі R_{M1a} , L_{M1a} фази А двигуна першого відгалуження; u_{M1b} , u_{M1c} - аналогічні параметри для фаз В и С; u_{K1a} , u_{K1b} , u_{K1c} - напруги на фазах комутаційного апарата першого відгалуження (приєднання).

З перших двох рівнянь системи (2.72) виразимо напруги на фазах двигуна:

$$\begin{cases} u_{M1a} = (u_a - u_{ABa} - u_{K1a}) + u_{06}; \\ u_{M1b} = (u_b - u_{ABb} - u_{K1b}) + u_{06}; \\ u_{06} = -u_c + u_{ABc} + u_{K1c} + u_{M1c}. \end{cases} \quad (2.73)$$

Напруга u_{M1a} визначається диференціальним рівнянням:

$$u_{M1a} = i_{M1a} R_{M1a} + L_{M1a} \frac{di_{M1a}}{dt}, \quad (2.74)$$

звідки, інтегруючи, можна знайти значення струму i_{M1a} і, аналогічно, i_{M1b} :

$$\begin{cases} i_{M1a} = \int \frac{u_{M1a} - i_{M1a} R_{M1a}}{L_{M1a}} dt + i_{M1a}(0); \\ i_{M1b} = \int \frac{u_{M1b} - i_{M1b} R_{M1b}}{L_{M1b}} dt + i_{M1b}(0). \end{cases} \quad (2.75)$$

Значення струму i_{M1c} визначаються відповідно до залежності (2.27).

Структурна схема комп'ютерної моделі АД, що складена відповідно до виразів (2.73), (2.75) і (2.27), при прийнятих припущеннях наведена у додатку Б, рис. 5.

З метою розрахунку струмів в активно-ємнісному опорі ізоляції гнучкого кабелю першого відгалуження має бути складена система рівнянь для визначення різниці потенціалів між вузлами 0 і 4:

$$\begin{cases} u_{04} = -u_a + u_{ABa} + u_{K1a} + u_{1a}; \\ u_{04} = -u_b + u_{ABb} + u_{K1b} + u_{1b}; \\ u_{04} = -u_c + u_{ABc} + u_{K1c} + u_{1c}, \end{cases} \quad (2.76)$$

де u_{1a} - напруга на паралельно приєднаних активному опорі R_{1a} і ємності C_{1a} ізоляції фази А гнучкого кабелю першого відгалуження електротехнічного комплексу; u_{1b} , u_{1c} - аналогічні параметри для фаз В и С.

Приведемо систему (2.76) до наступного виду:

$$\begin{cases} u_{1a} = (u_a - u_{ABa} - u_{K1a}) + u_{04}; \\ u_{1b} = (u_b - u_{ABb} - u_{K1b}) + u_{04}; \\ u_{04} = -u_c + u_{ABc} + u_{K1c} + u_{1c}. \end{cases} \quad (2.77)$$

Струми витоку на землю через ізоляцію фаз А и В гнучкого кабелю першого відгалуження визначаються виразами:

$$\begin{cases} i_{i31a} = \frac{u_{1a}}{R_{1a}} + C_{1a} \frac{du_{1a}}{dt}; \\ i_{i31b} = \frac{u_{1b}}{R_{1b}} + C_{1b} \frac{du_{1b}}{dt}. \end{cases} \quad (2.78)$$

Струм витоку i_{i31c} визначається за першим законом Кірхгофа зі співвідношення (2.42). Залежності (2.77), (2.78) являють собою математичну модель ізоляції гнучкого кабелю, структурна схема якої наведена у додатку Б, рис. 6. Струм витоку на землю через ізоляцію фази С гнучкого кабелю першого відгалуження визначається виразом (2.42).

Напруга u_{1c} на паралельному приєднанні R_{1c} та C_{1c} визначається в такий спосіб:

$$u_{1c} = \int \frac{i_{i31c} - u_{1c}/R_{1c}}{C_{1c}} dt + u_{1c}(0). \quad (2.79)$$

Математичний опис другого відгалуження системи складається аналогічно першому.

Математична модель апарата захисту від витоків струму на землю АЗУР-4 має бути складена відповідно до наведеної на рис. 2.3 схеми заміщення. Падіння напруги між вузлами А і F визначається диференціальним рівнянням:

$$u_{AF} = R_K i_K + L_K \frac{di_2}{dt} + u_{BF} \quad (2.80)$$

Струм i_2 визначається відповідно до першого закону Кірхгофа:

$$i_2 = i_1 - i_3, \quad (2.81)$$

де струм i_3 визначається за законом Ома:

$$i_3 = \frac{u_{12}}{R_1}. \quad (2.82)$$

Падіння напруги u_{BF} обчислюється відповідно до рівняння:

$$u_{BF} = \frac{1}{C_p} \int i_{11} dt + u_{BF}(0), \quad (2.83)$$

де

$$i_{11} = i_2 - i_{10}. \quad (2.84)$$

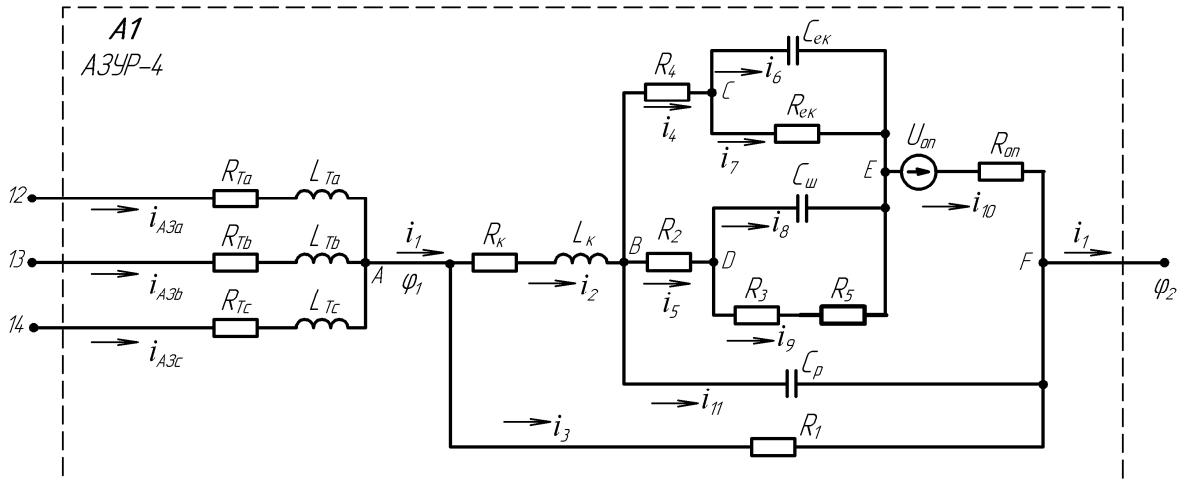


Рисунок 2.3 -Схема заміщення кола оперативного струму апарата АЗУР-4

Поряд з цим, параметр u_{BF} може бути виражений, як:

$$u_{BF} = -U_{on} + i_{10}R_{10} + u_{BE}, \quad (2.85)$$

звідки визначається струм i_{10} :

$$i_{10} = \frac{u_{BF} + U_{on} - u_{BE}}{R_{on}}. \quad (2.86)$$

Падіння напруги u_{BE} має бути визначене відповідно до другого закону Кірхгофа:

$$u_{BE} = i_4R_4 + u_{CE}, \quad (2.87)$$

де u_{CE} визначається відповідно до залежності:

$$u_{CE} = \frac{1}{C_{ek}} \int i_6 dt + u_{CE}(0), \quad (2.88)$$

при чому,

$$i_6 = i_4 - i_7, \quad (2.89)$$

$$i_7 = \frac{u_{CE}}{R_{ek}}, \quad (2.90)$$

$$i_4 = i_{10} - i_5, \quad (2.91)$$

$$i_5 = \frac{u_{BE} - u_{DE}}{R_2}. \quad (2.92)$$

Падіння напруги u_{DE} :

$$u_{DE} = \frac{1}{C_{uu}} \int i_8 dt + u_{DE}(0), \quad (2.93)$$

де

$$i_8 = i_5 - i_9, \quad (2.94)$$

$$i_9 = \frac{u_{DE}}{R_3 + R_5}. \quad (2.95)$$

Падіння напруги на резисторі R_5 :

$$u_{R5} = R_5 i_9. \quad (2.96)$$

Залежності (2.80)-(2.96) являють собою математичну модель кола оперативного струму апарата АЗУР-4, структурна схема якої наведена у додатку Б, рис. 7. Узагальнена структура комп'ютерної моделі електротехнічного комплексу дільниці шахти напругою 660 В з апаратом захисту АЗУР-1 наведена на рис. 2.4. Модель складена з обґрунтованих раніше моделей блоків А0-А9 системи, топологічно повторює вихідну схему заміщення дільничного електротехнічного комплексу (рис. 2.1) і дозволяє: досліджувати стан мережі дільниці в сталих і перехідних режимах, пов'язаних з комутаціями відгалужень; розраховувати: струми у фазах кожного елемента мережі, у тому числі оперативний струм апарата захисту і струм, що протікає через вимірювальний елемент АЗУР1 (напруга на вимірювальному елементі АЗУР4); падіння напруги на елементах системи, а також напруги між нульовою точкою трансформатора КТП та землею.

До властивостей цієї моделі слід віднести також можливість: задавати необхідні значення параметрів елементів системи; характер комутацій силових відгалужень (ідеальна, неодночасна пофазна, керована та ін.), та урахувати випадковий характер варіювання даних параметрів; виявляти момент спрацьовування АЗ; моделювати симетричні і несиметричні режими функціонування дільничного електротехнічного комплексу.

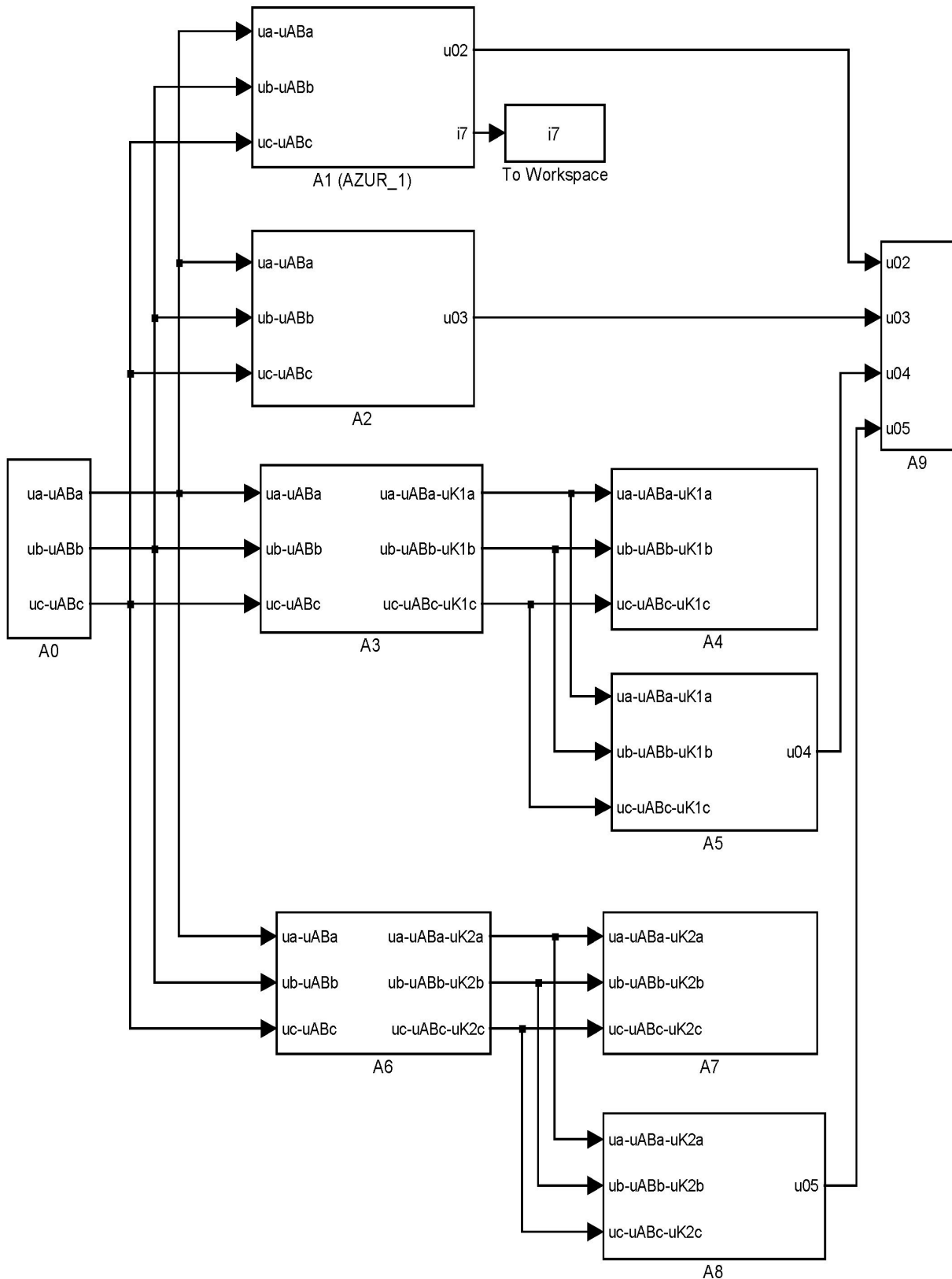


Рисунок 2.4 - Узагальнена структурна схема комп'ютерної моделі електромережі дільниці шахти напругою 660В с апаратом захисту від витоків струму на землю АЗУР-1

2.2 Аналіз функціонування засобів захисного знеструмлення кола витoku струму на землю в умовах виникнення комутаційних перехідних процесів мережі

З використанням обґрунтованої математичної і розробленої відповідно до неї комп'ютерної моделі шахтного дільничного електротехнічного комплексу, схема заміщення якого наведена на рис. 2.1, а параметри в табл. Б.1 додатку Б, отримані діаграми миттєвих значень струмів і напруг різних силових елементів і ланки визначення оперативного параметру АЗ, які дають уявлення про особливості протікання перехідних процесів в системі при комутаціях силових відгалужень.

У сталому режимі роботи величина оперативного струму i_1 , що накладений на мережу апаратом захисту, визначається, головним чином, сукупною величиною активного опору ізоляції R_{i3} фаз системи відносно землі. Зі зменшенням величини R_{i3} оперативний струм підвищується, відповідно збільшується струм i_7 через вимірювальний елемент АЗ. На рис. 2.5 наведені розрахункові діаграми струму i_7 через вимірювальний елемент апарата захисту типу АЗУР-1 для перерахованих у табл. 2.1 значеннях активного опору ізоляції фаз кабелів системи відносно землі.

Як видно з діаграми на рис. 2.5 струм i_7 , що протікає у вимірювальному елементі АЗУР-1, має постійну та змінну складові. Остання обумовлена системою напруг фаз дільничної мережі, прикладених до індуктивного фільтра приєднання АЗ, а постійна складова підтримується джерелом оперативної напруги U_{on} , що входить у схему АЗ. Оскільки індуктивний опір фази фільтра приєднання значно перевищує активний опір, то амплітуда змінної складової є значно меншою величини постійної складової.

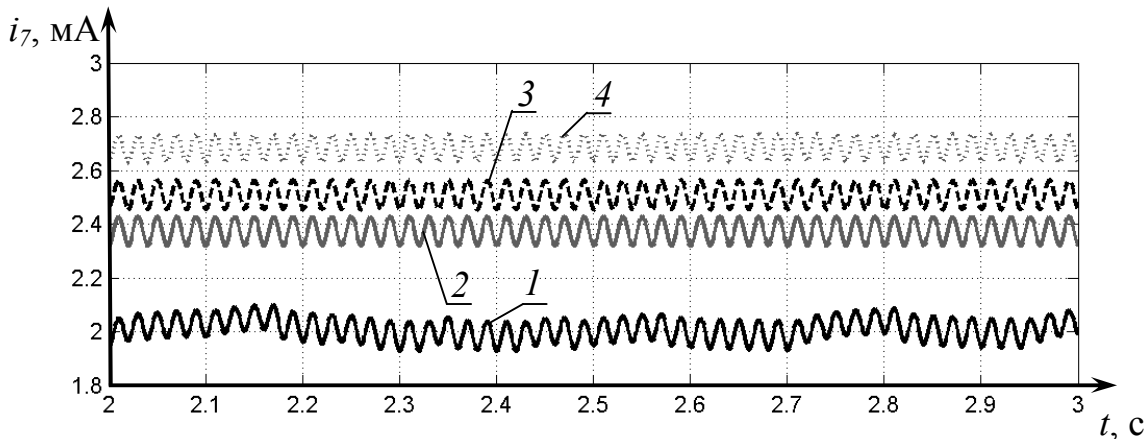


Рисунок 2.5 - Діаграми струмів у вимірювальному елементі АЗУР-1 при різних значеннях активного опору ізоляції кабелів мережі

Таблиця 2.1

Значення активного опору ізоляції фаз кабелів системи (Ом/ фазу) відносно землі, що відповідають кривим 1-4

Кабель	Опір ізоляції по фазам	Номер кривої			
		1	2	3	4
МК	R_{0a}	$1,00 \cdot 10^6$			$0,50 \cdot 10^6$
	R_{0b}	$0,95 \cdot 10^6$			$0,45 \cdot 10^6$
	R_{0c}	$0,90 \cdot 10^6$			$0,55 \cdot 10^6$
ГК1	R_{1a}	$1,00 \cdot 10^6$	$0,50 \cdot 10^6$		
	R_{1b}	$1,10 \cdot 10^6$	$0,55 \cdot 10^6$		
	R_{1c}	$1,20 \cdot 10^6$	$0,60 \cdot 10^6$		
ГК2	R_{2a}	$0,90 \cdot 10^6$		$0,45 \cdot 10^6$	
	R_{2b}	$1,00 \cdot 10^6$		$0,50 \cdot 10^6$	
	R_{2c}	$1,10 \cdot 10^6$		$0,55 \cdot 10^6$	

Розглянемо перехідний процес у системі при відключенні 1-го силового відгалуження в момент t' шляхом розмикання контактів контактора К1, що моделюється стрибкоподібним збільшенням опору фаз зазначеного комутаційного апарата від перехідного опору в замкнутому стані до опору ізоляції між розімкнутими контактами. Приймається припущення про ідеальний характер комутації, тобто (відключення відбувається миттєво по всіх трьох фазах при відсутності електричної дуги). При виконанні цих умов у

момент t' струм у фазах першого відгалуження зменшується до нуля, струм у загальній частині мережі, що являє собою суму струмів 1-го і 2-го відгалужень, зменшується до величини струму відгалуження №2 (рис. 2.6,а-в). Припиняється струм через активно-ємнісний опір ізоляції відносно землі кабелю 1-го відгалуження, що не впливає на величини струмів на землю через опори ізоляції відносно землі інших кабелів (рис. 2.6, д-ж) [17].

У момент комутації має місце перехідний процес, що характеризується істотною зміною величини напруги між нульовою точкою вторинної обмотки живильного трансформатора (вузол 0) і землею. На рис. 2.7, а наведена діаграма зміни напруги u_{03} між вузлами 0 і 3 мережі (рис. 2.1), з якого можна встановити наступне. Напряга u_{03} характеризується наявністю постійної і змінної складових. Постійна складова обумовлена наявністю джерела оперативної напруги U_{on} в схемі апарата захисту, а змінна - несиметрією фаз системи. До моменту t' для заданих параметрів системи постійна складова u_{03} характеризується величиною (-125) В, а амплітуда змінної складової має величину 15 В. У момент t' має місце відключення першого відгалуження, що супроводжується збільшенням напруги u_{03} до 100В, тобто на 220В, після чого протягом 0,05 с напруга u_{03} зменшується до сталого стану. Останнє характеризується декілька більшими значеннями постійної складової (-100) В та амплітуди змінної складової 20В у порівнянні з докомутаційним режимом.

Такий стрибок напруги між нульовою точкою трансформатора КТП і землею пояснюється зміною кута зсуву фаз між векторами напруги та струму системи при комутації, що супроводжується зміною напруги на активно-ємнісних опорах ізоляції невідключної частини мережі. На рис. 2.7, б-д наведені діаграми миттєвих значень напруг $u_{0a} - u_{0c}$ на опорах ізоляції фаз А-С магістрального кабелю відносно землі, на яких простежується перехідний процес у момент t' .

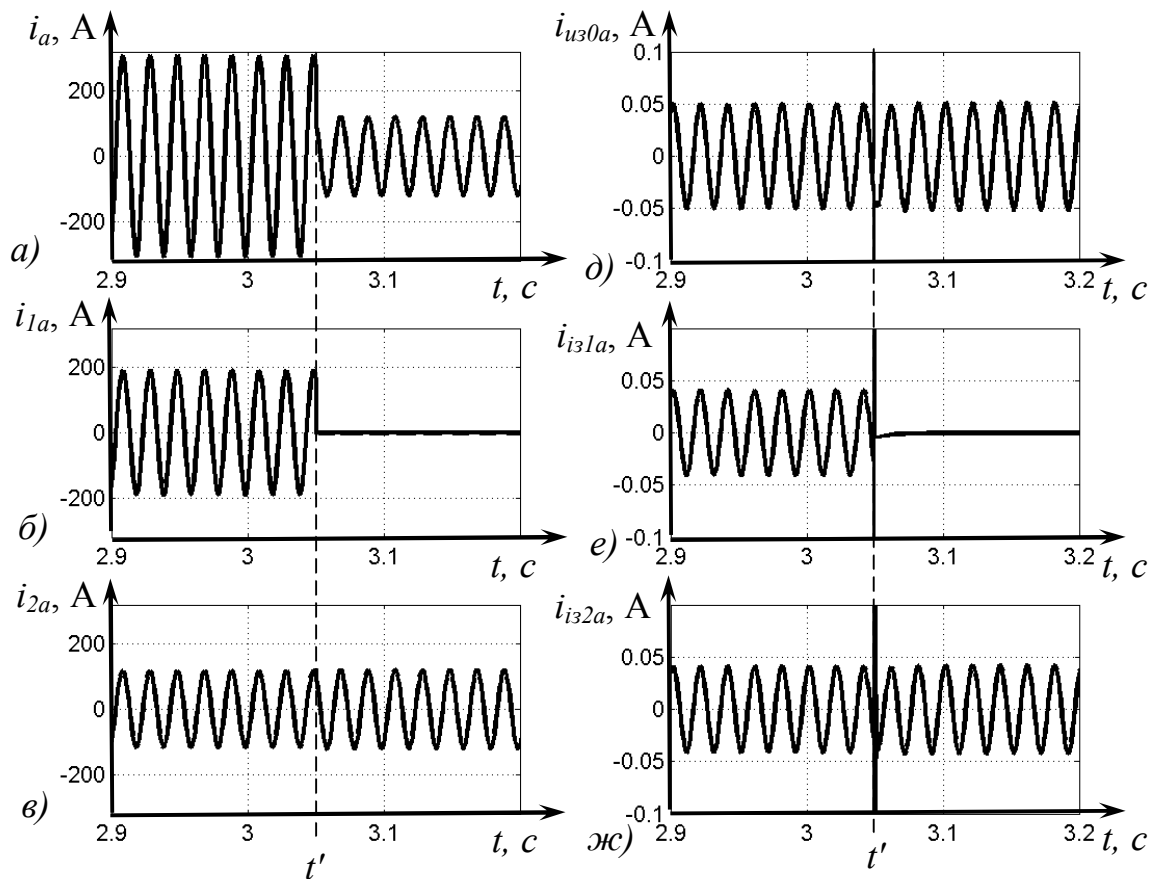


Рисунок 2.6 - Діаграми струмів у фазі А: загальної частини мережі (а), 1-го (б) і 2-го (в) відгалужень, ізоляції відносно землі магістрального кабелю (а), гнучкого кабелю 1-го (е) і 2-го (ж) відгалуження, отримані шляхом моделювання перехідного процесу в системі при відключенні 1-го відгалуження при допущенні про ідеальний характер комутації

Зазначений перехідний процес у системі при відключенні силового відгалуження впливає на струми в контурі «земля» (рис. 2.8). У момент t' у кривих струмів $i'_1 - i'_6$ спостерігається різко виражена перехідна складова. У посткомутаційному сталому режимі з відключенням першого відгалуження струми в опорах ізоляції його гнучкого кабелю стають рівними нулю ($i_{is1a} = i_{is1b} = i_{is1c} = 0$), а залежність (2.25) перетвориться до виду: $i'_6 - i'_2 - i'_4 = 0$. Це приводить до зміни величин струмів $i'_1 - i'_6$.

Короткочасне підвищення напруги між нульовою точкою вторинної обмотки трансформатора КТП та землею впливає на електричні параметри у вимірювальному елементі АЗ, оскільки він є включеним між фазами загальної

частини мережі та землею (на рис. 2.1 – між вузлами 12-14 і 2). Крива струму i_7 , що протікає через вимірювальний елемент АЗУР-1 при відключенні в момент t' першого відгалуження системи, наведена на рис. 2.9. До моменту t' постійна складова струму i_7 характеризувалася величиною 2mA (моделювання проводилося при перерахованих у додатку А, табл. А.1 значеннях параметрів системи), амплітуда змінної складової не перевищувала 0,05mA.

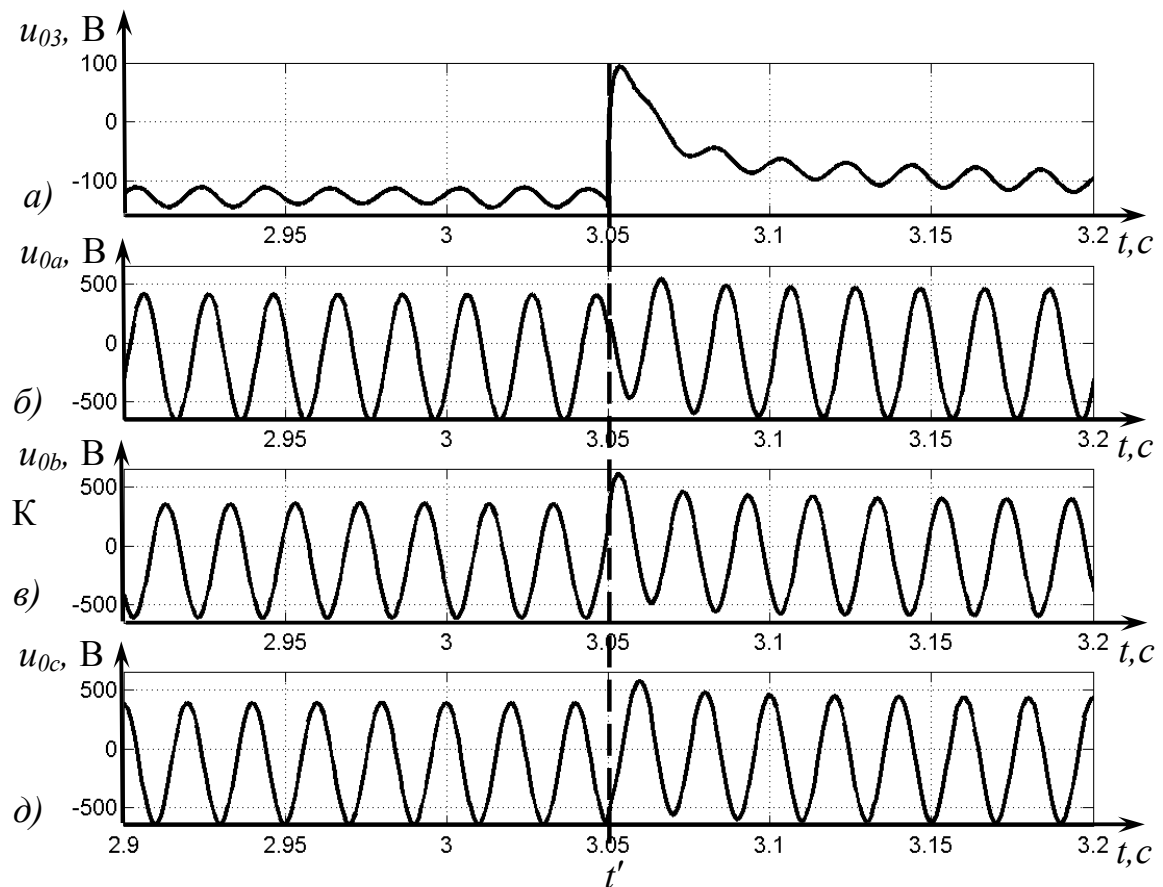


Рис. 2.7 - Діаграма зміни напруги u_{03} між вузлами 0 і 3 мережі (а), миттєві значення напруг $u_{0a} - u_{0c}$ на опорах ізоляції фаз А-С магістрального кабелю відносно землі (б-д)

У момент t' відключення комутаційного апарата першого відгалуження спостерігається стрибкоподібне збільшення струму i_7 до величини уставки спрацьовування (4,3 mA) апарату захисту АЗУР-1 з наступним експонентним

зниженням до величини, обумовленої активним опором ізоляції мережі в посткомутаційному стані.

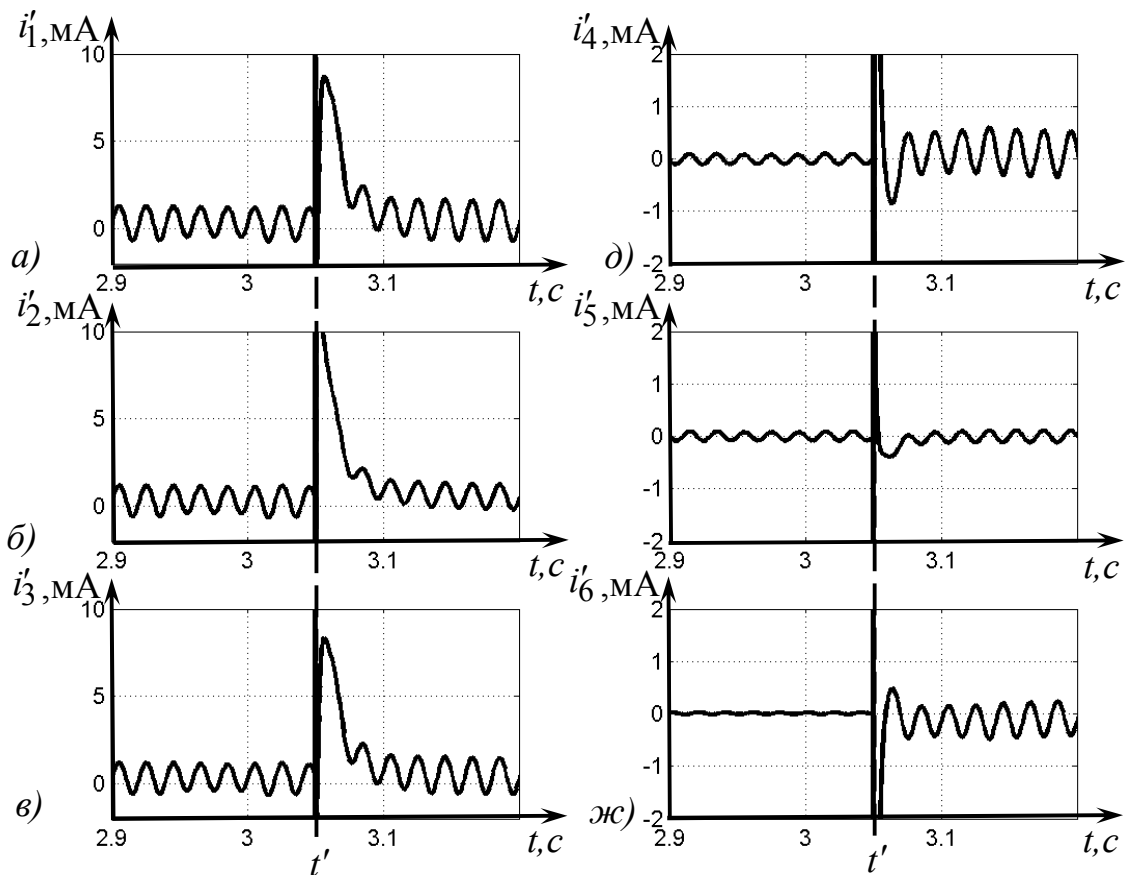


Рисунок 2.8 - Діаграми зміни струмів у контурі «земля», отримані шляхом моделювання перехідного процесу в системі при відключенні 1-го відгалуження і припущенні про ідеальний характер комутації

Таке короткочасне підвищення струму в момент комутації відгалуження мережі спроможне ініціювати хибне спрацьовування апарата захисту від витоків струму на землю.

Припущення про те, що короткочасне підвищення напруги між нульовою точкою і землею в момент комутації обумовлене впливом на змінну складову струму через вимірювальний елемент апарата АЗУР-1 зміною заряду ємностей ізоляції мережі, підтверджується діаграмою на рис. 2.10, що ілюструє криві струму i_7 через вимірювальний елемент АЗУР-1 у двох граничних випадках: 1) при нульовій оперативній напрузі $U_{on} = 0$ і дії тільки трифазної системи напруг

джерела u_a, u_b, u_c ; 2) при $u_a = u_b = u_c = 0$ та дії на мережу тільки оперативної напруги.

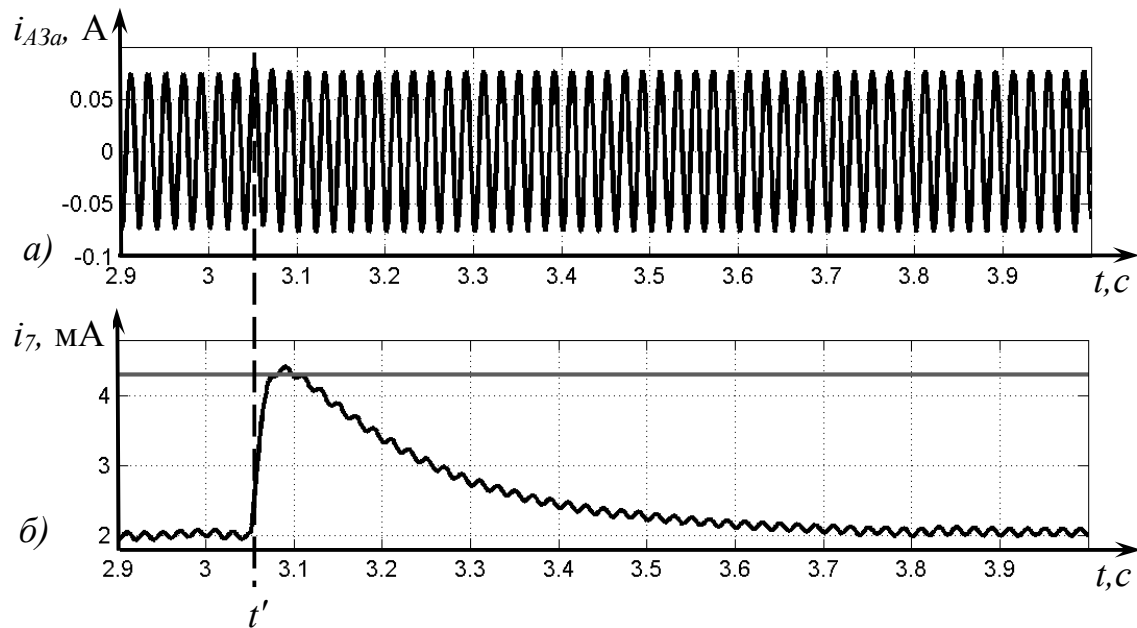


Рисунок 2.9 - Діаграми зміни струмів у фазі А фільтра приєднання (а) і вимірювального кола (б) АЗУР-1, отримані шляхом моделювання перехідного процесу в системі при відключенні 1-го відгалуження при допущенні про ідеальний характер комутації

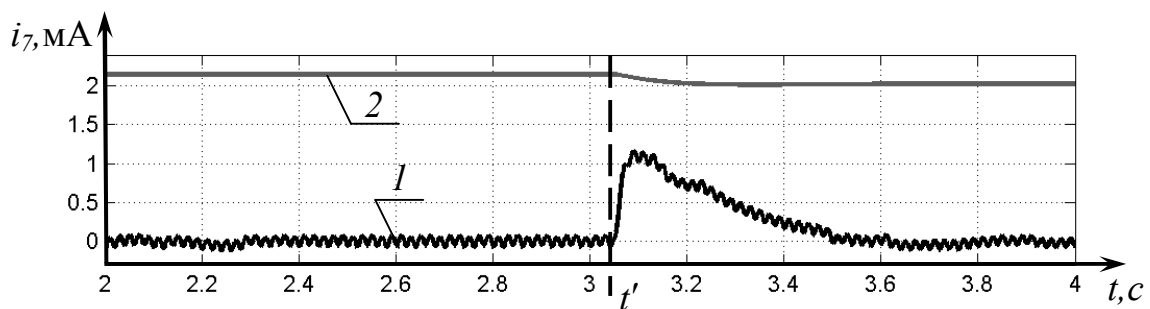


Рисунок 2.10 - Діаграма зміни струму через вимірювальний елемент АЗУР-1 при $U_{on}=0$ (крива 1) і при $u_a = u_b = u_c = 0$ (крива 2), отримані шляхом моделювання перехідного процесу в системі при відключенні 1-го відгалуження при допущенні про ідеальний характер комутації

У першому випадку ($U_{on}=0$) опір джерела оперативної напруги приймається рівним нулю, схема заміщення АЗУР-1 являє собою пасивне коло (рис. 2.1) і через вимірювальний елемент протікає лише змінна складова струму, що підтримується трифазною системою напруги джерела u_a, u_b, u_c . У момент t' спостерігається зростання величини такої складовій до 1mA з наступним експонентним зменшенням (рис. 2.10, крива I). У другому випадку ($u_a = u_b = u_c = 0$) через вимірювальний елемент АЗУР-1 протікає тільки постійна складова струму, що підтримується тільки напругою джерела U_{on} . У момент комутації t' спостерігається незначне аперіодичне зменшення рівня даної складової, обумовлене збільшенням загального активного опору ізоляції мережі при відключенні першого відгалуження.

При застосуванні апарата захисту АЗУР-4 також існує можливість створення умов його хибного спрацьовування при комутації відгалужень. Моделювання функціонування АЗУР-4 проводилося відповідно до обґрунтованої математичної моделі системи (п. 2.1), де схема заміщення АЗУР-1 на рис. 2.1 була замінена схемою заміщення кола оперативного параметра АЗУР-4 (рис. 2.3), параметри якої наведені в табл. 2.1. Відповідна структурна схема комп'ютерної моделі АЗУР-4 наведена у додатку Б, рис. 7.

При моделюванні перехідного процесу в системі у випадку відключення першого відгалуження в момент t' отримана діаграма зміни напруги u_{R5} на реагуючому органі АЗУР-4 (резисторі R_5 в схемі заміщення на рис. 2.9), що наведена на рис. 2.11. Уточнення отриманих результатів має бути досягнуте засобом урахування параметрів існування електричної дуги між полюсами контактора в процесі їхнього розмикання. Приймається припущення про загасання дуги між контактами при проходженні струму через нуль (рис. 2.12, а, б). У цьому випадку, як і під час ідеальної комутації, встановлена наявність стрибкоподібної зміни напруги між нульовою точкою вторинної обмотки трансформатора і землею (у розглянутій реалізації перехідного процесу така

зміна складала 80 В, рис. 2.12, *в*) і відповідний сплеск струму через реагуючий орган апарата АЗУР-1 (до 3,05 мА, рис. 2.12, *д*).

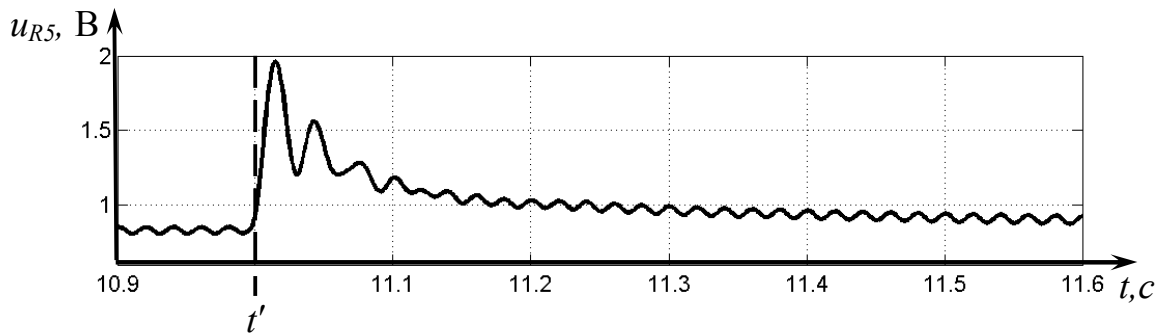


Рисунок 2.11 - Діаграма зміни напруги на вимірювальному елементі АЗУР-1 отримана шляхом моделювання

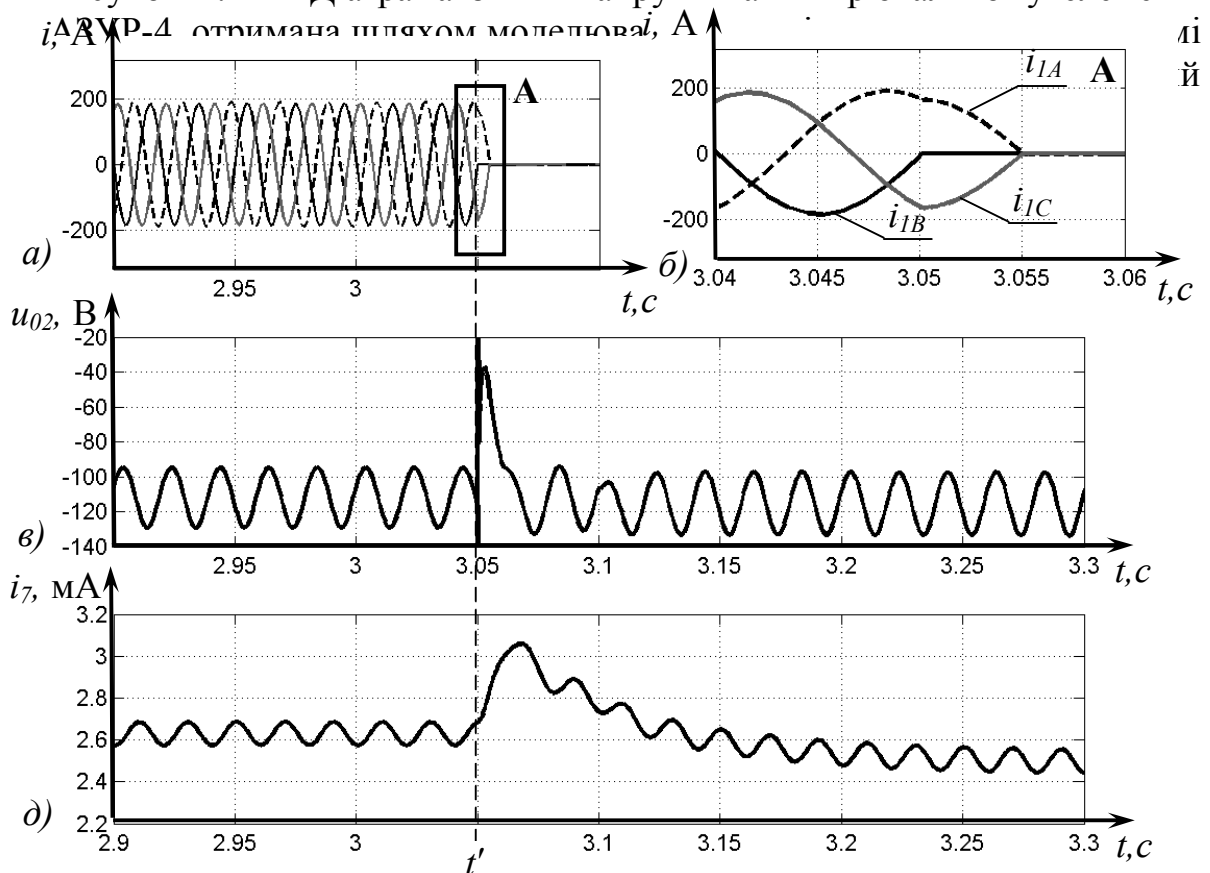


Рисунок 2.12 - Діаграми струму в першому відгалуженні мережі (*а*, *б*), напруги між нульовою точкою вторинної обмотки трансформатора і заземлювачем АЗУР-1 (*в*) і струму через вимірювальний елемент АЗУР-1 (*д*), отримані шляхом моделювання перехідного процесу в системі при відключенні 1-го відгалуження при допущенні про загасання дуги між контактами контактора КМ1 при проходженні струму через нуль

Величина зміни амплітуди напруги зсуву нейтралі системи U_m в процесі відключення відгалуження під час неодноразової пофазної комутації (відповідно

до умов, рис.2.12 б) не залишається постійною за умови зміни параметрів мережі. Комп'ютерним моделюванням був досліджений комплексний вплив на U_m рівня напруги системи (660 В або 1140 В), довжини невідключної ділянки мережі L і потужності дільничної КТП. Узагальнений результат досліджень за умови застосування КТП типів ТСВП-630 і ТСВП-1000 і кабелю марки КГЭШ 3х95 загальною довжиною відключної та невідключної ділянок – 300 м представлений на (рис. 2.13) [14]. Наведені параметри АД навантаження прийняті: $R = 0,2$ Ом; $L = 0,02$ Гн.

Встановлено, що короточасні амплітуди напруг між нейтралю мережі і землею, обумовлені неодноразовністю пофазної комутації контактора пускача перевищують 300В, що стосовно до апаратів захисту від витоків струму на землю серії АЗУР здатне викликати наднормативне перевищення контрольованого параметра в АЗ.

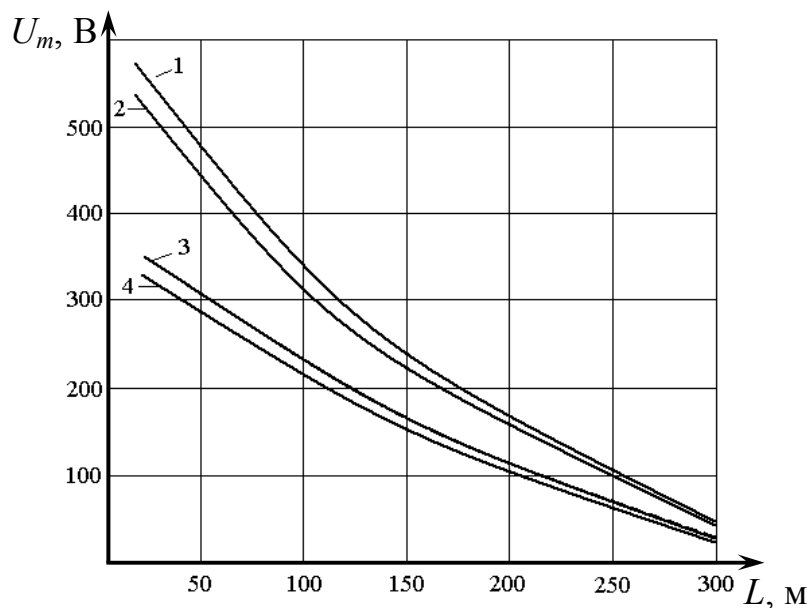


Рисунок 2.13 - Криві, що ілюструють зміну амплітуди напруги зсуву нейтралі U_m у процесі відключення відгалуження при неодноразовності пофазної комутації залежно від довжини L невідключної ділянки мережі: 1 - $U_{л}=1140$ В, ТСВП-1000; 2 - $U_{л}=1140$ В, ТСВП-630; 3 - $U_{л}=660$ В, ТСВП-1000; 4 - $U_{л}=660$ В, ТСВП-630

Із аналізу графіка можна зробити висновок, що із підвищенням потужності дільничних КТП від 630 кВА до 1000 кВА вище визначені параметри напруги між нейтраллю мережі і землею мають тенденцію до збільшення, зокрема, при напрузі 660В - на 3,9%; при напрузі 1140В - на 5,3%. Це є фактор підвищення ймовірності хибного спрацьовування захисту від витоків струму на землю [17]. Таким чином, впровадження додаткових технічних заходів із перешкоджання впливу комутаційних перехідних процесів дільничної мережі на параметри контрольованого сигналу в АЗ є доцільним.

2.3 Визначення ймовірності хибного спрацьовування засобу захисного знеструмлення кола витoku струму на землю

Хибне спрацьовування апарата захисту матиме місце у випадку перевищення контрольованим параметром порога спрацювання АЗУР під час перехідних процесів у системі, пов'язаних з контакторними комутаціями силових відгалужень, які можуть відбуватись в довільний момент часу. Відповідно до цього, засобами комп'ютерного моделювання на основі обґрунтованих структур моделі та відповідних аналітичних залежностей, виконана серія досліджень (в кількості $n=50$), у кожному з яких момент t' відключення першого відгалуження системи (рис. 2.14) є вибірковою величиною, рівномірно розподіленою на інтервалі від 2 до 3 с. При цьому прийняті наступні параметри ізоляції кабелів системи:

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

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

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

Результатами дослідів є вибіркові значення максимальної величини струму через вимірювальний елемент апарата АЗУР-1 $i_{7\max}$ (табл. Б.2, додаток Б), якої відповідає рис. 2.14. Виконання первинної статистичної обробки результатів спостережень припускає виключення значень, що різко виділяються. Розташувавши вибіркові значення $i_{7\max}$ у варіаційний ряд за зростанням, визначимо мінімальне і максимальне значення: $\min[i_{7\max}] = 2,83$ мА, $\max[i_{7\max}] = 5,8$ мА.

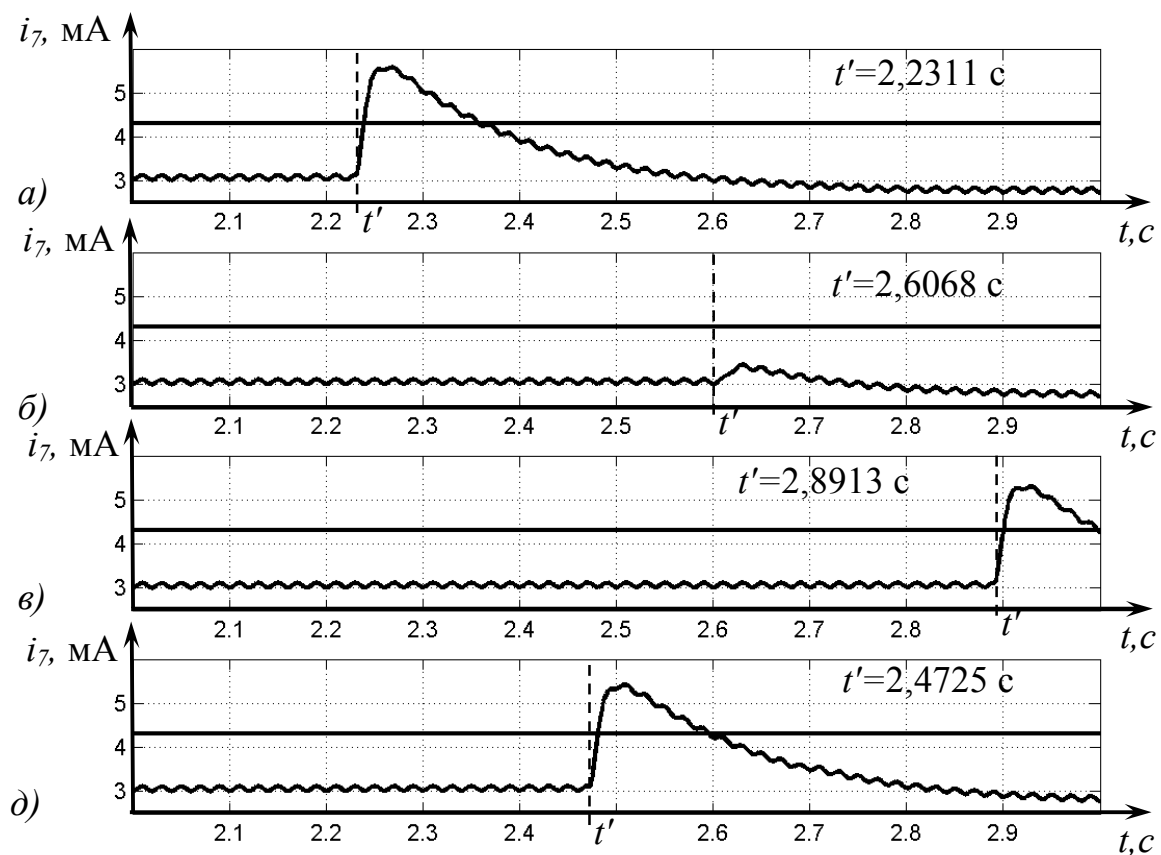


Рисунок 2.14 - Діаграми струму через вимірювальний елемент АЗУР-1 при випадкових моментах відключення комутаційного апарата першого відгалуження, отриманий шляхом моделювання: а - $t' = 2,2311$ с, $i_{7\max} = 5,58$ мА; б - $t' = 2,6068$ с, $i_{7\max} = 3,45$ мА; в - $t' = 2,8913$ с, $i_{7\max} = 5,30$ мА; д - $t' = 2,4725$ с, $i_{7\max} = 5,42$ мА

Доцільним є виконання статистичної перевірки наступних двох конкуруючих гіпотез [18]: нульова гіпотеза H_0 - вибірка є однорідною; альтернативна гіпотеза H_1 - спостереження одного з результатів ($\min[i_{7\max}]$ або $\max[i_{7\max}]$) вироблялося при істотно змінених умовах, цей результат

необхідно виключити. Значення критерію для першого і останнього члена варіаційного ряду мають бути знайдені відповідно до залежностей:

$$v_1 = \frac{|\bar{i}_{7\max} - \min[i_{7\max}]|}{\bar{s}}, \quad (2.97)$$

$$v_n = \frac{|\bar{i}_{7\max} - \max[i_{7\max}]|}{\bar{s}}, \quad (2.98)$$

де $\bar{i}_{7\max} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n i_{7\max j} = 4,27 \text{ мА}$, $\bar{s} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (i_{7\max j} - \bar{i}_{7\max})^2} = 0,81 \text{ мА}$ –

відповідно вибіркові значення математичного очікування і стандартного відхилення кидків струму через вимірювальний елемент АЗУР-1 при комутації відгалуження (табл. Б.2, додаток Б).

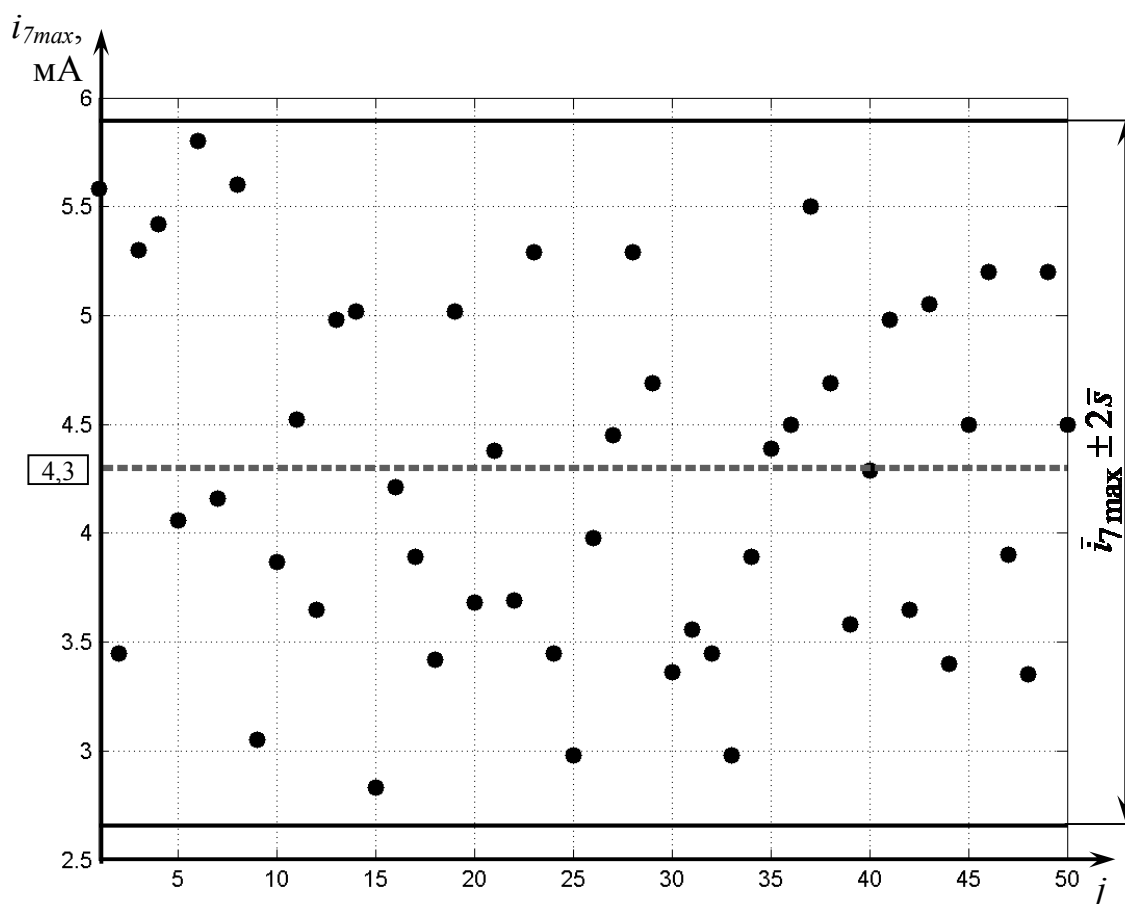


Рисунок. 2.15 - Вибіркові максимальні значення струму через вимірювальний елемент АЗУР-1 при комутації відгалуження мережі

Таким чином, розрахункові значення критерію становлять:

$$v_1 = \frac{|4,27 - 2,83|}{0,81} = 1,78; \quad v_n = \frac{|4,27 - 5,8|}{0,81} = 1,89. \quad \text{Критичне значення критерію}$$

визначається обсягом вибірки n та величиною $Q = 200\alpha\%$, де α - прийнятий рівень значимості. При $n=50$ і $\alpha=0,05$ згідно [19] має: $v_{\max}(n, Q) = v_{\max}(50, 10\%) = 2,99$. Оскільки $v_1 < v_{\max}$ і $v_n < v_{\max}$, то при рівні значимості $\alpha=0,05$ немає підстав відкидати нульову гіпотезу H_0 , тобто при заданому рівні вибірку можна вважати однорідною.

Для перевірки стохастичної незалежності результатів спостережень, є доцільним користування критерієм квадратів послідовних відхилень [18]. Прийmemo дві конкуруючі гіпотези: нульову H_0 - результати спостережень є стохастично незалежними, і альтернативну H_1 - вибіркові значення не можна розглядати як стохастично незалежні величини. Розрахункове значення критерію визначається відповідно до залежності:

$$\gamma_n = \frac{q^2(n)}{\bar{s}^2(n)}, \quad (2.99)$$

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

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

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

Критичне значення критерію підраховується за формулою:

$$\gamma_{\alpha}^{(\min)}(n) = 1 + \frac{u_{\alpha}}{\sqrt{n+1}}, \quad (2.100)$$

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

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

Перевірка гіпотези про нормальний розподіл вибірових даних має бути виконана за критерієм Колмогорова-Смірнова [18], для чого будується теоретична $G(i_{7\max})$ та емпірична $F(i_{7\max})$ функції розподілу ймовірностей відповідно до вибірових значень $i_{7\max}$ (рис. 2.16). Розрахункове значення критерію визначається найбільшою розбіжністю між теоретичною і експериментальною функціями розподілу:

$$K_s = \sup_{i_{7\max}} |G(i_{7\max}) - F(i_{7\max})| \quad (2.101)$$

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

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

$$P(i_{7\max} > I_{уст}) = 0,5 - \Phi\left(\frac{I_{уст} - \bar{i}_{7уст}}{\bar{s}}\right), \quad (2.102)$$

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

При уставці апарата захисту $I_{уст} = 4,3$ mA шукана ймовірність становить:
 $P(i_{7max} > 4,3) = 0,51$, що є неприпустимим. Аналогічний результат можна отримати шляхом графічних побудов на діаграмі функції розподілу ймовірностей (рис. 2.16).

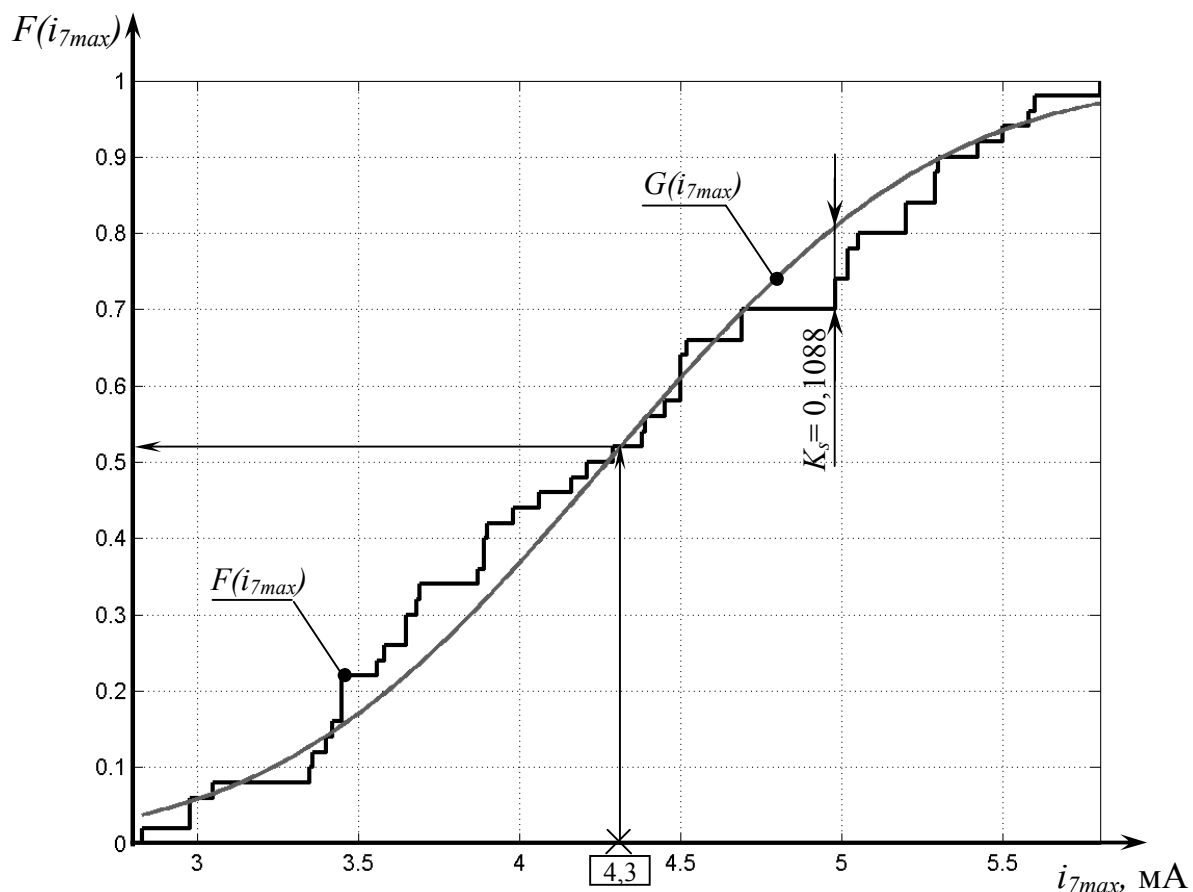


Рисунок 2.16 - Теоретична $G(i_{7max})$ і емпірична $F(i_{7max})$ функції розподілу вибірових максимальних значень струму через вимірювальний елемент АЗУР-1 при комутації відгалуження мережі

2.4 Аналіз функціонування засобів захисного знеструмлення кола витоку струму на землю в умовах застосування засобів регульованої комутації асинхронних двигунів споживачів

Засобами математичного і комп'ютерного моделювання встановлено, що комутацією силового відгалуження в електротехнічному комплексі шахтної

дільниці утворюється перехідний процес стрибкоподібної зміни величини електричного параметру реагуючого органу АЗ. Отже вплив на цей процес може відбуватися як засобами управління (корекція структури та параметрів схеми АЗ) так і засобами збурення. До останніх слід віднести засоби регульованої комутації силових відгалужень (що здатні змінити параметри комутаційних перехідних процесів дільничної мережі) [20-22].

Ефективним засобом регульованої комутації, що застосовується для уповільнення пуску асинхронних двигунів є тиристорний регулятор напруги (ТРН), що застосовується в системах “*soft - start*” і забезпечує регулювання вихідної напруги за фазовим принципом [20].

Вплив параметрів електричної мережі на стійкість роботи АЗ при регульованій комутації АД може бути досліджений на основі розрахункової схеми (рис. 2.26) [22]. Силовий тиристорний регулятор напруги, функціонуючи в режимі фазового керування, змінює свою провідність від нульового до номінального значення шляхом зміни кута α відпирання тиристорів в діапазоні: $180 \geq \alpha \geq 0$ ел. град.

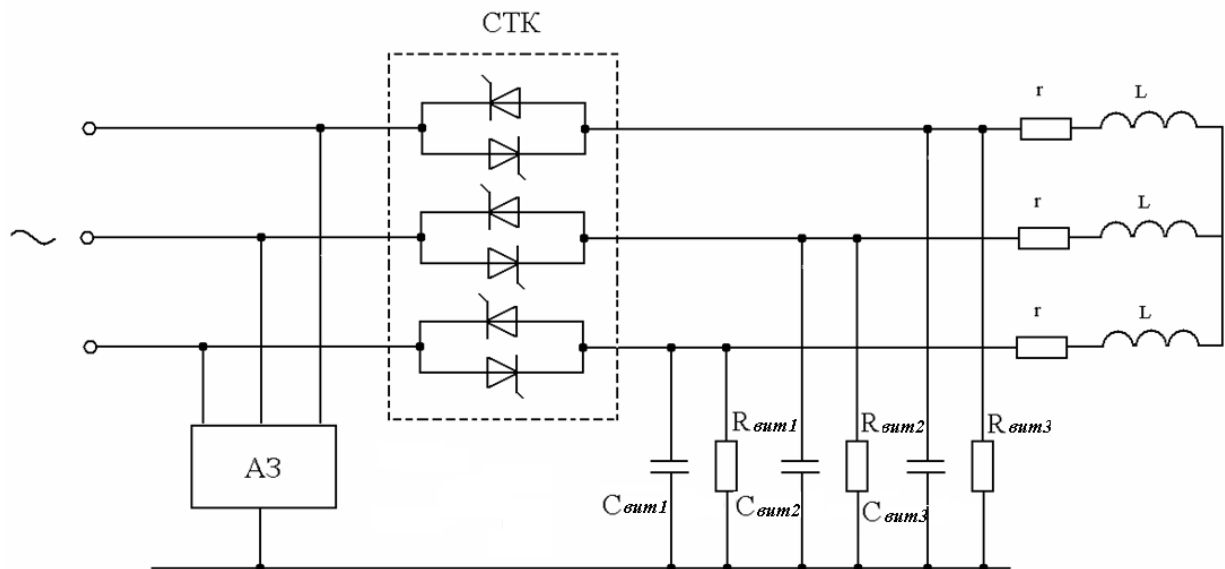


Рисунок 2.26 - Розрахункова схема фрагмента електромережі з тиристорним комутатором (регулятором напруги)

Стосовно до схеми (рис. 2.26) варто задатися законом зміни кута α відпирання тиристорів і тривалістю зміни цього кута у всьому діапазоні.

Виходячи з параметрів відомих серійних систем “*soft - start*”, приймемо припущення про те, що тривалість Δt зміни кута α відпирання тиристорів СТК (у повному діапазоні) не перевищує 3 с. Зміна кута α у функції часу при пуску і перед відключенням двигуна може здійснюватися відповідно до лінійного або експоненціального законів [20]:

при пуску АД

$$\alpha(t)_{\text{лін.пуск}} = 180^\circ - Qt, \quad (2.109)$$

$$\alpha(t)_{\text{експ.пуск}} = e^{-\frac{t}{Q}}, \quad (2.110)$$

при відключенні АД

$$\alpha(t)_{\text{лін.отк}} = Qt, \quad (2.111)$$

$$\alpha(t)_{\text{експ.отк}} = 1 - e^{-\frac{t}{Q}}, \quad (2.112)$$

де $Q \in [0,09; 0,9]$ - інтенсивність комутації (град/мс).

Предметом дослідження є визначення падіння напруги на реагуючому органі АЗ типу АЗУР-4, залежно від параметрів дільничної електромережі і характеру виконання регульованої комутації. Моделювання функціонування АЗ в складі шахтного дільничного ЕТК при використанні ТРН здійснюється засобами комп'ютерного моделювання, відповідно до рис. 2.22, де контактор $КМ_1$ замінюється тиристорним регулятором напруги (рис. 2.27) [23].

У схемі на рис. 2.27 блок *Tir_Preobr_Napr* містить три пари зустрічно з'єднаних по одній парі в фазі тиристорів (рис. 2.28), імпульси управління на які подаються від системи імпульсного фазового управління, реалізованої в середовищі Simulink [24]. Паралельно тиристорам комутатора підключені активні опори, що забезпечують протікання оперативного струму АЗ.

Засобами комп'ютерного моделювання отримані результати серії досліджень включення відгалуження (рис. 2.22). Максимальні значення зміни напруги на реагуючому органі апарата АЗУР-4 (резисторі R_5 в схемі заміщення ланцюга оперативного струму апарата захисту – рис. 2.28) при лінійному і

експоненціальному законі зміни кута α відпирання тиристорів СТК (тривалість Δt зміни кута α від 0,5с до 3с) наведені у табл. 2.2.

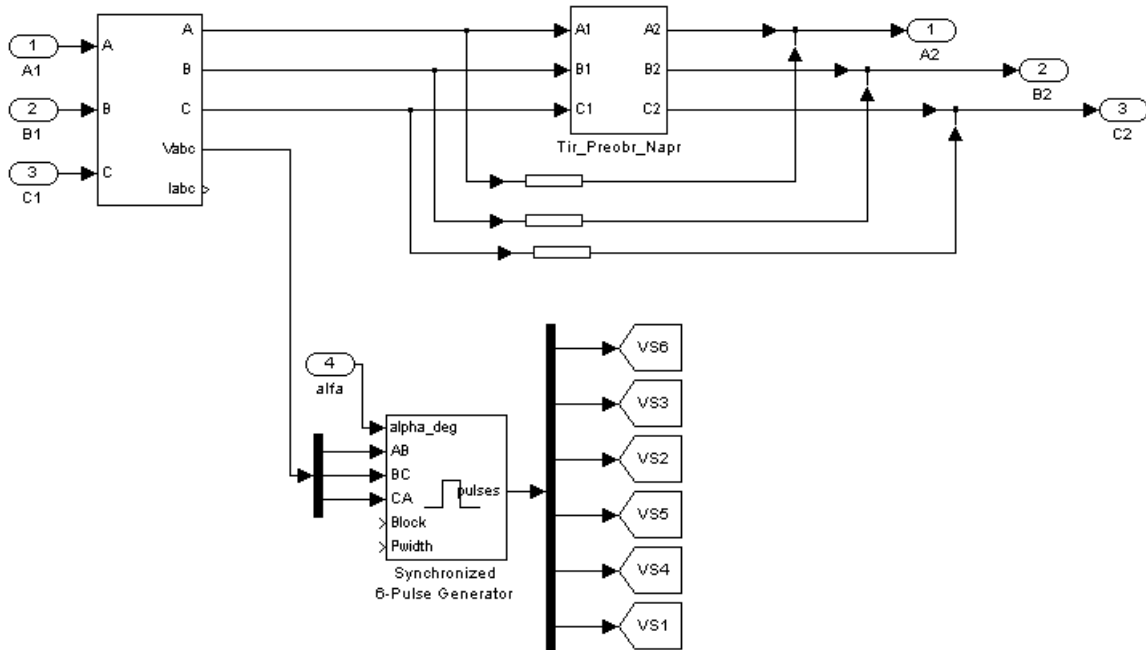


Рисунок 2.27 - Структурна схема комп'ютерної моделі тиристорного регулятора напруги

При сукупній ємності мережі 1,5 мкФ/фази і експоненціальному законі зменшення кута α встановлені короточасні перевищення напругою на реагуючому органі гранично припустимого значення (2,4 В) для АЗУР-4, що здатно призвести до хибного спрацьовування АЗ (табл. 2.2). При лінійному законі зміни $\alpha(t)$ перехідний процес на контрольованому органі не супроводжується подібним підвищенням напруги. Це дозволить уникнути хибного спрацьовування АЗ при даних параметрах кабельної мережі дільничного ЕТК.

При сукупній ємності мережі 1,5 мкФ/фази і експоненціальному законі зменшення кута α встановлені короточасні перевищення напругою на реагуючому органі гранично припустимого значення (2,4 В) для АЗУР-4, що здатно призвести до хибного спрацьовування АЗ (табл. 2.2). При лінійному

законі зміни $\alpha(t)$ перехідний процес на контрольованому органі не супроводжується подібним підвищенням напруги. Це дозволить уникнути хибного спрацьовування АЗ при даних параметрах кабельної мережі дільничного ЕТК.

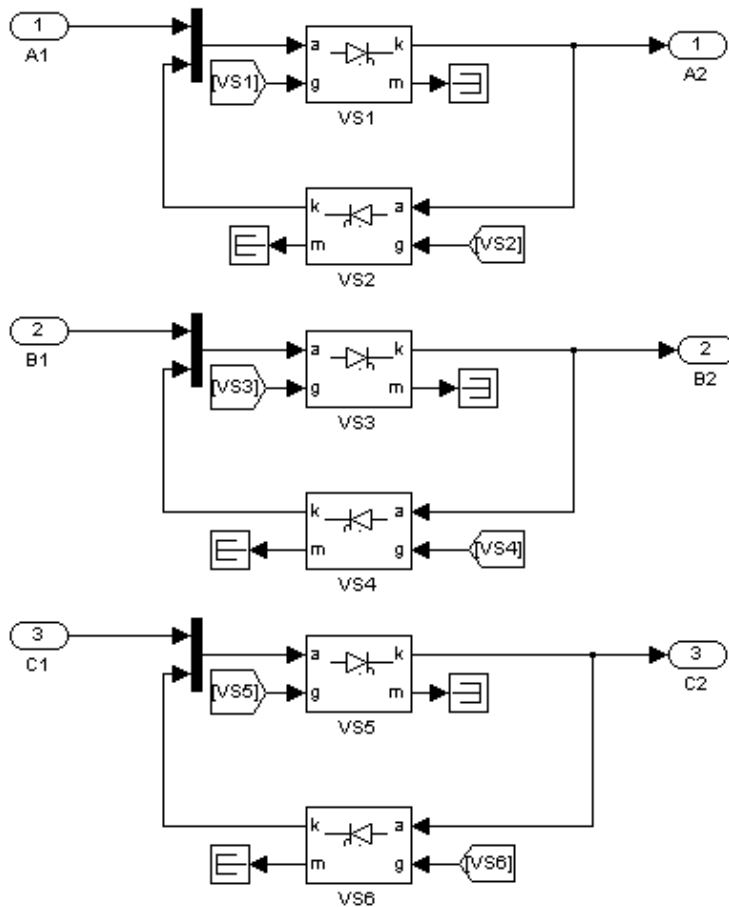


Рисунок 2.28 - Структурна схема підсистеми Tir_Preobr_Napr комп'ютерної моделі тиристорного регулятора напруги

Отже, більш прийнятним є лінійний закон зміни величини напруги, при здійсненні регульованої комутації асинхронного двигуна споживача, оскільки дозволяє розширити галузь застосування системи кабелів в дільничному електротехнічному комплексі до ємності мережі 1,5мкФ/фазу.

Таблиця 2.2

Максимальні значення напруги через вимірювальний елемент апарата АЗУР-4 U_{R5} при включенні відгалуження мережі ($C_{i3\Sigma} = C_{i31} + C_{i32} = 1,0$ мкФ/фазу, $C_{i3\Sigma} = C_{i31} + C_{i32} = 1,5$ мкФ/фазу, $R_{i3} = 34$ кОм/фазу, $U_c = 660$ В)

закон зміни кута $\alpha(t)$ відпирання тиристорів СТК	U_{R5} , В ($\Delta t = 0,5$ с)		U_{R5} , В ($\Delta t = 1,0$ с)		U_{R5} , В ($\Delta t = 1,5$ с)	
	Ємності ізоляції $C_{i3\Sigma}$, мкФ/фазу :					
	1,0	1,5	1,0	1,5	1,0	1,5
лінійний закон	1,68	2,07	1,56	1,95	1,52	1,90
експоненціальний закон	1,93	2,44	1,85	2,24	1,80	2,12

2.5 Результати експериментальних досліджень процесів при керованій комутації силового приєднання

У випадку застосування пристроїв повільного пуску АД, з функцією збільшення вихідної напруги за лінійним законом від фіксованого рівня $0,2U_H$ до номінального (U_H) при пуску і повільного зменшення напруги до нуля перед відключенням, хибних спрацьовувань АЗ від витоків струму на землю не зафіксовано. Максимальна ємність ізоляції кабелю одного приєднання відносно землі становила $0,4$ мкФ/фазу при сумарній ємності ізоляції відносно землі $1,0$ мкФ/фазу. Осцилограми параметрів у контрольованих точках дослідницького стенду наведені на рис. 2.29 – 2.32.

Статистична обробка результатів вимірів напруги на реагуючому органі АЗУР-4 при зміні активного опору ізоляції від 30 кОм/фазу до 40 кОм/фазу виконана за методикою [25; 26] і наведена в табл. 2.3.

Таблиця 2.3

Статистично оброблені результати виміру напруги на реагуючому органі АЗУР-4 при регульованому включенні відгалуження мережі

№ досліду	Ємність мережі C_e , мкФ/фаза	Вибіркові значення напруга на реагуючому органі АЗУР-4 U, В	Вибіркове емпіричне математичне очікування U, В	Вибіркове емпіричне стандартне відхилення S_U , В	$t \frac{S_U}{\sqrt{n}}$, В при $\gamma=0,95$	Вибіркове теоретич. математичне очікування, В
1 - 5	0,1	1,63; 1,57; 1,41; 1,25; 1,16	1,30	0,12	0,17	1,40
6 - 10	0,2	1,74; 1,69; 1,62; 1,53; 1,50	1,52	0,11	0,15	1,49
11- 15	0,3	1,97; 1,82; 1,71; 1,64; 1,55	1,61	0,11	0,16	1,61
16- 20	0,4	2,36; 2,16; 1,92; 1,81; 1,70	1,87	0,10	0,21	1,87

Зіставлення отриманих осцилограм із результатами моделювання процесів у системі з аналогічними параметрами схеми дозволяє зробити висновок, що форма експериментальних кривих напруг на реагуючому органі АЗ відповідає даним, отриманим у результаті моделювання. Дана обставина свідчить про правильність підходу до складання моделі впливу параметрів шахтної низьковольтної електричної мережі на параметри стійкості роботи АЗ. Порівняльна оцінка осцилограм параметрів отриманих в результаті моделювання і експериментів свідчить про адекватність отриманої математичної моделі результатам експеримента. Вірогідність отриманих результатів підтверджується застосуванням апробованих статистичних методів оцінки погрішності результатів вимірів [25].

Отже, запропонована математична модель може бути використана при визначенні співвідношень між параметрами мережі та напругою на реагуючому елементі АЗ.

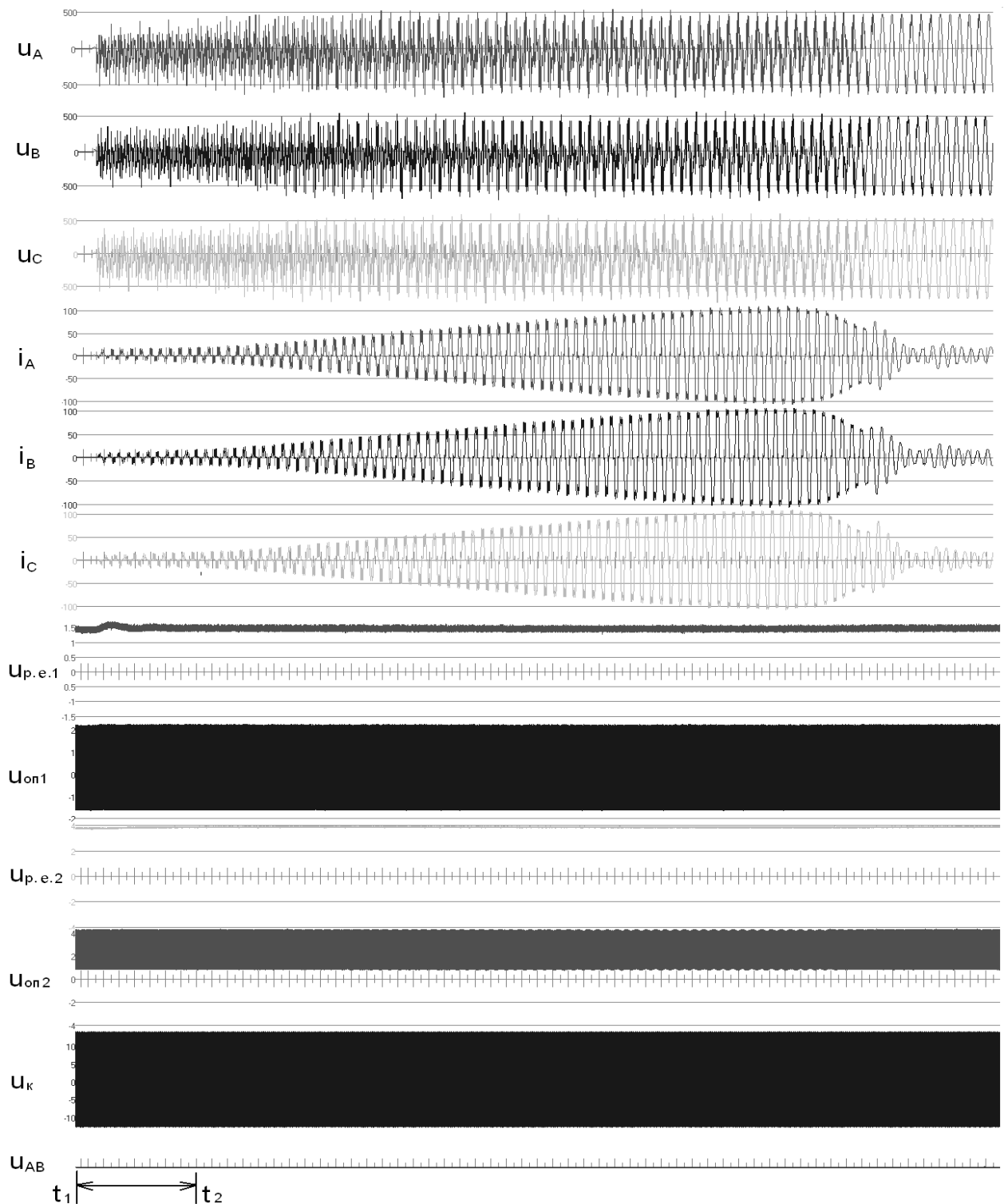


Рисунок 2.29 - Регульоване включення споживача ($C_C = 0,4$ мкФ/фазу, $R_{is} = 32$ кОм/фазу): u_A, u_B, u_C - напруга фази А, В, С; i_A, i_B, i_C - струм фази А, В, С; $U_{p.e.1}$ - напруга на реакуючому елементі АЗУР (1-й вимірювальний канал); U_{on1} - опорна напруга 1-го вимірювального каналу АЗУР; $U_{p.e.2}$ - напруга на реакуючому елементі АЗУР (2-й вимірювальний канал); U_{on2} - опорна напруга 2-го вимірювального каналу АЗУР; U_K - напруга виходу компаратора АЗУР; U_{AB} - напруга датчика спрацьовування автоматичного вимикача мережі

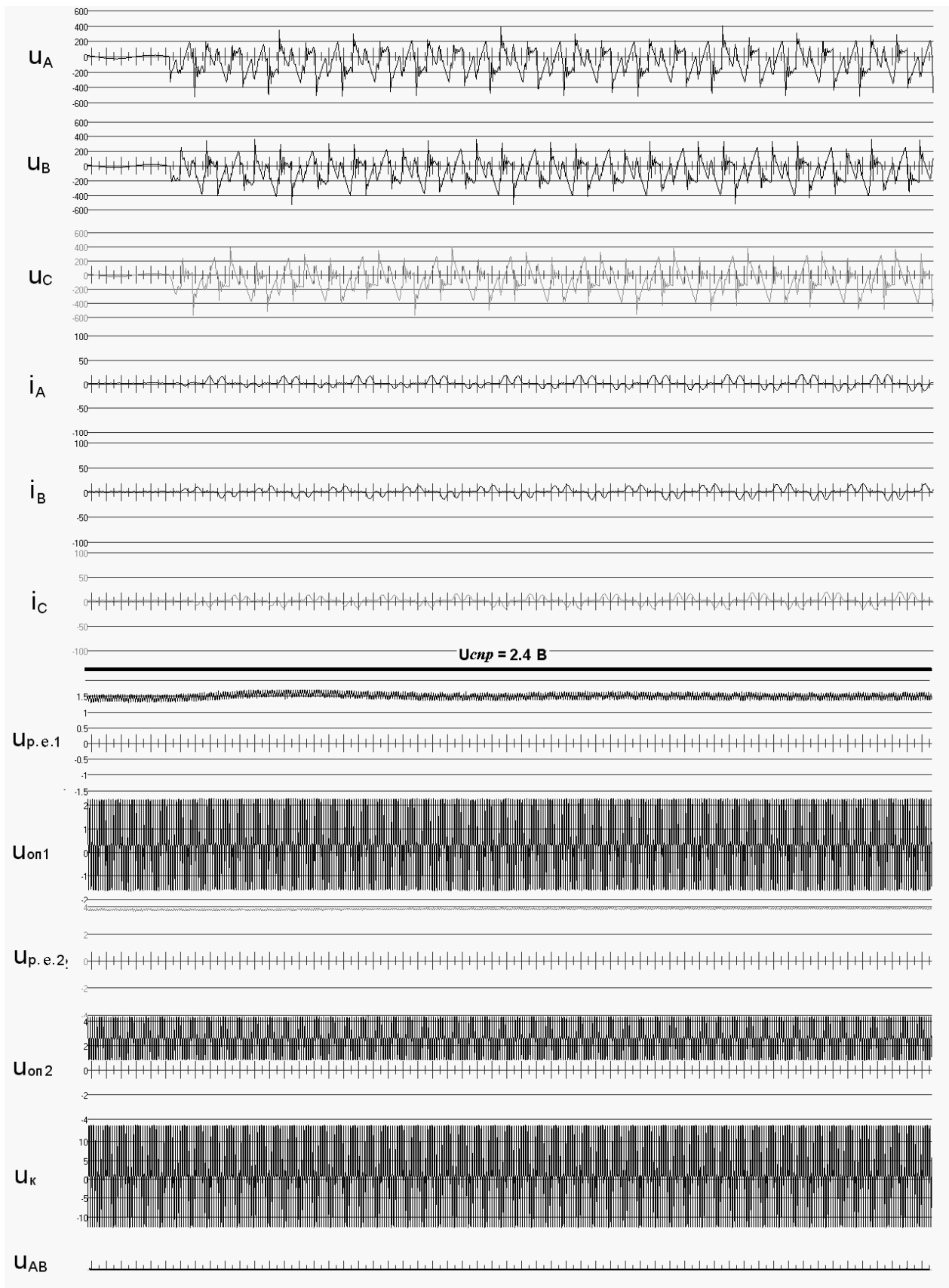


Рисунок 2.30 - Параметри дослід, що відповідають рис. 3.7 на інтервалі часу $t_1 - t_2$

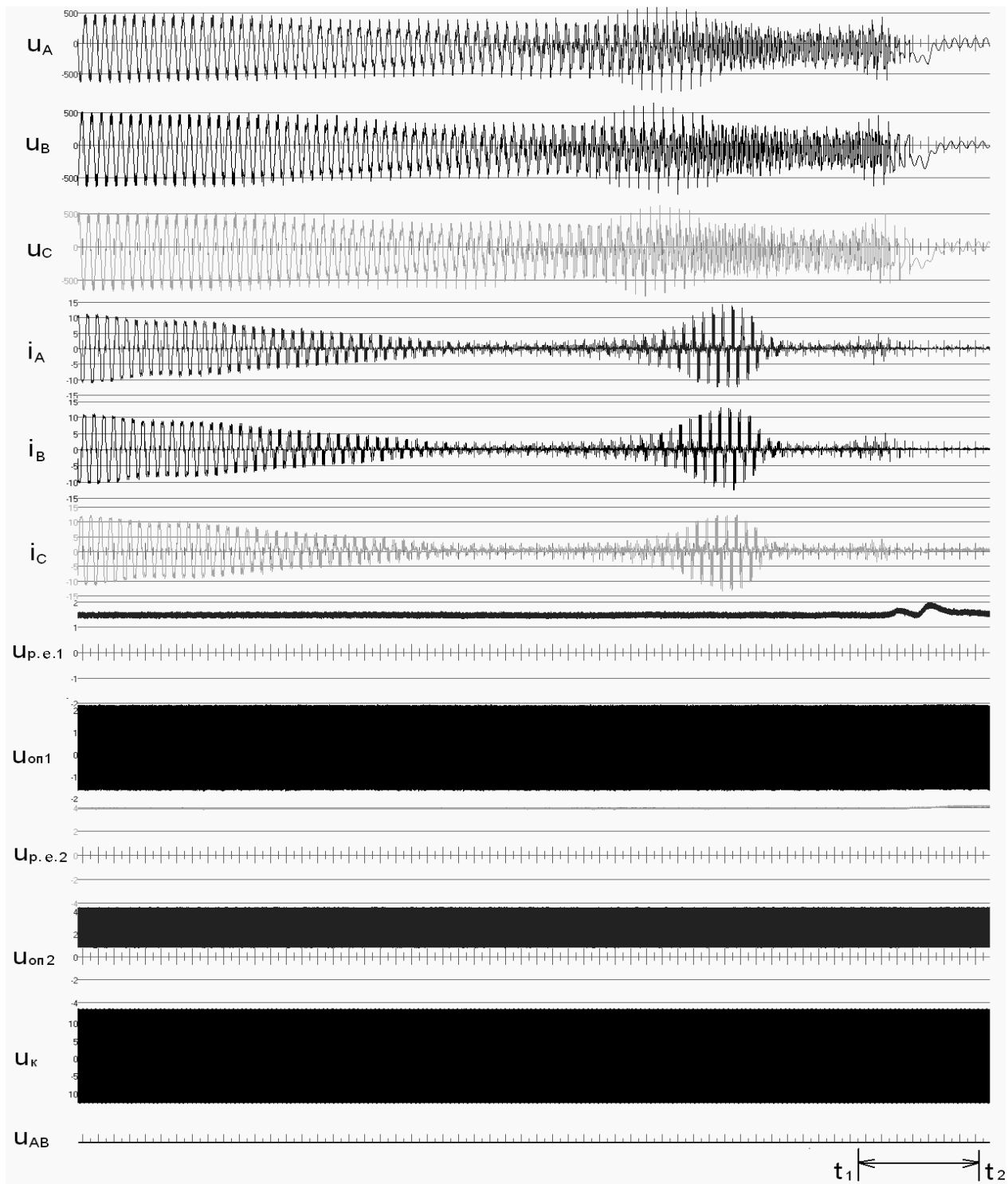


Рисунок 2.31 - Регульоване відключення споживача ($C_c = 0,4$ мкФ/фазу, $R_{із} = 32$ кОм/фазу): u_A, u_B, u_C - напруга фази А, В, С; i_A, i_B, i_C - струм фази А, В, С; $U_{p.e.1}$ - напруга на реагуючому елементі АЗУР (1-й вимірювальний канал); U_{on1} - опорна напруга 1-го вимірювального каналу АЗУР; $U_{p.e.2}$ - напруга на реагуючому елементі АЗУР (2-й вимірювальний канал); U_{on2} - опорна напруга 2-го вимірювального каналу АЗУР; U_K - напруга виходу компаратора АЗУР; U_{AB} - напруга датчика спрацьовування автоматичного вимикача мережі

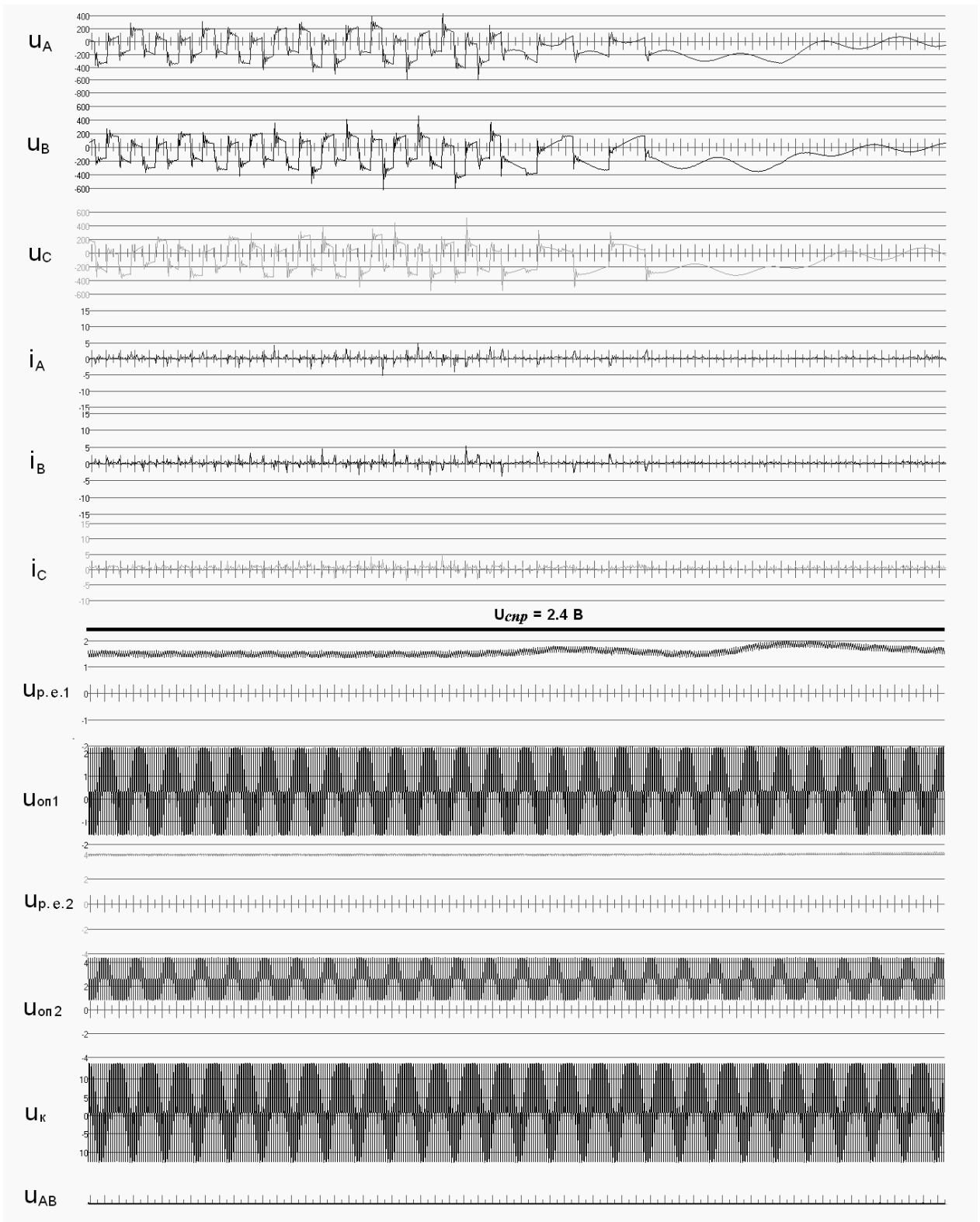


Рис. 2.32 - Параметри досліду, що відповідають рис. 3.9 на інтервалі часу $t_1 - t_2$

3 РАЦІОНАЛЬНІ РІШЕННЯ ІЗ УДОСКНАЛЕННЯ СХЕМОТЕХНІКИ ЗАСОБІВ ЗАХИСНОГО ЗНЕСТРУМЛЕННЯ МЕРЕЖІ З КОЛОМ ВИТОКУ СТРУМУ НА ЗЕМЛЮ

3.1 Необхідні технічні властивості і проблематика застосування засобів захисту від електроураження в шахтних дільничних мережах підвищеного рівня номінальної напруги

Існуюча тенденція щодо поступового підвищення номінальної потужності електроприладів технологічних установок шахти обумовлює доцільність переведення дільничних електромереж на підвищені рівні номінальної лінійної напруги (з метою мінімізації втрат напруги в активно-індуктивних опорах трансформатора підстанції та кабелів при протіканні струму навантаження). Враховуючи на світовий досвід і рекомендовані потужності перспективних електроприладів гірничих машин та інших технологічних установок шахтної дільниці, слід передбачити, що наступною величиною номінальної діючої лінійної напруги шахтного дільничного електротехнічного комплексу буде рівень у 3300В [27]. Однак, запровадження мережевої напруги підвищеного номінального рівня ускладнює задачі дотримання заданих нормативних параметрів електробезпеки експлуатації шахтних дільничних електротехнічних комплексів і потребує корекції параметрів захисту від витоків струму на землю. Це, передусім, стосується параметрів терміну: визначення наявності витоків струму на землю; спрацьовування засобу захисту від витоків струму, перевлаштування засобів автокомпенсації ємності ізоляції мережі при підключенні (відключенні) кабелю приєднання. При застосуванні номінальної напруги дільничної мережі величиною 3300 В сукупний термін знеструмлення електротехнічного комплексу дільниці при виникненні ланки витоків струму на землю не повинен перевищувати 0,05 с. Це потребує удосконалень у схемі засобу захисту від витоків струму на землю.

Засобом захисту, адаптованим до функціонування в мережі номінальної трифазної напруги 3300 В є апарат захисту від витоків струму на землю типу АЗУР-5 (розроблюється ПАТ „Донецький електротехнічний завод”). Його схема інтегрує в собі позитивні властивості попередніх засобів захисту. Її структура представлена схемою (рис. 3.1) [26; 27].

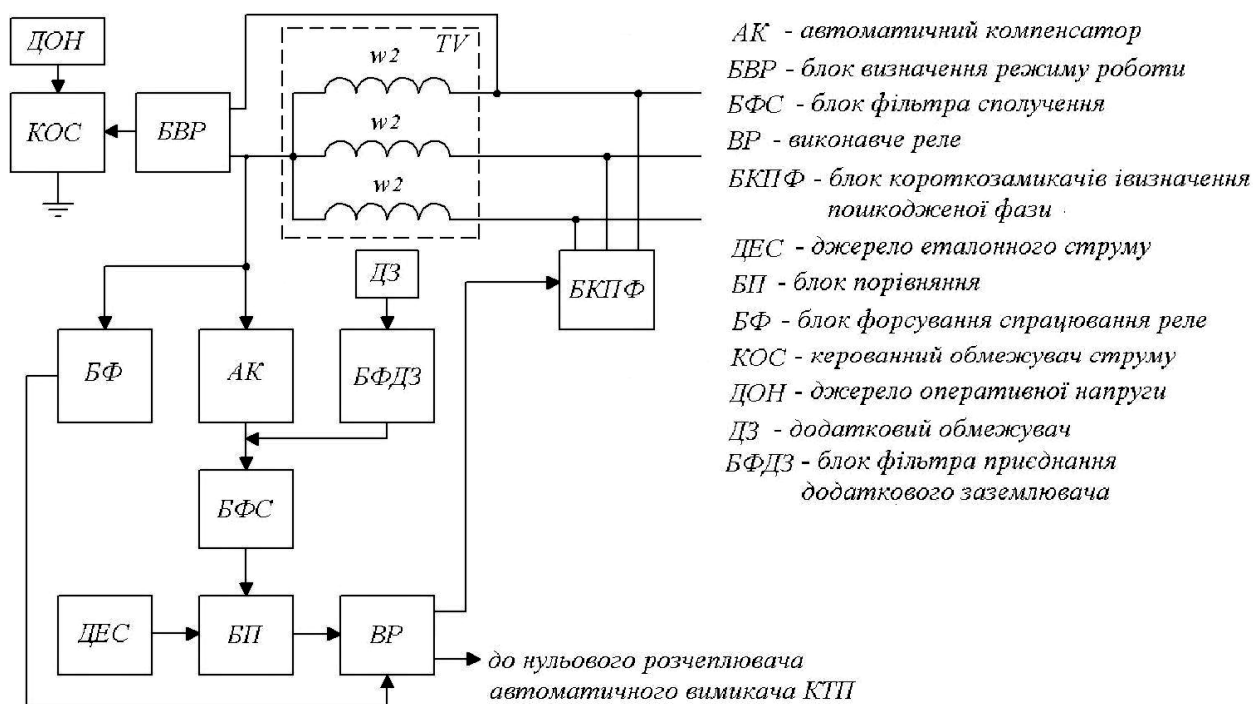


Рисунок 3.1 – Функціональна схема засобу автоматичного захисту від витоків струму на землю АЗУР-5

Інформаційним параметром стосовно визначення наявності і величини струму витоків на землю в дільничній мережі є оперативний струм, що створюється джерелом оперативної напруги. Його величина задається керованим обмежувачем (КОС) відповідно до режиму роботи захисту (що визначається блоком БВР).

На відміну від попередніх модифікацій (призначених для роботи в мережі під напругою 660 В і 1140 В), приєднання ланцюга оперативного струму до фаз дільничної мережі здійснюється через загальну точку з'єднання за схемою «зірка» вторинних обмоток w_2 трансформатора TV дільничної КТП. Таке

підключення схеми до точки нульового потенціалу мережі суттєво підвищує безпеку і ресурс експлуатації засобу захисту (АЗУР-5).

Підвищення швидкодії спрацьовування захисту забезпечене функцією форсування спрацьовування реле. Відповідний блок (БФ) реагує на величину диференціальної складової струму витоку на землю.

Отже, вхідним сигналом для пристрою керування виконавчим реле апарату АЗУР-5 є параметр, обумовлений сукупністю вихідних параметрів блоків порівняння (БП) і форсування (БФ). Відмінною властивістю БП є підтримання певної форми сигналу, що відповідає працездатному стану схеми АЗУР-5. Порушення цієї працездатності приведе до деформації вихідного сигналу БП і відключення виконавчого реле АЗУР-5 з подальшим відключенням автоматичного вимикача КТП. Цим забезпечується самоконтроль справності схеми апарату АЗУР-5 при його роботі в дільничній мережі з напругою 3300В.

Крім цієї функції, ефективність функціонування захисту від витоку струму на землю в мережі 3300 В має бути забезпечена засобами перешкоджання хибному спрацьовуванню АЗ через вплив комутаційних перехідних процесів, що відбуватимуться у мережі електротехнічного комплексу. Ця функція може бути виконана за умови підтримання коефіцієнта впливу комутаційного процесу ($\lambda_{\text{ком}}$) на рівні:

$$\lambda_{\text{ком}} = \frac{U_{\text{ком max}}}{U_{\text{спр}}} < 1, \quad (3.1)$$

де $U_{\text{ком max}}$ – амплітуда напруги на реагуючому органі АЗУР-5, обумовлена комутаційним перехідним процесом у дільничній мережі; $U_{\text{спр}}$ - напруга (мінімальна) на реагуючому органі АЗУР-5, що приводить до спрацювання захисту.

Наслідком переведення мережі дільничного електротехнічного комплексу на підвищений рівень номінальної напруги є відповідне підвищення амплітуди імпульсу напруги на реагуючому органі АЗУР-5, створюваної через вплив

комутаційного перехідного процесу в мережі. Тому проблематика забезпечення стійкості апарата АЗУР-5 проти таких впливових факторів потребує додаткового дослідження.

3.2 Дослідження впливових властивостей комутаційних процесів електротехнічного комплексу при напрузі 3300 В стосовно стійкості функціонування апарата АЗУР-5

3.2.1 Структура та параметри математичної моделі електротехнічного комплексу при застосуванні апарата захисту типу АЗУР-5

Впливові властивості комутаційних перехідних процесів в електротехнічному комплексі шахтної дільниці при напрузі 3300 В стосовно стійкості функціонування засобу захисту від витоків струму на землю мають бути досліджені засобами математичного і комп'ютерного моделювання.

Складемо математичну модель кола оперативного струму апарата захисту від витоків струму на землю АЗУР-5 відповідно до наведеної на рис. 3.2 схемі заміщення. Ця схема адаптована до прийнятої для моделювання конфігурації електротехнічного комплексу (рис. 2.1).

Так як, підключення апарата захисту до мережі 3300 В здійснюється до 0-й точки трансформатора, дільничної комплектної підстанції, а не до фаз мережі, то при моделюванні (на відміну від формул 2.21 і 2.22) треба враховувати:

$$i_a + i_b + i_c = i_0, \quad (3.2)$$

$$i_{A3a} = 0; i_{A3b} = 0; i_{A3c} = 0. \quad (3.3)$$

Отже, об'єктом дослідження є процеси зміни електричних параметрів у вимірювальному колі апарата АЗУР – 5 які мають місце за умови впливу процесів комутації силових приєднань мережі та наявності струму витоків на землю (рис. 3.2).

Отже, модель вторинної обмотки дільничного трансформатора та автоматичний вимикач (блок А0) може бути представлена як структурна схема комп'ютерної моделі (рис. 2.4), при цьому модель “земля” (блок А9) на змінюється. Таким чином, отримуємо структуру електротехнічного комплексу що відповідає схемі заміщення (рис.2.1) з вимірювальною ланкою АЗУР-5 [26].

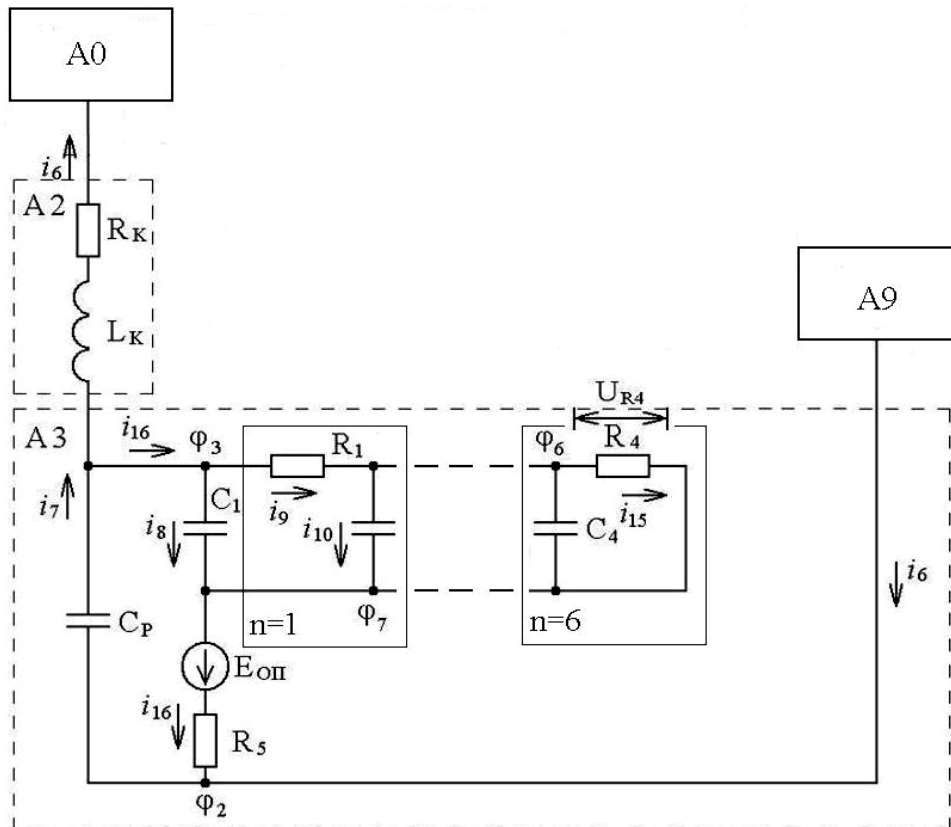


Рисунок 3.2 - Схема заміщення кола оперативного струму апарата АЗУР-5

Різниця потенціалів між вузлами 0 - 3 визначається виразом:

$$u_{13} = \varphi_1 - \varphi_3 = -L_K \frac{di_6}{dt} - R_K i_6, \quad (3.4)$$

Таким чином, миттєві значення струму i_6 можуть бути виражені через параметри дроселя приєднання АЗУР-5 до мережі (фрагмент А2):

$$\frac{di_6}{dt} = \frac{-u_{13} - R_K i_6}{L_K}. \quad (3.5)$$

Математичний опис вимірювальної частини АЗУР-5 (фрагмент А3) визначається системою диференціальних рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{du_{23}}{dt} = \frac{1}{C_p} \left(i_6 + \frac{E_{оп} - u_{23} - u_{37}}{R_{оп}} \right); \\ \frac{du_{37}}{dt} = \frac{R_1(E_{оп} - u_{23}) - u_{37}(R_1 + R_{оп}) + R_{оп}u_{47}}{C_1 R_1 R_{оп}}; \\ \frac{du_{47}}{dt} = \frac{u_{37}R_2 + u_{57}R_1 - u_{47}(R_1 + R_2)}{C_2 R_1 R_2}; \\ \frac{du_{57}}{dt} = \frac{u_{47}R_3 + u_{67}R_2 - u_{57}(R_2 + R_3)}{C_3 R_2 R_3}; \\ \frac{du_{67}}{dt} = \frac{u_{57}R_4 - u_{67}(R_3 + R_4)}{C_4 R_3 R_4}. \end{array} \right. \quad (3.6)$$

Вирази (3.5) і (3.6) являють собою математичну модель вимірювальної частини і дроселя приєднання апарата АЗУР-5.

3.2.2 Аналіз результатів математичного моделювання перехідних процесів у ланці реагуючого органу апарата захисту від витоків струму на землю типу АЗУР-5

Попередніми дослідженнями встановлено, що результатом впливу комутаційного перехідного процесу в дільничному електротехнічному комплексі на роботу засобу захисту від витоків струму на землю є короткочасне (імпульсне) підвищення напруги на резисторі цього реагуючого органу [4]. Це може стати причиною хибного спрацювання останнього. Отже, технічним рішенням, спроможним обмежити амплітуду імпульсу напруги у реагуючому органі апарата АЗУР-5, обумовленого комутаційним перехідним процесом, слід вважати застосування засобу обмеження амплітуди і швидкості наростання напруги. Вказані обмежуючі функції є властивими схемі RC – фільтру низької частоти. Однак застосування останнього може спричинити зменшення чутливості апарата АЗУР-5. Тому задачею дослідження слід вважати

встановлення раціональних параметрів RC – приєднання, здатного обмежити на достатньому рівні впливові фактори комутаційного процесу.

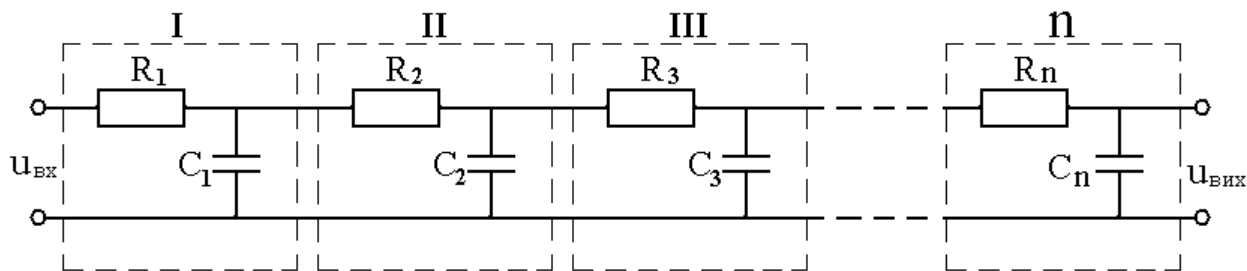
Технічно це може бути реалізовано паралельним приєднанням окремих RC – секцій, кожна з яких утворена окремими ступенями активного опору і ємності. Величини цих ступенів можуть бути встановлені з наступного обґрунтування. Відповідно до параметрів імпульсу напруги (максимальної амплітуди) на реагуючому органі АЗУР-5, що обумовлена впливом комутаційного перехідного процесу в електротехнічному комплексі дільниці розраховуються мінімальні параметри RC – фільтра, функціонування якого призводить до десятикратного зменшення амплітуди напруги вказаного імпульсу впливу. Надалі параметри опору і ємності цього RC – фільтру мають бути поділені на “ n ” окремих елементарних ступенів, що будуть обумовлювати параметри опору і ємності кожної з “ n ” RC – секцій (рис. 3.3). Отже, у залежності від розгалуженості кабельної мережі дільниці довжин і перетинів застосованих кабелів кількість необхідних елементарних приєднань RC – секцій може варіюватись. Прийнятна їх кількість відповідатиме стану, коли впливовий параметр на хибне спрацьовування апарату АЗУР створюватиметься комутацією силового приєднання з ємністю ізоляції $C_{із} = 0,5$ мкФ/фази [27].

З іншого боку, імпульс впливу на резистор реагуючого органу апарату АЗУР-5 може бути представлений сукупністю гармонік напруги, частоти яких перевищують 100 Гц. Отже, обмеження амплітуди імпульса напруги на цьому резисторі полягатиме в обмеженні амплітуд відповідних складових гармонік шляхом паралельного підключення певної кількості RC – секцій.

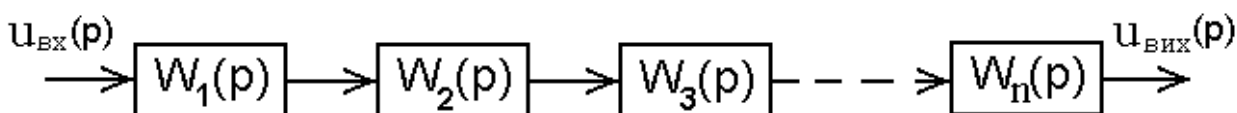
При розгляді обмежуючих властивостей фільтра низької частоти слід враховувати, що кожна з його RC – секцій являє собою аперіодичне звено першого порядку, що описується передавальною функцією виду:

$$W(p) = \frac{1}{Tp + 1}, \quad (3.7)$$

де $T=RC$ – постійна часу.



а)



б)

Рисунок 3.3 - Загальний вид пропонуємого фільтру низьких частот (а), та його передавальна функція (б)

Загальна передавальна функція фільтру низької частоти являє собою добуток передавальних функцій RC – секцій:

$$W_{заг}(p) = \prod_{i=1}^n W_i(p) = \frac{1}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1) \dots (T_n p + 1)}, \quad (3.8)$$

де постійні часу $T_1 = T_2 = \dots = T_n = T$, тому (3.8) набуває вид:

$$W_{заг}(p) = \frac{1}{(Tp + 1)^n}. \quad (3.9)$$

Виходячи з попередніх припущень, приймаємо наступні параметри окремих RC – секцій: $R=10$ кОм, $C=1$ мкФ. Тоді постійна часу: $T=RC=10^4 \cdot 10^{-6}=0,01$ с.

Побудовані у подальшому логарифмічні частотні характеристики (ЛАЧХ) RC – фільтра (рис. 3.4) дають загальну уяву про його спроможність до зменшення амплітуди вхідного сигналу і дозволяють зробити попередній висновок про достатність застосування RC – секцій в кількості $2 \leq n \leq 6$.

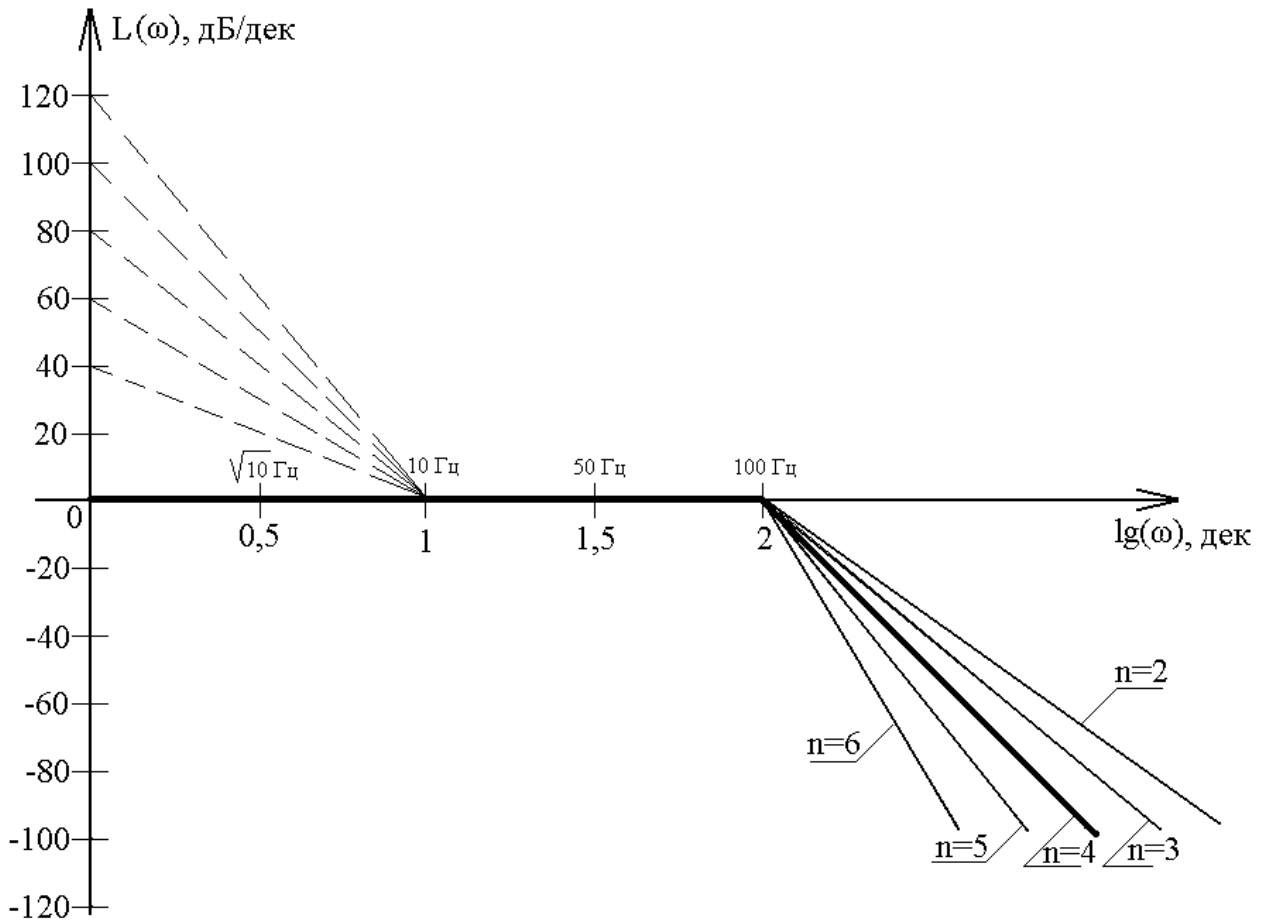


Рисунок 3.4 - ЛАЧХ RC – фільтру, що представляє собою аперіодичний ланцюг n – го порядку ($n=2\dots 6$)

Аналіз ЛАЧХ показує, що частоти напруги до 100 Гц таким пасивним чотирьохполюсником пропускаються з коефіцієнтом посилення $\kappa=1$, а високочастотні гармоніки напруги ($f > 100$ Гц) послаблюються. Інтенсивність послаблення складає від -120 до -40 дБ/дек, оскільки чотирьохполюсник описаний аперіодичною ланкою n – го порядку у якій передавальна функція має вид (3.9).

Уточнення достатньої кількості RC – секцій (блок А-3) доцільно виконати дослідженням процесів у шахтному дільничному електротехнічному комплексі (рис. 3.2) засобами математичного та комп'ютерного моделювання. Отримані діаграми миттєвого значення напруги оперативного параметру апарата захисту від витоків струму на землю АЗУР-5, дають уявлення про характер зміни і величину параметрів в засобі вимірювання АЗУР при комутації силового

відгалуження та при наявності струму витоку на землю, в разі застосування RC – секцій від двох до шести. Моделювання проводилось за умови, що комутаційний процес в дільничній мережі відбувається стосовно включення силового приєднання з ємністю ізоляції $0,5 \text{ мкФ/фаза}$ [27] обумовлює максимальну амплітуду імпульсу напруги на реагуючому органі апарата АЗУР-5 (рис. 3.5 – рис. 3.8).

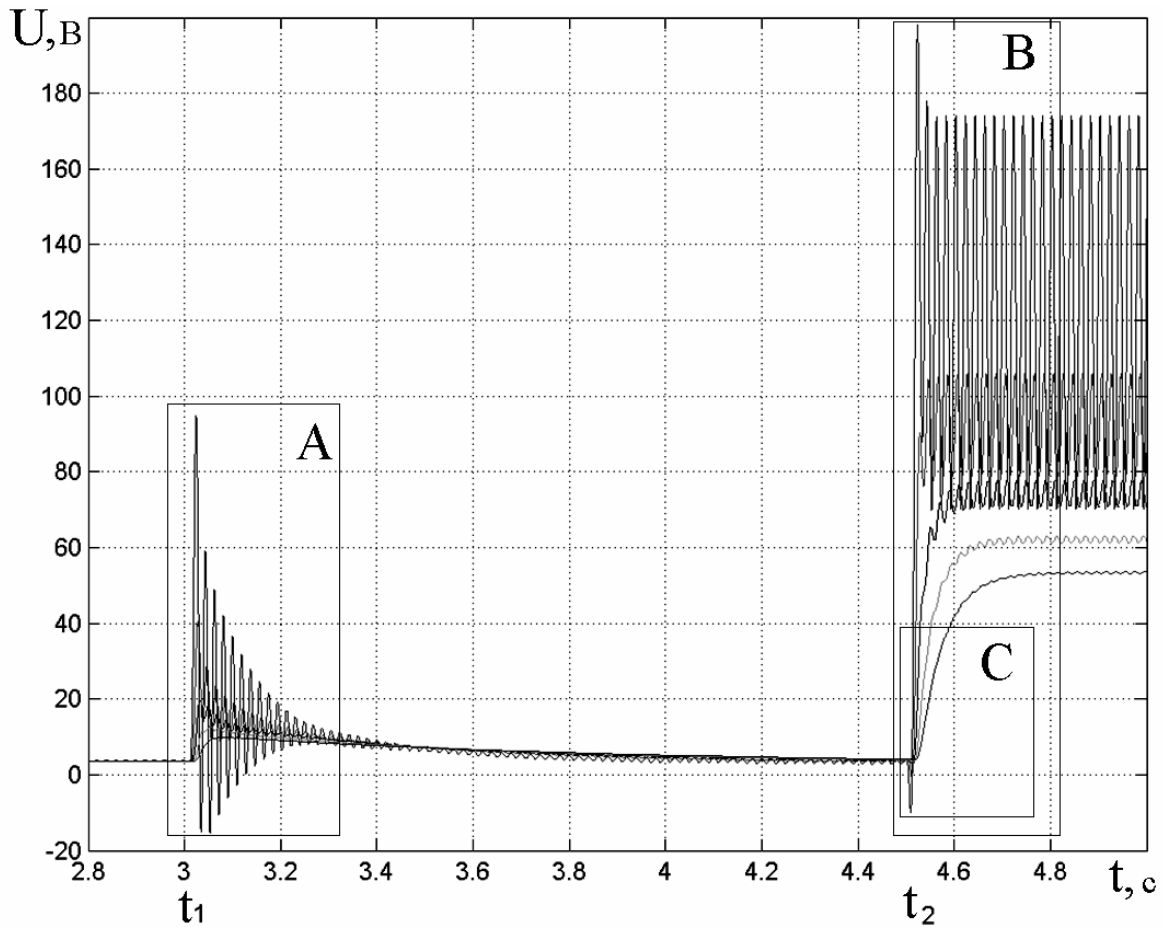


Рисунок 3.5 – Загальний вид діаграми миттєвих значень напруги на вимірювальному елементі апарата АЗУР-5 при включенні відгалуження мережі ($t_1=3,01 \text{ с}$) та виникненні струму витоку на землю ($t_2=4,5 \text{ с}$) при різноманітній кількості RC - секцій ($n=2\dots 6$)

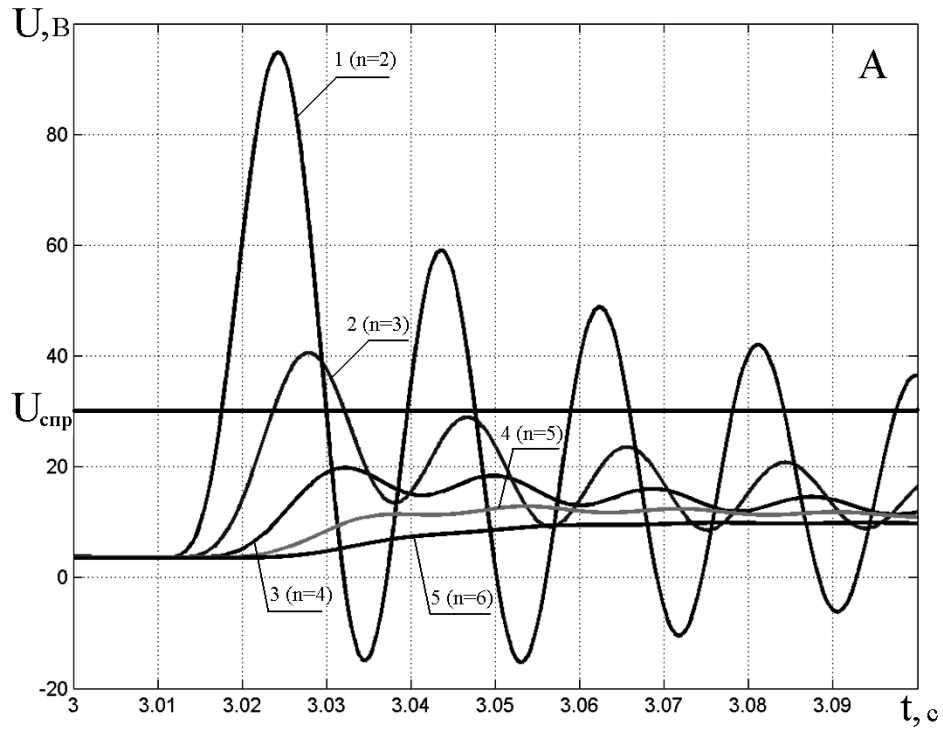


Рисунок 3.6 – Фрагмент А діаграми миттєвих значень напруги на вимірювальному елементі апарата АЗУР-5 при включенні відгалуження ($t_l=3,01$ с) при різноманітній кількості RC - секцій ($n=2\dots 6$)

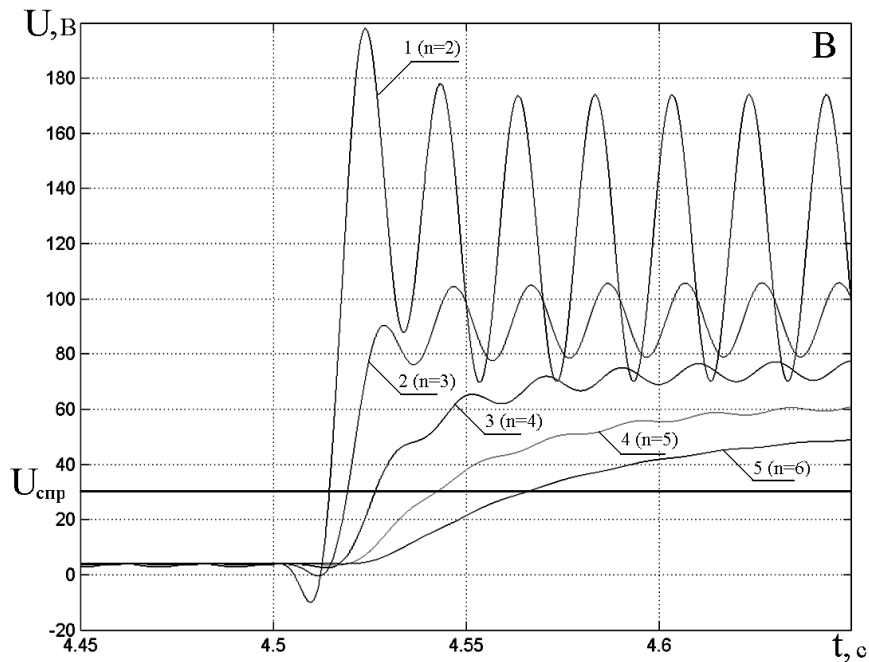


Рисунок 3.7 – Фрагмент В діаграми миттєвих значень напруги на вимірювальному елементі апарата АЗУР-5 при виникненні однофазного струму витоку на землю $R_{вум}=1$ кОм при різноманітній кількості RC - секцій ($n=2\dots 6$)

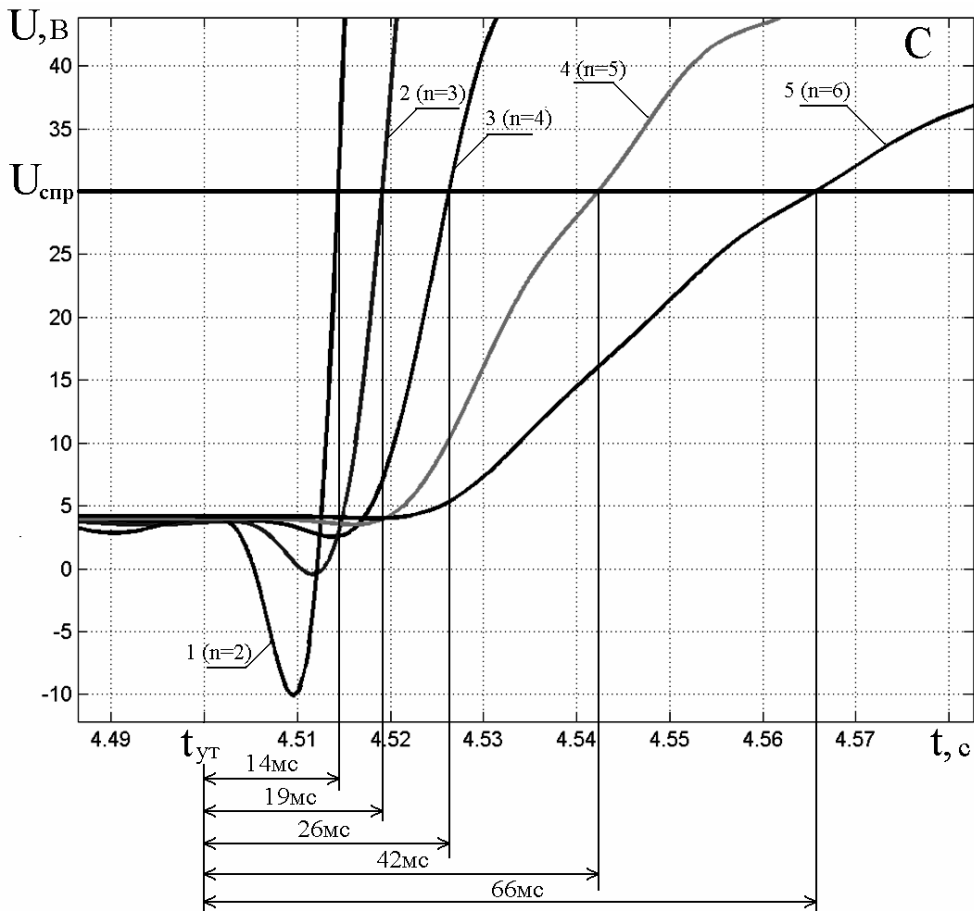


Рисунок 3.8 – Фрагмент С діаграми миттєвих значень напруги на вимірювальному елементі апарата АЗУР-5 при виникненні однофазного струму витоків на землю $R_{sum}=1$ кОм при різноманітній кількості RC - секцій ($n=2\dots6$), та визначення терміну захисного спрацювання апарата АЗУР-5

Аналіз результатів математичного моделювання перехідних процесів у ланці визначення оперативного параметру апарата захисту від витоків струму на землю типу АЗУР-5 при комутації відгалуження мережі та при виникненні однофазного струму витоків на землю наведений в табл. 3.1.

Таким чином, у результаті математичного моделювання перехідних процесів у ланці визначення оперативного параметру апарата захисту від витоків струму на землю типу АЗУР-5 отримано інтервали існування відносного перевищення напруги спрацювання при комутації відгалуження

мережі (рис. 3.9,а) та при виникненні однофазного струму витoku на землю наведені (рис. 3.9,б).

Таблиця 3.1

Кількісні показники моделювання перехідних процесів у ланці визначення оперативного параметру апарату захисту від витоків струму на землю типу АЗУР-5, обумовлених включенням кабельного відгалуження дільничної мережі або створенням ланцюга витoku струму (підвищеної провідності) на землю з величиною опору $R_{\text{вум}}=1$ кОм

включення відгалуження мережі						виникнення однофазного струму витoku ($R_{\text{вум}}=1$ кОм)			
№ кривої	кількість RC - секцій, n	характер перехідного процесу	перевищення уставки спрацювання апарату АЗУР-5	U на реагуючому елементі, В	відносне перевищення напруги спрацювання $\lambda_{\text{ком}} = U_{\text{max}} / U_{\text{спр}}$	термін спрацювання АЗУР-	U_{max} на реагуючому елементі, В	відносне перевищення напруги спрацювання $\lambda_{\text{уг}} = U_{\text{max}} / U_{\text{спр}}$	спрацювання апарату захисту АЗУР-5
1	2	коливальний	+	95	3,15	14	198	6,6	+
2	3		+	41	1,37	19	106	3,53	+
3	4		-	20	0,66	26	78	2,6	+
4	5	аперіодичний з перерегулюванням	-	13	0,43	42	63	2,1	+
5	6		-	10	0,3	66	54	1,8	+

У точках 1, 2 в разі комутаційного перехідного процесу (в мережі електротехнічного комплексу) має місце хибне спрацювання, апарату захисту АЗУР-5 ($\lambda > 1$), що робить не прийнятною кількість RC - секцій ($n < 3$) застосованих у відповідній конфігурації схеми АЗУР-5.

Розглянемо випадки $n=4$, $n=5$, $n=6$. Зі збільшенням кількості n зменшується λ , однак істотно збільшується термін спрацювання АЗ. Тому оптимальним є приєднання чотирьох RC - секцій ($n=4$), оскільки з допустимої

області (де $\lambda < 1$) він характеризується найменшим терміном спрацювання АЗУР-5.

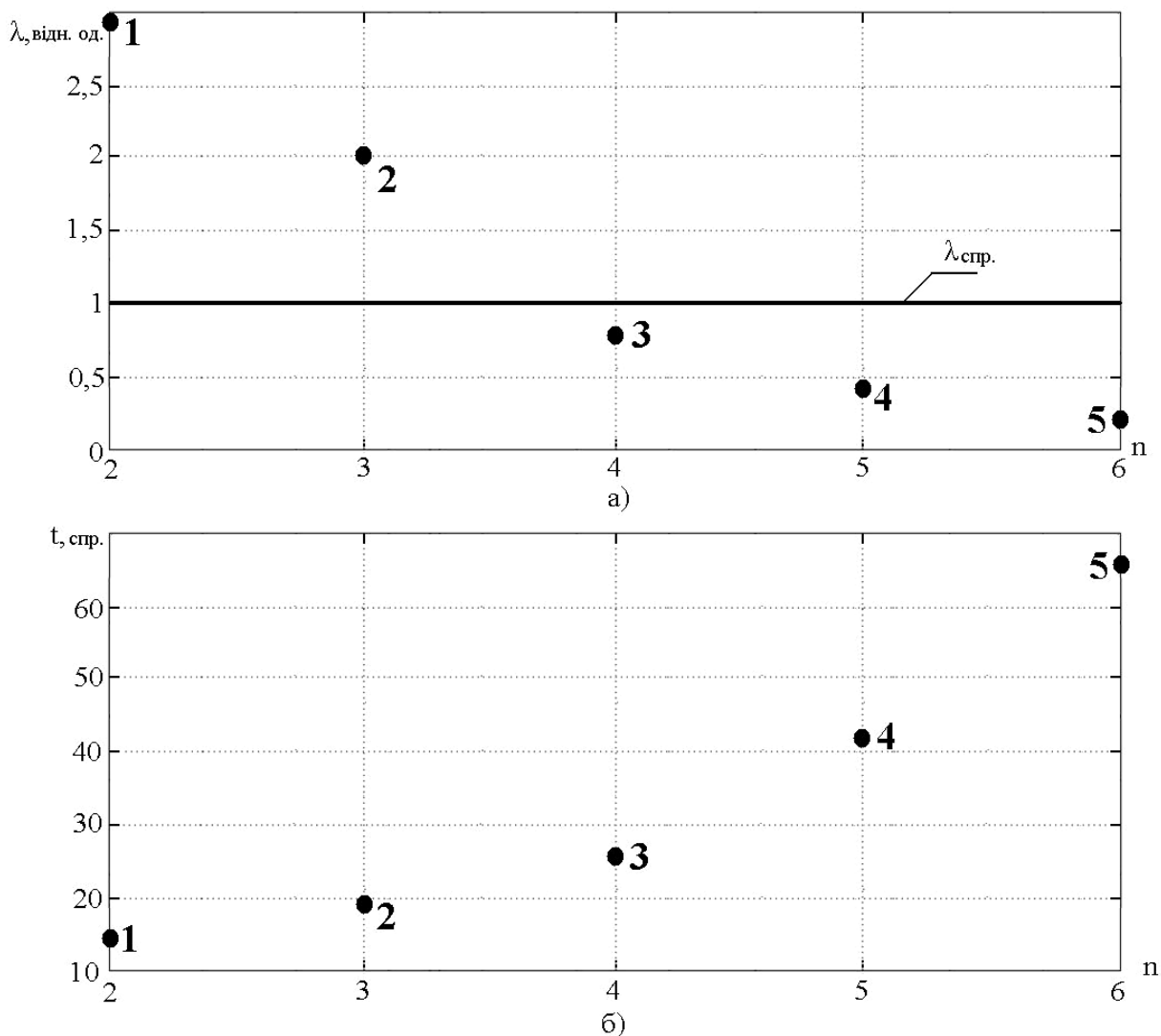


Рисунок 3.9 – Координати відносного перевищення напруги спрацювання при комутації відгалуження мережі (а) та виникненні однофазного струму витoku на землю (б)

При $n=5$ (6) $t_{спр.}=42$ мс (66мс), тобто більш ніж у 1,5 (2,5) рази перевищує 26мс, що є неприпустимим. Крім того, необґрунтоване збільшення кількості RC – секцій в схемі вимірювального органу АЗУР-5 не є раціональним, оскільки зменшує параметри надійності органу в цілому.

При виникненні струму витоку на землю та випадку $n=4$ відносно перевищення напруги спрацювання $\lambda=2,6$, тобто апарат гарантовано має спрацювати з необхідним запасом ($U_{max} > U_{cnp}$ у 2,6 рази).

Уточнення параметрів фільтра в складі схеми реагуючого органу апарата АЗУР-5 є доцільним заходом, що спрямований на підвищення швидкодії спрацювання захисту. Однак в умовах застосування високої напруги (3300 В) параметри швидкодії захисного знеструмлення дільничної мережі мають бути ще більш підвищені. Аналіз схемних рішень, запроваджених при проектуванні апарата АЗУР-5 свідчить про раціональність застосування засобів прискореного виявлення стану витоку струму на землю на основі виміру величини швидкості його наростання. Розглянемо властивості схеми, основаної на використанні виміру першої похідної оперативного струму, перетвореного у випрямлену напругу пропорційної величини. Комп'ютерна модель (рис. 3.10) вузла форсованого визначення стану витоку струму на землю в дільничній мережі запропонована з метою визначення його функціональних властивостей при застосуванні в складі схеми апарата захисту від витоків струму на землю в трифазній промисловій мережі напругою 3300 В і передбачає перетворення параметра, пропорційного оперативному струму апарата захисту у пропорційну за величиною випрямлену напругу з подальшою реакцією на швидкість зміни її величини. Звісно, модель передбачає відповідність величин активного і ємнісного опорів ізоляції мережі реальним величинам, типовим для сучасних шахтних дільничних електромереж.

Аналіз параметрів струму витоку на землю (при виникненні кола витоку в момент t_1 , $R_{ВИТ}=1$ кОм) реакції схеми на утворення стану витоку струму на землю (рис. 3.11) дозволяє зробити висновок про відповідність властивостей засобу форсування визначення стану витоку струму на землю вимогам прискорення захисного знеструмлення мережі і наявності складової підвищеної частоти в параметрі напруги на компенсуючому дроселі. Це кореспондується з раніш прийнятими припущеннями про те, що імпульс впливу на резистор

реагуючого органу апарата АЗУР-5 може бути представлений сукупністю гармонік напруги, частоти яких перевищують 100 Гц.

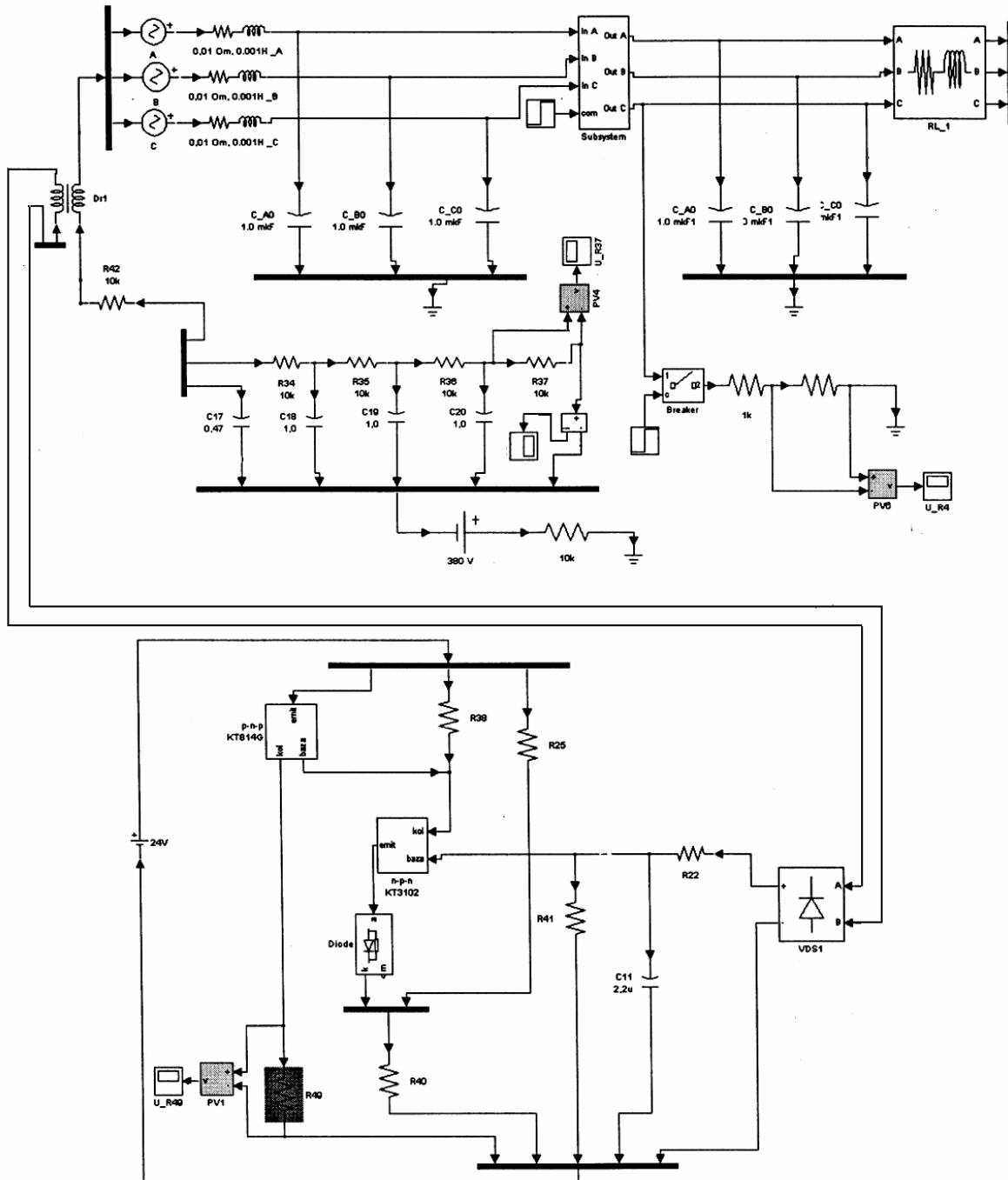


Рисунок – 3.10 Комп'ютерна модель вузла форсування та фільтру низької частоти що полягає з чотирьох RC - секцій для визначення терміну захисного спрацювання апарата АЗУР-5

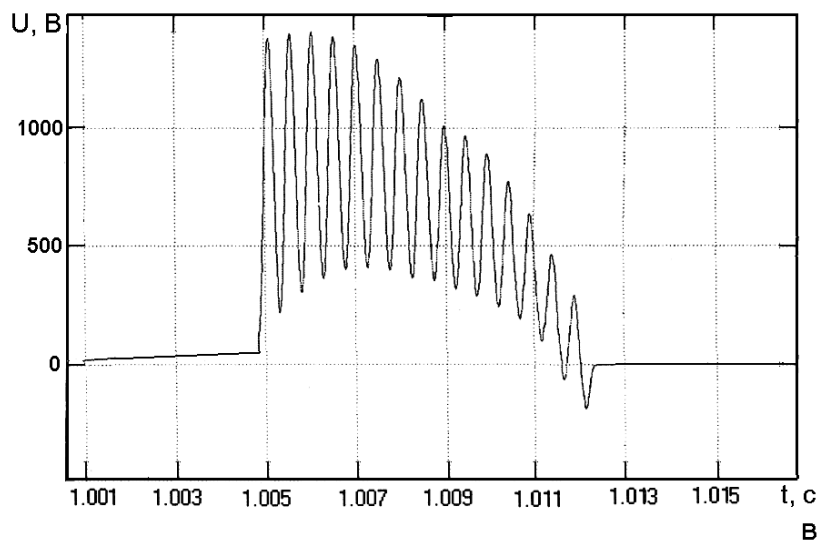
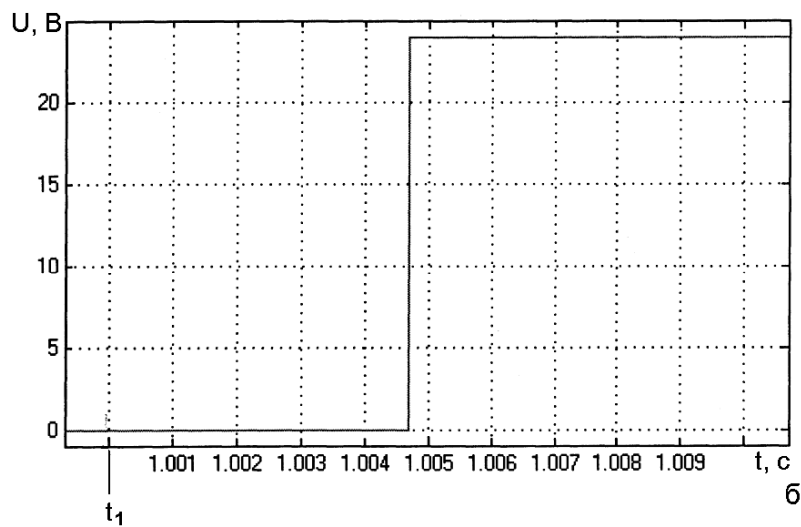
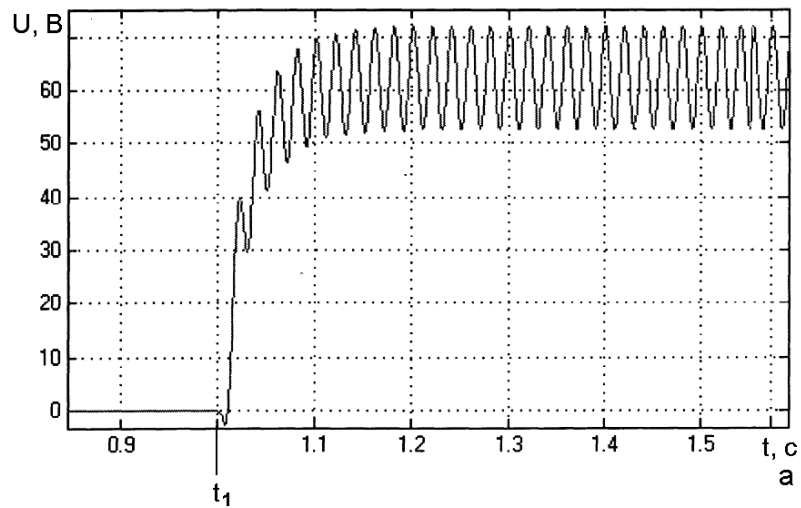


Рисунок 3.11 - Діаграми миттєвих значень напруги на вимірювальному елементі апарата АЗУР-5, при виникненні однофазного струму витоку на землю $R_{\text{вум}}=1$ кОм (а), напруги на реагуючому елементі блоку форсування (б) та напруги на компенсуючому дроселі (в)

3.3 Аналіз результатів промислових випробувань дослідного зразка апарата АЗУР-5 з урахуванням впливу комутаційних процесів в електротехнічному комплексі дільниці шахти

Електротехнічний комплекс як об'єкт дослідження представлений структурою стенда відповідно до схеми (рис. 3.12). Ця схема складається з типових компонентів шахтного дільничного електротехнічного комплексу, до яких відносяться: підстанція ВСТПКРУ1000-6,0-3,3; апарат захисту від витоків струму на землю (досліди проводилися стосовно апарату АЗУР-5); двоканальний цифровий осцилограф TDS2002C; набір активних опорів і ємностей для імітації параметрів провідності ізоляції електричної мережі відносно землі (що визначається ГОСТ 22929-78, п.5.2). В якості силового навантаження, що є об'єктом контакторної комутації, застосований асинхронний двигун з короткозамкненим ротором типу SG3 потужністю 200 кВт. Схема вторинної обмотки трансформаторної підстанції забезпечує живлення її силового приєднання в режимі ізольованої нейтралі. Номінальна лінійна напруга мережі 3300В, частота напруги 50 Гц, кількість фаз – 3.

Експериментальні дослідження мають на меті підтвердження адекватності теоритичних досліджені в мережі при застосуванні апарата захисту типу АЗУР-5 (дослідний зразок).

Отриманими осцилограмами (рис. 3.13) підтвержена відповідність параметрів обекта дослідження, отриманих експерементально результатам теоритичного дослідження, що дозволяє зробити висновок про раціональність прийнятих припущень, формалізації і побудови структури моделі дослідження електротехнічного комплексу з урахуванням функціонування схеми апарата захисту від витоків струму на землю типу АЗУР-5, призначеного для експлуатації в мережі 3300В.

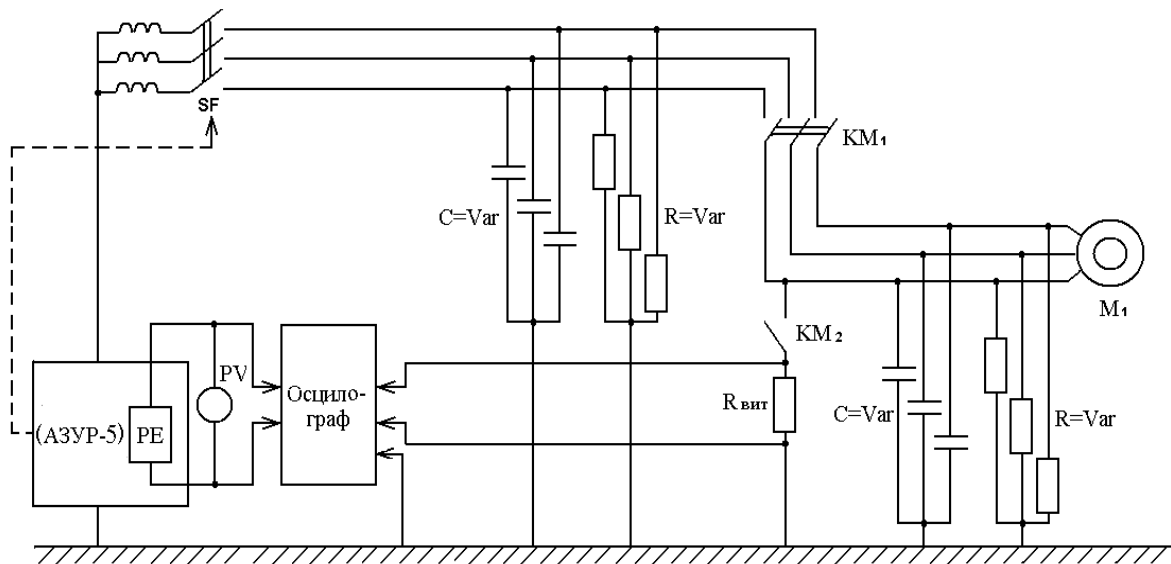
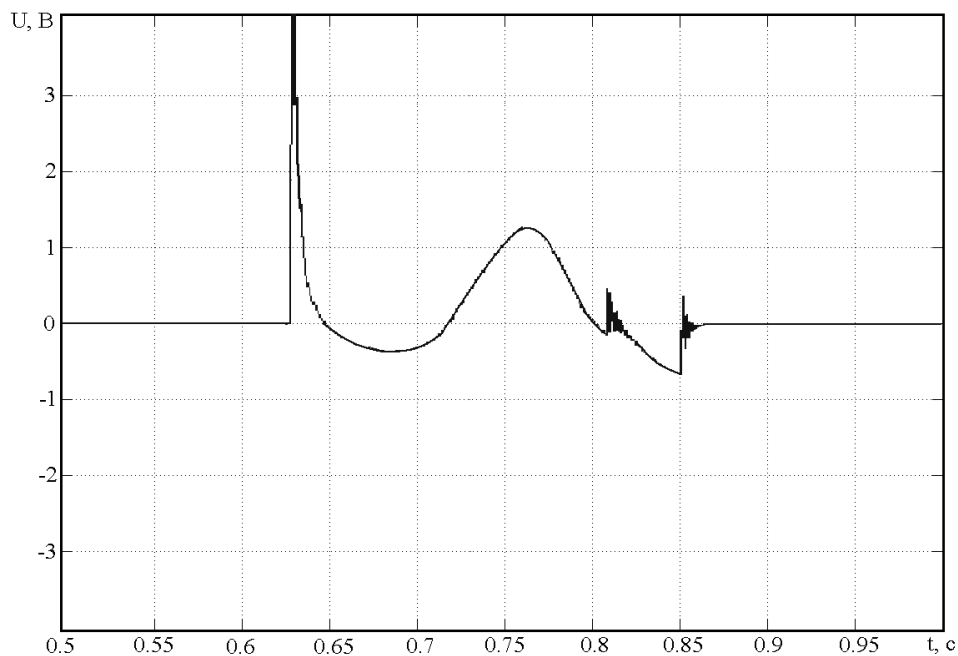


Рисунок 3.12 - Схема стенда для дослідження впливу комутаційних перехідних процесів на параметри контрольованого сигналу в схемі апарата захисту від витоків струму на землю типу АЗУР-5

У ході досліджень виконувалась контакторна комутація відгалуження мережі при різних ємностях ізоляції невідключеної частини, а ємність відключеної частини була $0,15 \text{ мкФ/фазу}$. При цьому аналізувався та порівнювався характер перехідних процесів отриманих теоретично та експериментально (рис. 3.13). Порівняльний аналіз осцилограм перехідних процесів у колі оперативного струму АЗ при комутації відгалуження мережі показав їхню якісну подібність із аналогічними часовими залежностями, отриманими при математичному моделюванні. Деяка різниця між експериментальними та теоретичними осцилограмами обумовлена тим, що у ході математичного моделювання маємо можливість приймати найбільш критичні параметри.



a)



б)

Рисунок – 3.13 Осцилограма падіння напруги на резисторі $R_{ш}$ в ланцюзі струму витoku, отримана експериментально (а) та теоретично (б) при ємності невідключної частини мережі 0,15 мкФ/фазу

Зокрема, момент виникнення струму витоку на землю відбувається, коли синусоїда напруги заряду ємності на відповідній фазі досягає свого максимуму (що експериментально перевірити досить важко). Цим створюється можливість дослідження процесів при найбільш критичних умовах комутації для апарата захисту від струмів витоку на землю.

Таким чином, теоретично обґрунтована і експериментально доведена раціональність застосування RC – ланцюга в схемі визначення оперативного параметру апарата захисту від витоків струму на землю АЗУР-5 в дільничній мережі номінальної напруги 3300В, як засобу запобігання хибному спрацьовуванню апарата захисту від впливу комутаційних перехідних процесів в дільничній мережі. Обґрунтована достатня кількість елементарних RC – ланок, що мають бути застосовані в схемі RC – ланцюга шляхом паралельного з'єднання. Запропонована методика дослідження і обґрунтування структури і параметрів технічного засобу визначення оперативного параметру, запроваджені у промисловості при проектуванні схеми і визначенні параметрів апарата захисту від витоків струму на землю типу АЗУР-5.

4 РАЦІОНАЛЬНІ РІШЕННЯ ІЗ УДОСКНАЛЕННЯ СПОСОБУ УПРАВЛІННЯ ЗАСОБАМИ РЕГУЛЬОВАНОЇ КОМУТАЦІЇ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ СПОЖИВАЧІВ

4.1 Обґрунтування доцільності застосування пристроїв регульованої комутації відповідно до параметрів мережі шахтного дільничного електротехнічного комплексу

У ході виконаних досліджень встановлена можливість протидії хибному спрацьовуванню АЗ шляхом застосування регульованої комутації силових електроспоживачів. Однак застосування відповідних пристроїв для дистанційного ввімкнення – відключення всіх (без винятку) асинхронних двигунів дільниці є фактором суттєвого збільшення коштовності силового електрообладнання і відповідно до окремих, конкретних конфігурацій дільничних електромереж може бути непотрібним. Тому є доцільним порівняння функціональних властивостей (у т.ч. впливовості на стійкість роботи АЗ) контакторних та регульованих засобів комутації силових приєднань з урахуванням конкретних параметрів мереж шахтних дільничних електротехнічних комплексів.

Для виявлення відгалужень шахтної дільничної електромережі, у яких необхідно встановлювати пристрої регульованої комутації, необхідно використати наступний алгоритм (рис. 4.1). У першу чергу, - задатися масивом A_1 параметрів елементів електромережі дільниці, що передбачає паспортні дані всіх елементів дільничної електромережі, довжини кабелів і т. п. (блок 2). За даними масиву A_1 мають бути обчислені: параметри схем заміщення АД, фактичні параметри ізоляції кабелів і т.п.

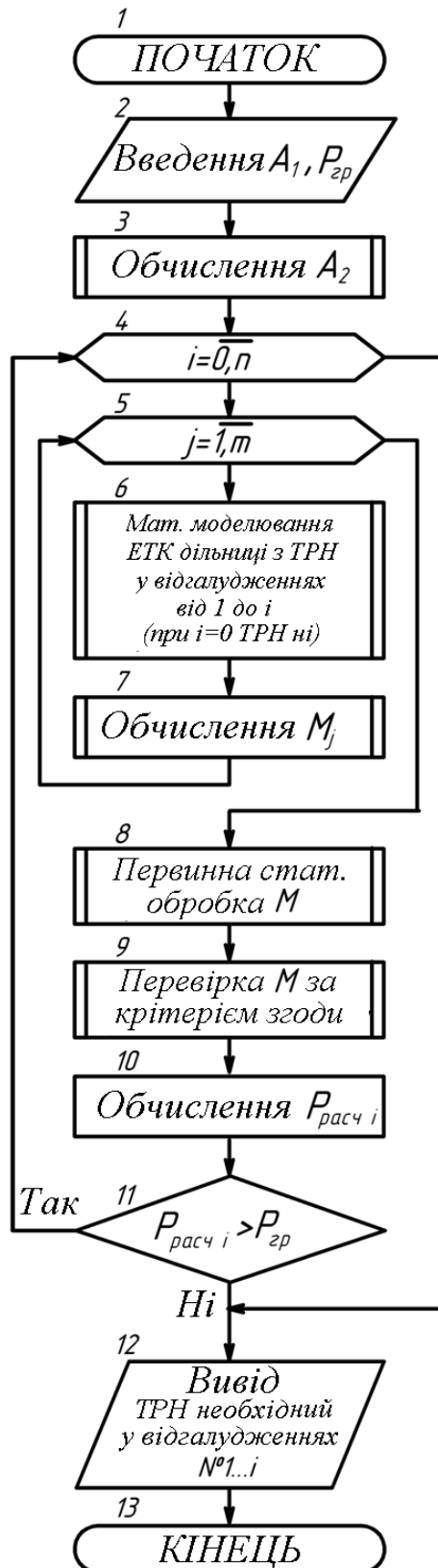


Рисунок 4.1- Блок-схема алгоритму виявлення відгалужень шахтної дільничної електромережі, у яких необхідно встановлювати ТРН для забезпечення заданої ймовірності хибного спрацьовування АЗ

Отримані величини, згруповані в масив A_2 (блок 3) і є вихідними даними для проведення моделювання відповідно до обґрунтованої в розділі 2 математичної моделі електромережі дільниці шахти, що враховує коло оперативного параметра апарата захисту від витоків струму на землю та стохастичний характер горіння електричної дуги при комутаціях силових електроспоживачів. При первинному розрахунку розглядається система за відсутності пристроїв регульованої комутації. У блок-схемі на рис. 5.1 це відповідає випадку $i=0$, де i - номер останнього відгалуження, у якому встановлений ТРН, рахуючи від першого номера. При цьому вважається, що приєднання пронумеровані в порядку зниження потужностей електродвигунів (відгалуження №1 живить найбільш потужне АД, відгалуження № n - АД найменшої потужності, де n - загальне число відгалужень).

У результаті проведення m актів дослідження (наприклад, $m=50$ або 100) має бути отримана вибірка M максимальних значень струму (напруги) на реагуючому органі апарата захисту в момент комутації (блоки 5-7). Після виконання первинної статистичної обробки вибірки M (блок 8) і перевірки її за критерієм згоди (блок 9) необхідно визначити розрахункову ймовірність $P_{розр i}$ перевищення струму (напруги) на реагуючому органі порога спрацьовування (блок 10), для чого можна використати залежність (2.102). Задавшись гранично припустимою ймовірністю $P_{зр}$ (блок 2) помилкового спрацьовування апарата захисту і виконавши порівняння $P_{розр i}$ та $P_{зр}$ (блок 11), робиться висновок про необхідність (при $P_{розр i} > P_{зр}$) застосування регульованої комутації або відсутності такої необхідності (при $P_{расч i} < P_{зр}$).

У випадку виявлення необхідності використання пристроїв регульованої комутації в моделі дільничної електромережі тиристорний комутатор доцільно підключати у коло найбільш потужного двигуна ($i = 1$) і виконувати повторний розрахунок з метою визначення ймовірності $P_{розр i}$ помилкового спрацьовування АЗ. Якщо $P_{розр i} < P_{зр}$, розрахунок припиняється. У іншому випадку є

доцільність в оснащенні регулятором напруги кожного наступного відгалуження $(1, \dots, i)$ доти, поки не буде виконуватися умова $P_{розр i} < P_{зр}$. У результаті розрахунку робиться вивід про необхідність оснащення відгалужень №№ $1, \dots, i$ тиристорними регуляторами напруги (блок 12).

4. 2 Дослідження процесів в системі «тиристорний регулятор напруги – асинхронний двигун» в контексті реалізації принципу регульованої комутації силового приєднання

Доцільність застосування тиристорного регулятора з функцією фазового регулювання вихідної напруги як силового комутаційного засобу, що не створює передумов до хибного спрацьовування АЗ, обумовлює необхідність аналізу процесів в системі «ТРН-АД» з метою встановлення прийнятного закону зміни заданого кута α відпирання силових тиристорів в процесі реалізації уповільненого пуску АД. Відмінною особливістю функціонування об'єкту дослідження є активна функція (вплив на процеси) з боку ЕРС обертання, індукованої в статорі АД полем струмів ротора [28]. Її дія відносно ТРН може призвести до виникнення автоколивань параметрів в системі «ТРН-АД».

Питання стійкості цієї системи під час фазового регулювання напруги живлення АД дослідженні в роботах [29-34]. Зокрема, встановлені умови, необхідні для виникнення і підтримання автоколивань в ланцюзі статора АД (I_{1m}), ЕРС обертання $E_{обт}$ АД, а також кутів відпирання α та провідності β тиристорів ТРН (рис. 4.2, де $\frac{E_{обт}}{U_{ном}}$ - відношення амплітуд ЕРС обертання та номінальної напруги відповідної фази; $\frac{I_{1m}}{I_{1н}}$ - відношення амплітуд фактичного та номінального струму статора АД).

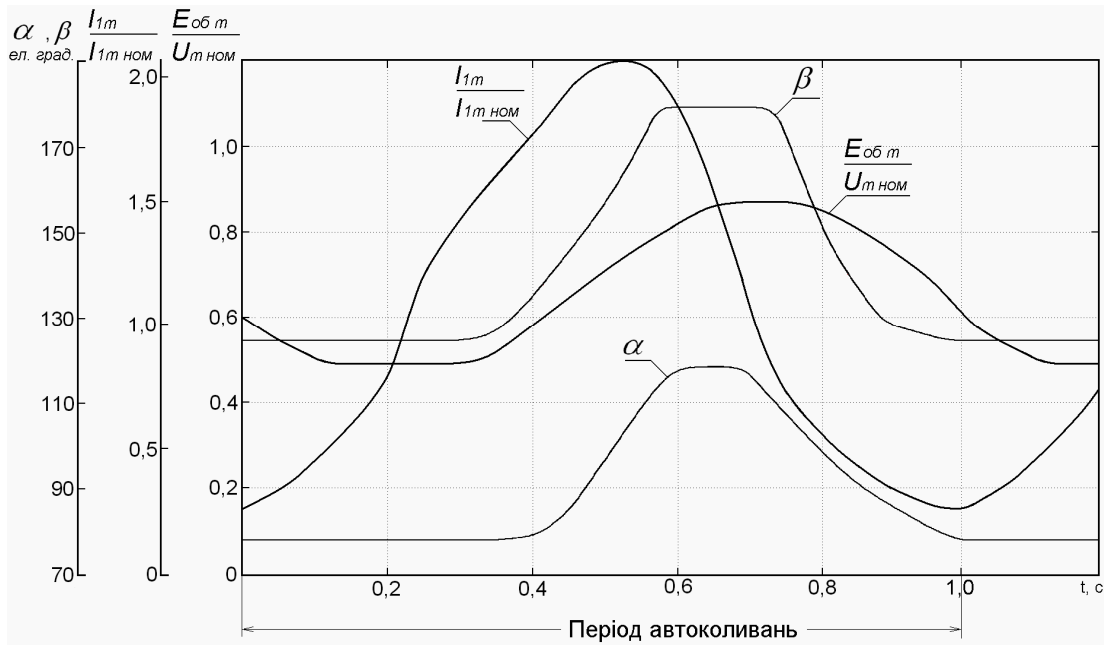


Рисунок 4.2 - Діаграми параметрів системи «ТРН-АД» при виникненні автоколивань [29]

Визначена причина штучного відхилення кутів α та β від заданих величин, якою є підвищення величини ЕРС обертання АД за умови підвищеного рівня струму живлення АД при $\alpha \gg 0$ та високої, близької до номінальної, кутової швидкості ротора. Саме в цьому разі виникають часові інтервали, де миттєві значення фазних ЕРС обертання АД, що діє з боку статора, перевищує величини миттєвих значень відповідних вихідних напруг ТРН ($u_A^|$, $u_B^|$, $u_C^|$ рис.4.3). Це є причиною: виникнення фактичних кутів відпирання (α_f) та провідності (β_f) тиристорів ТРН, що суттєво відрізняються від заданих (α_3); створенню умов до повного відпирання тиристорів ТРН, подальшого зменшення струму АД і повернення ЕРС обертання АД, кутів α і β до вихідних величин ($\alpha = \alpha_3$).

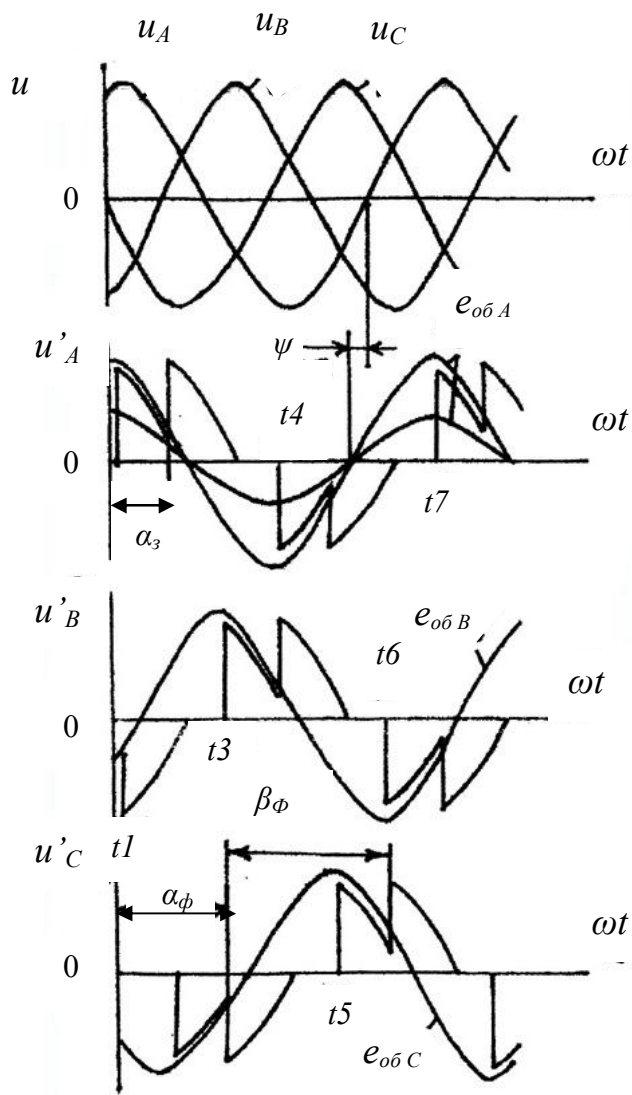


Рисунок 4.3 - Діаграми напруг системи «ТРН-АД» в процесі автоколивань при фазовому регулюванні напруги

Наведені результати базуються на експериментальних даних дослідженнях сталого процесу автоколивань параметрів “тиристорний регулятор напруги – асинхронний двигун” при незмінній величині заданого кута α_3 відпирання тиристорів. Однак, актуальною є задача теоретичного дослідження зазначених вище автоколивальних процесів на основі моделювання з метою визначення особливостей їх протікання під час зміни в певному часовому інтервалі заданих кутів α_3 відпирання тиристорів ТРН. Одним із актуальних результатів цього дослідження має бути визначення особливостей протікання автоколивальних

процесів в системі “ТРН-АД” за умови наявності динаміки зміни величини α_3 . Практичне значення цього дослідження постає в обґрунтуванні часової діаграми зміни фазового кута α_3 під час пуску АД з метою мінімізації амплітудно-часових параметрів автоколивального процесу в системі “ТРН-АД”.

Аналіз процесів в системі “ТРН-АД” (в динаміці зміни кута α_3 відпирання тиристорів) в процесі керування пуском АД передбачає обґрунтування і дослідження відповідних математичної та комп’ютерної моделей.

Як правило, розрахункова схема для систем фазового управління в статорі асинхронного двигуна містить трифазне джерело живлення u_A ; u_B ; u_C , і тиристорний регулятор напруги VS1-VS6, підключений виходом до статора асинхронного двигуна М (рис. 4.4, а) [30].

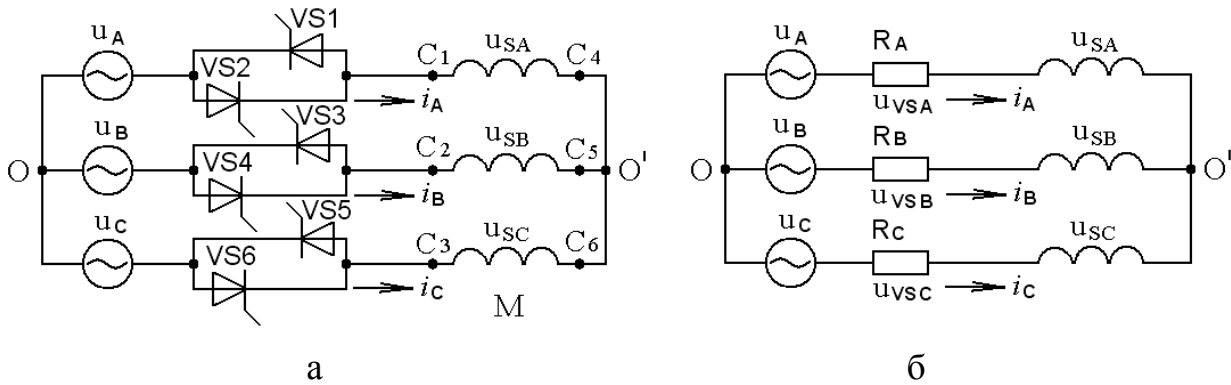


Рисунок 4.4 – Розрахункова схема для дослідження процесів у системі “ТРН-АД” при фазовому управлінні (а), схема заміщення (б)

Оскільки з двох тиристорів, що приєднані у кожен фазу зустрічно-паралельно, у стані провідності в кожен момент часу може знаходитися лише один, кожен з таких пар тиристорів (VS1 - VS2; VS3 - VS4; VS5 - VS6) можна під час розрахунків уявити активними опорами R_A , R_B , R_C , відповідно. Величина кожного такого опору змінюється стрибкоподібно від R_{max} до R_{min} при відпиранні одного з тиристорів пари (рис. 4.4, б), наприклад:

$$R_A = \begin{cases} R_{min}, & \text{якщо } VS1 = 1 \text{ або } VS2 = 1; \\ R_{max}, & \text{якщо } VS1 = 0 \text{ та } VS2 = 0, \end{cases} \quad (4.1)$$

де $VS1=1$ позначає відкритий стан тиристора VS1, а $VS1=0$, відповідно, - непровідний.

Падіння напруги u_{VSA} ; u_{VSB} та u_{VSC} на кожному такому опорі дорівнює:

$$u_{VSA} = i_A R_A; \quad u_{VSB} = i_B R_B; \quad u_{VSC} = i_C R_C, \quad (4.2)$$

де i_A , i_B , i_C - струми у фазах А, В та С, відповідно.

Якщо позначити напругу між нульовими точками джерела живлення (O) та обмотки статора двигуна (O') через $u_{OO'}$, то для кожної з фаз можна скласти рівняння згідно другого закону Кірхгофа [35]:

$$\begin{cases} u_{VSA} = u_A - u_{OO'} - u_{SA}; \\ u_{VSB} = u_B - u_{OO'} - u_{SB}; \\ u_{VSC} = u_C - u_{OO'} - u_{SC}. \end{cases} \quad (4.3)$$

де u_{SA} ; u_{SB} ; u_{SC} - падіння напруги на обмотках статора АД.

Користуючись першим законом Кірхгофа, враховуючи симетрію обмоток статора та систему (3), напругу $u_{OO'}$ можна визначити наступним чином:

$$u_{OO'} = \frac{(u_A - u_{VSA}) + (u_B - u_{VSB}) + (u_C - u_{VSC})}{3}. \quad (4.4)$$

З урахуванням параметрів активних опорів статора і ротора (R_s, R_r), індуктивностей статора, ротора і головного магнітного поля, відповідно, $L_s; L_r; L_m$, розрахункова схема системи "ТРН-АД" має бути представлена відповідно до рис. 4.5. В цій системі суттєвим є вплив на процеси з боку фазних електрорушійних сил кутової швидкості ротора (ЕРС оберт.), індуктованої в обмотці статора [33]:

$$-e_{o6r} = \frac{1}{\sqrt{3}} p \omega (L_m (2i_{sA} + i_{sB}) + L_r (2i_{rB} + i_{rA})), \quad (4.5)$$

де p – кількість пар полюсів АД; i_s та i_r - струми статора та ротора; ЕРС e_{o6r} має знак (-) по відношенню до ЕРС обертання, індуктованої в обмотці статора.

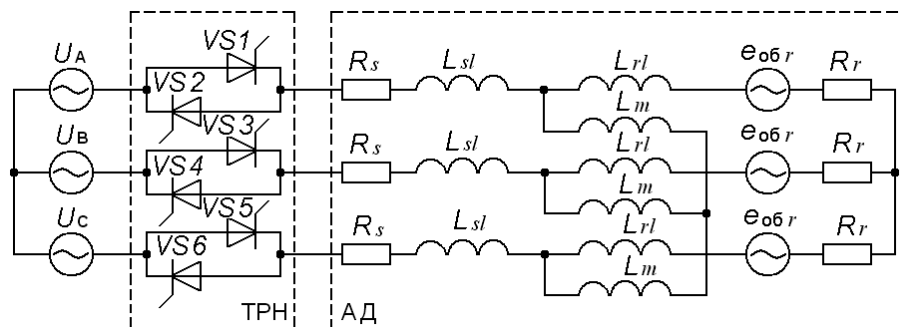


Рисунок 4.5 – Схема заміщення системи "ТРН-АД"

Для опису асинхронного двигуна використовується математична модель складена згідно методу просторового вектора у системі координат статора [35, 36]:

$$\begin{cases} \bar{\psi}_s = \int (\bar{u}_s - \bar{i}_s R_s) dt + \bar{\psi}_s(0); \\ \bar{\psi}_r = \int (j\omega \bar{\psi}_r - \bar{i}_r R_r) dt + \bar{\psi}_r(0); \\ \omega = \frac{1}{J} \int (M - M_C) dt + \omega(0); \\ M = -\frac{3}{2} I_M [\psi \bar{i}_r]; \\ \bar{i}_s = \frac{1}{L_s L_r - L_m^2} (L_r \bar{\psi}_s - L_m \bar{\psi}_r); \\ \bar{i}_r = \frac{1}{L_s L_r - L_m^2} (L_s \bar{\psi}_r - L_m \bar{\psi}_s). \end{cases} \quad (5.6)$$

Початковими є величини:

$\bar{\psi}_s(0+) = \bar{\psi}_r(0+) = \omega(0+) = 0$, що відповідає процесу пуску АД,

де $\bar{\psi}_r$, $\bar{\psi}_s$, \bar{i}_r , \bar{i}_s - просторові вектори, ψ - спряжений вектор к $\bar{\psi}_r$.

Залежність моменту машини від кутової швидкості визначається з відношення:

$$M_C(\omega) = M_0 + (M_H - M_0) \left(\frac{\omega}{\omega_H} \right)^k, \quad (4.7)$$

де M_0 - момент опору руху при нульовій швидкості; M_H - момент опору при номінальній швидкості; k - коефіцієнт, що характеризує зміну моменту при збільшенні швидкості ($0 < k \leq 2$). [37]

Просторовий вектор напруги статора \bar{u}_s формується з фазних напруг u_{SA} , u_{VB} , u_{SC} :

$$\bar{u}_s = \frac{2}{3} [u_{SA} + e^{j120^\circ} \cdot u_{SB} + e^{j240^\circ} \cdot u_{SC}], \quad (4.8)$$

а струми у фазах мережі i_A , i_B , i_C обраховуються за просторовим вектором струму статора \bar{i}_s наступним чином:

$$i_A = \text{Re}[\bar{i}_s]; \quad i_B = \text{Re}[e^{j120^\circ} \cdot \bar{i}_s]; \quad i_C = \text{Re}[e^{j240^\circ} \cdot \bar{i}_s]. \quad (4.9)$$

Моделювання незалежної роботи тиристорів різних фаз при фазовому регулюванні та трифазній комутації вентилів базується на використанні логічної функції [38]:

$$V_i = X_i \cdot Z_i + Y_i, \quad (4.10)$$

де V_i - логічна змінна, що дорівнює "1" при провідному стані i - го тиристора та "0" в разі його несправного стану; X_i відповідає напрузі на тиристорі, Y_i - струму через тиристор, Z_i - сигналу керування.

Наведені залежності являють собою математичну модель системи "ТРН – АД" при фазовому регулюванні напруги на виході ТРН, яка реалізується структурною схемою (рис. 4.6):

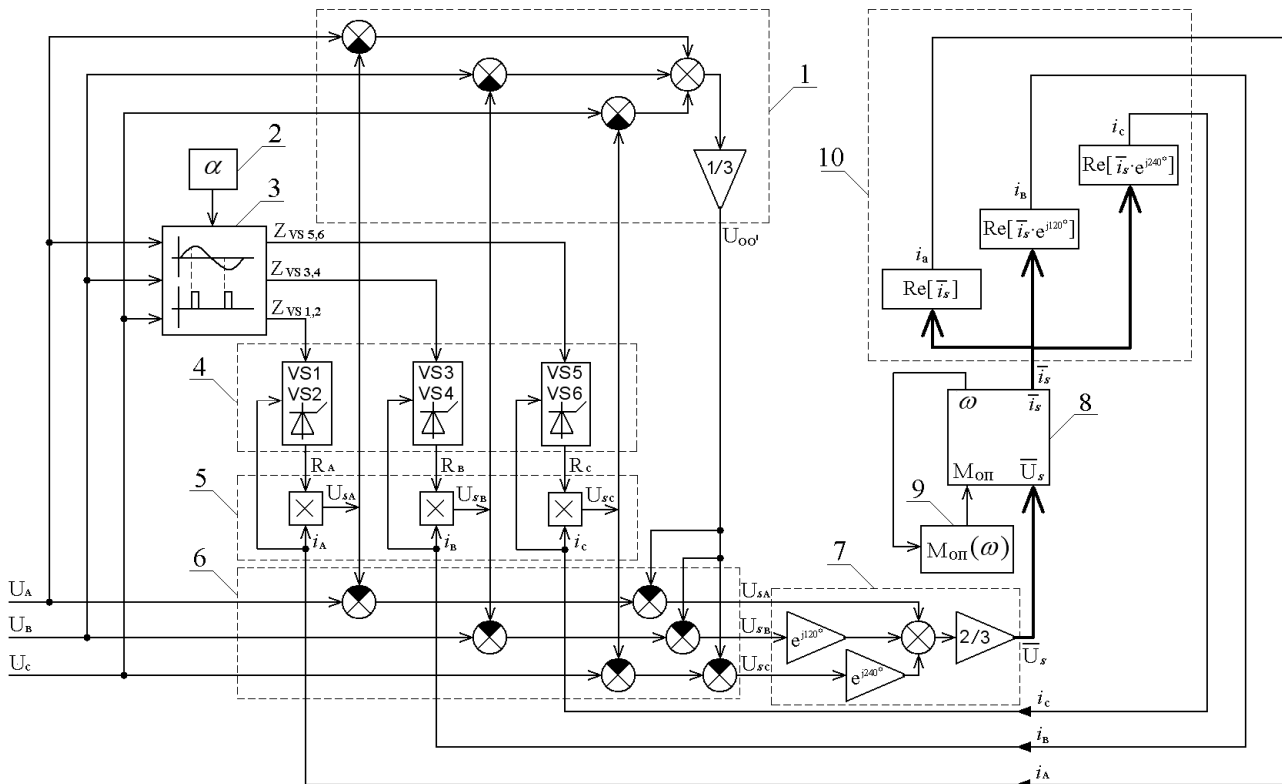


Рисунок 4.6 - Узагальнена структура моделі системи "ТРН-АД"

Групи блоків позначені наступними позиціями:

- 1 – блоки для визначення напруги зміщення нейтралі $u_{oo'}$ згідно з (4.6);
- 2 – модель засобу завдання кута α відкриття тиристорів;

3 - модель СІФУ, що видає сигнали керування $Z_{VS1,2}$ на тиристорі у фазі А (VS1 та VS2), $Z_{VS3,4}$ - у фазі В, $Z_{VS5,6}$ - у фазі С при умові синхронізації за напругою мережі;

4 – моделі пар тиристорів, ввімкнених у кожен фазу, що реалізують залежності (4.1) та (4.10);

5 – обрахування згідно (4.2) падіння напруги на опорах, що моделюють пари тиристорів у кожній фазі;

6 – визначення фазних напруг на обмотках статора двигуна згідно (4.3);

7 – залежність (4.8) для обчислення просторового вектора \bar{u}_s ;

8 – модель АД згідно (4.6);

9 - модель визначення моменту АД в залежності від кутової швидкості ротора згідно (4.7);

10 – вирази (4.9) для обчислення миттєвих значень струмів i_A, i_B, i_C у фазах мережі.

В процесі досліджень запропонованої моделі прийняті наступні припущення: в якості асинхронного двигуна системи “ТРН-АД” прийнята машина типу ЭДКОФВ315LB4 потужністю 250 кВт [39] з відповідними параметрами активних опорів, індуктивностей та моменту інерції (J_M); лінійна номінальна напруга джерела живлення 1140 В, частота напруги 50 Гц; номінальний електромагнітний момент двигуна $M_H=1613$ Н*м; номінальна кутова швидкість ротора $\omega_{ном}=1480,5$ об/хвил; момент опору ($M_{оп}$) задається при моделюванні в діапазоні $0,1M_H < M_{оп} < M_H$. Під час керованого пуску АД фазовий кут α відкриття тиристорів ТРН зменшується від 140 ел. град. до 0 ел. град. за лінійним законом на протязі заданого часового інтервалу ΔT .

Комп’ютерним моделюванням підтверджена наявність автоколивальних процесів в системі “ТРН-АД” при досягненні двигуном кутової швидкості, близької до номінальної, за умови, якщо заданий кут α відкриття тиристорів ТРН є набагато більшим, ніж 0 ел. град. (85 ел. град. $<\alpha <45$ ел. град.). Ці

автоколивання є джерелом впливу на електромеханічні параметри АД, зокрема, спроможні привести до коливань кутової швидкості ротора (в часовому інтервалі ΔT зміни кута α_3 , що задається) при незначних сукупних моментах інерції J_Σ електропривода ($J_\Sigma = 1,1 J_M$, рис. 4.2,а). Цей момент інерції є фактором найбільш суттєвого впливу на параметри перехідного процесу розгону електропривода (4.5) і здатен у залежності від своєї величини не допустити виникнення вищевказаних коливань швидкості ротора або суттєво зменшити їхню амплітуду ($J_\Sigma = 1,6 J_M$, рис. 4.7,б). Однак, сама наявність автоколивальних процесів в системі „ТРН-АД” (тобто, вихід цієї системи з під керуваності з боку пристрою завдання кута α_3) потребує відповідних коректуючих технічних рішень.

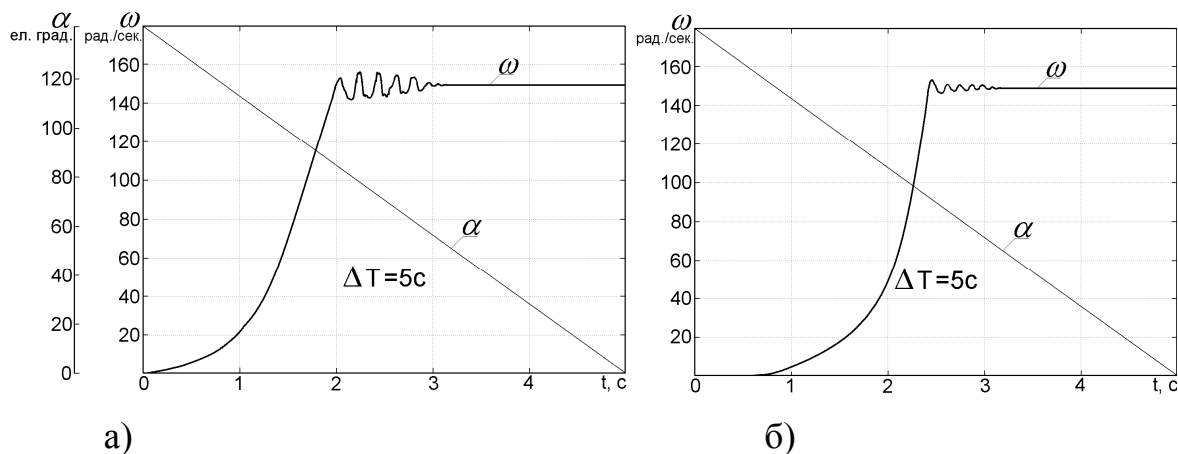


Рисунок 4.7 - Діаграма зміни частоти обертання ротора (ω) АД при пуску в процесі змінення кута α_3 відпирання тиристорів ТРН при моментах інерції $J_\Sigma = 1,1(a)$, та $J_\Sigma = 1,6 J_M(b)$

Зазначені вище автоколивальні процеси виявлені і в результаті експериментальних досліджень. В ході експерименту до виходу ТРН (в системі „ТРН-АД”) підключалося трифазне навантаження – активні опори, з’єднані за схемою „зірка”. В системі „ТРН-АД” був задіяний асинхронний двигун з короткозамкненим ротором ВАО-51-4-У2 потужністю 7,5 кВт. Лінійна напруга мережі – 380 В. Фазна напруга, що знімалася з опору однієї з фаз через дільник напруги, АЦП, передавалася на персональний комп’ютер, що дозволяло

фіксувати і аналізувати параметри процесу. На рис. 4.8 наведені осцилограми фазної напруги на інтервалі періода автоколивань (заданий кут α_3 був незмінним і становив 60 ел. град). Встановлено що діапазон заданих кутів α_3 відпирання тиристорів ТРН, при якому відбуваються автоколивальні процеси, становить від 85 ел. град до 45 ел. град.

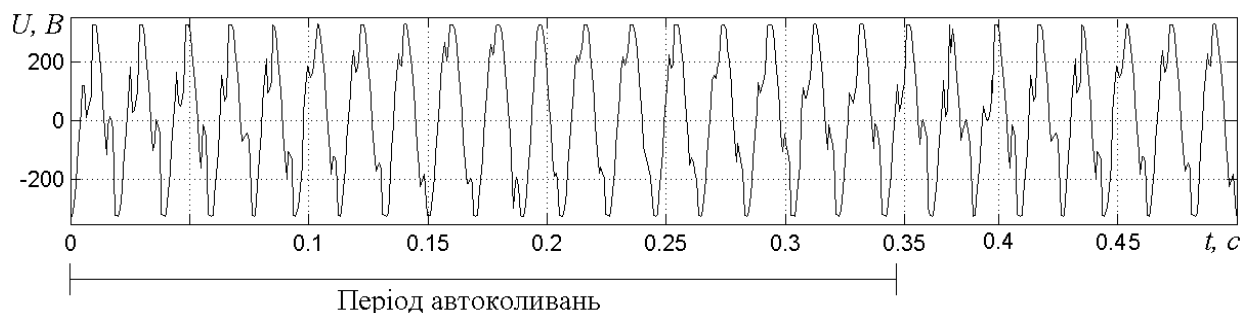


Рисунок 4.8 - Осцилограма фазної напруги на інтервалі періода автоколивань при заданому куті $\alpha_3 = 60$ ел. град./с.

Отже прийнятним способом уникнення цих автоколивань слід вважати двоетапний закон завдання інтенсивності Q зміни кута α_3 . Зокрема, за умови $\omega \approx \omega_{ном}$; $\alpha_{зад} \approx 90$ ел. град./с. доцільним є підвищення параметру Q до 50 ел. град./с (рис. 4.9).

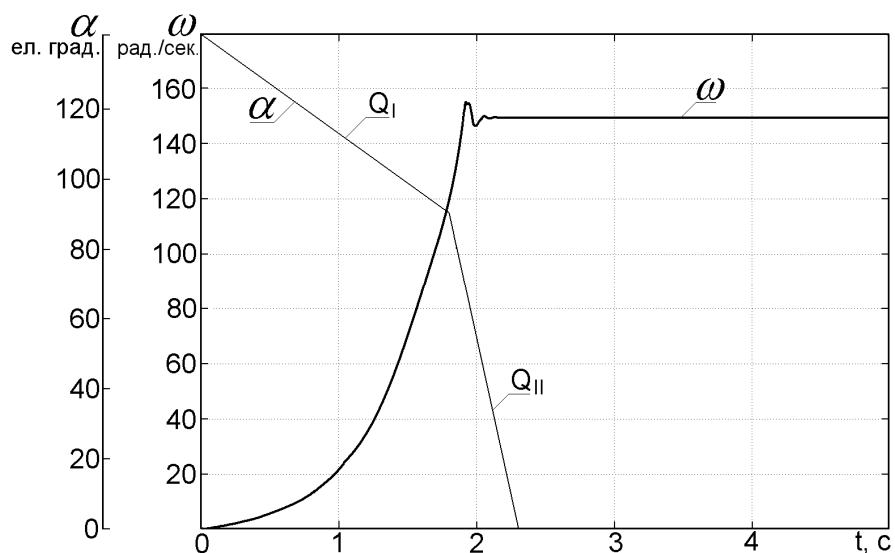


Рисунок 4.9 - Діаграма зміни частоти обертання ротора (ω) АД при двоетапному законі завдання інтенсивності Q зміни кута α_3

Вплив зазначеного вище процесу керування тиристорами ТРН (під час виконання повільного пуску АД) на параметри стійкості дільничного апарата захисту (АЗ) від витоків струму на землю може бути визначений дослідженням комп'ютерної моделі (рис. 2.31, 2.36).

В результаті моделювання отримана отримана залежність падіння напруги на реакуючому елементі АЗ (R_5) при двоетапном законі ($Q_I=28$ град./с, $Q_{II}=150$ ел. град./с) зміни інтенсивності кута відкриття тиристорів α (рис. 4.10).

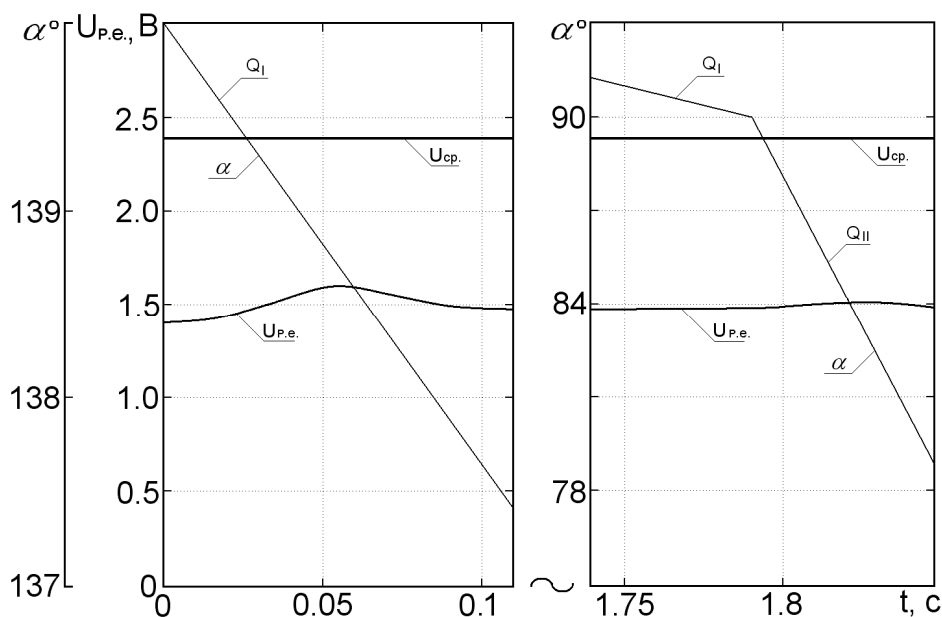


Рисунок 4.10 – Залежність падіння напруги $U_{p.e.}$ на реакуючому елементі АЗ (R_5) при двоетапном зменшенні кута відкриття тиристорів (α)

Ці результати повністю узгоджуються з експериментальними даними (рис. 4.11) і свідчать про те, що застосування тиристорного регулятора напруги для уповільнення пуску АД за умови двоетапного закону змінення кута α відпирання тиристорів ТРН не приведе до неприпустимого збільшення напруги ($U < 2,4$ В) на реакуючому елементі апарата захисту від витоків струму на землю (серії АЗУР) і не буде впливати на стійкість параметрів цього захисту.

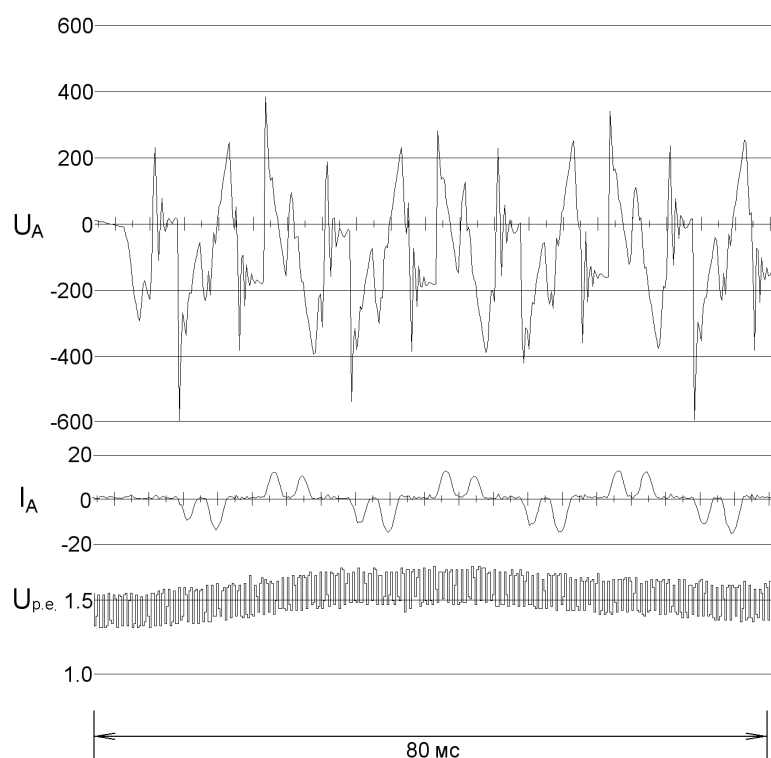


Рисунок 4.11 – Осцилограма керованого пуску АД U_A – напруга фази А; I_A – ток фази А; $U_{p.e.}$ - напруга на реагуючому елементі АЗ

4.3 Обґрунтування способу технічної реалізації принципу регульованої комутації силового приєднання електротехнічного комплексу дільниці

Результатом попереднього дослідження встановлено, що дієвим засобом припинення автоколивальних процесів в системі «ТРН-АД» в разі їх виникнення є прискорене зменшення заданого кута α_3 відпирання тиристорів ТРН зі швидкістю що є не меншою за 50 ел. град./с. [29, 30]. Враховуючи на те, що умовою виникнення автоколивань є суттєве підвищення кутової швидкості АД ($\omega \approx \omega_H$) в процесі розгону ротора при $\alpha_3 \gg 0$ ел. град./с., таке інтенсивне зменшення кута α_3 відпирання тиристорів не здатне спричинити порушення

електромеханічних параметрів відповідного асинхронного електропривода і є цілком прийнятним.

Практичний інтерес представляє встановлення інформаційного сигналу, який може бути використаний для формування команди на прискорене зменшення фазового кута α_3 . Ґрунтуючись на результатах попередніх досліджень [29-33], встановлюємо, що характерною ознакою наявності автоколивального процесу є самовільне повне відпирання тиристорів ТРН що є результатом штучного збільшення фактичного кута провідності (β_ϕ) тиристорів до 120 ел. град./с. при заданому куті (α_3) їх відпирання, що перебільшує нульове значення ($\alpha_3 \gg 0$ ел. град./с.). Це впливає з діаграм результатів експериментальних досліджень (рис. 4.8). Таким чином, вищезазначений інформаційний сигнал може бути сформований в процесі визначення і подальшого порівняння опорного і контрольного сигналів, в якості яких доцільно приймати параметри, пропорційні величинам дільничної напруги, відповідно, на вході і виході ТРН.

Так, самовільне збільшення кута провідності тиристорів ТРН до $\beta_\phi = 120$ ел. град./с. на початку автоколивань параметрів системи «ТРН-АД» є умовою встановлення номінальної діючої напруги на виході ТРН і зменшення до нуля різниці між опорним і контрольованим сигналами. Визначення цього стану має бути основою способу управління тиристорним регулятором напруги в пристрої уповільнення пуску асинхронного двигуна. Цей спосіб передбачає підвищення вихідної напруги симетричного тиристорного регулятора (ТРН) з наперед визначеною інтенсивністю від фіксованої зменшеної величини до номінальної шляхом фазового регулювання кутів відпирання тиристорів регулятора; визначення і порівняння між собою опорного і контрольного сигналів, і в разі досягнення контрольним сигналом величини опорного сигналу, - здійснення зменшення кута α_3 відпирання тиристорів регулятора за лінійним законом зі швидкістю, що є не меншою, ніж 50 ел. град./с. При цьому, в якості опорного та контрольного сигналів мають бути прийняті параметри,

пропорційні величинам діючої напруги, відповідно, на вході та на виході ТРН (рис. 4.12). [40].

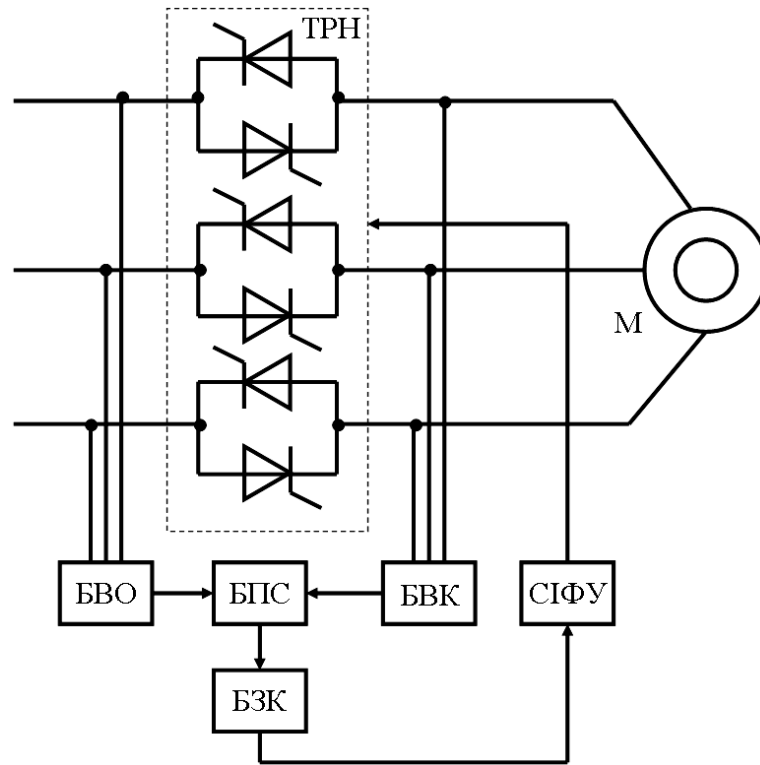


Рисунок 4.12 – Структурна схема пристрою управління тиристорним регулятором засобу уповільнення пуску асинхронного двигуна

Отже, управління ТРН досягається відповідним зменшенням заданого кута α_3 відпирання тиристорів від фіксованого значення ($\alpha_3 \gg 0$) до нуля засобами системи імпульсно-фазового управління (СІФУ). Блоки БВО та БВК визначають, відповідно, опорний і контрольний сигнали в якості яких приймають параметри, пропорційні величинам діючої напруги, відповідно, на вході та на виході ТРН. Зокрема, це можуть бути змінні складові випрямленої трифазної системи напруг входу і виходу ТРН. В разі, якщо процес регулювання вихідної напруги не є завершеним, опорний сигнал перебільшує величину контрольного, і корекція роботи ТРН не створюється.

Якщо заданий кут α_3 відпирання силових тиристорів ТРН є суттєво більшим нуля, а кутова швидкість двигуна М підвищується до рівня, близького

до номінального, створюються умови до автоколивальних процесів в системі „ТРН-АД”, які, зокрема, супроводжуються коливаннями напруги в ланці між регулятором ТРН і двигуном М в діапазоні від номінального значення до величини, що відповідає заданому куту α_3 відпирання тиристорів ТРН. В момент підвищення напруги в ланці між регулятором ТРН і двигуном М до номінальної величини, опорний параметр стає рівним контрольному параметру, і блок порівняння сигналів (БПС) формує команду на прискорене зменшення величини заданого кута α_3 відпирання тиристорів ТРН. Ця команда відпрацьовується блоком завдання величини кута (БЗК) відпирання тиристорів і СІФУ. Цим забезпечується запровадження прискорення інтенсивності зменшення кута α_3 відпирання тиристорів ТРН як засіб перешкоджання виникненню автоколивальних процесів в системі “ТРН-АД” на завершальному етапі регульованого комутаційного процесу (керованого пуску асинхронного двигуна споживача).

ВИСНОВКИ

Дослідженням доведена спроможність комутаційних перехідних процесів в шахтному дільничному електротехнічному комплексі створювати впливову функцію стосовно хибного спрацьовування засобу захисного знеструмлення кола витoku струму на землю.

Запропонована структура математичної моделі і, безпосередньо, математичний апарат дозволяє аналізувати процеси в розгалужених електричних схемах з урахуванням конкретної конфігурації вимірювальних схем (ланок утворення оперативного параметру) засобів захисту і параметрів всієї сукупності структурних складових шахтного дільничного електротехнічного комплексу.

З метою підвищення стійкості захисних засобів проти хибного спрацьовування обґрунтовані технічні рішення в контексті удосконалення ланок виміру їх оперативних параметрів. Розглянуті питання доцільності застосування засобів регульованої комутації силових електроспоживачів та обґрунтован спосіб управління тиристорним регулятором в процесі уповільненого пуску асинхронного двигуна, що виключає виникнення автоколивальних процесів в системі „регулятор напруги – асинхронний двигун”.

Додаток А

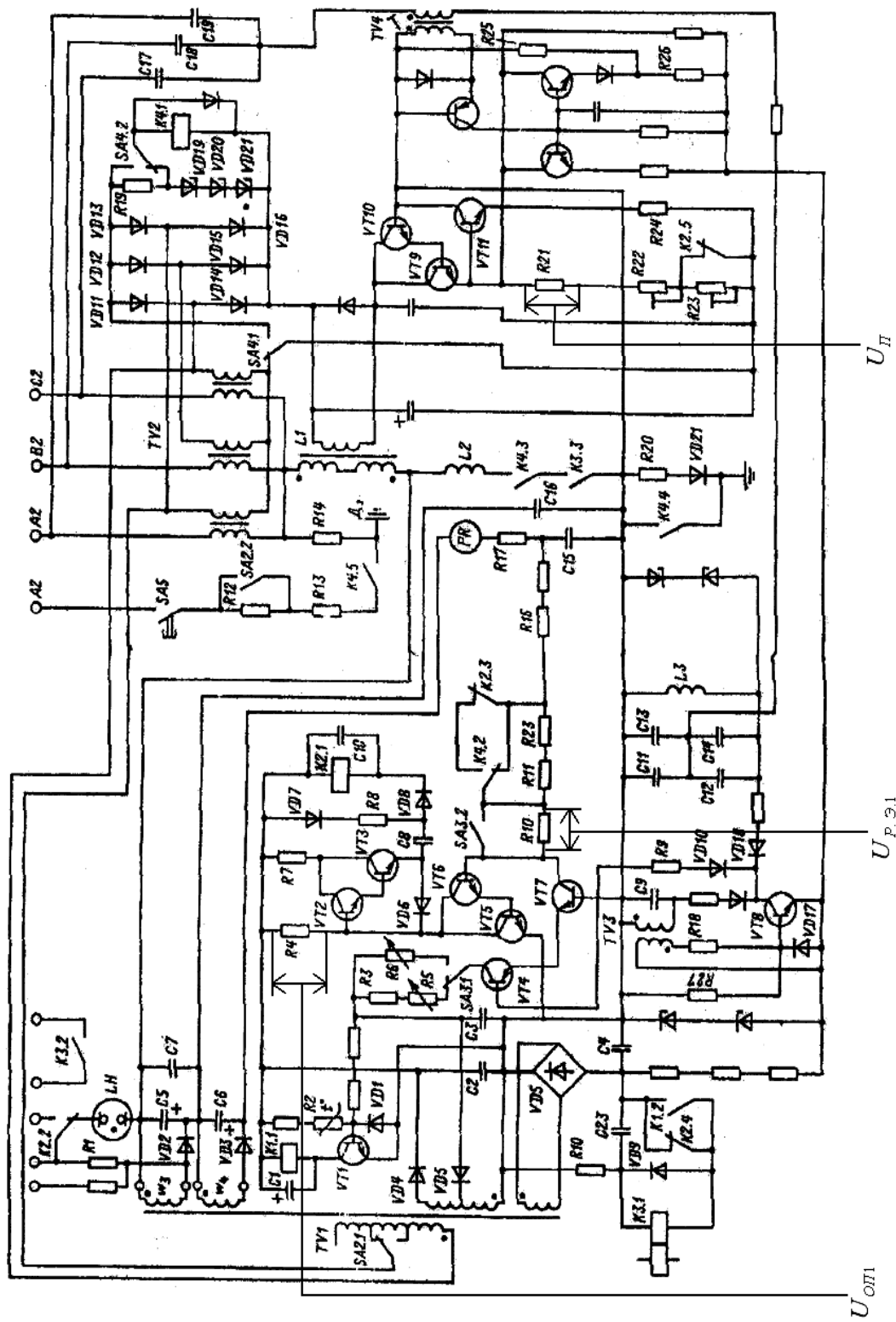


Рисунок А1 - Принципова електрична схема апарату АЗУР – 1 (розробка УкрНДІВЕ)

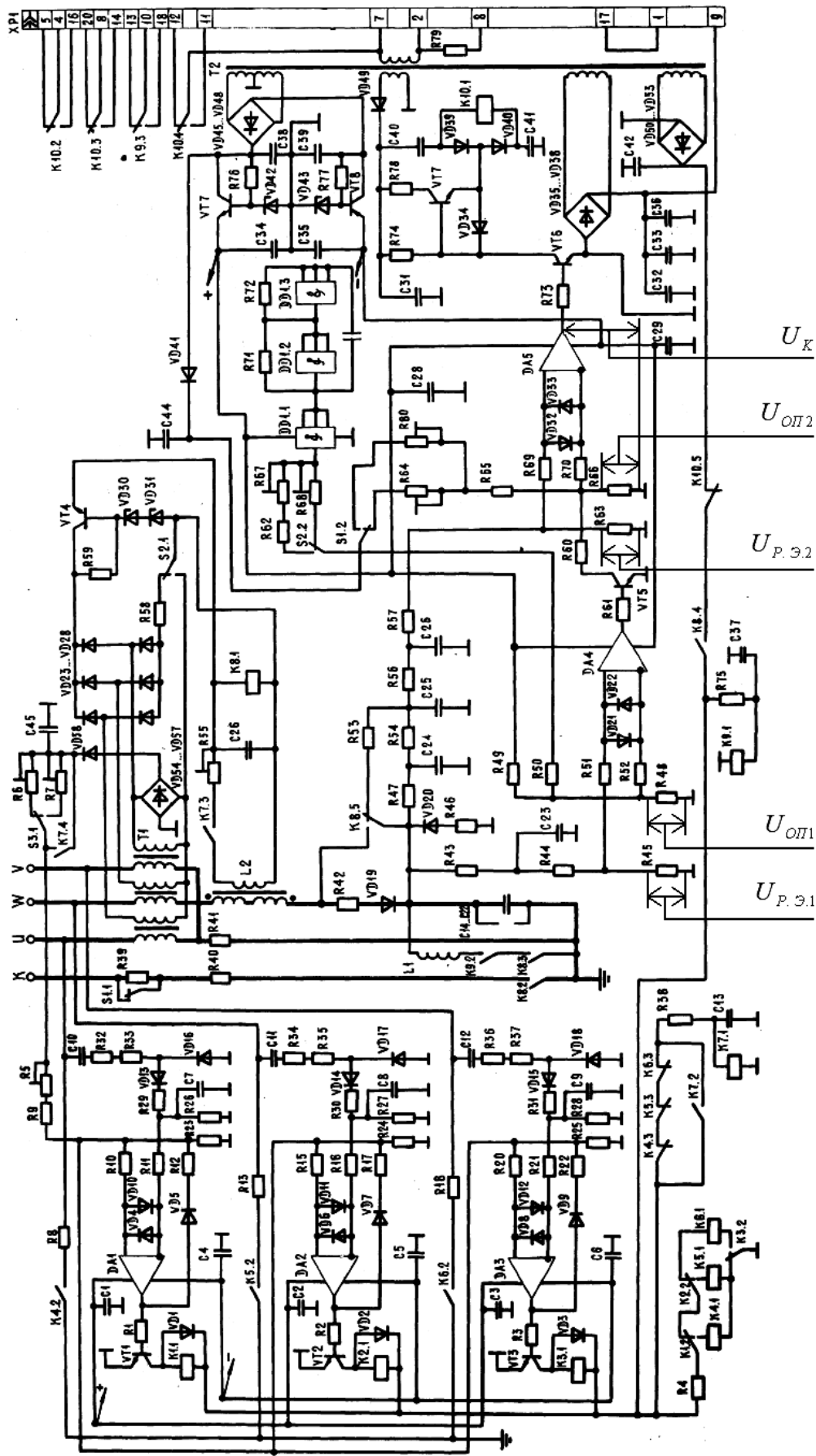


Рисунок А2 - Принципова електрична схема апарату АЗУР - 4 (розробка УкрНДІВЕ)

Додаток Б

Таблица Б.1

Параметри комп'ютерної моделі електричної мережі дільниці шахти напругою 660 В

№	Блок	Параметр	Значення	Од. вим.	№	Блок	Параметр	Значення	Од. вим.
1	A0	R_{ABa}	$0,1 / 1 \cdot 10^6$	Ом	38	A2	C_{0c}	$0,3 \cdot 10^{-6}$	Ф
2		R_{ABb}	$0,1 / 1 \cdot 10^6$	Ом	39	A3	R_{K1a}	$0,1 / 1 \cdot 10^6$	Ом
3		R_{ABc}	$0,1 / 1 \cdot 10^6$	Ом	40		R_{K1b}	$0,1 / 1 \cdot 10^6$	Ом
4	A1 (АЗУР-1)	R_{Ta}	200	Ом	41		R_{K1c}	$0,1 / 1 \cdot 10^6$	Ом
5		R_{Tb}	200	Ом	42	A4	R_{M1a}	2,11	Ом
6		R_{Tc}	200	Ом	43		R_{M1b}	2,09	Ом
7		L_{Ta}	22	Гн	44		R_{M1c}	2,12	Ом
8		L_{Tb}	22	Гн	45		L_{M1a}	$5 \cdot 10^{-3}$	Гн
9		L_{Tc}	22	Гн	46		L_{M1b}	$5,1 \cdot 10^{-3}$	Гн
10		R_K	114	Ом	47		L_{M1c}	$5,05 \cdot 10^{-3}$	Гн
11		L_K	8,3	Гн	48	A5	R_{1a}	$1 \cdot 10^6$	Ом
12		$C_{ЭК}$	$16 \cdot 10^{-6}$	Ф	49		R_{1b}	$1,1 \cdot 10^6$	Ом
13		$U_{он}$	179	В	50		R_{1c}	$1,2 \cdot 10^6$	Ом
14	$R_{6и}$	$1 \cdot 10^3$	Ом	51	C_{1a}		$0,25 \cdot 10^{-6}$	Ф	
15	R_1	$1,2 \cdot 10^3$	Ом	52	C_{1b}		$0,25 \cdot 10^{-6}$	Ф	
16	C_p	$9 \cdot 10^{-6}$	Ф	53	C_{1c}		$0,25 \cdot 10^{-6}$	Ф	
17	$R_{ЭК}$	$16,9 \cdot 10^3$	Ом	54	A6		R_{K2a}	$0,1 / 1 \cdot 10^6$	Ом
18	R_2	$6,2 \cdot 10^3$	Ом	55		R_{K2b}	$0,1 / 1 \cdot 10^6$	Ом	
19	R	$1,2 \cdot 10^5$	Ом	56		R_{K2c}	$0,1 / 1 \cdot 10^6$	Ом	
20	A1 (АЗУР-4)	R_K	114	Ом	57	A7	R_{M2a}	3,61	Ом
21		L_K	8,3	Гн	58		R_{M2b}	3,63	Ом
22		R_4	$6,2 \cdot 10^3$	Ом	59		R_{M2c}	3,58	Ом
23		$R_{ЭК}$	$17,8 \cdot 10^3$	Ом	60		L_{M2a}	$8 \cdot 10^{-3}$	Гн
24		$C_{ЭК}$	$50 \cdot 10^{-6}$	Ф	61		L_{M2b}	$7,5 \cdot 10^{-3}$	Гн
25		R_2	$6,2 \cdot 10^3$	Ом	62		L_{M2c}	$7 \cdot 10^{-3}$	Гн
26		$C_{иу}$	$1 \cdot 10^{-6}$	Ф	63	A8	R_{2a}	$0,9 \cdot 10^6$	Ом
27		R_3	$7,5 \cdot 10^4$	Ом	64		R_{2b}	$1 \cdot 10^6$	Ом
28		R_5	$1,6 \cdot 10^3$	Ом	65		R_{2c}	$1,1 \cdot 10^6$	Ом
29		$U_{он}$	179	В	66		C_{2a}	$0,25 \cdot 10^{-6}$	Ф
30		$R_{он}$	0,4	Ом	67		C_{2b}	$0,25 \cdot 10^{-6}$	Ф
31		C_p	$9 \cdot 10^{-6}$	Ф	68		C_{2c}	$0,25 \cdot 10^{-6}$	Ф
32	R_1	$1,2 \cdot 10^5$	Ом	69	A9	R'_1	100	Ом	
33	A2	R_{0a}	$1 \cdot 10^6$	Ом		70	R'_2	100	Ом
34		R_{0b}	$0,95 \cdot 10^6$	Ом		71	R'_3	100	Ом
35		R_{0c}	$0,9 \cdot 10^6$	Ом		72	R'_4	100	Ом
36		C_{0a}	$0,3 \cdot 10^{-6}$	Ф		73	R'_5	100	Ом
37		C_{0b}	$0,3 \cdot 10^{-6}$	Ф		74	R'_6	100	Ом

Вибірні максимальні значення струму через контролюємий орган АЗУР-1 $i_{7\max}$ при відключенні першого відгалуження мережі у момент t' , які отримані за допомогою моделювання

№	t' ,с	$i_{7\max}$,мА	№	t'	$i_{7\max}$,мА
1	2,2311	5,58	26	2,4660	3,98
2	2,6068	3,45	27	2,4186	4,45
3	2,8913	5,30	28	2,8462	5,29
4	2,4725	5,42	29	2,5252	4,69
5	2,6895	4,06	30	2,2026	3,36
6	2,7919	5,80	31	2,6721	3,56
7	2,7382	4,16	32	2,8381	3,45
8	2,1763	5,60	33	2,0196	2,98
9	2,4057	3,05	34	2,4289	3,89
10	2,9355	3,87	35	2,3046	4,39
11	2,9169	4,52	36	2,1897	4,50
12	2,4103	3,65	37	2,1934	5,50
13	2,8936	4,98	38	2,6822	4,69
14	2,0579	5,02	39	2,3028	3,58
15	2,3529	2,83	40	2,5417	4,29
16	2,8132	4,21	41	2,3784	4,98
17	2,9900	3,89	42	2,8600	3,65
18	2,1389	3,42	43	2,8537	5,05
19	2,2028	5,02	44	2,5936	3,40
20	2,1987	3,68	45	2,1509	4,50
21	2,1988	4,38	46	2,4966	5,20
22	2,0153	3,69	47	2,8998	3,90
23	2,7468	5,29	48	2,8216	3,35
24	2,4451	3,45	49	2,6449	5,20
25	2,9318	2,98	50	2,8180	4,50

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Апараты 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 01.01.1979]. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 13с. – (Межгосударственный стандарт).
2. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів. Затв. 25.07.2006 № 258/ Міністерство палива та енергетики України. Х. Індустрія. 2007. – 272 с.
3. Лейбов Р.М. Утечки в шахтных электрических сетях / Р.М. Лейбов – М.: Углетехиздат, 1952.
4. Дзюбан В.С. Апараты защиты от токов утечки в шахтных электрических сетях / В. С. Дзюбан. – М.: Недра, 1982. – 152 с.
5. Разумный Ю.Т. Повышение эффективности электроснабжения угольных шахт / Ю.Т. Разумный, Ф.П. Шкрабец – К.:Техника, 1984. -136с.
6. 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). – 447 с.; Т.2.: (Гл. 22–44). – 440 с.
7. 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. - 614с.
8. Колосюк В.П. Защитное отключение рудничных электроустановок / В. П. Колосюк. – М.: Недра, 1980. – 334 с.
9. Вареник Є.О. Обмеження та захист від витоків струму у рудникових електроустановках напругою 1200 В: дис. ... кандидата техн. наук: 05.09.03/ Вареник Євген Олександрович.- Дніпропетровськ, 2004 -191 с.

10. Савицкий В.Н. Защита от токов утечки сетей с изолированной нейтралью напряжением 127 и 220 В / В.Н. Савицкий, А.И. Белошистов, А.В. Савицкий // Взрывозащищённое электрооборудование: Сб. науч. тр. УкрНИИВЭ. – Донецк: ООО «АИР», 2009. – С.104-109.

11. Дзюбан В.С. О влиянии схем и параметров элементов устройств компенсации ёмкостной составляющей тока утечки на токи утечки в сетях с незаземлённой нейтралью трансформатора / В.С. Дзюбан // Взрывобезопасное электрооборудование: труды ВНИИВЭ. – М.: Энергия, 1967. - Вып. 4.

12. Маренич К.М., Калінін В.В., Товстик Ю.В. та ін. Електрообладнання технологічних установок гірничих підприємств. Підручник для студентів вузів. Гріф МОН України. Донецьк-Харків: ДонНТУ, 2009..- 372 с.

13. Закс Л. Статистическое оценивание / Л. Закс; пер. с нем. В.Н. Варыгина; под ред. Ю.А. Адлера, В.Г. Горского. –М.: Статистика, 1976. – 598 с.

14. Дзюбан В.С. Математические модели устройств защиты от токов утечки в шахтных электрических сетях / В.С. Дзюбан, Е.А. Вареник // Сборник научных трудов УкрНИИВЭ. - Донецк, Юго-Восток. 2004.

15. Анализ параметров и процессов в шахтных электрических сетях / [Шкрабец Ф.П., Шидловская Н.А., Дзюбан В.С., Вареник Е.А.]. – Днепропетровск: Нац. горный ун-т, 2003. – 151 с.

16. Руссиян С.А. Дослідження впливу перехідних процесів на стійкість схеми апарата „АЗУР” проти хибного спрацьовування методами математичного моделювання / С.А. Руссиян, К.М. Маренич // Взрывозащищённое электрооборудование: Сб. науч. тр. УкрНИИВЭ. – Донецк: 2011.

17. Маренич К.Н. Процесс отключения ответвления электросети участка шахты при неодновременности пофазной коммутации контактора / К.Н. Маренич, С.А. Руссиян // Наукові праці Донецького нац. техн. ун-ту. Вип. 104, серія гірничо-електромеханічна. – Донецьк: ДонНТУ, 2006. – Вип. 104. – С.135-139.

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

19. Руссиян С.А. Визначення ймовірності хибного спрацьовування апарата „АЗУР” математичними методами / С.А. Руссиян // Наукові праці Донецького нац. техн. ун-ту. Випуск 21 (183), серія “Обчислювальна техніка та автоматизація” – Донецьк: ДонНТУ, 2011. – С. 40-47.

20. Тиристорные преобразователи напряжения для асинхронного электропривода / [Петров Л.П., Андрищенко О.А., Капинос В.М. и др.]. - М.: Энергоатомиздат, 1986.

21. Маренич К.Н. Исследование влияния преобразователя частоты на параметры электробезопасности отходящего присоединения в сети участка шахты / К.Н. Маренич, С.А. Руссиян, М.С. Дубинин // Взрывозащищённое электрооборудование: Сб. науч. тр. УкрНИИВЭ. – Донецк: ООО «АИР», 2009. – С.221-227.

22. Маренич К.М. Вплив низькочастотної складової напруги перетворювача частоти на роботу апарата захисту в електротехнічному комплексі дільниці шахти / К.М. Маренич, С.А. Руссиян, М.С. Дубинин // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. Випуск 9, том 2. – м. Мелітополь, 2009. – С. 82-89.

23. Волков А.И. Математическая модель тиристорного асинхронного электропривода в среде MATLAB / А.И. Волков, Каваре Ясер Хуссейн // Вісник Сумського державного університету, 2003. - №11(57). - С. 56-62.

24. Черных И.В. SIMULINK: среда создания инженерных приложений / И.В. Черных. Под общ. ред. Потёмкина В.Г. - М.: ЗАО “ДИАЛОГ-МИФИ”, 2004. – 496 с.

25. Налимов В.В. Теория эксперимента / В.В. Налимов – М.: Наука, 1971. - 208 с.

26. Дзюбан В.С. Вплив параметрів дільничної електромережі шахти на стійкість роботи апарата АЗУР-5 при комутації кабельного відгалуження / В.С. Дзюбан, А.В. Горохов, С.А. Руссиян // Наукові праці Донецького нац. техн. ун-ту. Випуск 21 (189), серія гірничо-електромеханічна. – Донецьк: ДонНТУ, 2011. – С. 59-64.

27. Дзюбан В.С. Требования к взрывозащищённому электрооборудованию в системах электроснабжения горных машин на напряжение 3 (3,3) кВ / В.С. Дзюбан, Н.М. Басов // Взрывозащищённое электрооборудование: Сб. науч. тр. УкрНИИВЭ. – Донецк: ООО «АИР», 2009. – С.209-213.

28. Маренич К.М. Зворотні енергетичні потоки асинхронних двигунів як фактор небезпеки в електромережі шахти: монографія / К.М. Маренич, С.В. Василюк.- Донецьк: ДВНЗ „ДонНТУ”, 2012.- 206 с.

29. Маренич К.М. Обґрунтування принципу удосконалення способу уповільнення пуску асинхронного електропривода гірничої машини / К.М. Маренич, С.А. Руссиян // Гірничі електромеханіка та автоматика. Науково-технічний збірник. Вип. 84.– Дніпропетровськ: ДГУ, 2010. – С. 160 – 167.

30. Маренич К.М. Дослідження умов порушення стійкості системи „тиристорний регулятор напруги – асинхронний двигун” при керуванні пуском електропривода / К.М. Маренич, С.А. Руссиян // Зб. наук. пр. Інституту електродинаміки. НАН України, Вип. 28, Київ, 2011.- С. 96-102.

31. Маренич К.Н. Процессы в системе “тиристорный коммутатор – асинхронный двигатель” при фазовом и квазичастотном регулировании напряжения / К.Н. Маренич // Преобразование параметров электрических и технологических установках. Сб. научн. тр. Ин-т электродинамики АН УССР, Киев 1991, - С. 57-63.

32. Маренич К.М. Способы предупреждения неустойчивых состояний асинхронного тиристорного электропривода горной машины / К.М. Маренич // Известия высших учебных заведений. Горный журнал № 3, март 1994. - Днепропетровск, 1994. – С. 126-129.

33. Маренич К.М. Питання стійкості систем “тиристорний комутаційний апарат - асинхронний мотор” під час фазового регулювання напруги./ К.М. Маренич // Теорія та моделі пристроїв вимірювальної і перетворювальної техніки. Сб. наук. пр. Інститут електродинаміки. НАН України, Київ, 1993. - с.35-39.

34. Маренич К.Н. Асинхронный электропривод горных машин с тиристорными коммутаторами / К.Н. Маренич. – Донецк: ДонГТУ, 1997. - 64с.
35. Браславский И.Я. Асинхронный полупроводниковый электропривод с параметрическим управлением / И.Я. Браславский. - М.: Энергоатомиздат. 1988.- 224 с.
36. Ковач К.П. Переходные процессы в машинах переменного тока / К.П. Ковач, И. Рац - М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 744 с.
37. Мартынов М.В. Автоматизированный электропривод в горной промышленности / М.В. Мартынов, Н.Г. Переслегин. - М.: Недра, 1977. – 376 с.
38. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин / И.П. Копылов. – М.: Высш. школа, 1987. – 248 с.
39. Взрывозащищённые асинхронные двигатели: выбор, эксплуатация и ремонт/ [В.В. Каика, Т.В. Швецова, А.И. Аниканов и др.] ; под общ. ред В.В. Каики. – Донецк : Юго-Восток, 2010.- 360 с.
40. Патент 63443 на корисну модель Україна.. МПК⁸ H02M7/00. Спосіб управління тиристорним регулятором напруги в пристрої уповільнення пуску асинхронного двигуна / Маренич К.М., Руссиян С.А. заявник Донецький нац. техн ун-т. - № у 2011 02763 заявл. 09.03.2011. Опубл. 10.10.2011. Бюл. 19.

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

МАРЕНИЧ Костянтин Миколайович
РУССІЯН Станіслав Анатолійович

**КОМУТАЦІЙНІ ПРОЦЕСИ В ШАХТНІЙ ДІЛЬНИЧНІЙ
ЕЛЕКТРОМЕРЕЖІ ЯК ФАКТОР
ВПЛИВУ НА СТІЙКІСТЬ РОБОТИ ЗАСОБІВ
ЗАХИСНОГО ЗНЕСТРУМЛЕННЯ**

Монографія

Редакційно-технічне оформлення, комп'ютерна верстка *С.А. Руссіян*
Дизайн обкладинки *К.М. Маренич*

Підп. до друку 15.03.2012 Формат 60x84/16.
Папір PolSpeed. Друк різнографія.
Ум. друк. арк. *??,??*. Обл.-вид. арк. *??,??*.
Тираж 300 прим. Замовлення № *????*

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.

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

Свідоцтво