

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

С.В. Дубінін, К.М. Маренич

**АВТОКОМПЕНСАЦІЯ ЄМНІСНИХ СТРУМІВ ВИТОКУ
НА ЗЕМЛЮ В МЕРЕЖІ З ПЕРЕТВОРЮВАЧЕМ
ЧАСТОТИ КОНВЕРТУВАННЯМ НЕГАТИВНОГО
ОПОРУ**

МОНОГРАФІЯ

**Донецьк
ДВНЗ «ДонНТУ»
2013**

УДК 621.316.1:622.33.012.2

Д 79

Монографія друкується за рішенням Вченої ради ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» (протокол № 2 від 22.03.2013 р.)

Автори:

ДУБІНІН Сергій Васильович, доцент кафедри «Гірнична електротехніка і автоматика ім. Р.М. Лейбова» ДонНТУ, кандидат технічних наук, доцент.

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

Рецензенти:

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

В.П. Коптиков, заступник директора Державного Макіївського НДІ з безпеки робіт в гірничій промисловості (м. Макіївка, Донецької обл.), доктор технічних наук, професор;

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

Дубінін С.В.

Д 79 Автокомпенсація ємнісних струмів витоку на землю в мережі з перетворювачем частоти конвертуванням негативного опору: монографія / С.В. Дубінін, К.М. Маренич. – Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2013. – 104 с.

ISBN 978-966-377-153-3

На основі запровадження апробованих методів теоретичних і експериментальних досліджень визначені фактори небезпеки електроураження, обумовлені структурою і специфікою функціонування силового напівпровідникового перетворювача частоти в складі електротехнічного комплексу шахтної дільниці, обґрунтовані заходи із забезпечення параметрів електробезпеки шляхом застосування удосконалених засобів автокомпенсації ємнісної складової струму витоку на землю в приєднанні, що відходить від силового перетворювача частоти і можливість використання у якості автокомпенсатора схеми на основі конвертора негативного опору.

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 621.316.1:622.33.012.2

ISBN 978-966-377-153-3

© Дубінін С.В., Маренич К.М., 2013

© ДВНЗ «ДонНТУ», 2013

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень.....	4
Вступ	5
1 Проблематика застосування перетворювача частоти в складі шахтної дільничної електромережі в контексті дотримання параметрів її електробезпеки	6
1.1 Принципи і засоби обмеження кількості електрики в колі витоку струму на землю.....	6
1.1.1 Аналіз впливу стану ізоляції на безпеку експлуатації електротехнічного комплексу дільниці шахти.....	9
1.1.2 Аналітичний огляд технічних рішень із захисту від витоків струму на землю	13
1.2 Огляд проблемних питань з експлуатації шахтних електротехнічних комплексів, оснащених силовими перетворювачами частоти	22
1.3. Перетворювач частоти як засіб впливу на параметри електробезпеки експлуатації шахтної дільничної електромережі.....	40
2 Процеси формування ємнісних струмів витоку на землю в комбінованій шахтній дільничній мережі	47
2.1 Властивості перетворювача частоти як джерела високочастотних складових струму витоку на землю	47
2.2. Квазістаціонарні процеси формування ємнісних струмів витоку на землю	54
2.3. Зіставлення результатів теоретичних і експериментальних досліджень процесів в комбінованому дільничному електротехнічному комплексі.....	62
3 Конвертація негативного опору як спосіб компенсації ємнісних струмів в комбінованій шахтній дільничній мережі	66
3.1 Квазістаціонарні і перехідні процеси компенсації ємнісного струму витоку на землю засобами конвертації негативного опору	66
3.2 Раціональні параметри засобу компенсації ємнісного струму витоку на землю в комбінованій мережі шахтної дільниці	83
3.3 Приклад технічної реалізації компенсатора ємнісного струму на основі конвертора негативного опору	88
3.4 Властивості конвертора негативного опору як засобу автоматичної компенсації ємнісного струму витоку на землю.....	91
Висновки	97
Додаток А. Розрахункові величини діючих струмів витоку на землю в мережі з перетворювачем частоти	98
Додаток Б. Алгоритм ПЛП-пошуку	99
Перелік літератури	100

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АВ	–	автоматичний вимикач;
АД	–	асинхронний двигун;
АЗ	–	апарат захисного знеструмлення кола витокy струму на землю;
АЦП	–	аналого–цифровий перетворювач;
ГК	–	гнучкий кабель;
ТП	–	трансформаторна підстанція;
ДШ	–	дільниця шахти;
ЕРС	–	електрорушійна сила;
ЕТК	–	електротехнічний комплекс;
КА	–	комутаційний апарат;
КМ	–	контактор магнітний;
МК	–	магістральний кабель;
П	–	пускач;
ПДЗП	–	пересувна дільнична знижувальна підстанція;
РП	–	розподільчий пункт;
ТР	–	трансформатор.
ТРН	-	тиристорний регулятор напруги

ВСТУП

Впровадження нових високопродуктивних систем видобутку вугілля на базі комбайнів УКД-500, КДК-500 і КДК-700 і іншого устаткування, до складу яких входить частотно-регульований асинхронний електропривод, привело до появи нового класу електротехнічних систем дільниці шахти – комбінованих електротехнічних комплексів. Такі комплекси містять різноманітні ділянки силової електричної системи з постійним струмом, струмом промислової частоти, струмом підвищеної частоти і струмом частоти, що змінюється в часі, і амплітуди.

Відносно велика протяжність силових кабелів в цих мережах обумовлює наявність значної ємкості електричної мережі відносно землі, що за наявності перетворювача частоти значно погіршує функціональні можливості апаратів захисту від струмів витоку на землю. Високочастотна складова струмів витоку за рахунок зниження ємкісного опору мережі багато разів збільшує значення струму витоку, при цьому сигнали основної гармоніки і високочастотної складової є адитивними і підсумовуються в процесі протікання струму витоку. Це призводить до появи режимів роботи електроустаткування, що представляють небезпеку для здоров'я і життя людей, знижує якість і надійність електропостачання.

Звичайні шахтні дільничні електромережі мають надійний захист від електроураження, реалізований апаратами захисту від витоку струму на землю, до функцій яких входить не тільки визначення наявності кола витоку струму на землю та його величини, формування команди на захисне відключення, але й обмеження величини кількості електрики в ланцюзі витоку струму на землю шляхом компенсації ємнісної складової струму витоку та прискорення захисного знеструмлення мережі. Однак, проблемним питанням залишається вплив перетворювача частоти (в разі його застосування в складі устаткування дільничної мережі) як джерела високочастотних складових струму витоку на землю. Пошуку ефективних засобів компенсації таких струмів присвячена дана робота.

1

ПРОБЛЕМАТИКА ЗАСТОСУВАННЯ ПЕРЕТВОРЮВАЧА ЧАСТОТИ В СКЛАДІ ШАХТНОЇ ДІЛЬНИЧНОЇ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖІ В КОНТЕКСТІ ДОТРИМАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЇЇ ЕЛЕКТРОБЕЗПЕКИ

1.1. Принципи і засоби обмеження кількості електрики в колі витоку струму на землю

Аналізуючи схеми електропостачання технологічних дільниць гірничих підприємств, можна виділити дві групи споживачів: зосереджені в очисному вибої, або поблизу від нього (споживачі очисного комплексу; перевантажувач, бурові станки і т.п); розподілені вздовж капітальних виробок - штреків (конвеєри, маневрові лебідки, дегазаційні установки, монорейкові дороги і т.п.). Це визначає значну розгалуженість і довжину кабельних мереж технологічних дільниць шахти. Тенденції щодо підвищення потужності електромеханічного обладнання дільниць шахти обумовлюють відповідне підвищення перетинів та довжин кабельної мережі електротехнічних комплексів, перехід на більш високий рівень номінальної лінійної напруги (1140 В), електроживлення розподільчого пункту дільниці від комплектної трансформаторної підстанції (КТП) по двох магістральних кабелях (рис.1.1). Загальним для схем електротехнічних комплексів (ЕТК) технологічних дільниць шахт є наступне:

- електроживлення ЕТК від дільничної комплектної трансформаторної підстанції (КТП) трифазною напругою промислової частоти, величиною 660 В, або 1140 В (діюче значення лінійної напруги);
- застосування магнітних пускачів або станцій управління для дистанційної комутації асинхронних двигунів електроспоживачів дільниці;
- застосування екранованих гнучких кабелів між пускачами та електродвигунами, оскільки обладнання технологічних дільниць шахт не є стаціонарним;
- застосування автоматичного вимикача у складі розподільчого пристрою низької напруги (РПНН) КТП і, додатково, групового автоматичного вимикача (АВ) на ввіді магістралі підключення групи пускачів;

- застосування броньованого або напівгнучкого кабелю в якості магістрального між КТП та вводом групового АВ дільниці;
- застосування апаратури захисту від витоків струму на землю в складі РПНН КТП з функцією впливу на автоматичний вимикач КТП (що є можливим завдяки запровадженню режиму ізольованої нейтралі трансформатора в підземних електромережах шахт) [1].

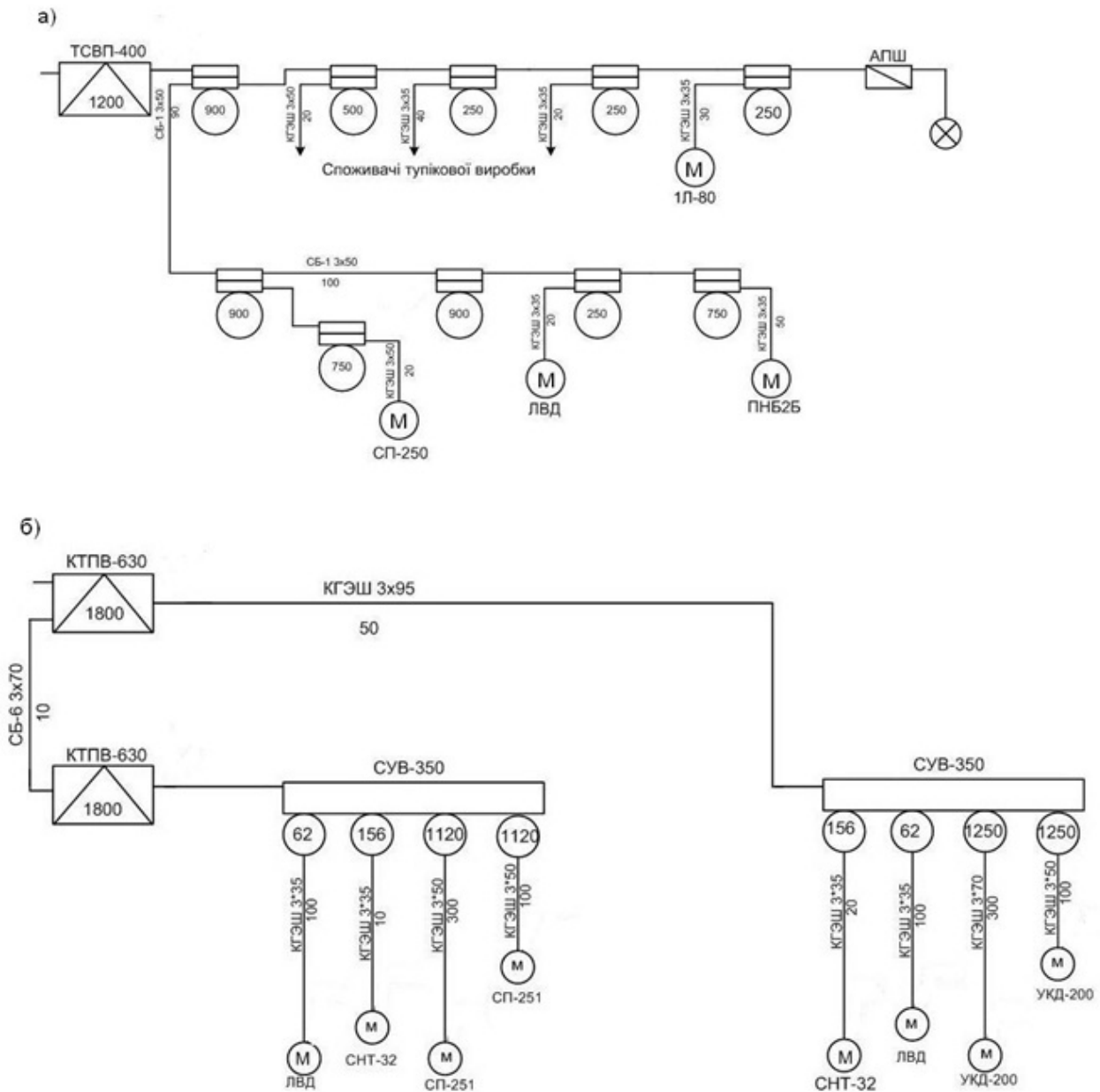


Рисунок 1.1 – Типові варіанти улаштування розподільчих пристроїв видобувних дільниць шахти: а – із застосуванням пускачів та групового автоматичного вимикача; б – із застосуванням станцій

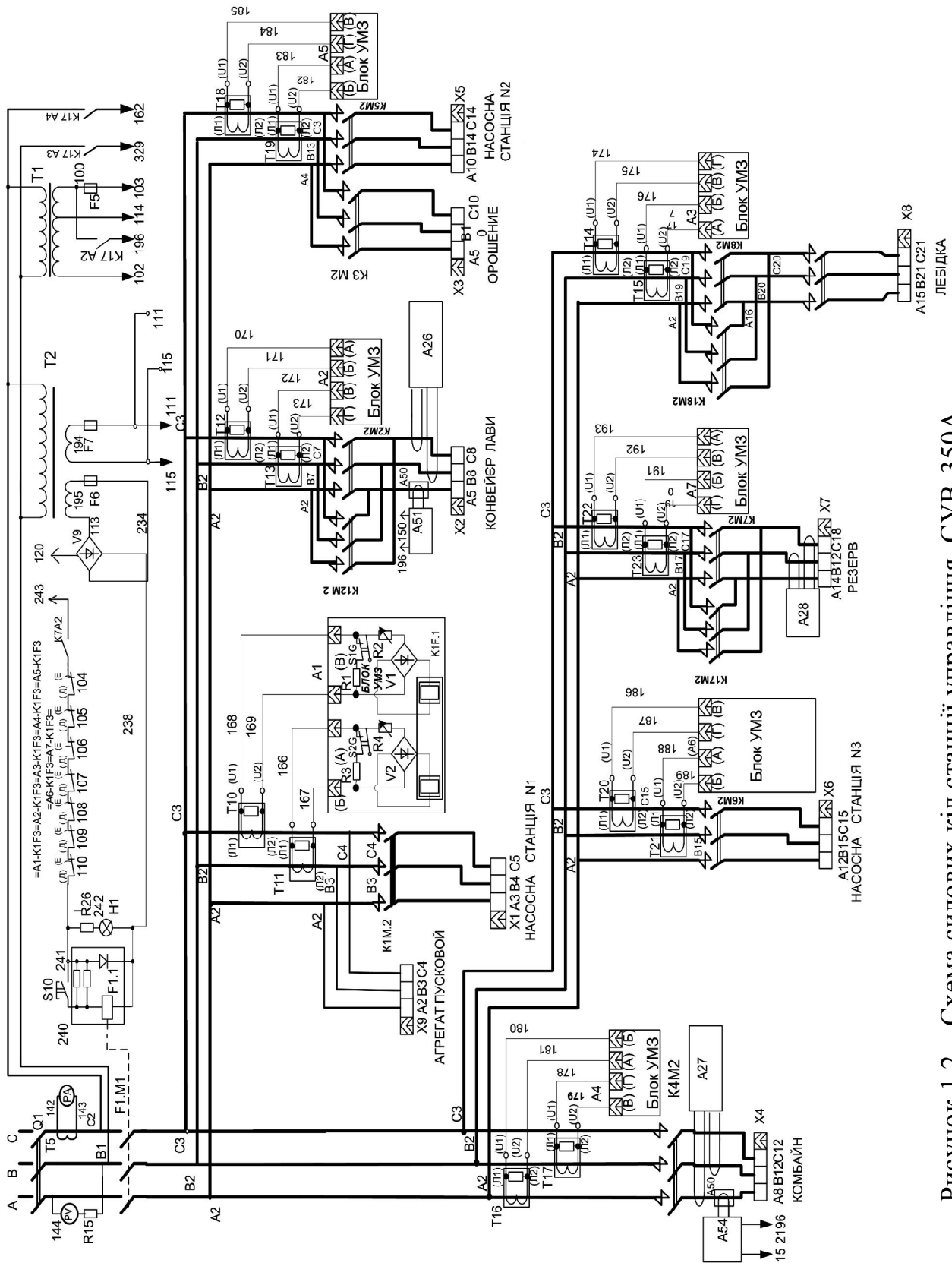


Рисунок 1.2 – Схема силових кіл станції управління СУВ-350А

Крім того, функції групового автоматичного вимикача і групи магнітних пускачів можуть бути об'єднані в одному силовому комутаційному пристрої – станції управління (рис. 1.2).

1.1.1 Аналіз впливу стану ізоляції на безпеку експлуатації електротехнічного комплексу дільниці шахти

Електрична ізоляція є загальним засобом запобігання всіх видів небезпеки від електричного струму. Її опір Z_i відносно землі у електричній мережі складається з активного R_i і ємнісного X_C . Активний опір силового приєднання мережі обумовлений властивостями і якістю ізоляційних матеріалів. Ємнісний опір такого приєднання обумовлений величиною перетину кабелю та його довжиною (має лінійну залежність від довжини кабелів). Ємність ізоляції інших видів устаткування на кілька порядків нижча, ніж ємність ізоляції кабелів і її вплив на параметри електробезпеки експлуатації дільничного ЕТК можна не враховувати [2]. У процесі експлуатації ємність кабельної мережі ділянки може змінюватися тільки за рахунок включення і відключення окремих кабельних ліній. Таким чином, струм що протікає через людину при торканні струмоведучого елемента мережі (струм витоку на землю) складається із двох складових: активної I_a , (струм через активні опори витоку і ізоляції кабельної мережі), ємнісної I_c , (струм через ємнісні складові ізоляції кабельної мережі).

$$I_{люд} = \sqrt{I_a^2 + I_c^2} \quad (1.1)$$

Розглядаючи вихідні положення теорії електробезпеки експлуатації рудникового електрообладнання, можна виділити наступні стани електричної мережі шахтного дільничного електротехнічного комплексу [3]. Нормальний режим роботи мережі характеризується рівністю фазних активних ($R_1 = R_2 = R_3$) і рівністю фазних ємнісних опорів ($X_1 = X_2 = X_3$). За таких умов [1, 2]:

$$U_1 = U_2 = U_3; I_1 = I_2 = I_3; U_n = 0; \quad (1.2)$$

де U_1, U_2, U_3 – напруги фаз відносно землі; I_1, I_2, I_3 – струми витoku фаз на землю; U_n – напруга нейтралі (рис.1.3,а).

Дотик людиною однієї фази мережі викликає порушення симетрії опорів ізоляції фаз відносно землі, зміщення нульової точки векторної діаграми і зміну значень фазних напруг (рис.1.3,б):

$$\dot{U}'_1 = \dot{U}_1 - \dot{U}_N \quad \dot{U}'_2 = \dot{U}_2 - \dot{U}_N \quad \dot{U}'_3 = \dot{U}_3 - \dot{U}_N \quad (1.3)$$

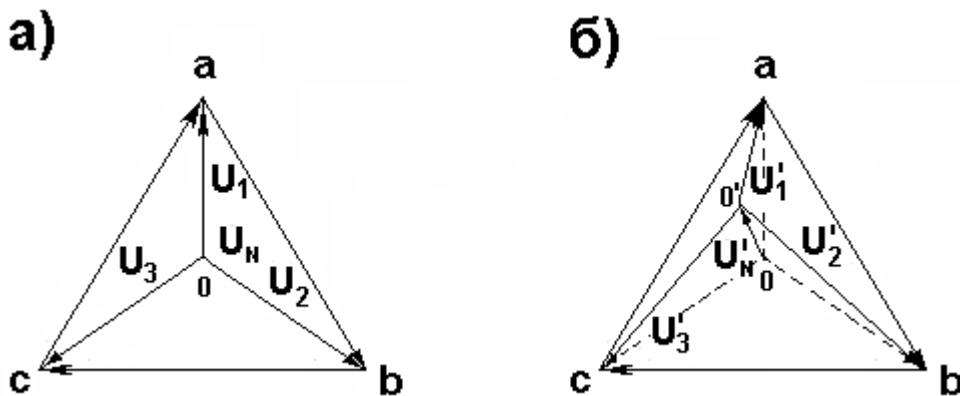


Рисунок 1.3 – Векторна діаграма фазних напруги при: а – симетричному опорі ізоляції; б – при торканні людиною однієї фази

В разі дотику до фази, що є під напругою, струм через тіло людини визначається виразом:

$$I_{Л} = \frac{3U_{\phi}}{3R_{Л} + Z_i} \quad (1.4)$$

Таким чином, повний опір ізоляції підключений послідовно з опором тіла людини і є фактором струмообмеження. У загальному випадку розподіл активного і ємнісного опорів ізоляції струм через тіло людини визначається за виразом [3]:

$$I_{Л} = \frac{U_{\phi}}{R_{Л} \cdot \sqrt{1 + \frac{R_i(R_i + 6R_{Л})}{9R_{Л}^2(1 + R_i^2\omega^2C^2)}}} \quad (1.5)$$

Отже, принциповим положенням є те, що струм витoku на землю можна знизити шляхом компенсації його ємнісної складової індуктивністю

компенсуючої котушки дроселя в разі утворення ланцюгів із зустрічним напрямом струмів (рис.1.4). Таким чином струм, що протікає через людину $I_{люд}$ (витік на землю) визначається формулою:

$$I_{люд} = \sqrt{I_a^2 + (I_c - I_L)^2} \quad (1.6)$$

де I_L – індуктивний струм; I_C – ємнісний струм; I_a – струм через активний опір.

У шахтних мережах напругою до 1200В в апаратах захисту від витоків струму на землю передбачають застосування компенсуючих дросельних засобів зі статичною або автоматичною компенсацією. Дросельні автокомпенсатори дозволяють запроваджувати повну компенсацію ємності мережі шляхом автоматичного налаштування індуктивності дроселя на цю ємність при її зміні в разі підключення, або відключення кабельних приєднань силового навантаження. Однак проблемним питанням залишається процес переналаштування компенсатора, обумовлений інерційністю його складових.

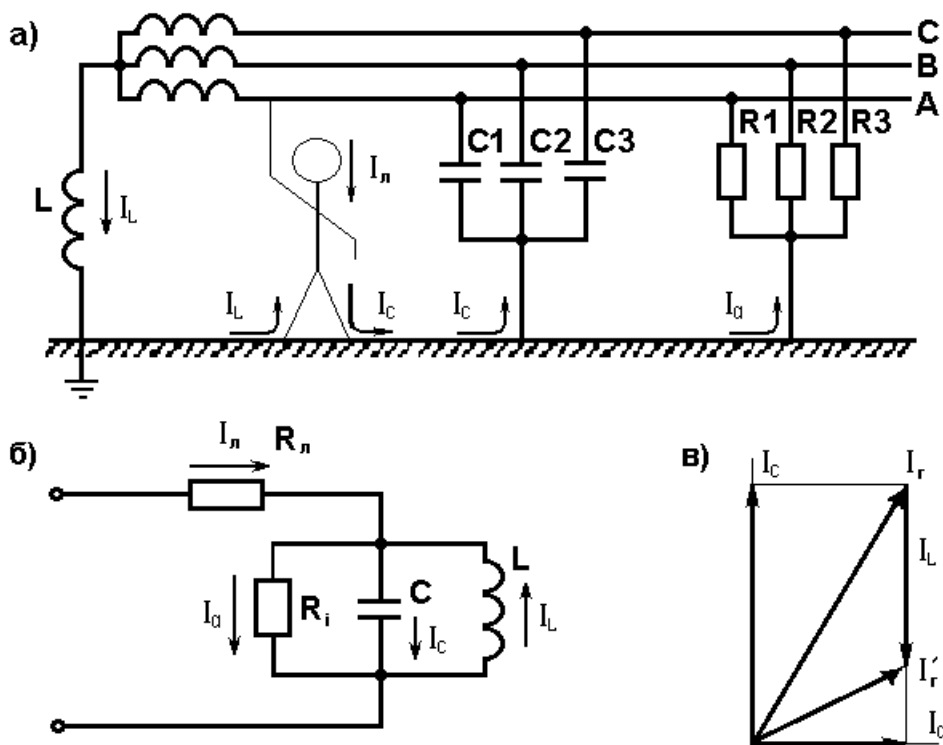


Рисунок 1.4 – Схема електричної мережі (а), схема заміщення (б) і векторна діаграма (в), які пояснюють принцип компенсації ємнісного струму витoku на землю

Отже, при комутації силового приєднання ємність мережі технологічної дільниці на інтервалі переналаштування дроселя може бути недокомпенсованою ($\omega C_C > 1/\omega L$), або перекомпенсованою ($\omega C_C < 1/\omega L$), що призводитиме до збільшення струму через ланку витoku на землю. Стосовно до мереж підвищеного рівня напруги це вимагатиме заходів із підвищення швидкодії переналаштування автокомпенсатора, або вживання додаткових заходів підвищення швидкодії захисту з метою обмеження величини кількості електрики, що пройде через тіло людини, на безпечному рівні ($Q = 50\text{mA}\cdot\text{c}$) [4; 5].

Ефективним засобом у цьому напрямі є захист швидкодіючим закорочуванням на землю, заснований на принципі зняття небезпечної напруги з людини при її дотику до струмоведучої фази, що перебуває під напругою, шляхом автоматичного закорочування на землю ушкодженої фази. Цим шунтується тіло людини [2;3]. При застосуванні захисту із закорочуванням фази на землю (рис. 1.5) безпека забезпечується, якщо термін $T_{ш}$ протікання струму через людину в перехідному режимі буде меншим припустимого часу $t_{люд}$ протікання струму через тіло людини у термін якого кількість електрики Q не перебільшуватиме нормованого показника [5]:

$$T_{ш} \leq t_{люд} \quad (1.7)$$

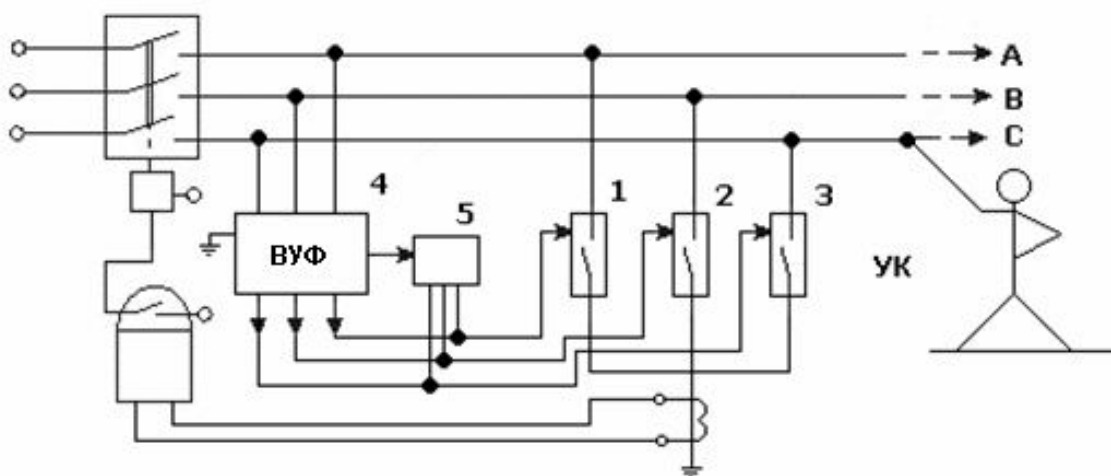


Рисунок 1.5 – Структурна схема захисту із закорочуванням на землю пошкодженої фази мережі

Основними елементами цього виду захисту є: пристрої для визначення ушкодженої фази мережі (ВУФ) і пофазно керований короткозамикач (КК).

1.1.2 Аналітичний огляд технічних рішень із захисту від витоків струму на землю

Захист від витоків струму на землю є основним технічним засобом, що забезпечує безпеку експлуатації шахтної дільничної електромережі, запобігає електротравмуванню персоналу в разі дотику до струмоведучих елементів електромережі, що нормально знаходяться під напругою, і відрізняє шахтні підземні електромережі від загальнопромислових як більш захищені і безпечні. Найпростіший принцип визначення наявності кола витoku струму на землю полягає у використанні постійного оперативного струму при послідовному підключенні вимірювального пристрою (рис. 1.6) [6].

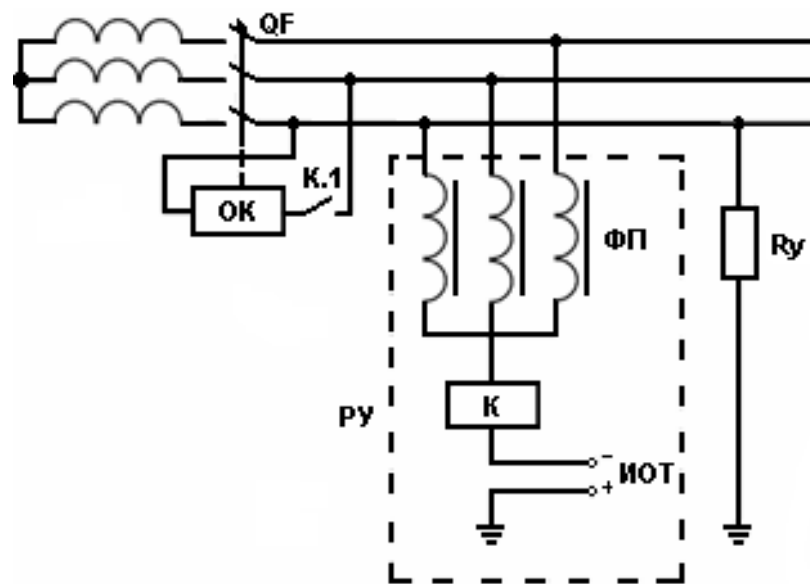


Рисунок 1.6 – Принцип визначення кола витoku струму на землю шляхом послідовного підключення засобу виміру в ланку оперативного струму

У цей спосіб створюється коло постійного оперативного струму в ланцюзі опорів ізоляції і витoku на землю та формується команда на захисне відключення електромережі, якщо величина цього оперативного струму стає

більшою за величину припустимого струму (25 мА). Незважаючи на простоту реалізації, цей спосіб має суттєві недоліки принципового характеру, а саме:

- електромагнітне реле водночас виконує не тільки функції виконавчого пристрою, а і вимірювального, що виключає точність виміру струму в ланцюзі опору витоку на землю;
- відключений стан цього реле у вихідному положенні і послідовна схема приєднання його котушки до ланцюга оперативного струму виключають самоконтроль справності схеми апарата;
- компенсація ємнісних складових струму витоку на землю виконується не в повному обсязі, оскільки в схемі передбачений статичний компенсатор із фіксованою величиною індуктивності.

Принцип побудови статичної компенсації ілюструється на рис.1.7.

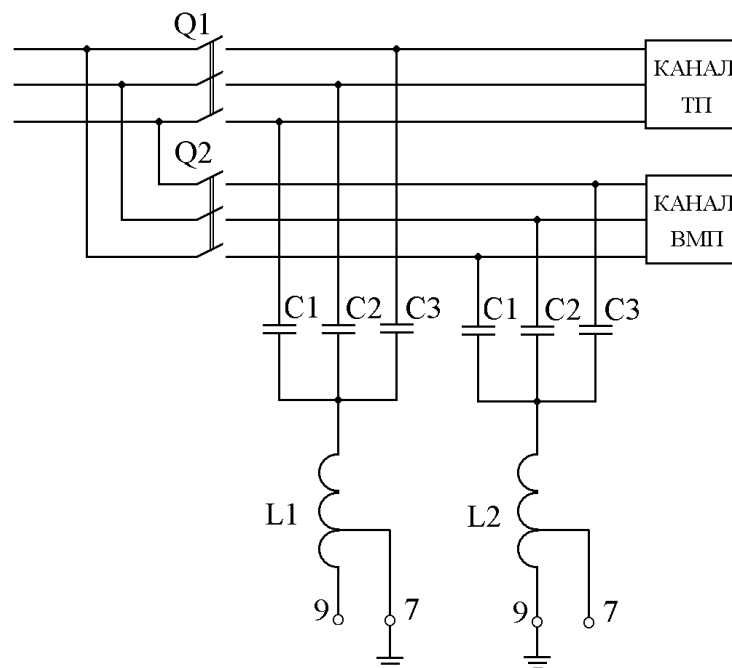


Рисунок 1.7 – Схема застосування статичної компенсації ємнісних складових опору ізоляції в апараті захисту АЗУ

Подальший розвиток теорії електробезпеки експлуатації шахтних дільничних електротехнічних комплексів пов'язаний з проблематикою підвищення точності виміру струму в колі витоку на землю, застосування засобів контролю стану схеми захисту, забезпечення її стійкості проти хибних

спрацьовувань від впливу комутаційних перехідних процесів в мережі, застосування автоматичної компенсації ємнісної складової струмів витоку на землю, поширення функції захисту від витоків струму на землю на шахтні дільничні мережі підвищених рівнів номінальної лінійної напруги на основі підвищення швидкості захисного знеструмлення мережі.. Ці принципові питання реалізовані в схемах сучасних захисних засобів серії АЗУР [7]. Зокрема, принцип визначення небезпечної величини витоку струму на землю оснований на порівнянні оперативного постійного струму, що надходить із захисного апарата у дільничну мережу, з еталонним струмом (що циркулює у внутрішньому ланцюзі апарата захисту), і формуванні команди на відключення виконавчого реле апарата, яке, в свою чергу, відключає автоматичний вимикач РПНН дільничної КТП. Суттєве підвищення точності контролю величини струму витоку на землю забезпечується застосуванням напівпровідникової вимірювальної схеми.

Дослідженнями [3] доведена доцільність автокомпенсації ємнісної складової струмів витоку на землю в електромережах шахтних дільничних електромережах для забезпечення нормованого параметру (кількість електрики через тіло людини – $50 \text{ mA} \cdot \text{s}$) електробезпеки їхньої експлуатації. Це дало можливість застосування в розгалужених електротехнічних комплексів шахтних технологічних дільниць із збільшенням кількості, довжини та перерізів гнучких кабелів. Принцип дії автокомпенсатора – дроселя $L2$ (рис. 1.8) оснований на зміні його індуктивності відповідною зміною постійного струму (з виходу підсилювача (П) в котушці підмагнічування. Цей струм відповідає величині ємності ізоляції мережі, яка безперервно вимірюється пристроєм вимірювання (В) на основі утворення резонансу LC – контура.

Дослідженнями [8] встановлено, що при комутації споживачів у непошкодженій мережі в ній виникають вільні коливання тривалістю до $0,8 \text{ с}$, які майже не проявляють себе в складі фазних напруг, однак суттєво впливають на величину струму компенсуючого дроселя і здатні завадити роботі оперативної ланки захисту від витоків струму на землю.

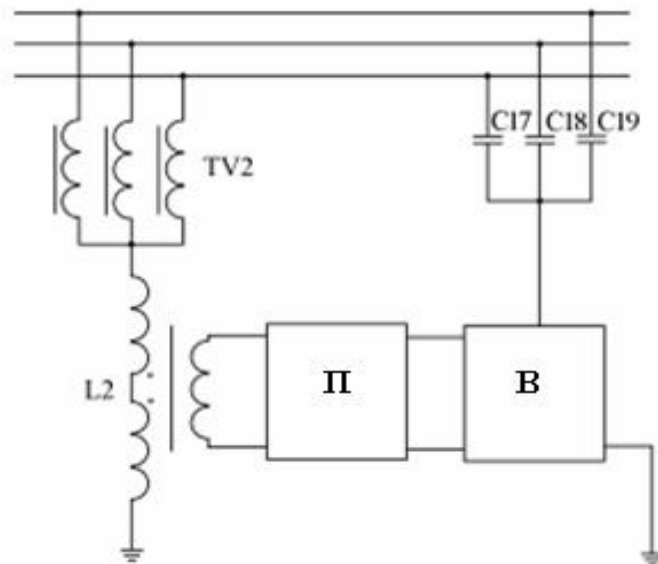


Рисунок 1.8 – Функціональна схема автоматичного компенсатора апарата захисту АЗУР

При виникненні ж небезпечного витоку ($R_{\text{ввт}} = 1000 \text{ Ом}$) вільні складові зменшуються у термін до 0,015 с, однак на початку процесу струм в місці пошкодження миттєво може наблизитись до 400мА з постійною часу зменшення до 3 мс (рис.1.9)

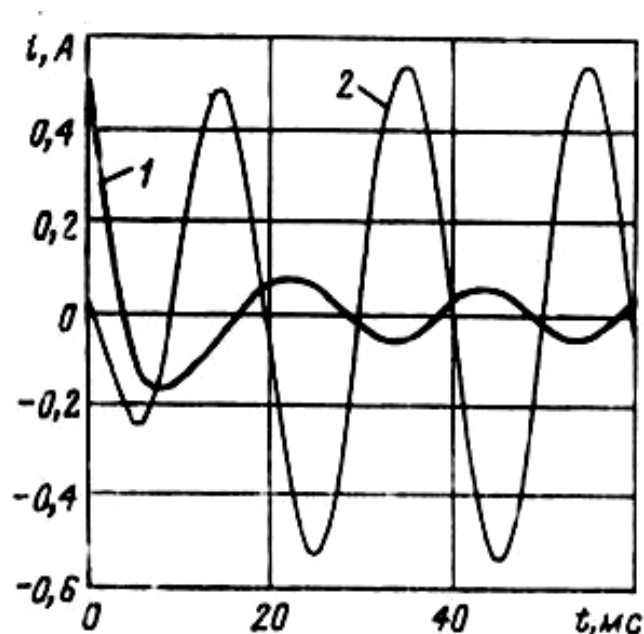


Рисунок 1.9 – Струм в місці пошкодження електромережі (1) і струм компенсуючого дроселя (2) при замиканні фази на землю через опір 1000 Ом

Ступінь впливу електричного струму на людину, при торканні до фази електромережі визначається не тільки сталим значенням струму однофазного витоку на землю, але й його вільною складовою, що виникає у перехідному режимі (*отримані результати впливу параметрів компенсуючого дроселя на тривалість перехідного процесу переналаштування компенсатора при зміні конфігурації діючої частини дільничної електромережі і встановлений характер впливу такого перехідного процесу на параметри електробезпеки експлуатації шахтної дільничної мережі*) [4, 7].

Отже, принциповим в контексті поширення області застосування дросельних автокомпенсаторів є питання підвищення швидкодії їх налаштування при зміні конфігурації ввімкнених до джерела електроживлення кабелів дільничної мережі. В роботах [8; 9] показано, що наявність компенсуючого дроселя в електромережі може викликати ферорезонансні процеси в перехідних режимах з появою значних перенапруг і небезпечних рівнів струмів витоку на землю. На рис.1.10 наведені графіки розрахункових значень відношення амплітуди фактичної напруги на компенсуючому дроселі до амплітуди його сталого значення (U_L/U_m) при виникненні безпосереднього замикання фази дільничної мережі на землю в момент переходу миттєвої напруги фази через нуль. Ймовірність виникнення ферорезонансу напруг в компенсуючому ланцюзі слід враховувати при обґрунтуванні параметрів елементів автокомпенсаторів.

В узагальненій формі принципи забезпечення електробезпеки експлуатації шахтних дільничних електротехнічних комплексів, що застосовуються на сьогодні, пояснюються структурною схемою (рис. 1.11). Введені наступні позначення: ФП - фільтр приєднання до фаз мережі; ДО - джерело оперативного параметру (струму або напруги); ВБ - вимірювальний блок; ПП – показуючий прилад; ВР - виконавче реле. Крім цього, існуючі пристрої захисту для мереж напругою 380 В - 1140 В можуть містити компенсатор ємності мережі - К, а для мереж напругою 660 В - 1140 В - фазний короткозамикач - ФК, пристрій перевірки справності апарата і заземлювача в

складі ланки з резистором R_p , кнопкою перевірки K_p та додатковим заземлювачем D_3 .

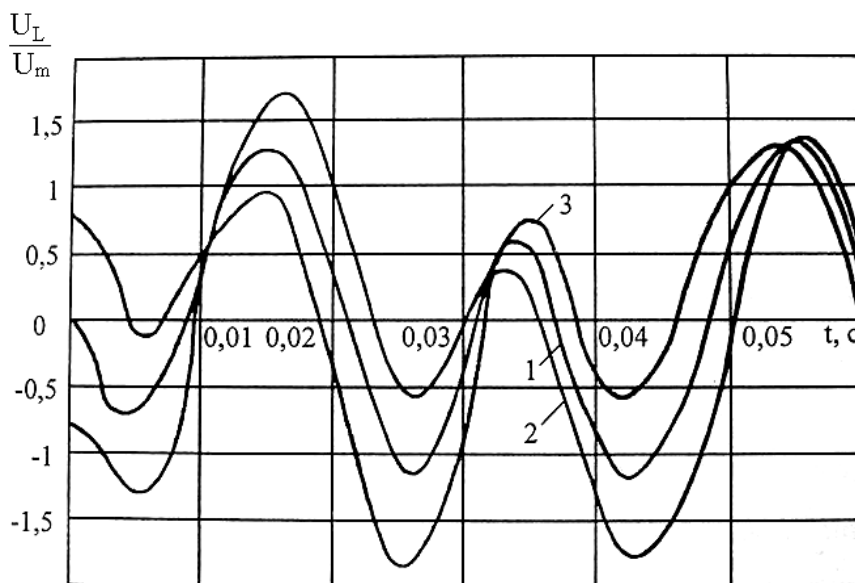


Рисунок 1.10 – Графіки відношення амплітуди фактичної напруги на компенсуючому дроселі до амплітуди його сталого значення при різних значеннях вимірювальної напруги пристрою компенсації: 1 – $u_c(0)=0$; 2 – $u_c(0)=U_m$; 3 – $u_c(0)=-U_m$

Схемна реалізація цих принципів впроваджена в апаратах захисту від витоків струму на землю типів АЗАК; АЗПБ; АЗУР; РУ-1140 та ін. [7; 10; 11]. Подальше поширення функціональних властивостей апаратів захисного відключення пов'язане із підвищенням динаміки процесів налаштування автокомпенсаторів при зміні конфігурації підключеної до джерела живлення дільничної електромережі (ввімкнення, або відключення окремих споживачів дільниці).

Це реалізовано в схемі апарата АЗУР-4 (рис.1.12) і дало змогу застосувати принцип автокомпенсації ємнісних складових струму витoku на землю в мережах з підвищеним рівнем номінальної напруги (1140 В) [6; 12].

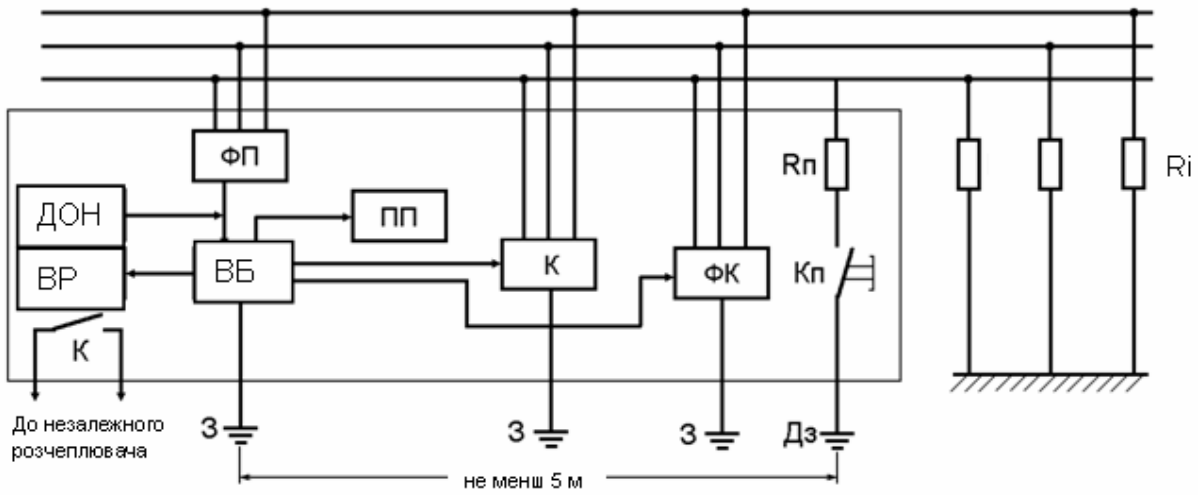


Рисунок 1.11 – Структурна схема автоматичного захисту від витоків струму на ЗЕМЛЮ

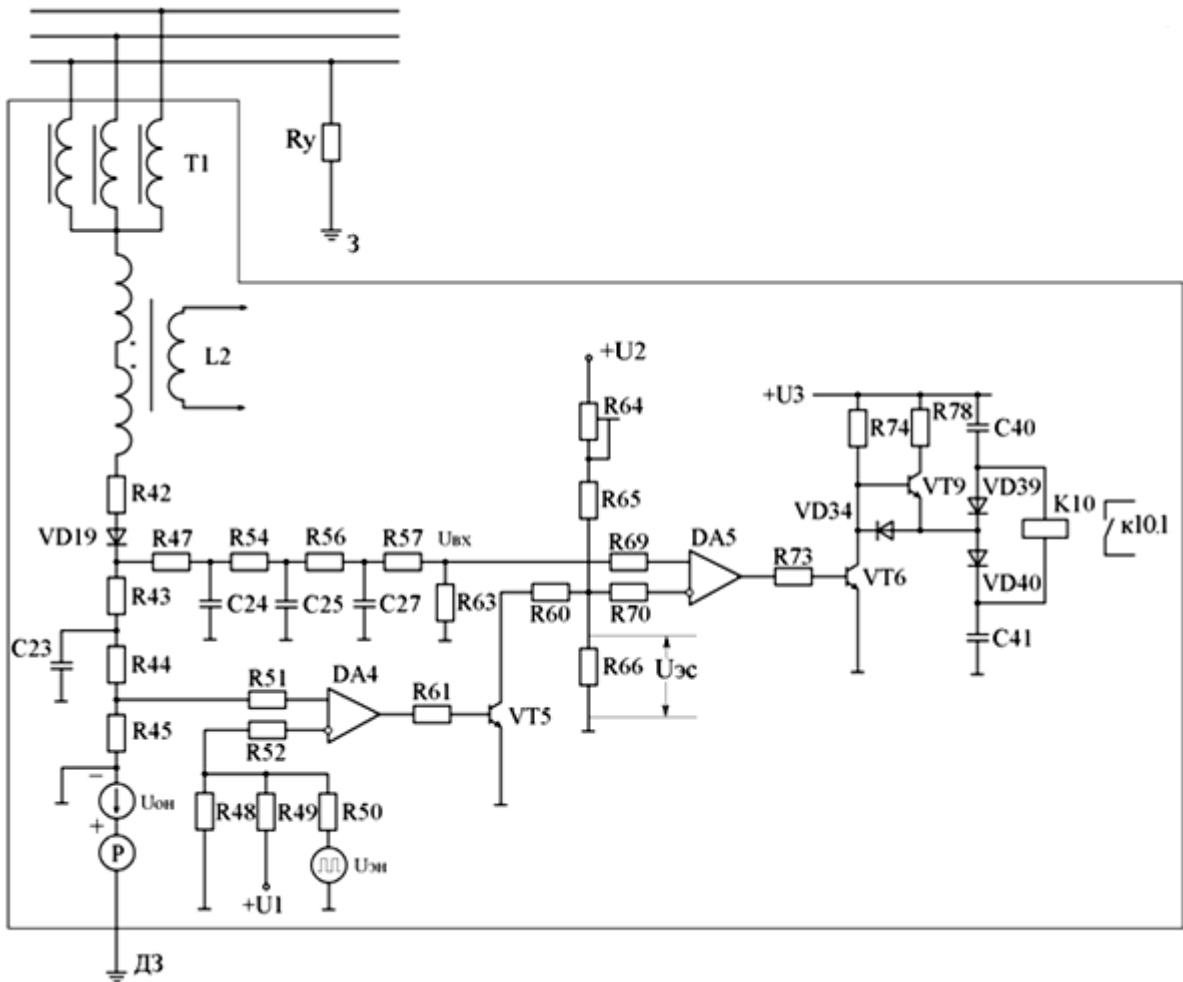


Рисунок 1.12 – Схема функціонального вузла контролі опору ізоляції та автокомпенсації ємності ізоляції мережі апарата АУЗР- 4

Поряд з вказаними напрямками удосконалення технічних засобів захисту людини від електроураження при торканні до фази в електромережі дільничного шахтного електротехнічного комплексу дослідженню підлягали і фактори впливу роботи силових напівпровідникових комутаційних апаратів на чутливість апаратів захисту від витоків струму на землю (рис. 1.13) [2].

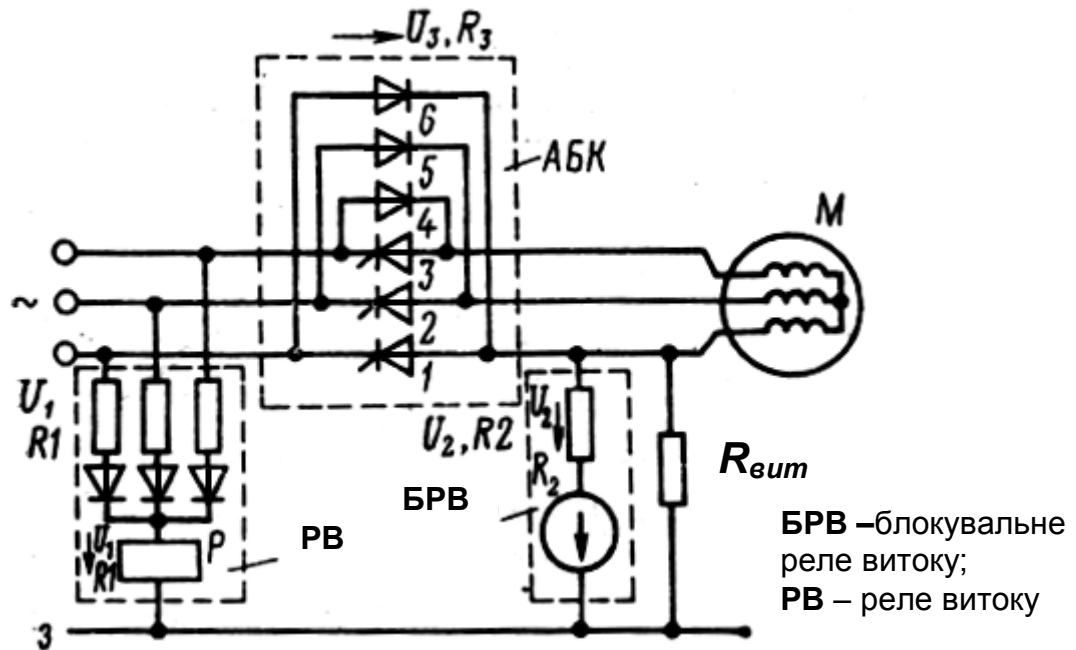


Рисунок 1.13 – Розрахункова схема дослідження впливу силового діодно-тиристорного комутатора апарата АБК на чутливість апарата захисту від витоків струму на землю

Встановлено, що застосування несиметричних діодно-тиристорних силових комутаторів здатне призвести до порушення чутливості апаратів захисту від витоків струму на землю, на відміну від симетричних тиристорних схем, функціонування яких такий вплив не викликає.

До шахтних низьковольтних електромереж, що містять випрямлячі відносяться контактні мережі електровозного відкочування, а також відгалуження електромережі шахтного електровозного гаража, що містять зарядні, або зарядно-розрядні пристрої для акумуляторних батарей. Для захисту людини від поразки електричним струмом і запобігання небезпечних витоків струму на землю в таких електромережах застосовують спеціальні апарати захисту від витоків струму на землю серій РУВ-Зар або РКУ-Зар (рис. 1.14).

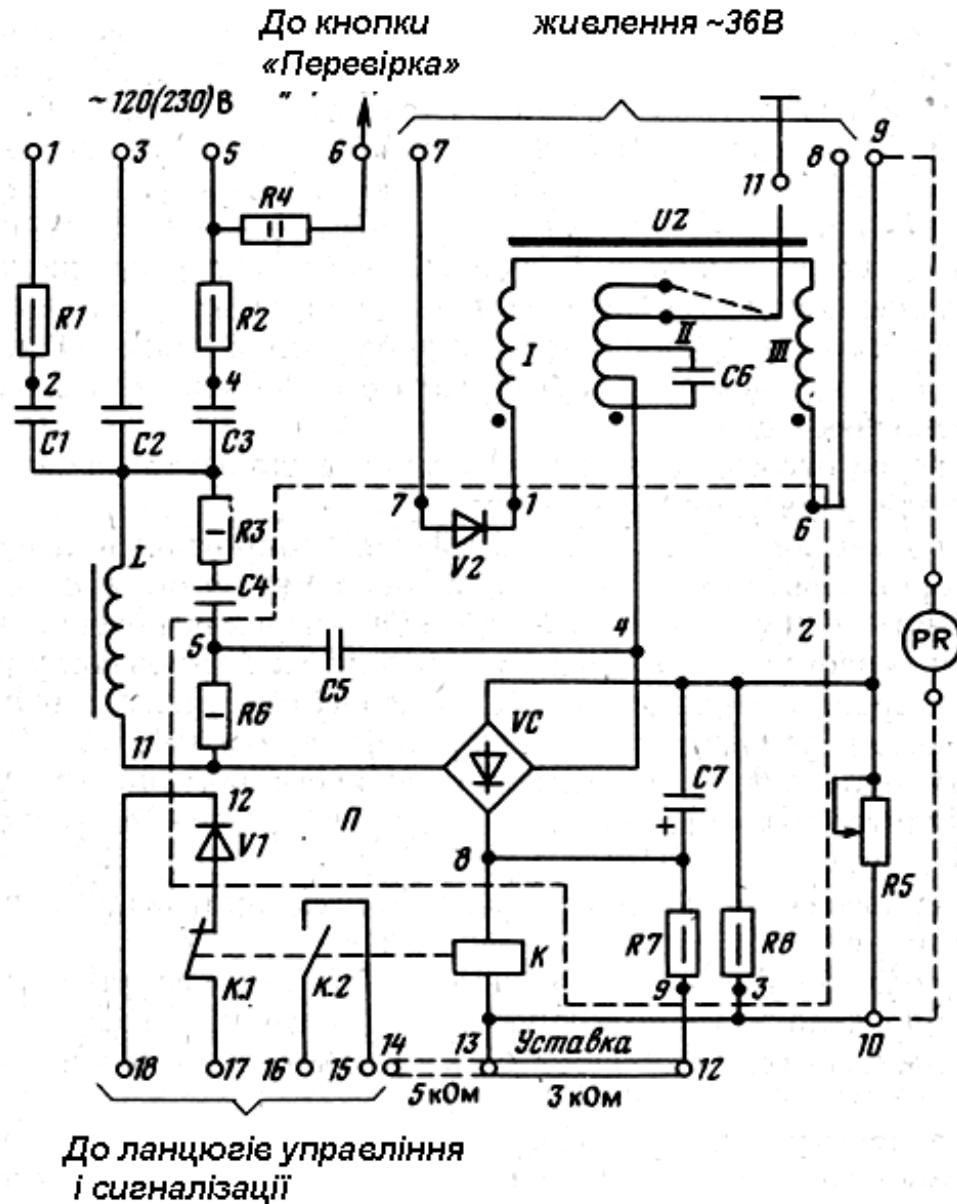


Рисунок 1.14 – Принципова електрична схема апарата захисту від витоків струму РКУ-Зар 1М

У схемі апарата захисту для контролю стану ізоляції мережі і відключення її у випадку небезпечного витoku на стороні постійного струму використовується оперативна напруга частотою 25 Гц, що знімається з виходу дільника частоти *UZ*. Ця оперативна напруга прикладається між землею та трьома фазами мережі через випрямний міст *VC*, загороджувальний контур *L*, *34*, *R6* і фільтр *I31*, *32,33*. При відсутності в мережі активних опорів витoku і високому опорі ізоляції стосовно землі по оперативному ланцюзі апарата струм

не протікає. Однак, при зниженні опору ізоляції як на стороні змінного, так і на стороні випрямленого струму струм, що протікає по оперативному ланцюзі, зростає, і реле K спрацьовує, формуючи команду на захисне відключення контрольованої ділянки мережі.

Таким чином, основним принципом виявлення витоку струму на землю в електромережі дільниці шахти є вимір оперативного струму апарата захисту, підвищення рівня електробезпеки досягається застосуванням автокомпенсаторів ємності ізоляції фаз і шунтуванням пошкодженої фази шляхом закорочування її на землю.

1.2. Огляд проблемних питань з експлуатації шахтних електротехнічних комплексів, оснащених силовими перетворювачами частоти

Переважає більшість технологічних процесів гірничого підприємства потребує вживання заходів із регулювання кутової швидкості електроприводів з метою уповільнення пуску і, тим самим – підвищення ресурсу гірничої машини, або тривалого регулювання швидкісного параметру у повному діапазоні величин. Поширеному застосуванню силових тиристорних регуляторів напруги (ТРН) для уповільнення пуску асинхронних двигунів гірничих машин сприяє простота реалізації силової схеми регулятора, включаючи систему охолодження силових тиристорів при їхньому розташуванні у вибухобезпечній оболонці пристрою. Для тих технологічних установок, уповільнення пуску яких не передбачає дотримання заданої діаграми швидкості при коливаннях моменту опору, достатнім є застосування розімкнених схем управління ТРН. Це ще більше спрощує схемотехніку засобів уповільнення пуску двигунів. Для цього класу технічних рішень (пристроїв «*Soft-start*») характерною є структура схеми, що реалізована в пристрої КУВПІ-250М (рис. 1.15) [6; 13].

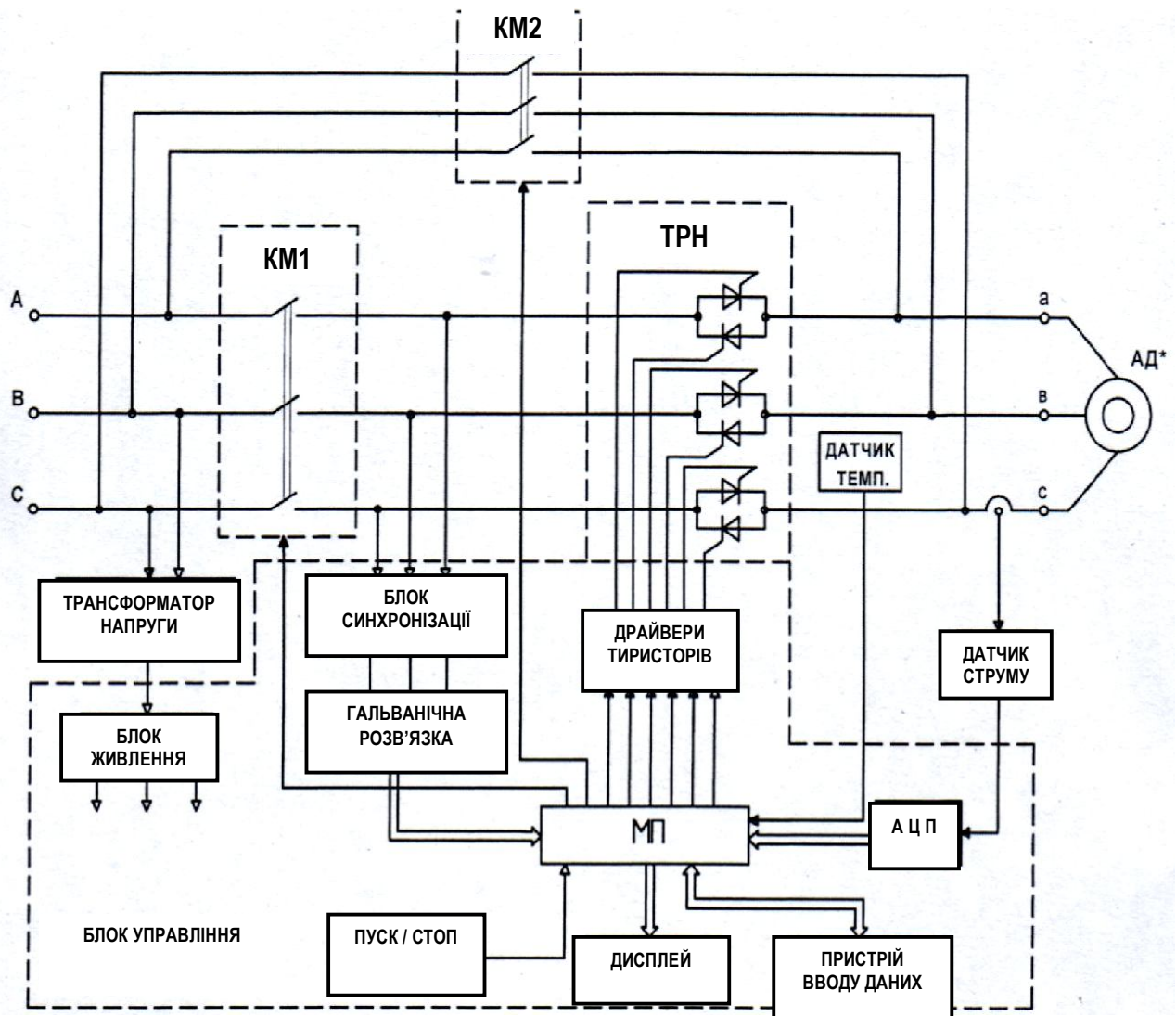


Рисунок 1.15 – Структурна схема комплекту пристрою повільного пуску КУВПП-250М (розробка УкрНДІВЕ, Україна)

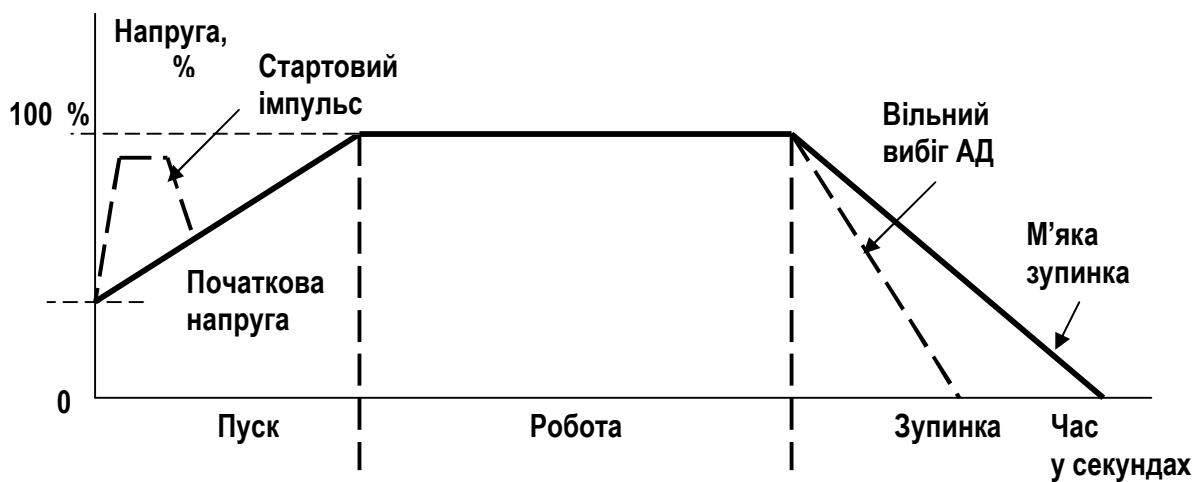


Рисунок 1.16 – Діаграми зміни вихідної напруги тиристорного комутатора пристрою КУВПП-250М в процесі розгону та уповільнення асинхронного двигуна споживача

Робота пристрою розпочинається ввімкненням послідовного контактору КМ1. При відключених тиристорах ТРН це відбувається без протікання струму і дугоутворення в силовому ланцюзі контактора, що суттєво збільшує його ресурс. Зазвичай, програма зміни вихідної напруги ТРН задається користувачем залежно від особливостей експлуатації електроприводу технологічної установки, керованої від пристрою уповільнення пуску і являє собою пряму лінію (рис. 1.16). Величина завдання стартової вихідної напруги ТРН знаходиться в межах від 0 до 60% від номінальної. При необхідності пуску установки із значним моментом опору передбачений режим «*Kick-start*». У цьому випадку на початковому етапі пуску відбувається короткочасний, тривалістю 0,8 с, «накид» напруги на виході ТРН. По закінченні розгону двигуна тиристири ТРН виводяться з роботи ввімкненням шунтуючого контактору КМ2. Це суттєво зменшує тепловиділення при роботі силових тиристорів регулятора напруги.

У випадку, необхідності збільшення тривалості уповільнення двигуна в порівнянні із тривалістю його вільного вибігу при відключенні в пристрої «*Soft-start*», передбачена функція м'якої зупинки. У цьому випадку за командою «СТОП» система управління спочатку повністю відкриває тиристири комутатора, а потім поступово в заданому діапазоні часу збільшує кут α відпирання тиристорів, повільно зменшуючи напругу на виході ТРН до нуля. Після цього відключається послідовний контактор КМ1 (за відсутності провідності ТРН процес відключення контактора не супроводжується дугоутворенням),

Отже, робота установок «*Soft-start*», передбачає регулювання величини трифазної напруги в силових приєднаннях асинхронних двигунів споживачів в повному діапазоні величин при незмінній (промисловій) частоті напруги.

Для реалізації регулювання частоти обертання ротора АД у всьому діапазоні у тривалому режимі застосовуються перетворювачі частоти з ланкою постійного струму, тиристорним, або транзисторним (IGBT) інвертором. Наявність такого перетворювача у складі електротехнічного

комплексу (рис.1.17) ділить електромережу останнього на ділянки електроживлення синусоїдальною напругою промислової частоти (до ПЧ), постійної напруги (ланка постійного струму) і трифазної модульованої широтно-імпульсним способом напруги, що змінюється за величиною і частотою (після ПЧ). В цьому випадку витік струму на землю можливий на одній з трьох ділянок мережі комбінованого електротехнічного комплексу:

- на ділянці електроживлення номінальною напругою промислової частоти (50 Гц);
- на ділянці постійно струму (вихід випрямляча ПЧ);
- на ділянці формування трифазної системи напруги регульованої частоти (вихід автономного інвертора).

Як встановлено в дослідженні [9], змінний струм витіку на стороні незмінної частоти, обумовлений активним опором ізоляції кабелю, ємністю силових жил кабелю відносно землі і опором витіку струму на землю ($R_{\text{вум}}$).

$$I_{\text{вум}} = U_{\phi} \sqrt{\frac{X_C^2 + R^2}{X_C^2 (R_{\text{вум}} + R)^2 + R_{\text{вум}}^2 R^2}}. \quad (1.8)$$

де $X_C = \frac{1}{2\pi f(C_1 + C_2 + C_3)}$ та $R = \frac{1}{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3}}$ - відповідно, результуючі

ємнісний і активний опори ізоляції ділянки змінного струму промислової частоти.

Проте, особливі проблеми в області експлуатації шахтних низьковольтних комбінованих електротехнічних комплексів викликає формування струму витіку на землю на ділянці з регульованою частотою напруги (вихід ПЧ). Зокрема, встановлено, що при розміщенні ПЧ в безпосередній близькості від споживача (в цьому випадку, ємністю кабелю відносно землі можна нехтувати) струм витіку на землю визначається величинами опору ізоляції ланки постійного струму ПЧ ($r_{\text{пч}}$) інвертора ПЧ (r_i) і самим опором витіку на землю ($R_{\text{вум}}$).

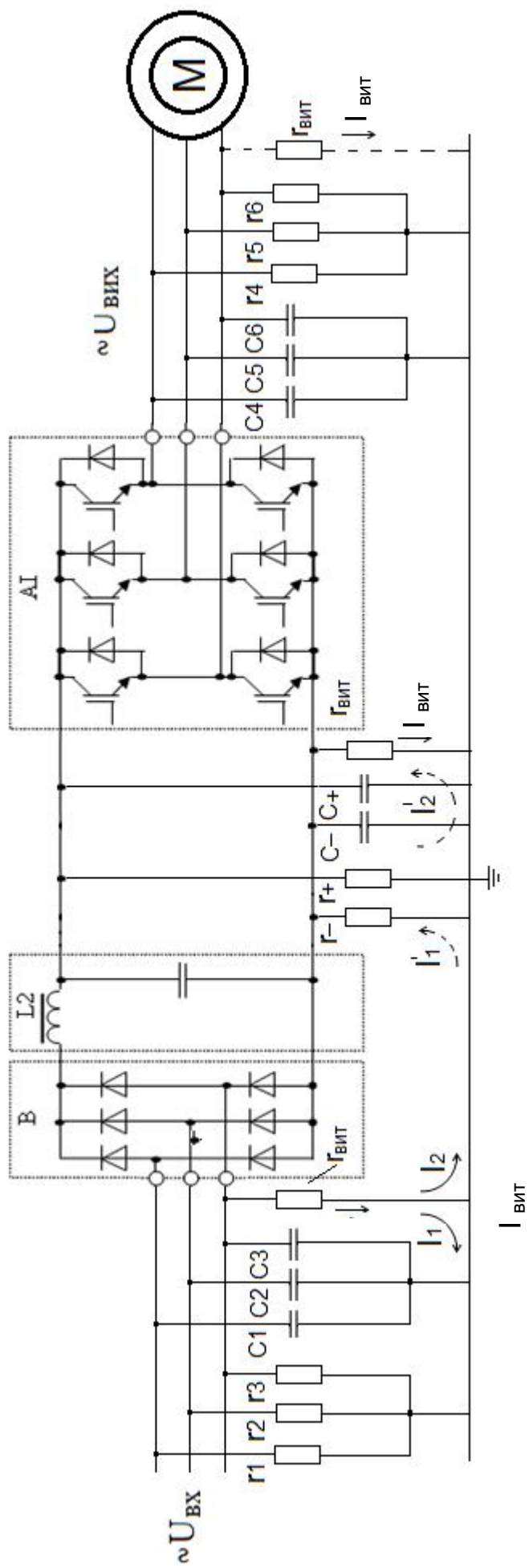


Рисунок 1.17 – Электрична схема комбінованої мережі при живленні асинхронного двигуна струмом змінної частоти

$$I_{\text{вит}} = U_{\phi} \sqrt{\frac{1}{(r_i + R_{\text{сум}})} + \frac{5,38r_i^2}{(r_i(R_{\text{сум}} + r_i) + R_{\text{сум}}r_i)}}. \quad (1.9)$$

У міру віддалення ПЧ від споживача істотним чинником впливу на величину струму витoku стає ємність кабелю (C_i) силового ланцюга виходу ПЧ і, загалом, - ємнісний опір цього ланцюга (X_c) відносно землі, який визначається частотою вихідної напруги ПЧ (рис.1.18, рис.1.19) [14].

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C_i}. \quad (1.10)$$

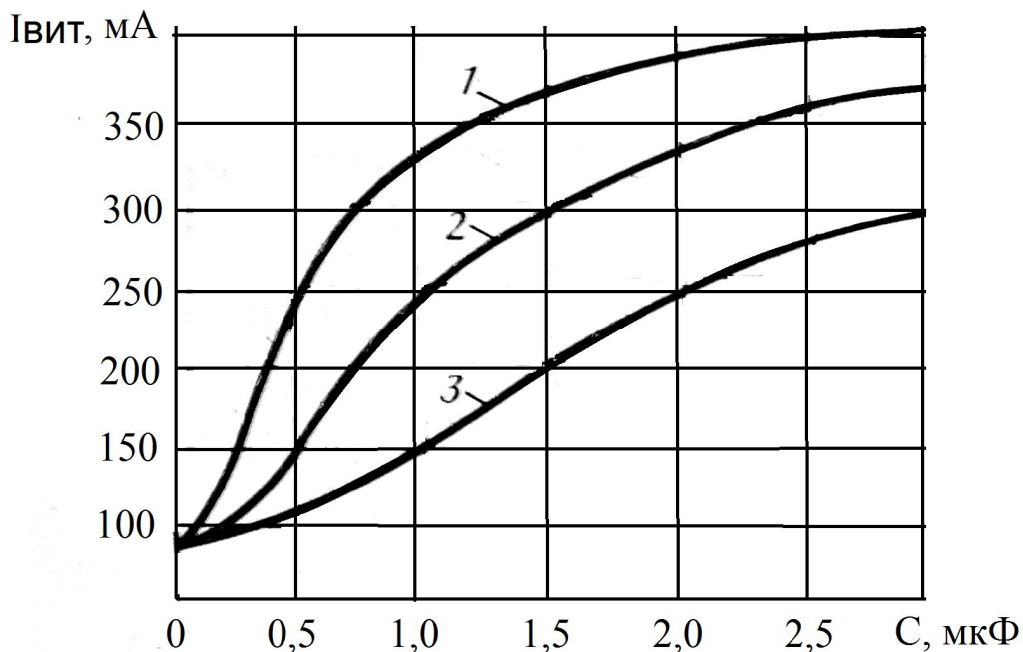


Рисунок 1.18 – Залежності величини струму витoku на ділянці мережі з частотою, що змінюється, від частоти робочої напруги:

1 – $C = 3$ мкФ; 2 – $C = 1,5$ мкФ

Зростання струму витoku із збільшенням частоти вихідної напруги ПЧ обумовлює неприйнятність експлуатації ПЧ у складі комбінованих дільничних електротехнічних комплексів шахти, при змінній частоті вихідної напруги. Специфічною особливістю функціонування ПЧ, інвертор якого працює в режимі широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), є наявність вищих гармонік струму, обумовлених процесами комутації вентилів випрямляча і інвертора [15]. Вищезазначеними дослідженнями встановлено, що струм

витоку на землю складається, переважно, з високочастотної складової, обумовленої роботою широтно-імпульсного регулятора і низькочастотної складової, що відповідає робочій частоті перетворювача (рис.1.20).

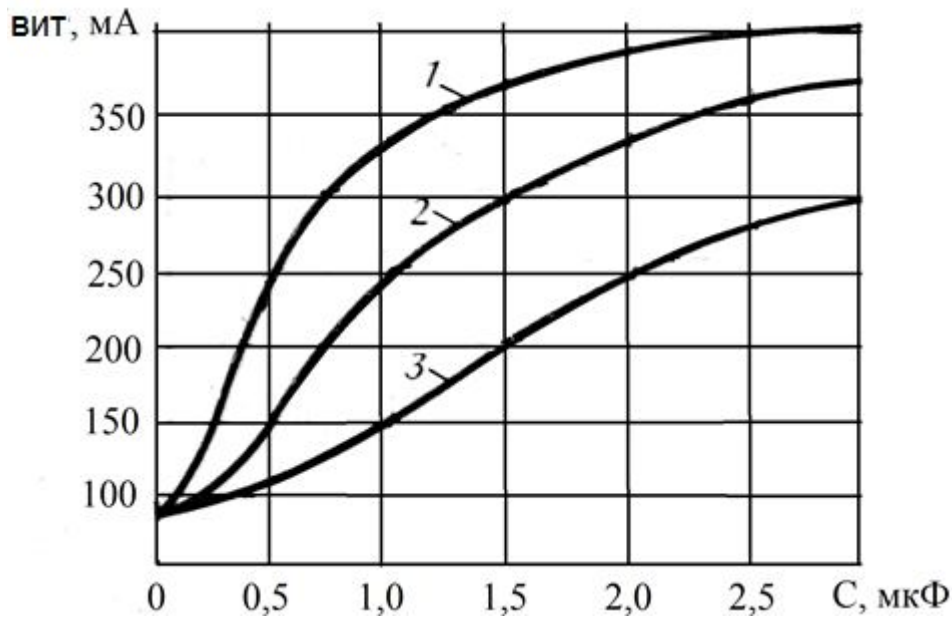
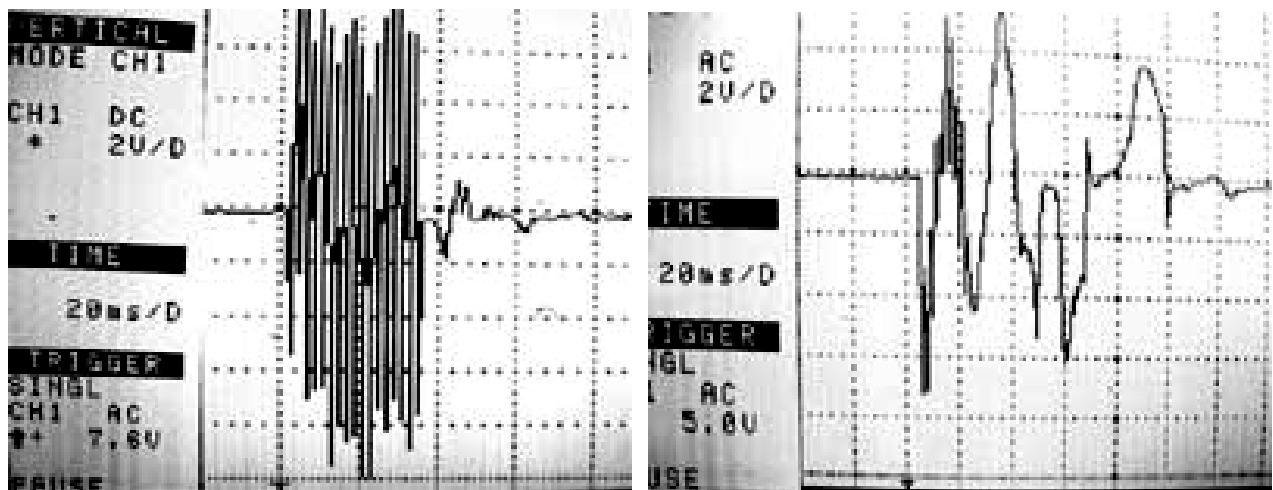


Рисунок 1.19 – Залежності величини струму витоку від ємності ділянки мережі з частотою, що змінюється: 1 - 200Гц; 2 - 100Гц; 3 - 50Гц

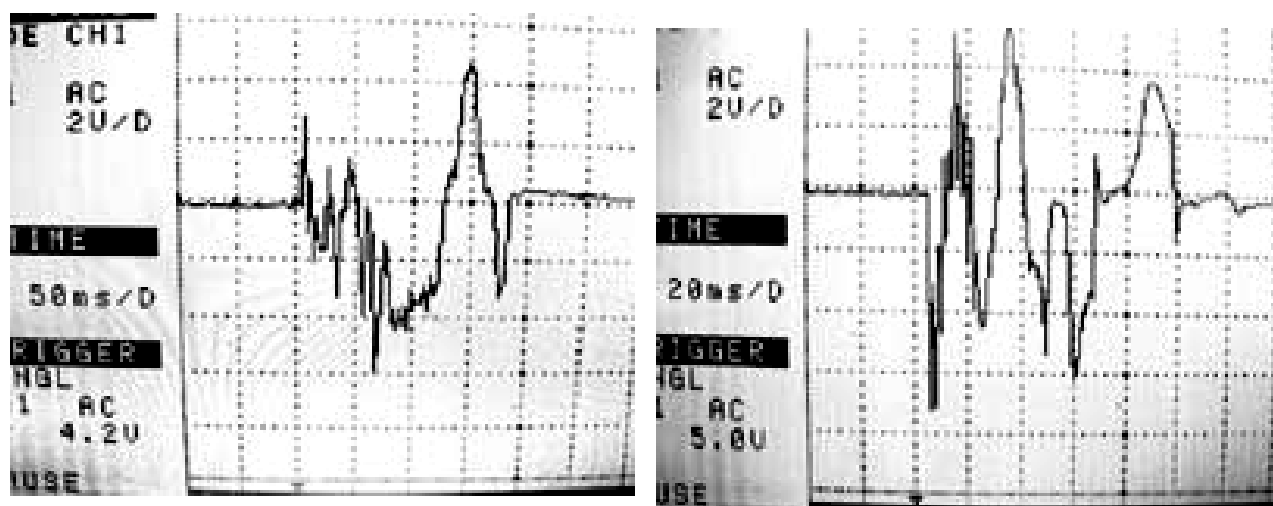
Із збільшенням частоти вихідної напруги перетворювача високочастотна складова в струмі витоку знижується, проте струм при цьому не є синусоїдальним. Характерною особливістю при експлуатації електротехнічного комплексу з асинхронними двигунами є те, що при відключенні джерела живлення, через витік продовжує протікати струм ЕРС вибігання двигуна і струм системи рекуперації електроенергії перетворювача частоти (рис.1.20 г).

Технічні рішення, спрямовані на зниження впливу ПЧ на параметри дільничного апарату захисту від витоків струму на землю стосовно проблематики експлуатації частотно-керованого асинхронного електроприводу подачі очисного комбайна розглянуті в [16]. Зокрема, одним з таких рішень є вживання розділового трансформатора (*TVI*), потужність якого відповідає потужності приводу подачі комбайна (рис.1.21).



а)

б)



в)

г)

Рисунок 1.20 – Осцилограми струму витоків на землю в розподільній мережі напругою 1140В при частоті перетворювача: а) $f=0$ Гц ($C=0,2$); б) $f=20$ Гц ($C=0,5$; $C=0,2$); в) $f=50$ Гц ($C=0,7$; $C=0,2$); г) $f=70$ Гц ($C=0,2$; $C=0,2$)

Проте, розміщення такого трансформатора у складі конструкції комбайна не є доцільним (в умовах його експлуатації в шахті), а розміщення трансформатора *TVI* на відкатувальному штретці виключає функцію захисту від витоків струму на землю в мережі електроживлення комбайна, у т.ч., - гнучкого кабелю, який проходить в очисному вибої і тому, – найбільш схильному щодо пошкодження ізоляції.

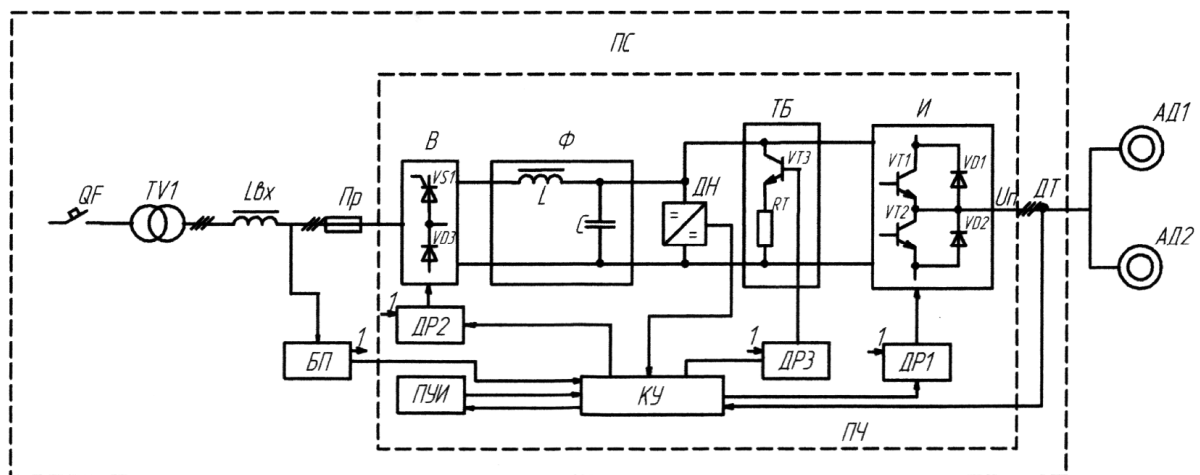


Рисунок 1.21 – Структурна схема регульованого приводу в складі з частотним перетворювачем

Таким чином, має місце технічне протиріччя між необхідністю застосування перетворювача частоти у складі асинхронного електроприводу очисного комбайна і істотним підвищенням небезпеки електротравмування при експлуатації електромережі комбайна, що обумовлене наявністю високочастотних складових струмів в елементах автономного інвертора перетворювача.

Зокрема, дослідженням [17] встановлений спектр частот напруги, відповідний формі і частоті вихідної напруги ПЧ при широтно-імпульсній модуляції (рис.1.22, рис.1.23).

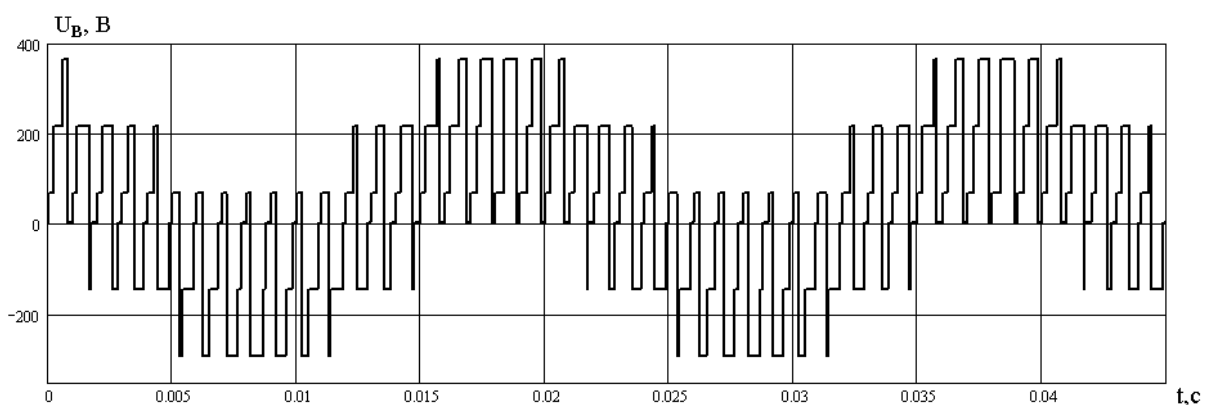


Рисунок 1.22 – Осцилограма фазної вихідної напруги перетворювача частоти на основі широтно-імпульсного модулятора

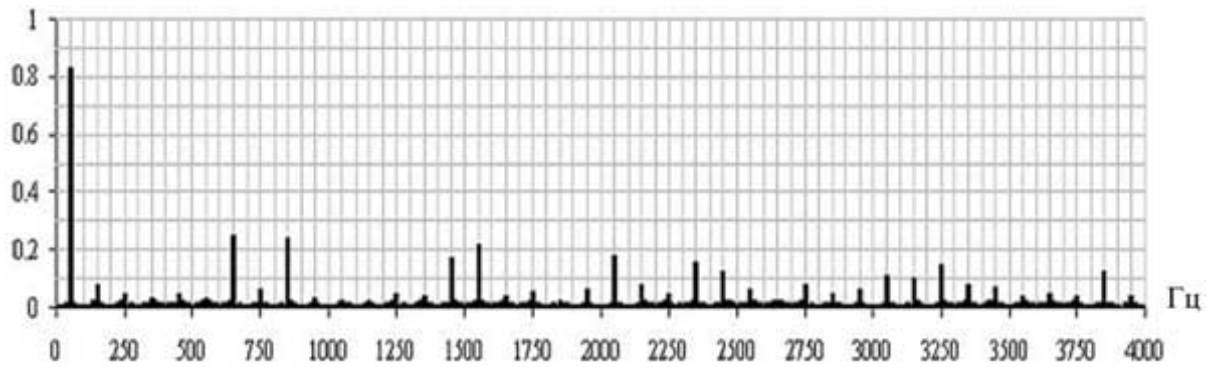


Рисунок 1.23 – Спектр вихідної напруги ПЧ у відносних одиницях

Однофазний витік струму на землю на виході ПЧ обумовлює процес зсуву нейтралі. Гармонійний склад напруги зміщення нейтралі визначається при розкладанні його в ряд Фур'є:

$$u_N(t) = U_{m1} \sin(\omega t + \varphi_1) + U_{m3} \sin(3\omega t + \varphi_3) + \dots + U_{mn} \sin(n\omega t + \varphi_n), \quad (1.11)$$

де $u_N(t)$ – миттєве значення напруги зміщення нейтралі мережі; U_{mn} – амплітуда n -ої гармоніки; ω – частота основної гармоніки вихідної напруги інвертора; φ_n – кут зміщення фаз для n -ої гармоніки.

Коефіцієнти Фур'є для n -ї гармоніки:

$$A_n = \{ \sum n [u_{\text{вих}} \cdot \cos(n\pi/m_f)] \} / (2\pi m_f \Delta t), \quad (1.12)$$

$$B_n = \{ \sum n [u_{\text{вих}} \cdot \sin(n\pi/m_f)] \} / (2\pi m_f \Delta t), \quad (1.13)$$

$$C_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2}. \quad (1.14)$$

де Δt – інтервал дискретизації; m_f – коефіцієнт модуляції по частоті.

Вирази (1.11)-(1.14) дозволяють надалі визначити миттєві значення струму однофазного витоку на землю в приєднанні електротехнічного комплексу з перетворювачем частоти (при допущенні, що опори полюсів ділянки постійного струму ПЧ відносно землі є однаковими).

Миттєві значення струму витоку на землю на ділянці мережі з промисловою частотою напруги (50Гц), дорівнює сумі миттєвих значень струмів, обумовлених окремими гармоніками і визначається виразами:

$$I_{\text{вум}}(t) = i_{\text{вум}(1)}(t) + i_{\text{вум}(3)}(t) + \dots + i_{\text{вум}(n)}(t), \quad (1.15)$$

$$\text{де } i_{\text{вум}(n)}(t) = u_{\text{вум}(n)}(t) \cdot \sqrt{[(x^2 c n^{-2} + R^2) / (x^2 c n^{-2} (R_{\text{вум}} + R)^2 + R^2_{\text{вум}} R^2)]},$$

x_c, x_R – відповідно ємнісний і активний опір мережі; $R_{\text{вум}}$ – опір витоку.

Позначивши:

$$Y_n = \sqrt{[(x^2 c n^{-2} + R^2) / (x^2 c n^{-2} (R_{\text{вум}} + R)^2 + R^2_{\text{вум}} R^2)]}, \quad (1.16)$$

отримаємо

$$i_{\text{вум}}(t) = U_{m1} Y_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + U_{m3} Y_3 \sin(3\omega t + \varphi_3) + \dots + U_{mn} Y_n \sin(n\omega t + \varphi_n). \quad (1.17)$$

Дієве значення струму однофазного витоку на землю на ділянці мережі з незмінною частотою з врахуванням вищих гармонік:

$$I_{\text{вум}} = \sqrt{(U^2_1 Y^2_1 + U^2_3 Y^2_3 + \dots + U^2_n Y^2_n)}. \quad (1.18)$$

У разі, коли опори полюсів ділянки постійного струму інвертора відносно землі не є рівними, у вихідній напрузі інвертора і струмі витоку на землю з'являється постійна складова. Миттєве значення струму витоку на землю на ділянці мережі з незмінною частотою визначається з виразу:

$$i_{y(n)}'(t) = u_{N(n)}(t) \cdot \sqrt{\{[(x^2 c n^{-2} + R^2) / (x^2 c n^{-2} (R_{\text{вум}} + R)^2 + R^2_{\text{вум}} R^2)] + [1,172 / (r + R_{\text{вум}})^2]\}}, \quad (1.19)$$

де r – опір витоку ланки постійного струму; 1,17 – коефіцієнт випрямленої напруги схеми ($u = 1,17 u_{\phi}$).

Позначивши:

$$Y'_n = \sqrt{\{[(x^2 c n^{-2} + R^2) / (x^2 c n^{-2} (R_{\text{вум}} + R)^2 + R^2_{\text{вум}} R^2)] + [1,172 / (r + R_{\text{вум}})^2]\}},$$

$$(1.20)$$

отримаємо:

$$i_y'(t) = U_{m1} Y'_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + U_{m3} Y'_3 \sin(3\omega t + \varphi_3) + \dots + U_{mn} Y'_n \sin(n\omega t + \varphi_n). \quad (1.21)$$

У цьому випадку чинне значення струму однофазного витоку на землю на ділянці мережі з незмінною частотою (опори полюсів не є рівними):

$$I'_y = \sqrt{(U^2_1 Y'^2_1 + U^2_3 Y'^2_3 + \dots + U^2_n Y'^2_n)}. \quad (1.22)$$

Діюче значення фазної напруги з врахуванням вищих гармонік:

$$U_\phi = \sqrt{(U^2_1 + U^2_3 + \dots + U^2_n)}. \quad (1.23)$$

Діюче значення струму однофазного витоку на землю на ділянці постійного струму:

$$I_y = U_\phi \{ [1,17r / (RR_{\text{sum}} + R_{\text{sum}}r + rR)] + [2,32 / (R_{\text{sum}} + r)] \}, \quad (1.24)$$

де 2,32 – коефіцієнт випрямленої напруги мостового випрямляча інвертора ($u = 2,32u_\phi$).

Миттєве значення струму однофазного витоку на землю на ділянці мережі із змінною частотою, визначається з виразу:

$$i''_{y(n)}(t) = u_{N(n)}(t) \cdot \sqrt{\{ [(x^2_c n^{-2} + r^2) / (x^2_c n^{-2} (R_{\text{sum}} + r)^2 + R^2_{\text{sum}} r^2)] + [2,32 / (r + R_{\text{sum}})] \}}. \quad (1.25)$$

Позначивши:

$$Y''_n = \sqrt{\{ [(x^2_c n^{-2} + r^2) / (x^2_c n^{-2} (R_{\text{sum}} + r)^2 + R^2_{\text{sum}} r^2)] + [2,32 / (r + R_{\text{sum}})] \}},$$

отримаємо:

$$i_y''(t) = U_{m1} Y''_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + U_{m3} Y''_3 \sin(3\omega t + \varphi_3) + \dots + U_{mn} Y''_n \sin(n\omega t + \varphi_n). \quad (1.26)$$

Діюче значення струму однофазного витоку на ділянці мережі з змінною частотою:

$$I_y = \sqrt{(U^2_1 Y''^2_1 + U^2_3 Y''^2_3 + \dots + U^2_n Y''^2_n)}. \quad (1.27)$$

У табл. 1.1 наведені величини струмів однофазного витоку на землю на ділянці мережі лінійної напруги 660В, обчислені по формулах (1.24 -1.27).

Встановлено, що відносний рівень гармонік струму є зворотно пропорційним частоті вихідної напруги і має максимальне значення при частоті вказаної напруги, близькій до нуля. На інтервалі напівперіоду вихідної напруги ПЧ, рівень його високочастотних складових змінюється від максимального значення в початковій і кінцевій стадії до мінімального в середині інтервалу.

Характерні осцилограми струму витоку на землю, зняті в розподільчій мережі сумарною ємністю кабелів відносно землі 1 мкФ на фазу при вихідній частоті перетворювача 5 Гц і 70 Гц наведені на рис.1.24 [17; 18].

Таблиця 1.1

Величини струмів однофазного витоку 1 кОм на різних ділянках мережі комбінованого електротехнічного комплексу дільниці шахти

Параметр	Значення при ємності мережі С, мкФ / фази				
	0,2	0,4	0,6	0,8	1
1. З незмінною частотою (опори полюсів рівні)					
Струм витоку при частоті 50 Гц $I_{\text{ввт}}(1)$, А	0,109	0,208	0,291	0,356	0,406
Струм витоку $I_{\text{ввт}}$, А	0,204	0,275	0,344	0,401	0,446
$I_{\text{ввт}} / I_{\text{ввт}}(1)$	1,868	1,321	1,181	1,126	1,1
2. З незмінною частотою (опори полюсів рівні)					
Струм витоку при частоті 50 Гц $I_{\text{ввт}}(1)$, А	0,109	0,208	0,291	0,356	0,406
Струм витоку $I_{\text{ввт}}$, А	0,308	0,364	0,419	0,468	0,507
$I_{\text{ввт}} / I_{\text{ввт}}(1)$	2,812	1,748	1,441	1,314	1,25
3. Постійного струму при витоку 1 кОм					
Опір r_p , кОм	30	90	150	250	500
Струм витоку $I_{\text{ввт}}$, А	0,051	0,018	0,011	0,007	0,004
4. З змінною частотою 50 Гц					
Струм витоку при частоті 50 Гц $I_y(1)$, А	0,111	0,21	0,293	0,358	0,408
Струм витоку $I_{\text{ввт}}$, А	0,314	0,368	0,422	0,47	0,509
$I_{\text{ввт}} / I_{\text{ввт}}(1)$	2,83	1,749	1,44	1,312	1,248
5. З змінною частотою 5 Гц					
Струм витоку при частоті 50 Гц $I_{\text{ввт}}(1)$, А	0,013	0,024	0,035	0,046	0,057
Струм витоку $I_{\text{ввт}}$, А	0,113	0,148	0,224	0,249	0,266
$I_{\text{ввт}} / I_{\text{ввт}}(1)$	8,966	7,75	6,448	5,443	4,686
6. З змінною частотою 70 Гц					
Струм витоку при частоті 50 Гц $I_{\text{ввт}}(1)$, А	0,172	0,308	0,4	0,459	0,496
Струм витоку $I_{\text{ввт}}$, А	0,346	0,431	0,5	0,549	0,581
$I_{\text{ввт}} / I_{\text{ввт}}(1)$	2	1,402	1,254	1,2	1,17

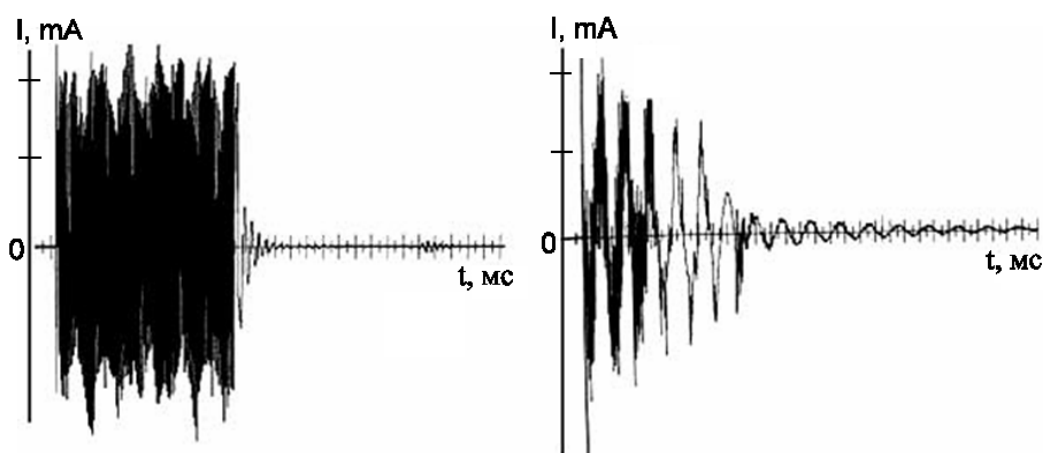


Рисунок 1.24 – Осцилограми струму витоку на землю в розподільній мережі при частоті вихідної напруги 5 Гц (а) і 70 Гц (б)

Аналізом осцилограм встановлено, що величина струму витоку, яка обумовлена високочастотною складовою напруги ПЧ, перевищує щонайменше в 5 разів величину струму основної гармоніки, причому при частоті 70 Гц відносне значення високочастотної складової є значно нижчим, ніж при частоті 5 Гц.

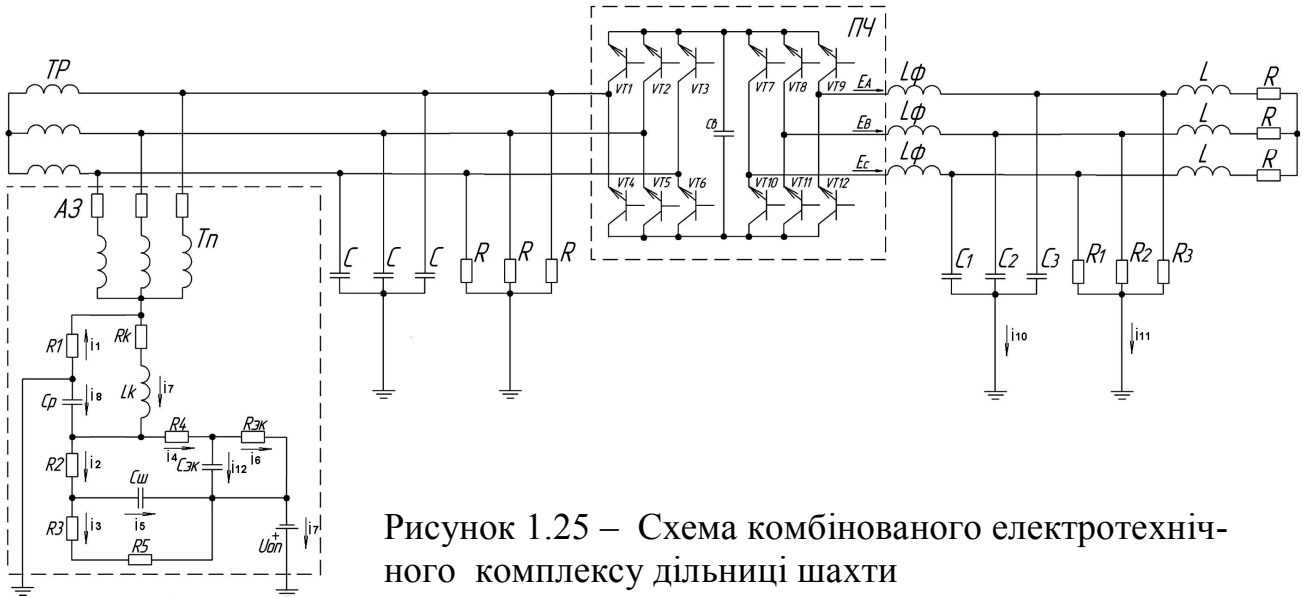


Рисунок 1.25 – Схема комбінованого електротехнічного комплексу дільниці шахти

Вплив низькочастотної складової вихідної напруги перетворювача частоти на роботу апарату захисного відключення в електротехнічному комплексі дільниці шахти пояснюється наступним. Схема ЕТК, оснащеного апаратом захисту типа АЗУР-4 і перетворювачем частоти представлена на рис.1.25 (введені позначення: E_A , E_B , E_C – фазні ЕРС ПЧ; L_ϕ – загороджувальний фільтр; R , L – еквівалентні приведені активні опори і індуктивності обмоток асинхронного двигуна; C_1 , C_2 , C_3 – ємності ізоляції фаз відносно землі; R_1 , R_2 , R_3 – активні опори фаз мережі відносно землі).

Виходячи з аналізу схеми контролю опору ізоляції дільничної мережі в апараті АЗУР-4 (АЗ), в якості параметру, що впливає на його виконавчий функціональний вузол прийнято падіння напруги на резисторі R_4 . Формування команди на захисне відключення мережі відбувається унаслідок перевищення цією напругою величини $U_{CP} = 2,4$ В. На рис.1.26 представлені осцилограми

залежності напруги на резисторі R_4 від частоти вихідної напруги ПЧ при опорі витоку струму на землю 1 кОм.

Дослідженнями процесів в структурі комбінованого ЕТК (рис.1.25) з використанням комп'ютерного моделювання встановлено, що робота перетворювача частоти в робочому діапазоні частот вихідної напруги не робить суттєвого впливу на чутливість дільничного апарату захисту від витоків струму на землю (рис.1.26). Низькочастотна складова напруги нейтралі робить негативний вплив на формування струму витоку на землю складаючись з оперативним струмом апарату захисту. Це може привести до значного збільшення часу спрацьовування (більш 100 мс) апаратури захисту.

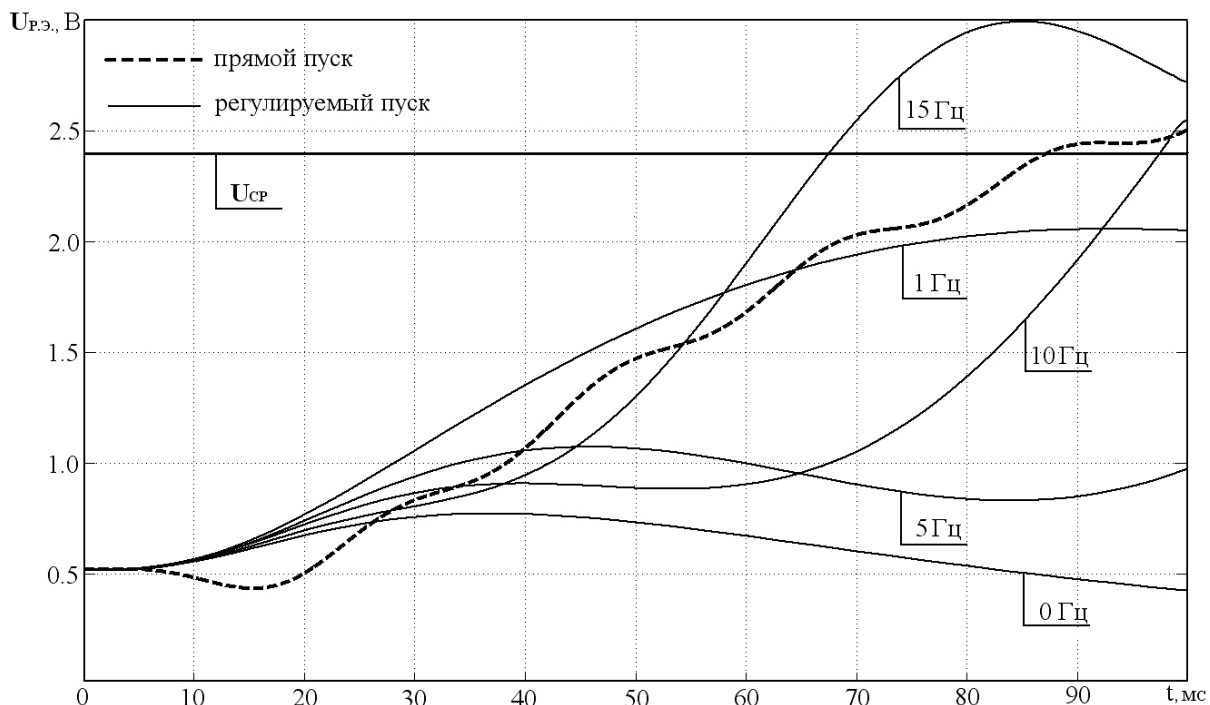


Рисунок 1.26 – Залежність напруги на резисторі R_5 від частоти вихідної напруги ПЧ ($R_{вит}=1$ кОм)

У відгалуженні комбінованого ЕТК (з перетворювачем частоти) ємнісна складова струму витоку на землю є сумою декількох гармонійних складових. Тому представляється не припустимим вживання дросельного способу компенсації ємнісної складової струмів витоку на землю (що є ефективним стосовно тільки однієї гармонійної складової струму витоку на землю).

Ця обставина, а також інерційність зміни індуктивності автокомпенсаторів відомих апаратів захисного відключення, що має місце, викликана змінами конфігурації ввімкненої дільничної мережі, зумовили пошук альтернативних рішень, що дозволяють підвищити ефективність дії вказаної захисної апаратури.

Відомий спосіб вживання послідовних операцій захисного шунтування витоків в пошкодженій фазі, захисного відключення мережі з подальшим підключенням дросельного компенсатора для припинення впливу ЕРС обертання двигунів. Цей спосіб реалізований в апараті АЗУР-4ПП захисту від витоків струму на землю в комбінованих електромережах шахтних технологічних дільниць (рис.1.27) [13; 17; 18].

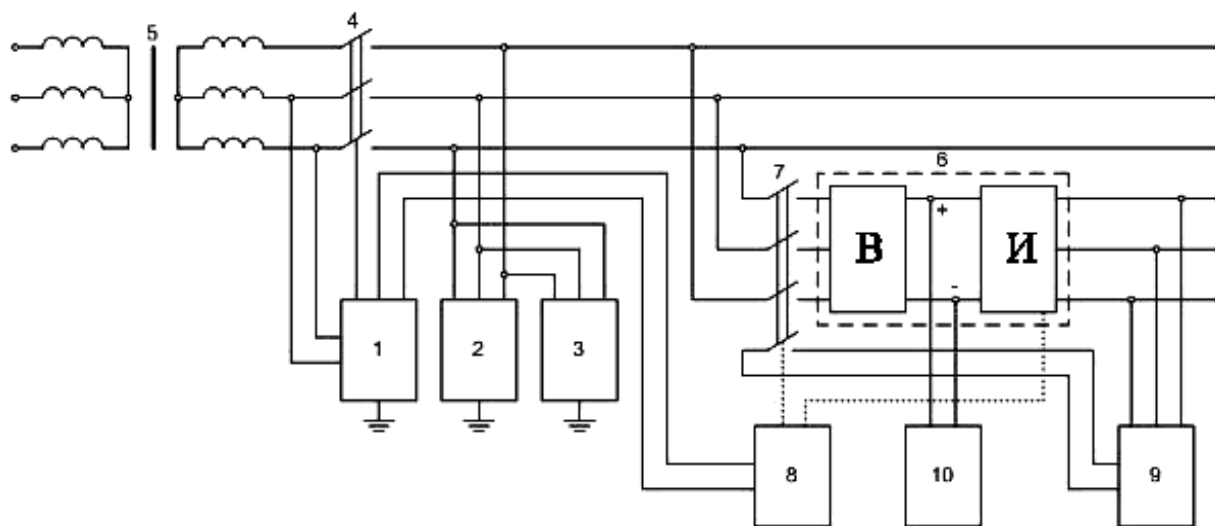


Рисунок 1.27 – Структурна схема апарата захисту АЗУР-4ПП

ЕТК обладнаний апаратом АЗУР-4ПП містить блок контролю опору ізоляції мережі 1; блок компенсації ємнісних складових струмів витоків на землю 2; блок захисного заземлення фази мережі з пошкодженою ізоляцією 3; силовий комутаційний апарат 4, контакти якого включені між трансформатором 5 дільничної підстанції і мережею, що захищається; перетворювач частоти 6 (в складі з випрямлячем і інвертором), включений в мережу через комутаційний апарат 7; блок примусового відключення 8 і

короткозамикач 9, приєднаний до виходу силових напівпровідникових приладів; блок 10 контролю опору ланки постійного струму.

Таким чином, що проблема компенсації ємнісних складових струмів витоку на землю при експлуатації комбінованих ЕТК вирішена стосовно компенсації лише однієї складової струму витоку на землю, що обумовлює доцільність подальших досліджень щодо компенсації сукупності струмів вищих гармонік в колі витоку на землю.

Істотний вплив на величину і характер формування ємнісного витоку струму на землю надає конфігурація комбінованого електротехнічного комплексу (розташування ПЧ відносно трансформаторної підстанції і струмоприймачів, а також потужність, споживана приводами у момент виникнення витоку) [19]. У таблиці 1.2 представлені варіанти розташування перетворювачів частоти стосовно різних типів очисних комбайнів.

Таким чином, має місце можливість виділити дві характерні структури схеми електроживлення частотно-керованого асинхронного електроприводу подачі очисного комбайна (рис.1.28, рис.1.29):

- ПЧ на комбайні (відрізок кабелю від ПЧ до АД розташований в металевому трубопроводі і вважається неушкоджуваним).

- ПЧ є відособленим силовим апаратом, розташованим на штрєці; кабель, що відходить, може мати значну довжину, перетин, прокладається уздовж відкатувального штрєку, очисного вибою і є схильним до небезпеки механічних пошкоджень. У обох випадках високочастотні складові в спектрі вихідної напруги ПЧ є чинниками дії на величину електричного параметра в реагуючому органі загальномережевого апарату захисту від витоків струму на землю. За наявності такого витоку вказані складові напруги створюють струми,

що являють небезпеку електротравмування.

Таким чином, з урахуванням можливих варіантів розташування перетворювача частоти, комбінований електротехнічний комплекс дільниці шахти можна розглядати у вигляді наступної узагальненої схеми (рис.1.28).

Відповідно до свого розташування ПЧ може знаходитися як у

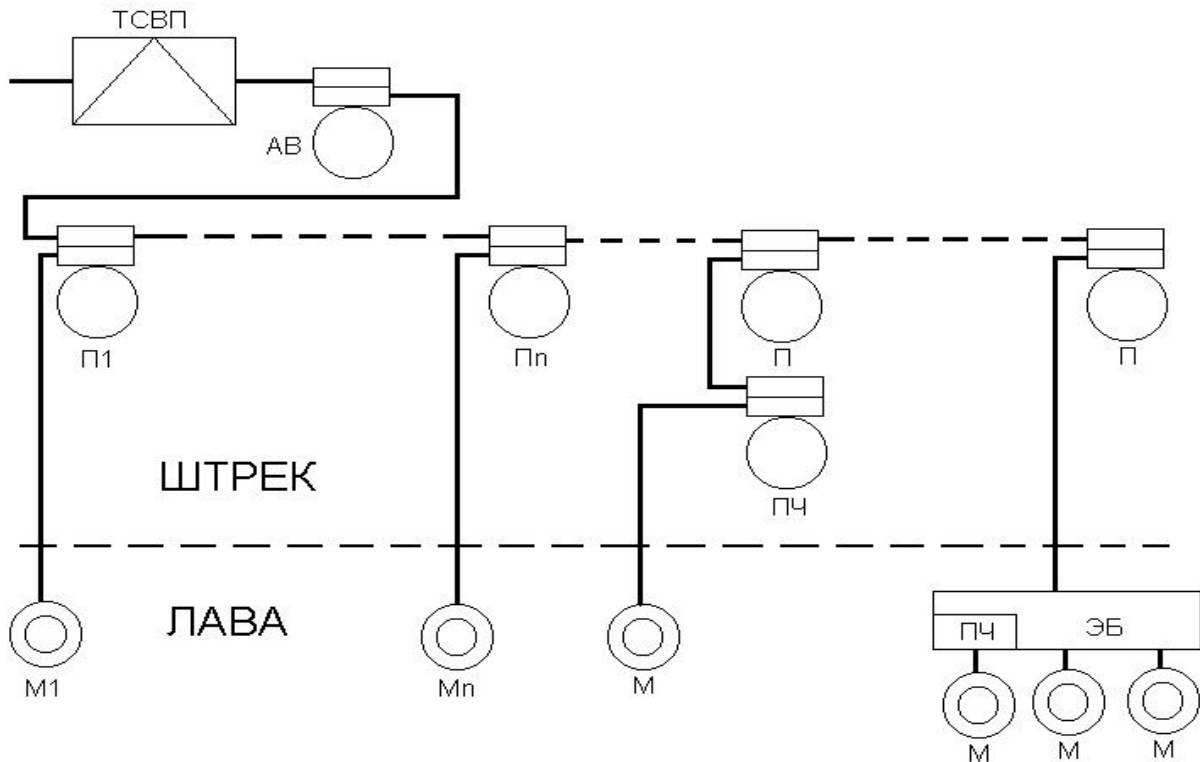


Рисунок 1.28 – Узагальнена електрична схема електротехнічного комплексу очисної дільниці шахти

безпосередній близькості від дільничної підстанції (і на видаленні від споживача) так і поблизу споживача (на видаленні від підстанції). Таким чином, найбільш небезпечні режими і найбільші рівні струмів витоку на землю виникають в комбінованих системах, в яких перетворювач частоти розташований безпосередньо біля станції управління, а електропривод розташований на значному видаленні від перетворювача частоти.

Таблиця 1.2

Параметри механізмів подачі комбайнів з частотно-керованим електроприводом

Параметри механізма подачі комбайна	Тип комбайна						
	КШ1КГ УЧ	К10ПМ	1КШЭЧ	КВПЧ	УКД- 300	КДК- 500	УКН- 400
Перетворювальна станція:			На комбайні	На комбайні	На штрєці	На комбайні	На комбайні
- Розміщення	На штрєці	На штрєці					
- номінальна напруга, В	660	660/1140	660/1140	660/1140	1140	660/1140	660/1140
- потужність, кВА	40	70	80	110	70	110	110
- діапазон регулювання частоти, Гц	2...70	2...70	0...70	1...70	0...70	0...70	0...70
- діапазон регулювання напруги, В	0; 26...660	0; 26...660	14...380	15...660/ 25...1140	25...1140	25...1140	25...1140
- номінальний струм, А	40	46...1140 72/45	145	110/70	145	145	145
Електродвигуни механізма:							
- кількість, шт.	1	2	2	2	2	2	2
- напруга, В	660	660/1140	380	660/1140	1140	660/1140	660/1140
- потужність, кВт	30	30x2=60	30x2=60	45x2=90	30x2=60	45x2=90	45x2=90

1.3. Перетворювач частоти як засіб впливу на параметри електробезпеки експлуатації шахтної дільничної електромережі

Характерною ознакою роботи комбінованого електротехнічного комплексу є наявність в його структурних складових струмів різних частот і напруг різних величин. Захисні параметри необхідно визначати для кожного з цих струмів і орієнтуватися на ті значення параметрів, які відповідають найбільш тяжким умовам експлуатації. Відмінною ознакою комбінованих електротехнічних комплексів шахтних дільниць є застосування в їхньому складі перетворювачів частоти з ланкою постійного струму і інвертором

напруги змінної напруги [16]. Отже, науковий і практичний інтерес становить випадок, коли в мережі існує струм витoku на землю (промислової, або підвищеної частоти).

Оскільки ГОСТ 22929-78 [5] не визначає величину опору спрацьовування апаратів захисного відключення у комбінованому електротехнічному комплексі, необхідно виконати оцінку необхідних параметрів цих апаратів захисту для комбінованих електротехнічних комплексів шахтних дільниць.

Для визначення вимог до опору спрацьовування захисту необхідно встановити залежність між припустимим струмом витoku і опором спрацьовування захисту. При аналізі користуватимемося наступними позначеннями: $R_{сп.т.п.}$, $R_{сп.т.з.}$, $R_{сп.т.к.}$ – опори спрацьовування апарату для тривалих постійного, змінного і комбінованого струмів відповідно; $R_{сп.к.п.}$, $R_{сп.к.з.}$, $R_{сп.к.к.}$ – опори спрацьовування апарату для короточасних постійного, змінного і комбінованого струмів, відповідно.

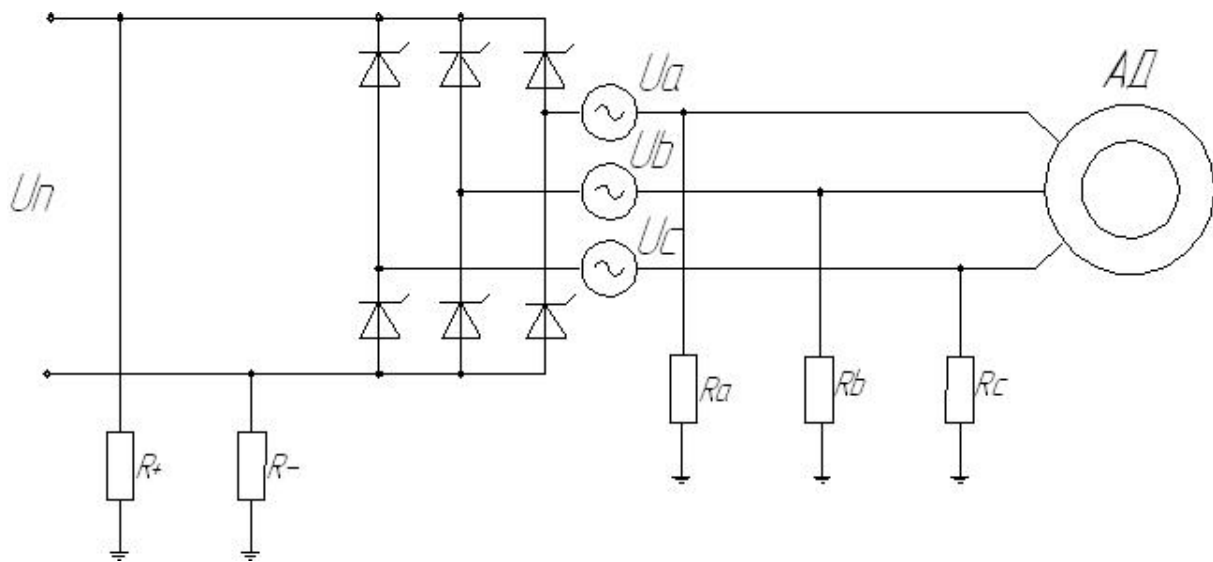


Рисунок 1.29 – Спрощена схема комбінованої системи

Спрощену комбіновану систему електротехнічного комплексу можна представити у вигляді, наведеному на рис.1.29, де АД – асинхронний електродвигун; ПЧ – силовий напівпровідниковий перетворювач частоти; R_A ,

R_B, R_C – опір фаз A, B, C відносно землі, відповідно; U_A, U_B, U_C – фазна напруга; U_{II} – вихідна напруга перетворювача частоти.

Кожен напівпровідниковий ключ можна представити у вигляді джерела пульсуючої ЕРС, напрям якої залишається незмінним, а величина змінюється від нуля до максимального значення, рівного напрузі на електродах закритого ключа. Кожен з полюсів ділянки випрямленого струму приєднаний до сторони змінного струму ПЧ за допомогою симетричної трьохпроменевої «зірки» з однакових ключів.

Це є еквівалентним під'єднанням полюсів до нульової точки трифазної мережі. У свою чергу, кожна з фаз ланки змінного струму приєднана до сторони випрямленого струму двопробевої «зірки» з тих же самих силових напівпровідників, що є еквівалентним під'єднанням фаз до нульової (середньої) точки мережі випрямленого струму.

У кожен окремий момент часу в схемі перетворювача частоти мають місце групи відкритих напівпровідникових ключів і закритий стан інших, оскільки в процесі роботи перетворювача відкритих ключів інвертора змінюють одна одну по черзі. Однак, з огляду на формування середніх, рівнодіючих струмів витоку на землю за час, кратний періоду роботи інвертора перетворювача частоти стани напівпровідникових ключів інвертора можна вважати рівно еквівалентними.

В подальшому, практичний інтерес представляє визначення струмів витоку на землю в окремих ланках комбінованого електротехнічного комплексу і відповідний до цього рівень опору витоку, на який реагує апарат захисного відключення мережі.

У відповідності до розрахункової схеми, струм витоку на землю буде максимальним, якщо витік виникає між двома точками струмоведучих частин з найбільшою різницею потенціалів, а опір останніх точок відносно землі буде рівним нескінченності. Крім того, в разі існування тривалого струму витоку опір кожної з цих двох точок відносно землі має дорівнювати подвоєному опору спрацьовування, тобто $2R_{cn.m.}$. При цьому, опір струмопровідних частин

відносно землі рівний $2R_{cn.m.}$, а опір струму витoku - $4R_{cn.m.}$. В разі виникнення короткочасного струму опір однієї з вказаних точок відносно землі має бути рівним $R_{cn.k.}$, а опір іншої точки – мінімальному розрахунковому опору тіла людини R_l , тобто 1кОм.

Для змінного струму точками з найбільшою різницею потенціалів є будь-які фази, наприклад фази А і В (рис.1.29). При цьому напруга ланцюга витoku струму на землю дорівнює лінійній напрузі $U_{л.}$. Виходячи з цього, для тривалого струму витoku на землю можна записати:

$$I_{m.z.} = \frac{U_{л.}}{4R_{cn.m.z.}}; \quad (1.28)$$

$$I_{k.z.} = \frac{U_{л.}}{R_{cn.k.z.} + R_l}; \quad (1.29)$$

де $I_{m.z.}$, $I_{k.z.}$ – тривалий і короткочасний змінні струми витoku на землю.

Для ланки випрямленої напруги $U_{п.}$ точками з найбільшою різницею потенціалів є полюси перетворювача. Напруга на опорі витoku при цьому дорівнює $U_{п.}$. Аналогічно до (1.28) і (1.29):

$$I_{m.n.} = \frac{U_{п.}}{4R_{cn.m.n.}}; \quad (1.30)$$

$$I_{k.n.} = \frac{U_{п.}}{R_{cn.k.n.} + R_l}; \quad (1.31)$$

В разі, якщо через опір витoku протікає як змінний, так і випрямлений струм, то найбільша різниця потенціалів буде між точками, одна з яких має найбільший змінний потенціал відносно точки «0», а друга – найбільший постійний потенціал відносно її ж. Такими точками є будь-яка з фаз і будь-який з полюсів. Нехтуючи змінною складовою випрямленого струму, запишемо:

$$I_{m.к.} = \sqrt{\left(\frac{U_{Л}}{\sqrt{3}4R_{сн.м.к} + R_{\varphi}}\right)^2 + \left(\frac{U_{П}}{2 \cdot 4R_{сн.м.к}}\right)^2}; \quad (1.32)$$

$$I_{к.к.} = \sqrt{\left(\frac{U_{Л}}{\sqrt{3}(R_{сн.к.к} + R_{\varphi})}\right)^2 + \left(\frac{U_{П}}{2(R_{сн.к.к} + R_{\varphi})}\right)^2}; \quad (1.33)$$

де $I_{m.к.}$, $I_{к.к.}$ – тривалий і короткочасний комбіновані струми витоків на землю.

Користуючись формулами (1.28 – 1.33), отримаємо вирази для визначення величин опорів витоків на землю, при яких спрацьовує апарат захисту від витоків струму на землю (в подальшому, опорів спрацьовування):

$$R_{сн.м.з.} = \frac{U_{Л}}{4I_{m.к.}}, \quad (1.34)$$

$$R_{сн.к.з.} = \frac{U_{Л}}{I_{к.з.}} - R_{л}, \quad (1.35)$$

$$R_{сн.м.н.} = \frac{U_{П}}{4I_{m.н.}}, \quad (1.36)$$

$$R_{ср.к.н.} = \frac{U_{П}}{I_{к.н.}} - R_{л}, \quad (1.37)$$

$$R_{сн.м.к.} = \frac{\sqrt{4U_{Л}^2 + 3U_{П}^2}}{8\sqrt{3}I_{m.к.}}, \quad (1.38)$$

$$R_{сн.к.к.} = \frac{\sqrt{4U_{Л}^2 + 3U_{П}^2}}{2\sqrt{3}I_{к.к.}} - R_{л}, \quad (1.39)$$

Виходячи з того, що найбільше значення припустимих короткочасних струмів витоків на землю в чотири рази перевищує найбільші значення відповідних припустимих тривалих струмів, і із зіставлень (1.34) з (1.35), (1.36) з (1.37) і (1.38) з (1.39), маємо:

$$R_{сн.м.з.} = R_{сн.к.з.} + R_{л}, \quad (1.40)$$

$$R_{сн.м.н.} = R_{сн.к.н.} + R_{л}, \quad (1.41)$$

$$R_{сн.т.к.} = R_{сн.к.к.} + R_{л.} \quad (1.42)$$

Таким чином, вимоги до опорів спрацьовування по тривалих струмах жорсткіші, ніж по короткочасних, оскільки їх значення є більшими на величину $Rч$. Це дозволяє надалі аналізувати лише три вирази: (1.34), (1.35), (1.36). Оскільки найбільші припустимі тривалі змінні і комбіновані струми витоку на землю збігаються, а найбільший припустимий випрямлений струм витоку на землю перевершує їх в два рази, із зіставлення виразів (1.36) і (1.38) з виразом (1.34), для перетворювача частоти, виконаного по трьохфазній мостовій схемі, $U_{II} = 1,35U_{л}$, маємо:

$$R_{сн.т.з.} = 1,5R_{ср.т.п.}, \quad (1.43)$$

$$R_{ср.т.з.} = 1,1R_{сн.т.к.} \quad (1.44)$$

Величина опору спрацьовування, отримана на основі вимог до величин тривалого змінного струму витоку на землю, перевищує значення опорів, отриманих за інших умов. Результати розрахунку, отримані на основі (1.34) - (1.36), наведені в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3

Необхідні опори спрацьовування апаратів захисту від витоку струму на землю для комбінованих мереж різної напруги

Лінійна напруга, В	127	220	380	660
Випрямлена напруга, В	170	300	500	900
Опір спрацьовування, кОм	1,3	2,2	4	7

При вказаних опорах спрацьовування (табл.1.3) матиме місце підвищення уставки спрацьовування апарата захисту по тривалому постійному струму витоку на землю. Проте, цій опір спрацьовування можна корегувати залежно від місця появи витоку, шляхом деформації характеристик пристрою захисту від витоків. Враховуючи це і те, що величина напруги дільничної шахтної мережі схильна до певних коливань,

розрахункові величини опорів спрацьовування доцільно збільшити приблизно на 50% [15].

На основі викладеного, параметри апаратів захисту від витоків струму на землю в комбінованих електротехнічних дільницях шахт повинні відповідати вимогам (табл.1.4):

Таблиця 1.4

Вимоги до апаратів захисту від витоків струму на землю в комбінованих мережах

Тривалий струм витоку, мА, не більш:	
Змінний і комбінований	25
Випрямлений	50
Короткочасний струм витоку, мА, не більш:	
Змінний	100
Випрямлений	200
Час спрацьовування при виникненні однофазного витоку опору 1000 Ом, с, не більш:	0,1
Опір спрацьовування, кОм, при лінійній напрузі:	
127 В	2,0
220 В	3,5
380 В	6,0
660 В	11,0

2 ПРОЦЕСИ ФОРМУВАННЯ ЄМНІСНИХ СТРУМІВ ВИТОКУ НА ЗЕМЛЮ В КОМБІНОВАНІЙ ШАХТНІЙ ДІЛЬНИЧНІЙ МЕРЕЖІ

2.1. Властивості перетворювача частоти як джерела високочастотних складових струму витоку на землю

Властивості перетворювача частоти стосовно впливу на величину електричних параметрів в колі витоку струму на землю в комбінованому електротехнічному комплексі дільниці шахти потребують детального визначення, що передбачає комплексне застосування апробованих теоретичних та експериментальних методів дослідження. Задачею експериментальних досліджень є встановлення основних закономірностей формування ємнісних складових струмів витоку на землю в комбінованому електротехнічному комплексі дільниці шахти, що містить перетворювач частоти, з метою уточнення припущень при обґрунтуванні математичної моделі об'єкту і виявлення характеру впливу перетворювача частоти на параметри електробезпеки електротехнічного комплексу дільниці шахти.

Схема експериментального стенду (рис.2.1) утворює структуру електротехнічного комплексу, що містить: трифазне джерело лінійної напруги (TVI) 380В частоти 50Гц (у режимі ізольованої нейтралі), яке живить навантаження – асинхронний двигун (M) з короткозамкненим ротором, потужністю 15 кВт. Регулювання частоти обертання ротора асинхронного двигуна здійснюється перетворювачем частоти (VZI) типу Danfoss VLT 6002 з ланкою постійного струму [20, 21].

Імітація ємностей і активних опорів ізоляції кабелю відносно землі між перетворювачем частоти і асинхронним двигуном здійснюється магазинами ємностей, і опорів у діапазонах, відповідно, 0 – 2 мкФ/фазу; 1 – 150 кОм/фазу.

Коло витокy струму на землю представлене сполученими послідовно міліамперметрами змінного ($PA1$), постійного струму ($PA2$) і додатковим активним опором ($R_{вум}$). Параметри струму витокy реєструються осцилографом (ОСЦ), підключеним до вимірювального резистора (R). Загальний опір кола витокy складає 1 кОм, що узгоджується з положеннями ГОСТ 22929-78 „Аппараты защиты от токов утечки рудничные для сетей напряжением до 1200 В” [5]. З метою імітації дії загороджувального фільтру у фазах кабелю на виході ПЧ послідовно з АД передбачено підключення індуктивностей в діапазоні від 0.1 мГн до 15 мГн.

Для аналізу результатів осцилографування струму в опорі витокy ($R_{вум}$) передбачено застосування вимірювального комплексу на основі персонального комп'ютера з використанням програми обробки даних аналого-цифрового перетворювача, з подальшою їх візуалізацією (рис.2.2) і записом у файли.

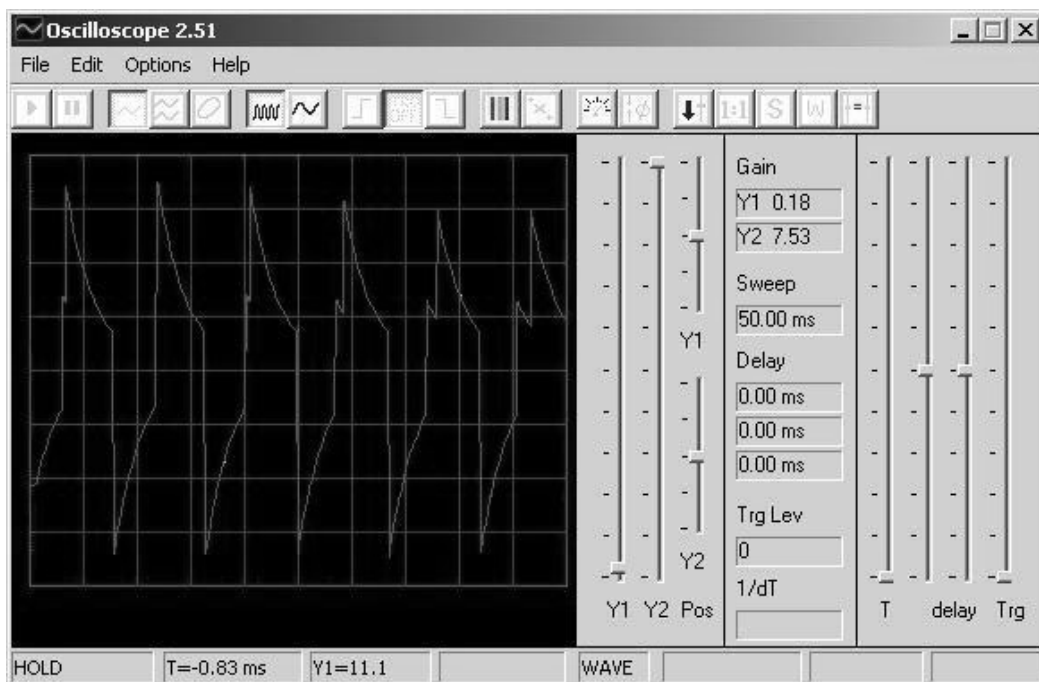


Рисунок 2.2 – Фрагмент осцилограми ємнісного струму витокy на землю при дослідженні моделі комбінованого електротехнічного комплексу

Застосований у складі стенду перетворювач частоти (UZI) має класичну компоновку силової схеми, включаючи автономний інвертор на IGBT (рис.2.3). При функціонуванні перетворювача на його виході забезпечується формування

трифазної системи напруги в діапазоні частот 0 – 60 Гц в режимі широтно-імпульсної модуляції при постійності відношення величини напруги, що діє, до його частоти.

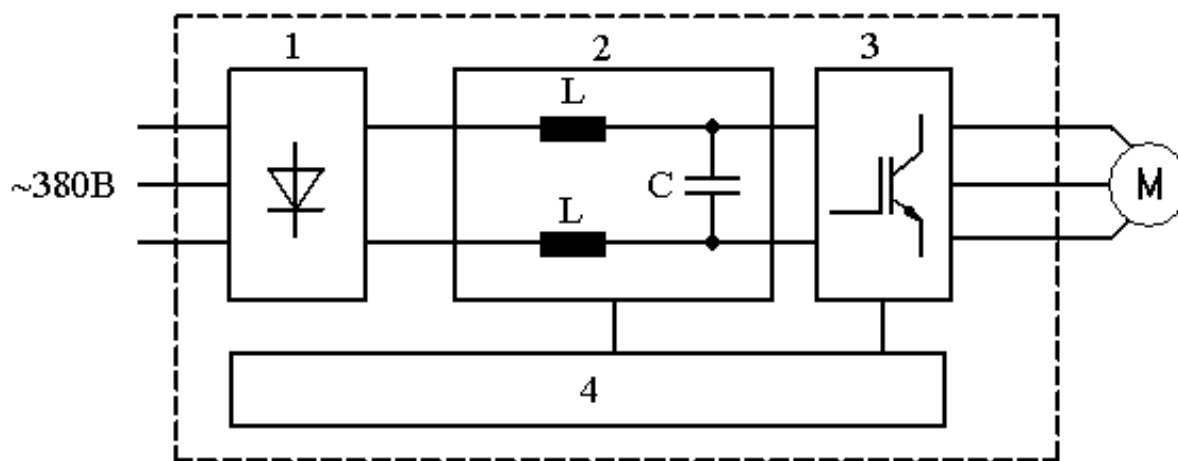


Рисунок 2.3 – Структурна схема ПЧ Danfoss VLT 6002 (1 – випрямний міст, 2 – індуктивно-ємкісною фільтр кола постійного струму, 3 – перетворювач постійної напруги в змінну напругу змінної частоти, 4 – процесор, з ШІМ модулятором)

Для підтвердження достовірності експериментальних даних застосовувався статистичний метод обробки результатів виміру з використанням критерію Уїлкінсона [22]. За допомогою цього методу перевіряється приналежність вибірок до однієї і тієї ж генеральної сукупності з урахуванням припущення про те, що вибірка є вільною від параметрів законів розподілу.

В ході експерименту отримані масиви миттєвих значень напруги на вимірювальному резисторі (R) у колі однофазного витоку сумарним опором 1 кОм. Значення струмів витоку на землю визначалися як відношення середньоквадратичного значення масиву виміряної напруги витоку до опору витоку 1 кОм за формулою:

$$I_{ym} = \sqrt{\frac{1}{n} \times \sum_{i=1000}^n (U_i)^2} / R_{sum}; \quad (2.1)$$

де $I_{\text{витоку}}$ – повний струм витоку через опір $R_{\text{витоку}} = 1 \text{ кОм}$; U_i – масив миттєвих значень напруги витоку; n – кількість елементів масиву.

Встановлено, що однофазний струм витоку, в основному, обумовлений величиною ємнісної провідності мережі, за відсутності вихідних індуктивних фільтрів ПЧ (індуктивності $L\phi$ зашунтовані). Основною гармонійною складовою струму витоку є струм високої частоти, обумовлений напругою виходу силового кола широтно-імпульсного модулятора. Результати обробки даних представлені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

Значення діючих однофазних струмів витоку на землю при опорі витоку 1 кОм і лінійній напрузі 380 В

Ємність мережі на фазу, після перетворювача, мкФ	Діюче значення струму витоку, мА, при частоті перетворювача, Гц					
	Несна частота 1 кГц			Несна частота 5 кГц		
	10	25	50	10	25	50
0.001	68	69	68	106	105	104
0.005	93	95	95	156	130	132
0.01	135	130	131	164	163	163
0.025	142	138	138	162	158	157
0.05	143	142	143	153	147	147
0.075	144	143	143	150	143	144
0.1	142	141	142	147	142	141
0.2	141	137	139	145	139	139

З аналізу таблиці 2.1 можна зробити висновок, що при ємності кабелю, яка є рівною 0.001 мкФ/фазу і більше, струм витоку на землю перевищує припустимі значення за ГОСТ 22929-78 [5]. З урахуванням ємності шахтних гнучких екранованих кабелів, найбільш часто вживаних перерізів КГЭБУШ 3x70+3x35 ($C = 0.48 \text{ мкФ/км}$); КГЭШ3x50 ($C = 0.21 \text{ мкФ/км}$), можна зробити висновок про те, що комбінований електротехнічний комплекс технологічної ділянки шахти (який містить перетворювач частоти з колом постійного струму), оснащений гнучкими кабелями вказаних вище перетинів з довжинами більш ніж 30м являє собою небезпеку електроураження людини [19]. Цим

підтверджується актуальність досліджень в області технічних рішень адаптації застосування перетворювачів частоти з колом постійного струму до діючих параметрів електробезпеки експлуатації електротехнічних комплексів технологічних дільниць шахт.

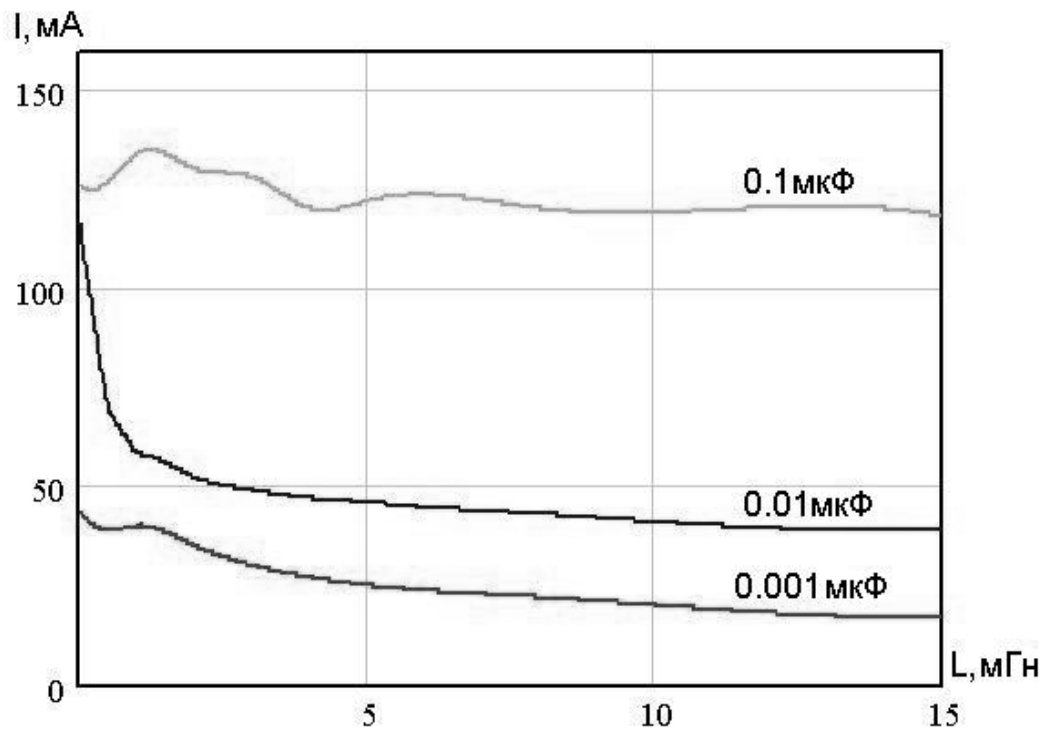
Ефективність вживання індуктивних фільтрів як засобу зниження впливу високочастотних складових напруги мережі на величину струму витоку на землю може бути визначена з аналізу експериментального дослідження на стенді (рис.2.1) при ввімкненні послідовно у фази мережі L_{ϕ} ($R_{вит} = 1$ кОм). Отримані дані приведені в додатку А, а графічна обробка результатів експериментів показана на рис.2.4 (для побудови графіків застосовувалася інтерполяція кубічним сплайном [23]).

Результати експериментів дозволяють зробити висновок про те, що при малих ємностях кабелів ЕТК відносно землі застосування фільтру суттєво знижує величину струму витоку на землю. Останній монотонно зменшується із збільшенням індуктивності фільтру. Проте, при ємності ізоляції кабелів вище 0,1мкФ/фаза таке збільшення індуктивності не приводить до однозначного зменшення струму витоку на землю. Зокрема, при індуктивності загороджувального фільтру 0,5мГн спостерігається збільшення струму витоку до 140 мА.

Більш виражене збільшення струму відбувається при несній частоті 5 кГц (рис.2.5). Так, при ємності кабелю відносно землі 0,1мкФ і індуктивності вихідного фільтру 1,5мкФ виникають явно виражені максимуми струму витоку (більш, ніж 500 мА). Причиною такого ефекту є резонансні явища в контурі «ємність-індуктивність» і наявність високочастотної складової вихідної напруги перетворювача частоти.

Конкретизація характеру дії перетворювача частоти на параметри електробезпеки ЕТК шахти може бути встановлена на основі математичного моделювання процесів у вказаному об'єкті.

а)



б)

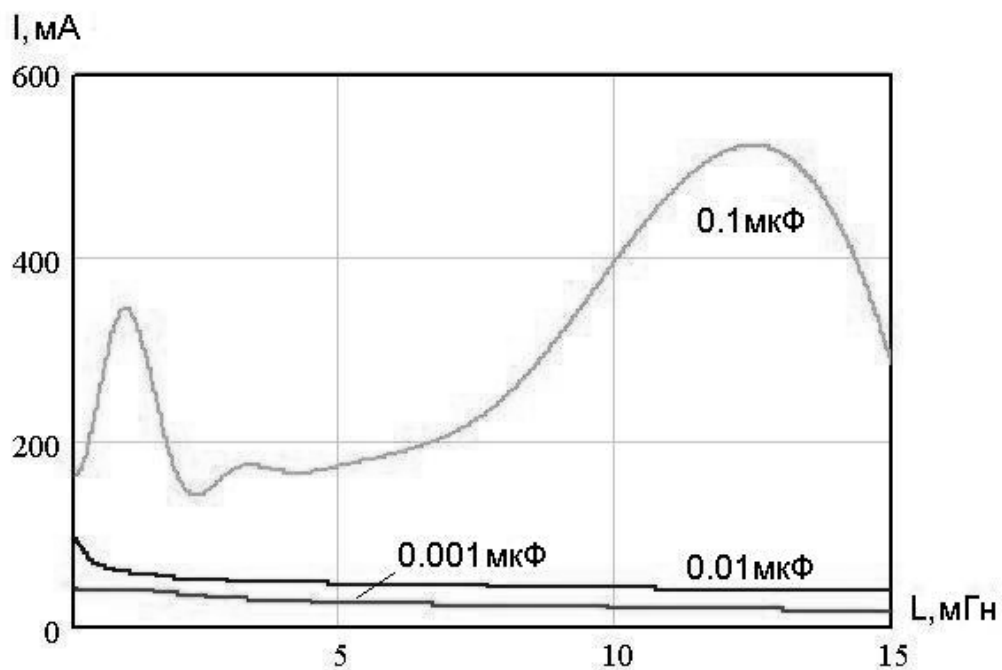


Рисунок 2.4 – Графіки залежності струму витoku на землю від індуктивності загороджувального фільтру при різних значеннях ємності мережі
а – несна частота перетворювача частоти – 1000 Гц;
б – несна частота перетворювача частоти – 5000 Гц

2.2. Квазістаціонарні процеси формування ємнісних струмів витоку на землю

Науковий і практичний інтерес представляє дослідження процесів при формуванні ємнісних складових струмів витоку на землю в електротехнічному комплексі – на ділянці кабельної мережі між виходом перетворювача частоти і асинхронним двигуном споживача.

Схема заміщення фрагмента ЕТК на ділянці від ПЧ до АД наведена на рас.2.5. На ній введені наступні позначення: E_A, E_B, E_C – фазні ЕРС трифазного перетворювача частоти; L_ϕ – індуктивність загороджувального фільтру; R, L – еквівалентні приведені активні опори і індуктивності обмоток асинхронного електродвигуна; C_1, C_2, C_3 – ємності жил силового кабелю відносно землі; R_1, R_2, R_3 – активні опори витоку фаз відносно землі

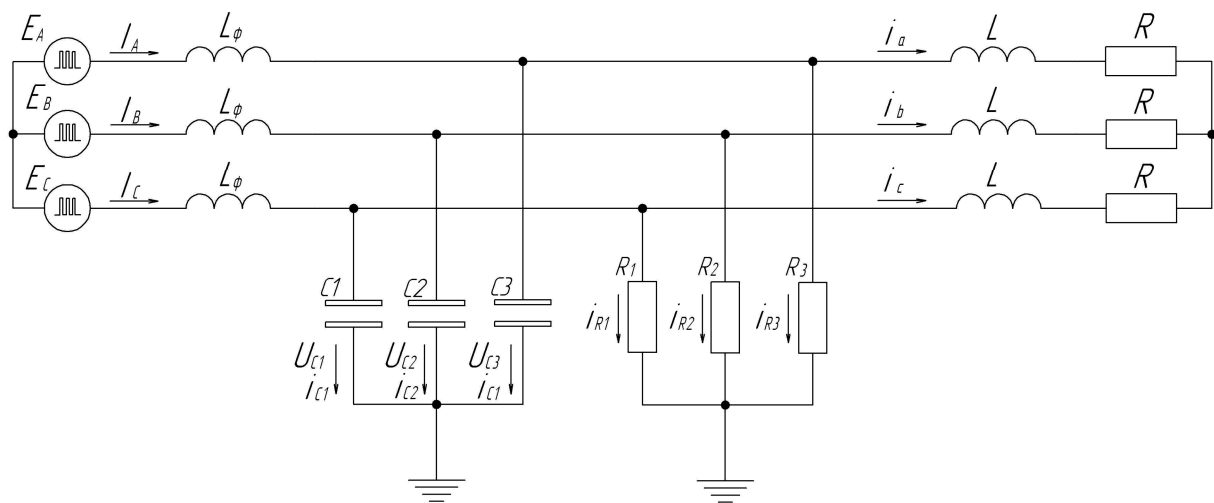


Рисунок 2.5 – Схема заміщення фрагмента комбінованого електротехнічного комплексу на ділянці від ПЧ до АД електричної мережі дільниці шахти

При обґрунтуванні припущень в ході дослідження даної схеми передбачається, що перетворювач частоти формує на виході трифазну систему напруги, в спектральний склад кожної з яких входить синусоїдальна напруга, що забезпечує робочий струм АД, а також додаткові гармонійні складові в певному діапазоні частот, викликані комутаційними процесами в

напівпровідниковому вихідному каскаді перетворювача частоти, обумовлені широтно-імпульсною модуляцією вихідної напруги ПЧ.

Окрім цього, в моделі передбачено наступне: параметри кабельної електричної мережі є зосередженими, параметри моделі електродвигуна є постійними величинами, індуктивність L-фільтру на виході перетворювача частоти є лінійною і ідеальною.

Величини струмів в елементах розрахункової схеми описуються на основі першого закону Кірхгофа:

$$\begin{cases} -I_A + i_{C3} + i_{R3} + i_a = 0; \\ -I_B + i_{C2} + i_{R2} + i_b = 0; \\ -I_C + i_{C1} + i_{R1} + i_c = 0; \\ i_a + i_b + i_c = 0; \\ I_A + I_B + I_C = 0; \end{cases} \quad (2.2)$$

Співвідношення електричних потенціалів розрахункової схеми (відповідно до другого закону Кірхгофа) може бути описане рівняннями:

$$\begin{cases} L_\phi \frac{dI_A}{dt} + L \frac{di_a}{dt} + Ri_a - L \frac{di_c}{dt} - Ri_c - L_\phi \frac{dI_C}{dt} = E_A - E_C; \\ L_\phi \frac{dI_B}{dt} + L \frac{di_b}{dt} + Ri_b - L \frac{di_c}{dt} - Ri_c - L_\phi \frac{dI_C}{dt} = E_B - E_C; \\ L_\phi \frac{dI_A}{dt} + R_3 i_{R3} - R_2 i_{R2} - L_\phi \frac{dI_B}{dt} = E_A - E_B; \\ L_\phi \frac{dI_A}{dt} + R_3 i_{R3} - R_1 i_{R1} - L_\phi \frac{dI_C}{dt} = E_A - E_C; \\ L_\phi \frac{dI_A}{dt} + R_3 i_{R3} - U_{C2} - L_\phi \frac{dI_B}{dt} = E_A - E_B; \\ L_\phi \frac{dI_A}{dt} + R_3 i_{R3} - U_{C1} - L_\phi \frac{dI_B}{dt} = E_A - E_C; \\ R_3 i_{R3} + U_{C3} = 0; \end{cases} \quad (2.3)$$

Після вирішення рівнянь відносно похідних відповідних струмів і напруги, представлення системи диференціальних рівнянь у формі Коші і приведення до нульових початкових умов, математична модель об'єкту дослідження (2.4) матиме вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} -I_A + i_{C3} + i_{R3} + i_a = 0; \\ -I_B + i_{C2} + i_{R2} + i_b = 0; \\ -I_C + i_{C1} + i_{R1} + i_c = 0; \\ i_a + i_b + i_c = 0; \\ I_A + I_B + I_C = 0; \\ \frac{dI_A}{dt} = \frac{R_1 i_{R1} + R_2 i_{R2} - 2R_3 i_{R3} + U_{C1} + U_{C2} + 2E_A - 2E_C}{2L_\phi} \\ \frac{dI_B}{dt} = \frac{R_1 i_{R1} - R_2 i_{R2} + U_{C1} - U_{C2} + 2E_B - 2E_C}{2L_\phi} \\ \frac{dI_C}{dt} = \frac{-R_1 i_{R1} + R_3 i_{R3} - U_{C1} + U_{C1} - E_A - E_B + 2E_C}{3L_\phi} \\ \frac{di_a}{dt} = \frac{-3R_1 i_{R1} - 3R_2 i_{R2} + 6R_3 i_{R3} - 3U_{C1} + 3U_{C2} - 4Ri_a + 2Ri_b + 4Ri_c - 2E_A - 2E_B + 4E_C}{6L} \\ \frac{di_b}{dt} = \frac{-3R_1 i_{R1} + 3R_2 i_{R2} - 3U_{C1} + 3U_{C2} + 2Ri_a - 4Ri_b - 2E_A + 4E_B + 4E_C}{6L} \\ \frac{di_c}{dt} = \frac{3R_1 i_{R1} - 3R_3 i_{R3} + 3U_{C1} - 3U_{C2} + Ri_a + Ri_b - 2Ri_c + 2E_A + E_B - 4E_C}{3L} \\ \frac{dU_{C1}}{dt} = \frac{1}{C_1} i_{C1} \\ \frac{dU_{C2}}{dt} = \frac{1}{C_2} i_{C2} \\ \frac{dU_{C3}}{dt} = \frac{1}{C_3} i_{C3} \end{array} \right. \quad (2.4)$$

де $I_A(0) = 0$, $I_B(0) = 0$, $I_C(0) = 0$, $i_a(0) = 0$, $i_b(0) = 0$, $i_c(0) = 0$, $U_{C1}(0) = 0$, $U_{C2}(0) = 0$, $U_{C3}(0) = 0$.

Дослідження параметрів ЕРС перетворювача частоти виконано на основі моделювання ПЧ з квазіоднopolосною модуляцією (ПЧ з КМ) [24]. У ПЧ з КМ реалізується багатоканальний спосіб перетворення параметрів електромагнітної

енергії мережі, відповідно до якого в блоці силових модуляторів здійснюється розгалужена пофазна модуляція напруги u_i , частоти ω_1 трифазної мережі відповідними їм еквівалентними модулюючими діями трифазної системи з частотою ω_2 . Математична модель вміщує багатопараметричне алгоритмічне рівняння, що описує процеси формування вихідної напруги $u_1(N,t)$ ПЧ с КМ [25]:

$$u_1(N,t) = \sum_{i=1}^3 u_2(i,t) \psi_{M(i)}^{\vartheta}(N,t,i) \quad (2.5)$$

де $u_2(i,t) = E_m \sin\left(\omega_1 t - \frac{2(i-1)\pi}{3}\right)$ – миттєві значення фазних напруг мережі;

E_m – амплітудне значення фазної напруги, $i = 1, 2, 3$; N – число інверторів силового модулятора напруги мережі i -ої фази.

Для силового модулятора напруги будь-якої з фаз, що складається з N інверторів, еквівалентну модулюючу дію будь-якого n -го з них представимо модулюючою функцією виду:

$$\psi_{M(i)}^{\vartheta}(n, N, t) = \sum_2 \text{sign}\left(\sin\left[\omega_2 t \pm \alpha_0 \pm \alpha_1(t) + (n-1)\beta_n - \frac{2(i-1)\pi}{3}\right]\right) \quad (2.6)$$

де α_0 – половина часового інтервалу тривалості нульової паузи в кривій вихідної напруги n -го інвертора; β_n – початкова фаза вихідної напруги n -го інвертора; $\alpha_1(t)$ – кут управління, зміна якого в часі забезпечує широтно-імпульсну модуляцію вихідної напруги кожного з інверторів i , тим самим, регулювання вихідної напруги ПЧ з КМ.

Враховуючи структурну організацію ПЧ з КМ, підключеного до трифазної мережі промислової частоти, еквівалентна модулююча дія будь-якого з трьох силових модуляторів задовольняє співвідношенню:

$$\psi_{M(i)}^{\vartheta}(N, t, i) = \sum_{n=1}^N \sum_2 \text{sign}\left(\sin\left[\omega_2 t \pm \alpha_0 \pm \alpha_1(t) + (n-1)\beta_n - \frac{2(i-1)\pi}{3}\right]\right) \quad (2.7)$$

Підставляючи (2.7) в (2.5), отримаємо математичну модель процесу формування вихідних ЕРС ПЧ з КМ. Записуючи алгоритмічне рівняння (2.5) відносно конкретної фазної напруги з урахуванням (2.7), отримуємо будь-який проміжний результат багатоступінчастого процесу формування ЕРС. При відповідному нормуванні виразу (2.7) відносно живлячої напруги може бути використано як математичний опис електромагнітних процесів в дволанкових перетворювачах частоти, як з трифазною, так і з однофазною вихідною напругою.

Математична модель системи дозволяє отримати значення струму через однофазний витік, відповідний опору тіла людини ($R_I = 1 \text{ кОм}$). Фрагмент осцилограми струму витоку на землю наведений на рис 2.6.

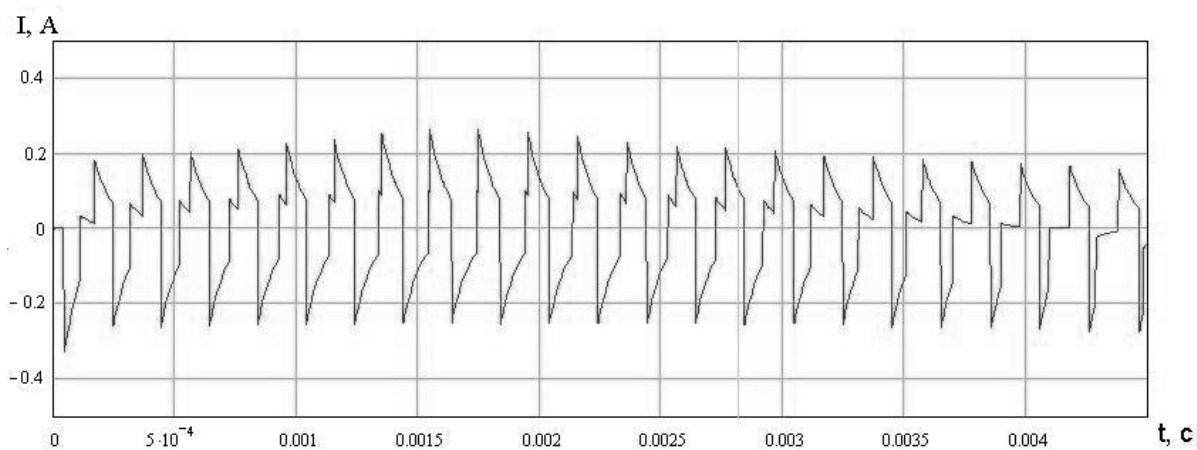


Рисунок 2.6 – Фрагмент осцилограми емнісного струму витоку на землю
 $(R_2 = R_3 = 500 \text{ кОм}; L_\phi = 0 \text{ Гн})$

Зіставлення осцилограм експериментальних досліджень і діаграм отриманих в ході математичного моделювання показало, що форма отриманого сигналу струму витоку (рис.2.6) аналогічна формі сигналу отриманого експериментальним шляхом (рис.2.2). Максимальна амплітуда струму витоку, отриманого експериментально, відрізняється від результату моделювання не більше, ніж на 12%, а діюче значення не більше ніж на 7%. Основна частота

сигналу збігається з несною частотою 1000 Гц, а форма обумовлена характером модуляції і величиною ємності кабелю відносно землі. Параметри імпульсів струму характеризуються швидким наростанням переднього фронту і відносно повільним зменшенням струму у міру заряду ємності мережі.

Отримані масиви даних оброблені з використанням виразу (2.1) і обчислені значення занесені в таблицю 2.2. З аналізу отриманих даних виходить, що при ємності кабелю, більше, ніж 0.001 мкФ/фаза струм витоку на землю перевищує безпечне значення [5].

Таблиця 2.2

Діяльні значення однофазних струмів витоку на землю при опорі витоку 1 кОм і лінійній робочій напрузі мережі 380В

Ємність мережі (на фазу), після перетворювача, мкФ	Діяльні значення струму витоку на землю, мА, при частоті напруги на виході перетворювача, Гц					
	Несна частота 1 кГц			Несна частота 5 кГц		
	10	25	50	10	25	50
0.0005	44	46	45	71	68	68
0.001	70	74	71	100	97	98
0.005	93	96	95	156	130	132
0.01	135	130	131	160	160	158
0.025	142	138	138	165	162	160
0.05	143	142	143	150	146	148
0.075	144	143	143	150	145	143
0.1	142	141	142	145	140	141
0.2	141	137	139	141	137	136
0.3	140	137	138	141	138	136
0.4	140	136	138	142	138	136
0.5	140	136	138	141	137	135

Діючі значення однофазних струмів витоку на землю при лінійній робочій напрузі 660В і 1140В приведені в Додатку Б.

З метою визначення струмообмежувальних властивостей загороджувальних фільтрів (відносно вищих гармонік струму) в структуру математичної моделі введений параметр індуктивності, відповідної елементу L_{ϕ} схеми (рис.2.5). Діапазон зміни величини індуктивності загороджувального

фільтру прийнятий від 0.01 мГн до 20 мГн. Ємність ізоляції кабелю змінювалася в межах від 0.0005 мкФ до 0.25 мкФ.

В ході досліджень отримані графіки зміни діючих значень струму витоку на землю залежно від індуктивності фільтру (рис.2.7; рис.2.8), а також графічні залежності величини цього струму витоку від індуктивності фільтру, з урахуванням ємності ізоляції кабелю відносно землі (рис.2.9; рис.2.10).

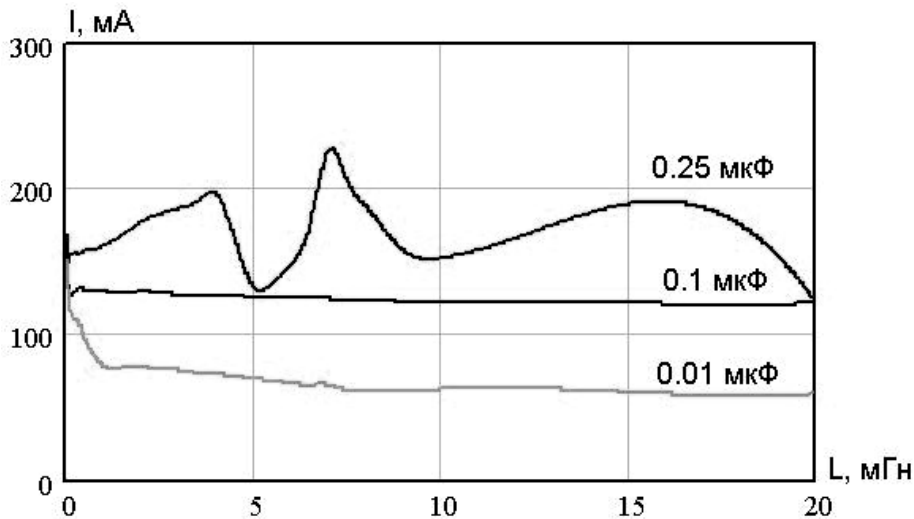


Рисунок 2.7 – Графіки залежності струму витоку від індуктивності L -фільтру при різних значеннях ємності кабелю і несної частоти ПЧ 1 кГц

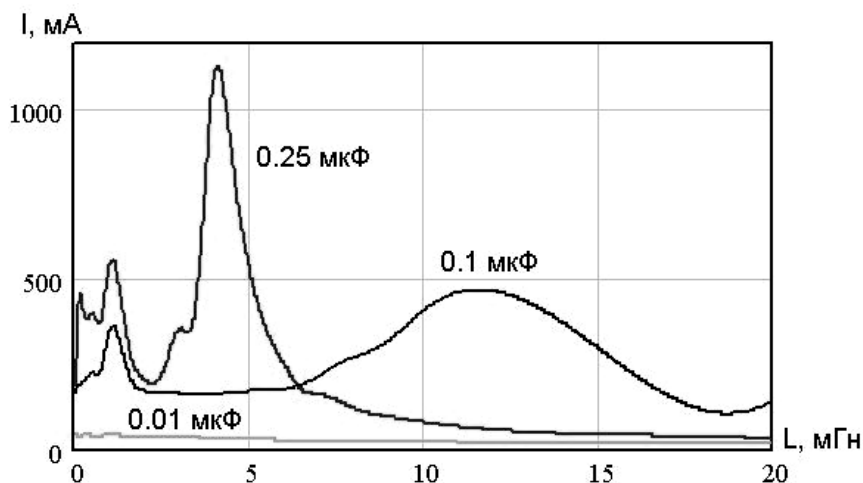


Рисунок 2.8 – Графіки залежності струму витоку від індуктивності L -фільтру при різних значеннях ємності кабелю і несної частоти ПЧ 5 кГц

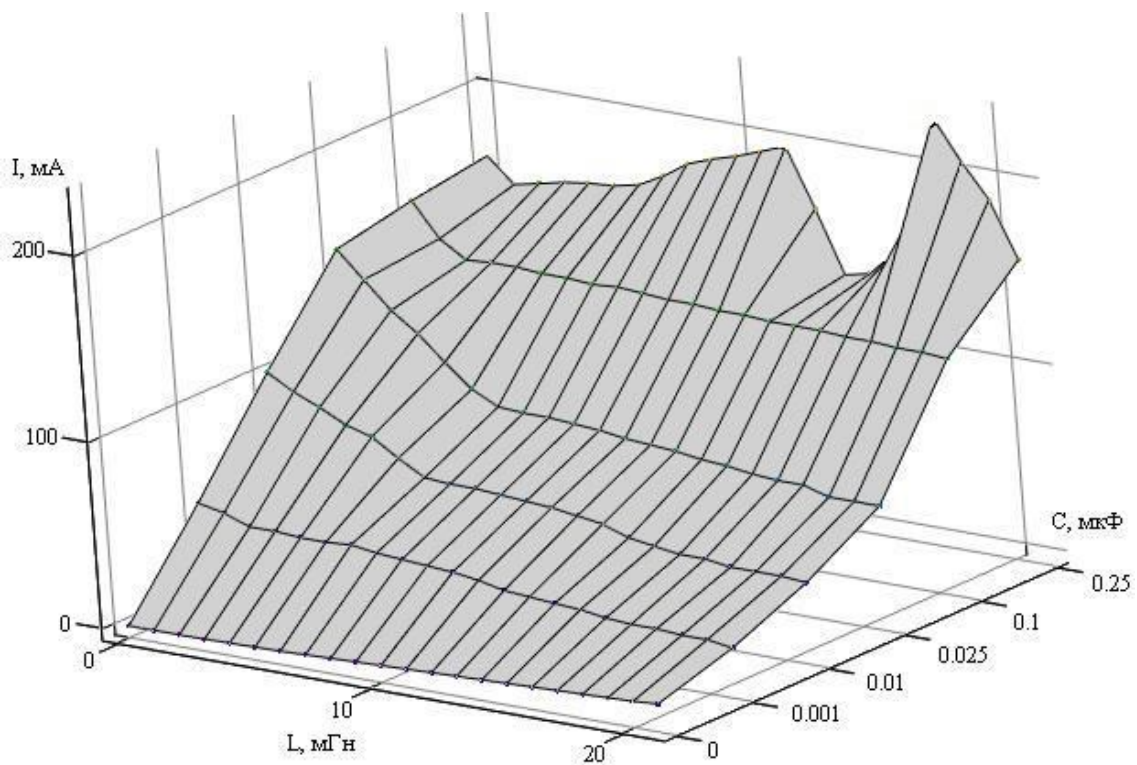


Рисунок 2.9 – Графіки залежності струму витoku на землю від індуктивності L-фільтру при різних значеннях ємності кабелю (несна частота ПЧ 1000 Гц)

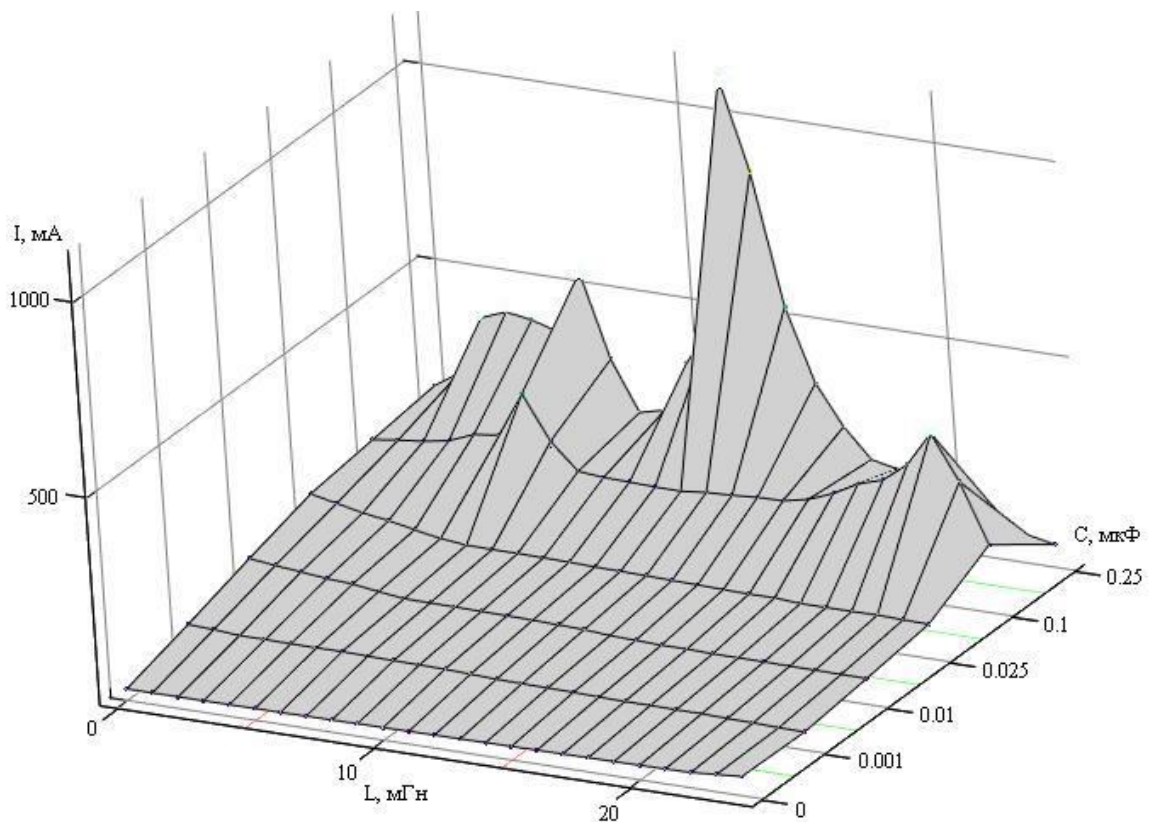


Рисунок 2.10 – Графіки залежності струму витoku на землю від індуктивності L-фільтру при різних значеннях ємності кабелю (несна частота ПЧ 5000 Гц)

З аналізу графіків виходить, що збільшення індуктивності L-фільтру не призводить до однозначного зниження струму витоку на землю. При певних її значеннях виникають резонансні явища, що на багато разів підвищують струм витоку на землю, погіршуючи параметри електробезпеки. Це необхідно враховувати при виборі L-фільтру. Значення його параметрів мають вмещувати прояви резонансних явищ в електротехнічному комплексі технологічної дільниці, що обумовлюватимуть перевищення безпечних значень струмів витоку на землю.

Приведений метод оцінки впливу параметрів L-фільтру дозволяє виконати аналітичний розрахунок величини струмів витоку на землю і обґрунтувати вибір типу і моделі фільтру, при якому не відбувається поява резонансних явищ в електричній мережі з перетворювачем частоти.

2.3. Зіставлення результатів теоретичних і експериментальних досліджень процесів в комбінованому дільничному електротехнічному комплексі

Для оцінки адекватності математичного моделювання зіставлені результати теоретичних і експериментальних досліджень процесів в комбінованому дільничному ЕТК. Зіставленню були піддані значення однофазних діючих струмів витоку на землю, їх форма і спектральна щільність отриманих осцилограм. Зіставлення результатів виконувалося на основі критерію Уїлкінсона і F-критерію. Величини струмів витоку на землю, що зіставляються, наведені в таблицях 2.3 і 2.4. Графіки струмів витоку на землю за результатами вимірів наведені на рис.2.9 і рис.2.10. Спектральна щільність напруги через опір витоку 1 кОм за результатами експериментальних і теоретичних досліджень показана на рис.2.12 і рис.2.13.

Результатами зіставлення підтверджена адекватність математичної моделі комбінованої мережі та її здатність відтворювати процес формування струмів витоку на землю з точністю:

- для форми імпульсів не гірше 8%;

- для діючого значення не гірше 6%;
- для спектральної щільності не гірше 10%.

Таблиця 2.3

Зіставлення діючих значень однофазних струмів витоку на землю за результатами теоретичних і експериментальних досліджень (несна частота 1000 Гц)

Ємність мережі на фазу, після перетворювача, мкФ	Діюче значення струму витоку, мА, при частоті перетворювача, Гц					
	Експериментальні дані			Теоретичні дані		
	f=10 Гц	f=25 Гц	f=50 Гц	f=10 Гц	f=25 Гц	f=50 Гц
0.001	68	69	68	70	74	71
0.005	93	95	95	93	96	95
0.01	135	130	131	164	163	163
0.025	142	138	138	162	158	157
0.05	143	142	143	153	147	147
0.075	144	143	143	150	143	144
0.1	142	141	142	147	142	141
0.2	141	137	139	145	139	139

Таблиця 2.4

Зіставлення діючих значень однофазних струмів витоку на землю за результатами теоретичних досліджень і експериментів даних (несна частота 5000 Гц)

Ємність мережі на фазу, після перетворювача, мкФ	Діюче значення струму витоку, мА, при частоті перетворювача, Гц					
	Експериментальні дані			Теоретичні дані		
	f=10 Гц	f=25 Гц	f=50 Гц	f=10 Гц	f=25 Гц	f=50 Гц
0.001	106	105	104	100	97	98
0.005	156	130	132	156	130	132
0.01	164	163	163	160	160	158
0.025	162	158	157	165	162	160
0.05	153	147	147	150	146	148
0.075	150	143	144	150	145	143
0.1	147	142	141	145	140	141
0.2	145	139	139	141	137	136

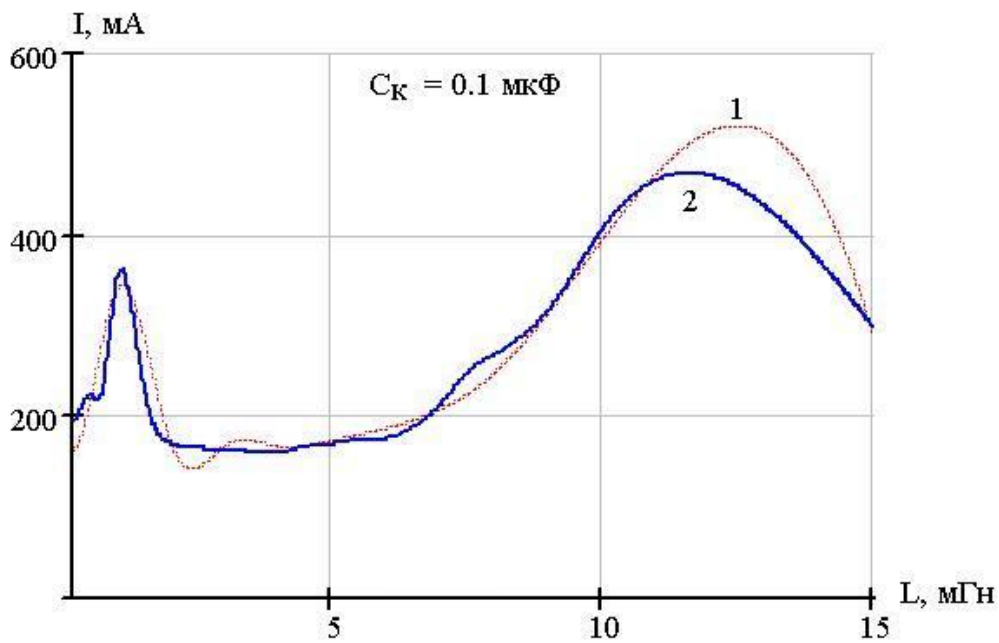


Рисунок 2.9 – Графіки зіставлення залежностей струму витoku на землю від індуктивності L-фільтру: 1 – результат експерименту; 2 – результат теоретичних досліджень

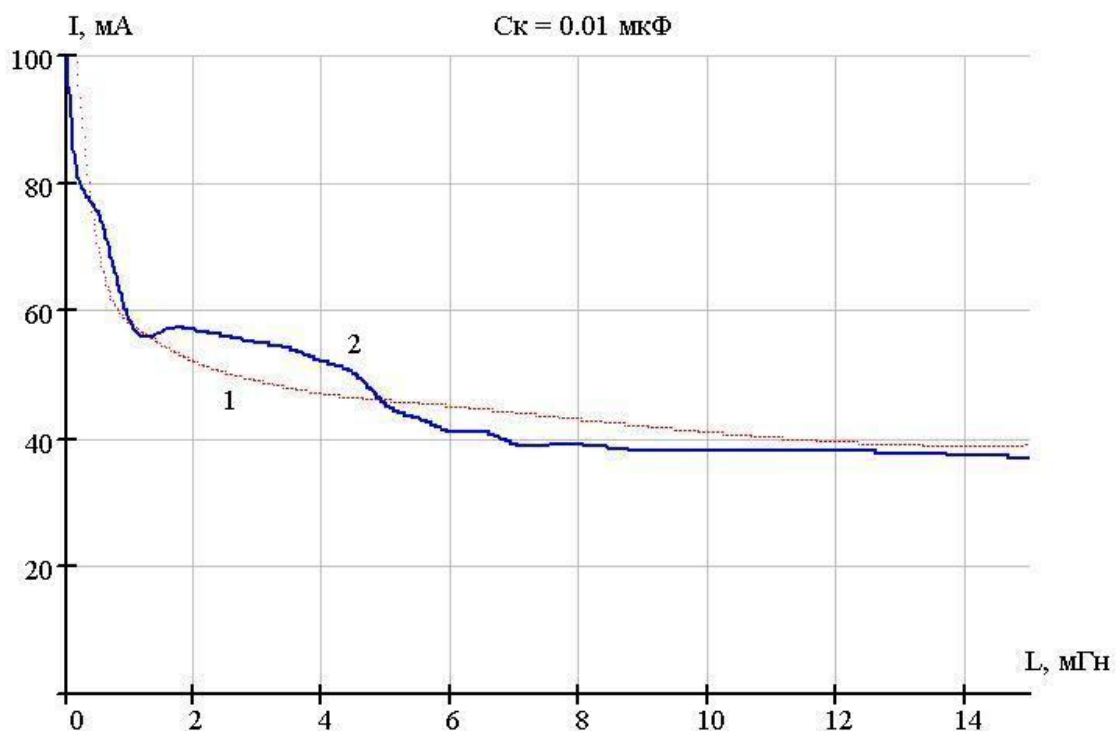


Рисунок 2.10 – Графіки зіставлення залежностей струму витoku на землю від індуктивності L-фільтру: 1 – результат експерименту; 2 – результат теоретичних досліджень

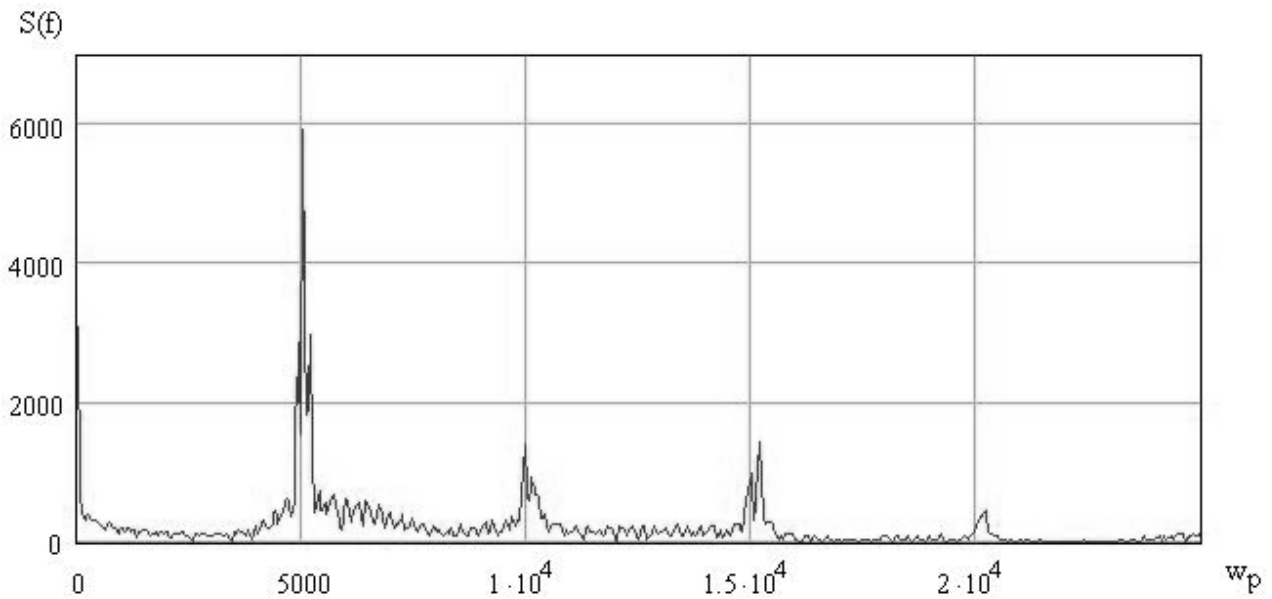


Рисунок 2.11 – Спектральна щільність експериментальних даних

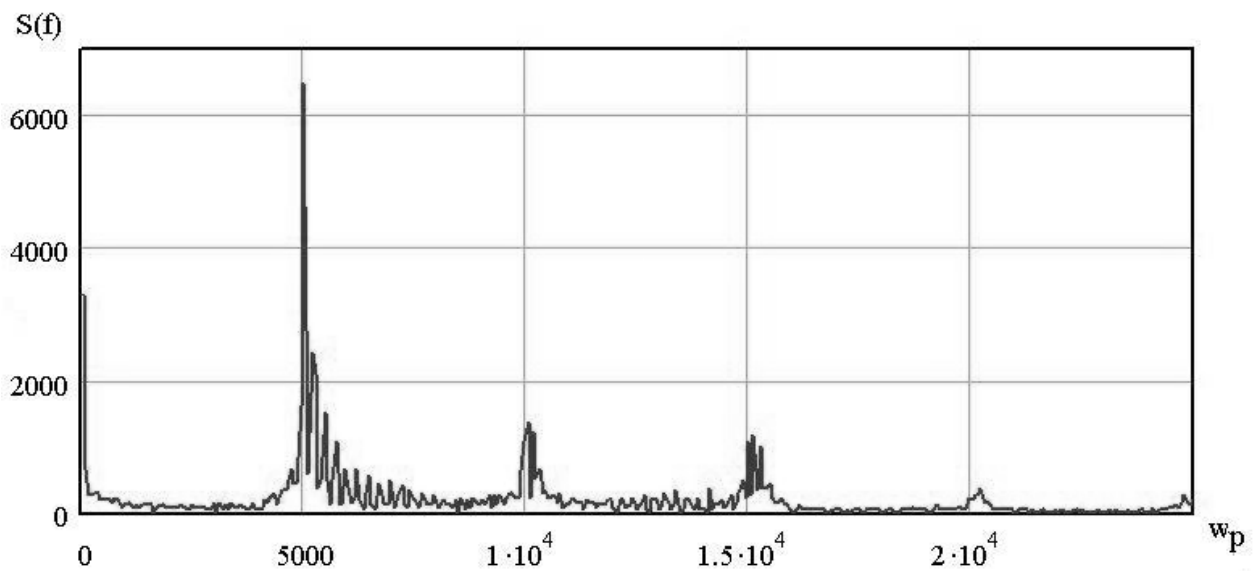


Рисунок 2.12 – Спектральна щільність теоретичних даних

Таким чином, дана модель може застосовуватися для теоретичного дослідження процесів формування ємнісних струмів витоку на землю і обґрунтування раціональних способів їх компенсації.

3

КОНВЕРТАЦІЯ НЕГАТИВНОГО ОПОРУ ЯК СПОСІБ КОМПЕНСАЦІЇ ЄМНІСНИХ СТРУМІВ В КОМБІНОВАНІЙ ШАХТНІЙ ДІЛЬНИЧНІЙ МЕРЕЖІ

3.1 Квазістаціонарні і перехідні процеси компенсації ємнісного струму витоку на землю при застосуванні конвертації негативного опору

Обмежені функціональні властивості дроселів при їх застосуванні як засобів автокомпенсації ємнісної складової струму витоку на землю в шахтних дільничних електромережах з перетворювачами частоти [4,15] обумовлюють доцільність впровадження альтернативних заходів, спрямованих на підвищення ефективності струмообмеження в ємнісних складових опору ізоляції кабельної мережі. Ця задача має бути вирішена з урахуванням основного принципу, покладеного в основу дросельної компенсації ємності ізоляції кабельної мережі, згідно з яким має бути передбачене віднімання індуктивної провідності компенсатора від ємнісної провідності фаз ізоляції мережі в процесі резонансу при дотриманні умови: $X_L = -X_C$ (де X_L і X_C – реактивні опори, відповідно, компенсатора і ізоляції мережі). Отже, для ефективною компенсації ємнісної складової струмів витоку на землю необхідно, щоб величина провідності компенсатора відносно землі дорівнювала провідності ємності ізоляції мережі із зворотним знаком в діапазоні зміни частоти струму витоку. Тому засіб компенсації ємнісної провідності має бути двополюсником, з комплексним опором, рівним еквівалентному ємнісному опору ізоляції мережі, узятому із зворотним знаком.

Варіантом реалізації такого двополюсника є конвертор негативного опору (КНО). На рис.3.1 представлена розрахункова схема КНО, який інвертує знак опору, підключеного до його входу як навантаження, і його вихід має комплексний опір рівний за модулем і зворотний за знаком опору цього навантаження (рис.3.1а) [26]. Коефіцієнт конверсії ($K_N = K_{ni} / K_{ne}$) – величина безрозмірна і має негативний знак.

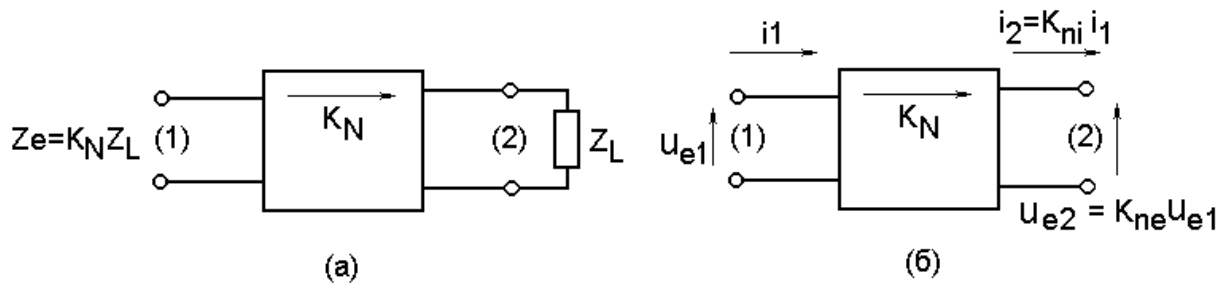


Рисунок 3.1 – Розрахункова схема конвертора негативного опору

Чотириполюсник, еквівалентний КНО (рис.3.1б), характеризується наступними рівняннями [26]:

$$i_2 = K_{ni} i_1; \quad (3.1)$$

$$V_{e2} = K_{ne} u_{e1}, \quad (3.2)$$

$$Z_e = u_{e1} / i_1 \text{ и } Z_L = u_{e2} / i_2 \quad (3.3)$$

$$\frac{Z_e}{Z_L} = \frac{u_{e1}}{i_1} \frac{K_{ni} i_1}{K_{ne} u_{e1}} = \frac{K_{ni}}{K_{ne}}; \quad (3.4)$$

$$Z_e = K_N Z_L = \frac{K_{ni}}{K_{ne}} Z_L. \quad (3.5)$$

Якщо в рівняннях, що описують КНО, прийняти $K_{ni} = +1$, то дана схема буде представлена як конвертор опору, негативного за напругою (КНОН), де струми на вході і виході схеми однакові, а напруга, в загальному випадку, різна (рис.3.2).

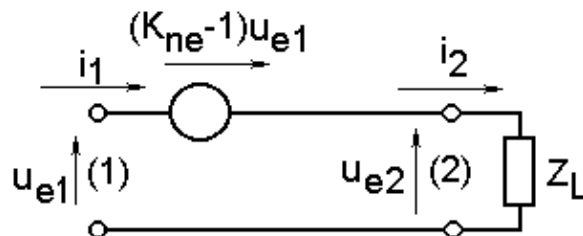


Рисунок 3.2 – Еквівалентна схема КНОН

Таким чином, для КНОН справедливо:

$$i_1 = i_2; u_{e2} = K_{ne} u_{e1}, K_{ne} < 0; Z_e = \frac{u_{e1}}{i_1} = \frac{Z_L}{K_{ne}}.$$

Тому, коефіцієнту $K_{ne} = -1$, відповідає співвідношення:

$$Z_e = -Z_L. \quad (3.6)$$

Конвертор негативного опору за напругою може бути побудований на основі диференціального підсилювача із заданим коефіцієнтом передачі (рис.3.3).

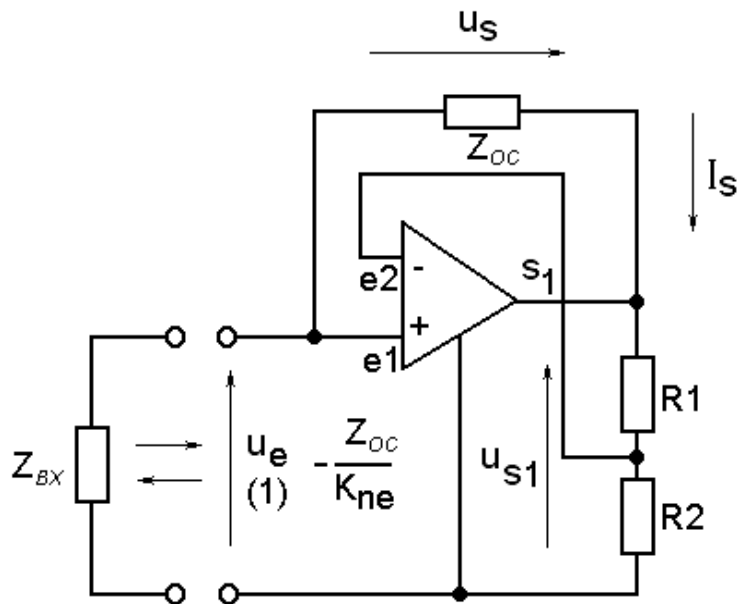


Рисунок 3.3 – Схема КНОН із незаземленим навантаженням

З аналізу схеми (рис.3.3) виходить:

$$u_{s1} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} u_e = A_{u_r} u_e; \quad u_s = u_{s1} - u_e; \quad I_e = -\frac{u_s}{Z_{oc}}, \quad (3.7)$$

звідки

$$Y_e = \frac{1}{Z_{oc}} (1 - A_{u_r}) \quad \text{и} \quad Z_e = \frac{Z_{oc}}{K_{ne}}, \quad (3.8)$$

де $K_{ne} = 1 - A_{ur}$, (A_{ur} – коефіцієнт підсилення замкненого підсилювача - керованого живлення).

Таким чином, на основі КНОН реалізується двополюсник з провідністю, рівною $1/X = -\omega C$. При підключенні КНОН паралельно ємності ізоляції мережі і виконанні умови $|-X_{oc}| = X_c$, ємнісна провідність ізоляції мережі компенсується. Абсолютні величини провідності $(1/X_c)$ і $(-1/X_{oc})$ однаково збільшуються із зростанням частоти. Їх знаки протилежні, а сума і результуюча реактивна провідність контуру буде наближатися до нуля при будь-якій частоті робочої напруги мережі.

Враховуючи на властивості даної схеми, можна зробити висновок про принципову можливість вживання його для компенсації ємнісної провідності ізоляції мережі відносно землі. Обґрунтування раціональних параметрів автокомпенсатора ємності мережі доцільно виконати на основі дослідження математичної моделі системи: “перетворювач частоти – автокомпенсатор – електричний кабель – асинхронний двигун”. Для побудови математичної моделі такої системи необхідно доповнити систему диференціальних рівнянь процесів в ЕТК (розділ 2, ф. 2.3), диференціальними рівняннями, що описують процеси в конверторі негативного опору.

Виходячи з викладеного, існує необхідність введення додаткового допущення і обґрунтування. Зокрема, вирази (3.5; 3.6) передбачають використання КНО з ємнісним позитивним зворотним зв'язком (рис.3.4). Із структури схеми (рис.3.4) виходить, що відповідно до першого закону Кірхгофа, справедливим є вираз:

$$I_K = -I_C; \quad (3.9)$$

де I_k – вихідний струм конвертора, I_c – струм через ємність C у зворотному зв'язку підсилювача.

Відповідно до другого закону Кірхгофа,

$$U_0 = U_C + U_K; \quad (3.10)$$

де U_k – вхідна напруга конвертора, U_c – напруга через ємність C в зворотному зв'язку підсилювача, U_o – вихідна напруга диференціального підсилювача.

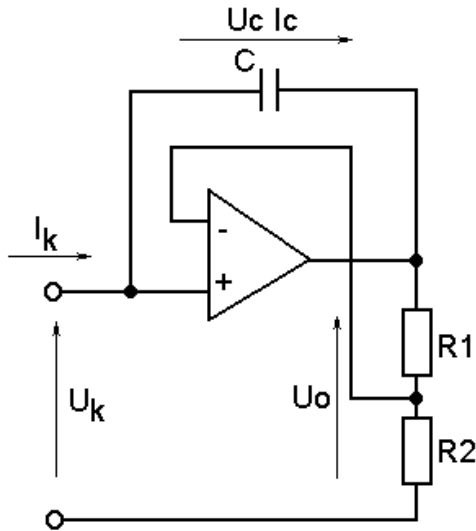


Рисунок 3.4 – Принципова схема КНО з ємнісним позитивним зворотним зв'язком

У свою чергу, величина напруги U_o визначається за формулою:

$$U_o = A_{OY} * U_K; \quad (3.11)$$

де $A_{OY} = \frac{R_1 + R_2}{R_2}$ – коефіцієнт підсилення підсилювача із замкнутим

зворотним зв'язком.

Тоді вхідний струм конвертора рівний:

$$I_K = -C \frac{dU_c}{dt} = -C \frac{dU_K (A_{OY} - 1)}{dt}; \quad (3.12)$$

З формули (3.12) виходить, що вхідний струм компенсатора формально є струмом, що проходить через конденсатор C , але має негативний знак. Тому вхідна провідність КНО володіє всіма властивостями ємнісної провідності, узятій із зворотним знаком.

Дослідження закономірностей процесів компенсації ємнісної провідності може бути виконане з використанням математичної моделі об'єкту,

структурна схема якого представлена на рис.3.5, при врахуванні наступних припущень:

- джерелом живлячих ЕРС E_n є генератор прямокутних імпульсів;
- частота напруги E_n прийнята в діапазоні 1-5 кГц, що відповідає діапазону зміни несної частоти реального перетворювача частоти, (прямокутна форма сигналу дозволяє досліджувати властивості КНО при дії на нього напруги, що містить вищі гармонійні складові);
- ємкості конденсаторів C_1 і C_2 відповідають приведеним ємностям мережі до однофазної схеми заміщення;
- опір $R_1 = 1$ кОм імітує опір однофазного виточу на землю (відповідає нормованому опору тіла людини [5]).

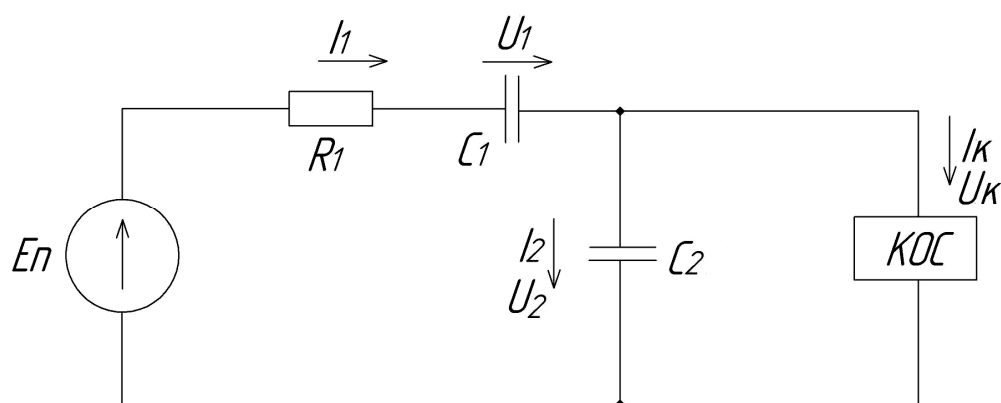


Рисунок 3.5 – Структурна схема об'єкту математичного моделювання для дослідження властивостей КНО в режимі компенсації ємнісної провідності ізоляції кабелю

Відповідно до першого закону Кірхгофа, величина струмів елементів є рівною:

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0; \quad (3.13)$$

Співвідношення напруги на елементах розрахункової схеми (відповідно до другого закону Кірхгофа) можуть бути описані рівняннями:

$$\begin{cases} I_1 \cdot R_1 + U_{C1} + U_{C2} = E_{II}; \\ I_1 \cdot R_1 + U_{C1} + U_K = E_{II}; \end{cases} \quad (3.14)$$

Записуючи диференціальні рівняння струмів і враховуючи вирази (3.12), отримуємо:

$$\begin{cases} I_1 = C_1 \frac{dU_{C1}}{dt}; \\ I_2 = C_2 \frac{dU_{C2}}{dt}; \\ I_K = -C \frac{dU_K (A_{oy} - 1)}{dt}; \end{cases} \quad (3.15)$$

Підстановкою у вирази (3.12) струмів системи (3.15), знаходимо струм I_1 через опір витоку R_I :

$$I_1 = C_2 \frac{dU_{C2}}{dt} - C(A_{oy} - 1) \frac{dU_K}{dt}; \quad (3.16)$$

або

$$I_1 = \frac{dU_{C2}}{dt} (C_2 - C(A_{oy} - 1)); \quad (3.17)$$

За умови $C_2 = C(A_{oy} - 1)$ (вираз 3.17) струм I_1 наближається до нуля за рахунок компенсуючих властивостей КНО. Вираз (3.17) описує процеси в КНО на основі ідеального диференціального підсилювача. Для оцінки відповідності ідеалізованого КНО з КНО на основі реального диференціального підсилювача доцільним є проведення експериментальних досліджень динамічних властивостей компенсатора (рис.3.6). На схемі дослідницького стенда введені позначення: E_n – генератор прямокутних імпульсів, $КНО$ – конвертор негативного опору, $ОС$ – осцилограф, $ДТ$ – датчик струму для виділення сигналу, пропорційного загальному ємнісному струму I_c витоку на землю.

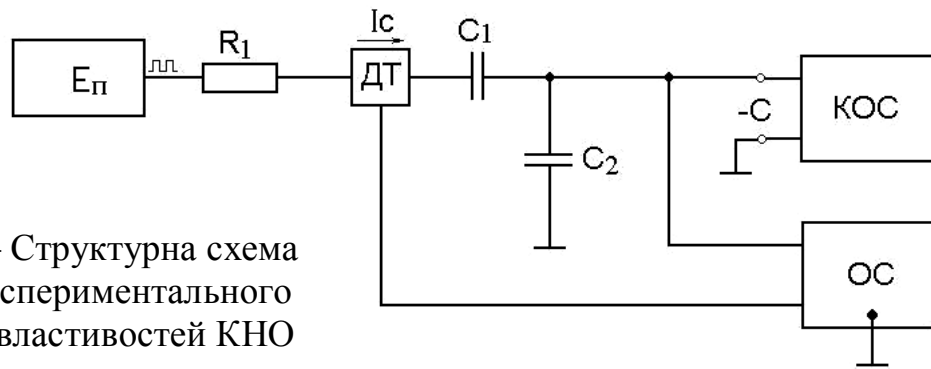


Рисунок 3.6 – Структурна схема стенду для експериментального дослідження властивостей КНО

Методика експериментальних досліджень полягає в наступному. Генератор E_n формує тестову напругу прямокутної форми. Ця напруга обумовлює величину струму через резистор R_1 і ємність C_1 . Сигнал, пропорційний загальному ємнісному струму I_c , виділяється на виході датчика струму (ДТ) і подається на один з входів осцилографа (ОС). На другий вхід осцилографа подається напруга з ємності C_2 . Паралельно цій ємності підключений КНО з властивостями негативної ємності, і його негативна провідність віднімається з провідності конденсатора C_2 зменшуючи еквівалентну ємнісну провідність. Ефективність схеми компенсації ємнісної провідності оцінюється на шляхом аналізу отриманих осцилограм.

Генератор прямокутних імпульсів може бути реалізований за схемою мультівібратора (рис.3.7). Конвертором негативного опору є диференціальний підсилювач $DA1$, охоплений позитивним зворотним зв'язком через ємність C_4 і негативним зворотним зв'язком через опори R_{11} і R_{12} відповідно до схеми КНО (рис.3.3). Резистор R_8 використаний як імітатор сигналу (напруга), пропорційного струму I_1 .

Отримані осцилограми (рис.3.8 і рис.3.9) ілюструють процес компенсації ємнісної провідності конденсатора C_2 реальним конвертором негативного опору.

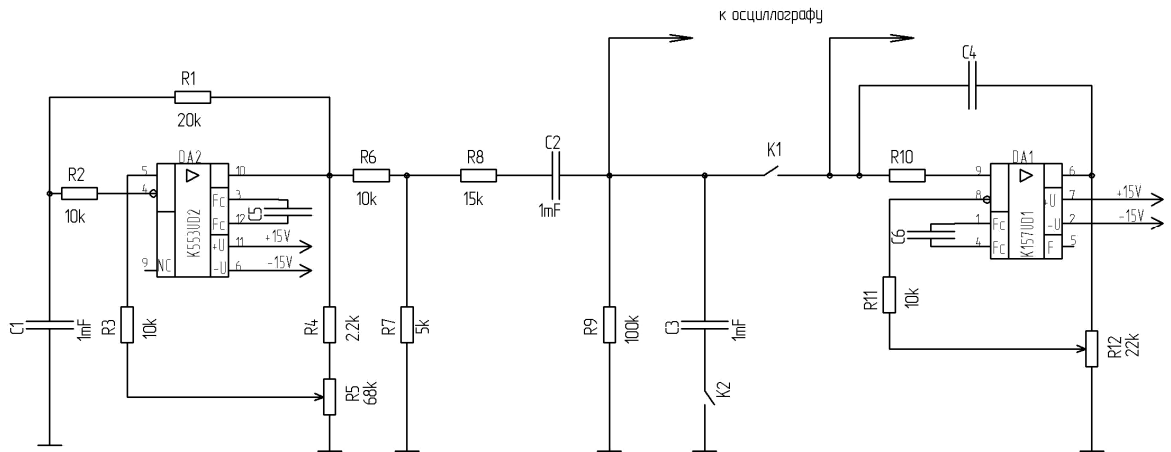


Рисунок 3.7 – Принципова схема стенду для експериментального дослідження властивостей КНО

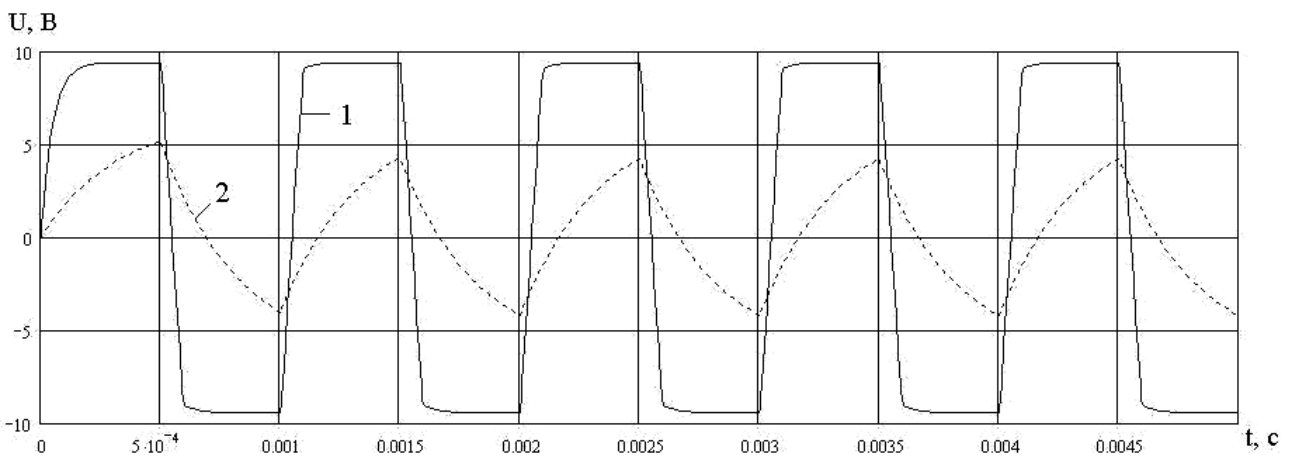


Рисунок 3.7 – Осцилограми напруги на ємності C_2 : 1 - з максимальною компенсацією; 2 - без компенсації (контакт $K1$ розімкнений)

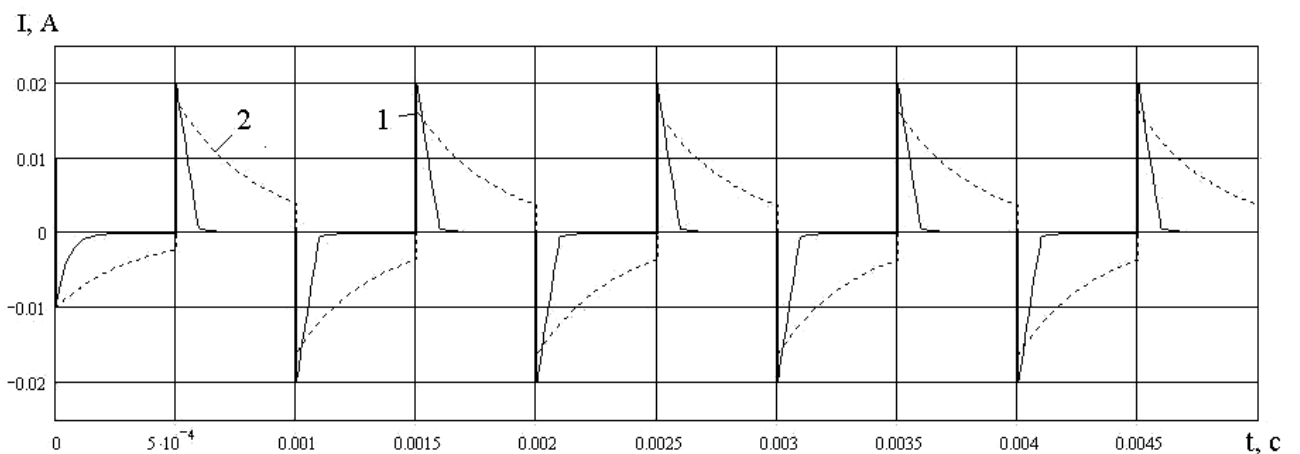


Рисунок 3.8 – Осцилограми струму через резистор R_8 : 1 - з максимальною компенсацією; 2 - без компенсації (контакт $K1$ розімкнений)

Напруга на ємності C_2 змінюється по експоненціальному закону за рахунок впливу інтегруючої властивості ємності. При компенсації ємнісної провідності ізоляції кабелю інтегруючі властивості ємності C_2 зменшуються і форма напруги на ній наближається до прямокутної форми імпульсів напруги генератора. Результуюче значення величини струму через опір резистора R_8 значно зменшується досягши максимальної компенсації ємнісної складової струму (рис.3.8 крива 1). Проте, унаслідок неідеальності характеристик операційного підсилювача, дана схема не дозволить здійснити повну компенсацію ємнісного струму витoku на землю. Отже, в математичній моделі об'єкту мають бути введені припущення, що враховують реальні параметри елементів схеми.

Однією з важливих властивостей реального підсилювача, що відрізняють його від ідеального є інерційність. Реальна інерційність диференціального підсилювача ($ДУ$) може бути врахована виразом:

$$A_{OYP} = A_{OY} * \frac{1}{Tp + 1}; \quad (3.18)$$

де A_{OYP} – коефіцієнт підсилення $ДУ$, T – постійна часу інерційної ланки, p – оператор Лапласа.

Тоді напруга U_o визначається співвідношенням:

$$U_o = A_{OYP} * U_K; \quad (3.19)$$

Вирішивши рівняння відносно похідною U_o за часом, отримуємо:

$$\frac{dU_o}{dt} = \frac{A_{OY}U_K - U_o}{T}; \quad (3.20)$$

З формули (3.20) і (3.18) отримуємо диференціальне рівняння для вихідної напруги КНО:

$$\frac{dU_K}{dt} = \frac{1}{C}I_K + \frac{dU_o}{dt}; \quad (3.21)$$

Диференціальні рівняння для розрахунку робочих струмів і напруги реального КНО мають вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dU_{C1}}{dt} = \frac{1}{C_1} I_1; \\ \frac{dU_{C2}}{dt} = \frac{1}{C_2} I_2 \\ \frac{dU_0}{dt} = \frac{A_{OY} U_K - U_0}{T} \\ \frac{dU_K}{dt} = \frac{1}{C} I_K + \frac{dU_0}{dt} \end{array} \right. \quad (3.22)$$

Об'єднання даної системи рівнянь з системою диференціальних рівнянь, що описують процеси в реальній системі електромережі, дозволяє отримати повну математичну модель реальної системи: «перетворювач частоти – автокомпенсатор – кабельна мережа – асинхронний двигун».

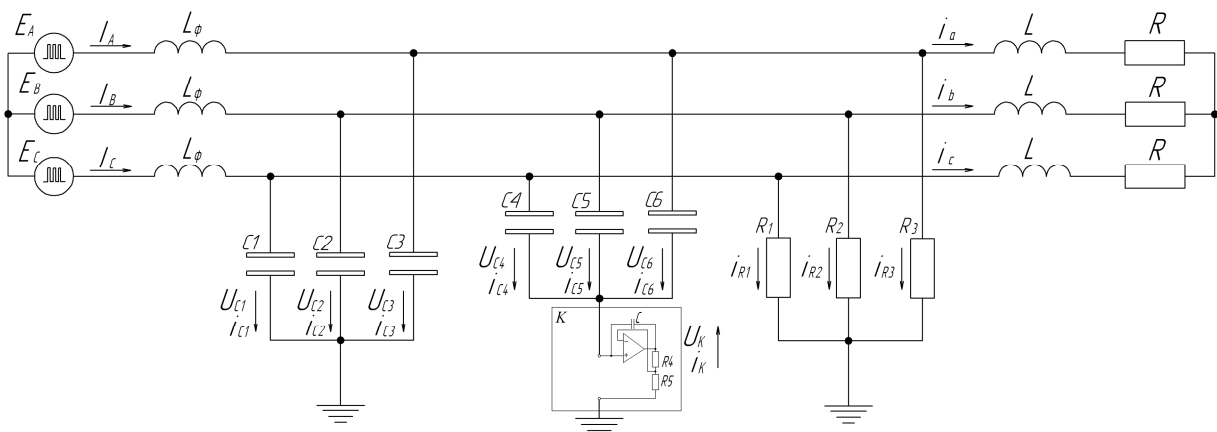


Рисунок 3.9 – Розрахункова схема комбінованої дільничної електромережі із застосуванням автокомпенсатора

З урахуванням викладеного, розрахункова схема комбінованої дільничної електромережі, що містить автокомпенсатор, має структуру, представлену на рис.3.9. На ній введені наступні позначення: \$E_A\$, \$E_B\$, \$E_C\$ – фазні ЕРС трифазного перетворювача частоти; \$L_\phi\$ – загороджувальний фільтр; \$R\$, \$L\$ – еквівалентні приведені активні опори і індуктивності обмоток асинхронного електродвигуна; \$C_1\$, \$C_2\$, \$C_3\$ – ємності жил силового кабелю відносно землі; \$R_1\$, \$R_2\$, \$R_3\$ – опір витoku фаз відносний землі; \$C_4\$, \$C_5\$, \$C_6\$ – ємнісний фільтр для

підключення компенсатора ємності мережі; K – компенсатор ємності кабельної мережі.

Величини струмів в елементах розрахункової схеми описуються на основі першого закону Кірхгофа:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_A + I_B + I_C = 0; \\ i_a + i_b + i_c = 0; \\ I_A - i_a - I_{C3} - I_{C6} - I_{R6} = 0; \\ I_B - i_b - I_{C2} - I_{C5} - I_{R5} = 0; \\ I_C - i_c - I_{C1} - I_{C4} - I_{R4} = 0; \\ I_{C4} + I_{C5} + I_{C6} - I_K = 0; \\ I_{C1} + I_{C2} + I_{C3} + I_K + I_{R4} + I_{R5} + I_{R6} = 0; \end{array} \right. \quad (3.23)$$

Співвідношення електричних потенціалів розрахункової схеми (відповідно до другого закону Кірхгофа) може бути описане рівняннями:

$$\left\{ \begin{array}{l} L_\phi \frac{dI_A}{dt} + R_3 i_{R3} - R_2 i_{R2} - L_\phi \frac{dI_B}{dt} = E_A - E_B; \\ L_\phi \frac{dI_A}{dt} + R_3 i_{R3} - R_1 i_{R1} - L_\phi \frac{dI_C}{dt} = E_A - E_C; \\ L_\phi \frac{dI_A}{dt} + L \frac{di_a}{dt} + R i_a - L \frac{di_c}{dt} - R i_c - L_\phi \frac{dI_C}{dt} = E_A - E_C; \\ L_\phi \frac{dI_B}{dt} + L \frac{di_b}{dt} + R i_b - L \frac{di_c}{dt} - R i_c - L_\phi \frac{dI_C}{dt} = E_B - E_C; \\ L_\phi \frac{dI_A}{dt} + R_3 i_{R3} - U_{C2} - L_\phi \frac{dI_B}{dt} = E_A - E_B; \\ L_\phi \frac{dI_A}{dt} + R_3 i_{R3} - U_{C1} - L_\phi \frac{dI_C}{dt} = E_A - E_C; \\ L_\phi \frac{dI_A}{dt} + R_3 i_{R3} + U_K - U_{C5} - L_\phi \frac{dI_B}{dt} = E_A - E_B; \\ L_\phi \frac{dI_A}{dt} + R_3 i_{R3} + U_K - U_{C4} - L_\phi \frac{dI_B}{dt} = E_A - E_C; \\ R_3 i_{R3} + U_K - U_{C6} = 0; \end{array} \right. \quad (3.24)$$

Після вирішення рівнянь відносно похідних відповідних струмів і напруги, представлення системи диференціальних рівнянь у формі Коші і приведення до нульових початкових умов, математична модель (рис.3.9) має бути представлена системою рівнянь (3.25) і придатна до дослідження квазістаціонарних і перехідних процесів формування ємнісних струмів витоку в електротехнічному комплексі, що містить перетворювач частоти і компенсатор ємності мережі на основі КНО. Ці дослідження можуть проводитися при різних значеннях параметрів моделі. Як приклад, можуть бути розглянуті процеси при наступних параметрах об'єкта: напруга живильної мережі 380 В; ємність ізоляції мережі змінюється від 0.01 мкФ/фазу до 1 мкФ/фазу; діапазон зміни індуктивності фільтру - від 0 до 8 мГн, без компенсації мережі і при максимально можливій глибині компенсації, яка обмежується стійкістю КНО. Характерна осцилограма квазістаціонарного струму витоку на землю (рис.3.10) отримана при наступних параметрах мережі: $C_1, C_2, C_3 = 0,1$ мкФ, $L_\phi = 0$ мГн, $f = 1000$ Гц.

Форма струму обумовлена, в основному, формою вихідної напруги ПЧ і ємністю провідності мережі. Значення дієвого струму досягає 200мА. З графіка 1, представленого на рис.3.10 витікає, що при ємності мережі 0.1 мкФ основну дію на величину витоку на землю надає високочастотна напруга несної частоти ПЧ. При підключенні компенсатора ємності мережі (графік 2) форма і величина струму витоку на землю міняється, на графіку присутні короткочасні імпульси струму, обумовлені кінцевою швидкодією операційного підсилювача КНО. Значення дієвого струму витоку знижується з 200 мА до 38мА.

При підключенні загороджувального фільтру індуктивністю $L_\phi=3$ мГн відбувається зменшення високочастотного сигналу в спектральному складі струму витоку на землю, що позначається на його формі і величині (рис.3.11). Форма струму витоку наближається до синусоїдальної, а дієве значення досягає 100мА (графік 1). При підключенні компенсатора ємнісний струм витоку на землю знижується до 8мА (графік 2), що відповідає тривалому безпечному параметру струму.

$$\left\{ \begin{array}{l}
I_A + I_B + I_C = 0; \\
i_a + i_b + i_c = 0; \\
I_A - i_a - I_{C3} - I_{C6} - I_{R6} = 0; \\
I_B - i_b - I_{C2} - I_{C5} - I_{R5} = 0; \\
I_C - i_c - I_{C1} - I_{C4} - I_{R4} = 0; \\
I_{C4} + I_{C5} + I_{C6} - I_K = 0; \\
I_{C1} + I_{C2} + I_{C3} + I_K + I_{R4} + I_{R5} + I_{R6} = 0; \\
\frac{dI_A}{dt} = \frac{U_K - U_{C1} - U_{C5} - 2R_3 i_{R3} + 2E_A - E_B - E_C}{3L_\phi} \\
\frac{dI_B}{dt} = \frac{U_K - U_{C5} - U_{C1} - 3R_2 i_{R2} + R_3 i_{R3} - E_A + 2E_B - E_C}{3L_\phi} \\
\frac{dI_C}{dt} = \frac{U_K - U_{C5} - U_{C1} - 3R_1 i_{R1} + R_3 i_{R3} - E_A - E_B + 2E_C}{3L_\phi} \\
\frac{di_a}{dt} = \frac{2U_K - 2U_{C5} - 2U_{C1} - 3R_1 i_{R1} - 9R_2 i_{R2} + 8R_3 i_{R3} - 18Ri_a - 9Ri_b + 27Ri_c - 6E_A - 2E_B + 6E_C}{9L} \\
\frac{di_b}{dt} = \frac{-U_K + U_{C5} + U_{C1} - 3R_1 i_{R1} + 9R_2 i_{R2} - 4R_3 i_{R3} + 9Ri_a - 9Ri_c + 3E_A + 8E_B - 3E_C}{9L} \\
\frac{di_c}{dt} = \frac{-U_K + U_{C5} + U_{C1} - 6R_1 i_{R1} - 4R_3 i_{R3} + 9Ri_a - 18Ri_c + 3E_A - 6E_B - 3E_C}{9L} \\
\frac{dU_{C1}}{dt} = \frac{1}{C_1} i_{C1} \\
\frac{dU_{C2}}{dt} = \frac{1}{C_2} i_{C2} \\
\frac{dU_{C3}}{dt} = \frac{1}{C_3} i_{C3} \\
\frac{dU_{C4}}{dt} = \frac{1}{C_4} i_{C4} \\
\frac{dU_{C5}}{dt} = \frac{1}{C_5} i_{C5} \\
\frac{dU_{C6}}{dt} = \frac{1}{C_6} i_{C6} \\
\frac{dU_0}{dt} = \frac{A_{OY} U_K - U_0}{T} \\
\frac{dU_K}{dt} = \frac{1}{C} I_K + \frac{dU_0}{dt}
\end{array} \right. \quad (3.25)$$

де

$$\begin{aligned}
I_A(0) = 0, \quad I_B(0) = 0, \quad I_C(0) = 0 \quad i_a(0) = 0, \quad i_b(0) = 0, \quad i_c(0) = 0, \quad U_{C1}(0) = 0, \\
U_{C2}(0) = 0, \quad U_{C3}(0) = 0, \quad U_{C4}(0) = 0, \quad U_{C5}(0) = 0, \quad U_{C6}(0) = 0, \quad U_K(0) = 0.
\end{aligned}$$

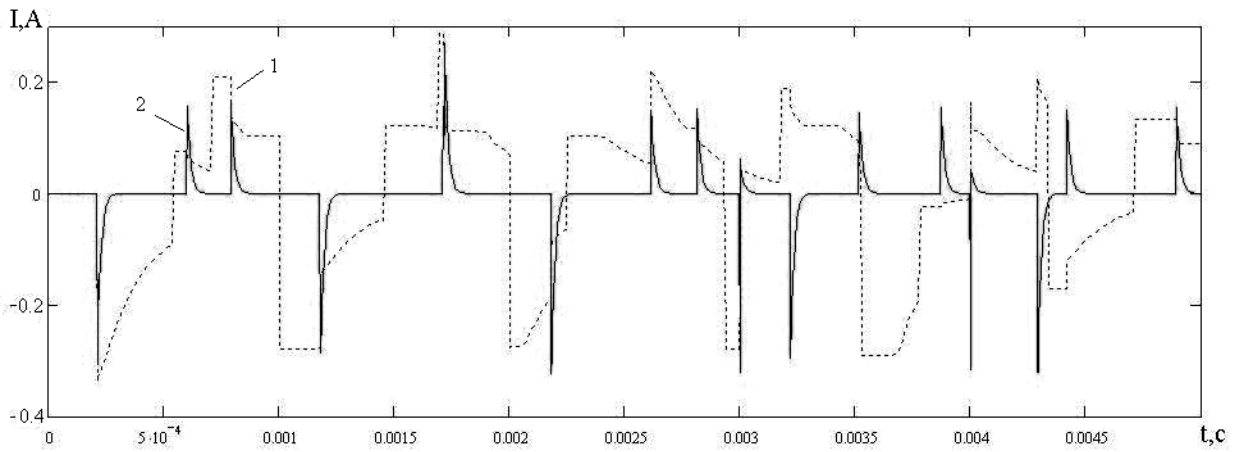


Рисунок 3.10 – Осцилограми струму витоку на землю в комбінованій електромережі: 1 - без компенсації ємнісної складової струму витоку на землю; 2 - з компенсацією ємнісної складової струму витоку на землю

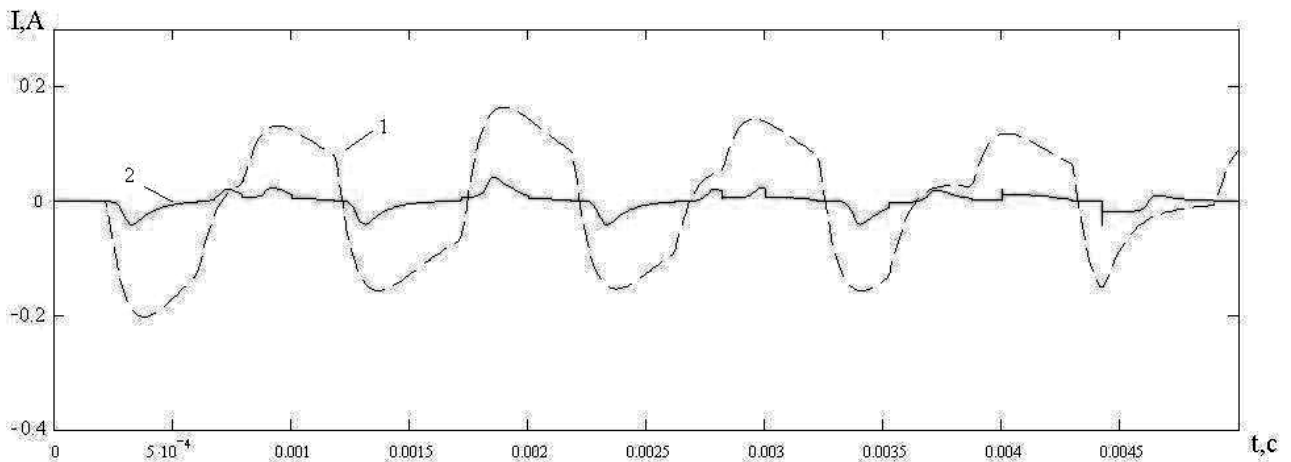


Рисунок 3.11 – Осцилограми струму витоку на землю в комбінованій електромережі із загороджувальним фільтром: 1 - без компенсації ємнісної складової струму витоку на землю; 2-з компенсацією ємнісною складовою струму витоку на землю

При дослідженні формування струму витоку на землю з несною частотою ПЧ 5 кГц встановлене, що середнє значення струму збільшується за рахунок зниження ефективності компенсації (рис.3.12). Причиною цьому є вплив інерційності диференціального підсилювача на властивості компенсатора. Обмеження спектрального складу напруги мережі за рахунок L-фільтру значно підвищує ефективність компенсації. При використанні вихідного загороджувального фільтру зменшується вплив високочастотних

складових струмів (рис.3.13) і форма струму витoku на землю наближається до синусоїдальної, досягаючи 3 мА (значення дієвого струму).

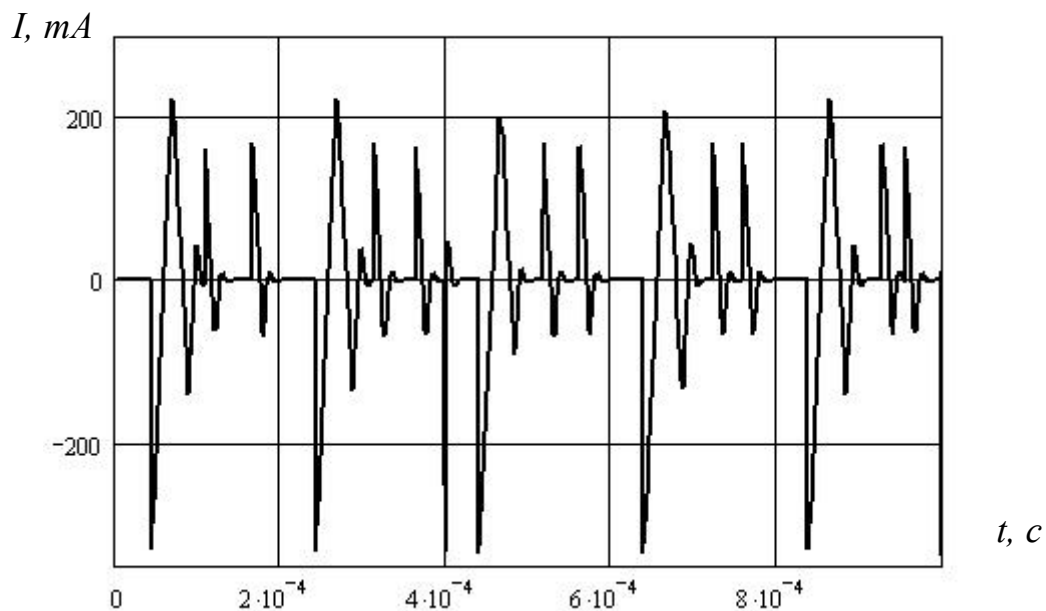


Рисунок 3.12 – Осцилограма струму витoku на землю в комбінованій електромережі при компенсації струму витoku без загороджувального фільтру (несна частота ПЧ 5000Гц)

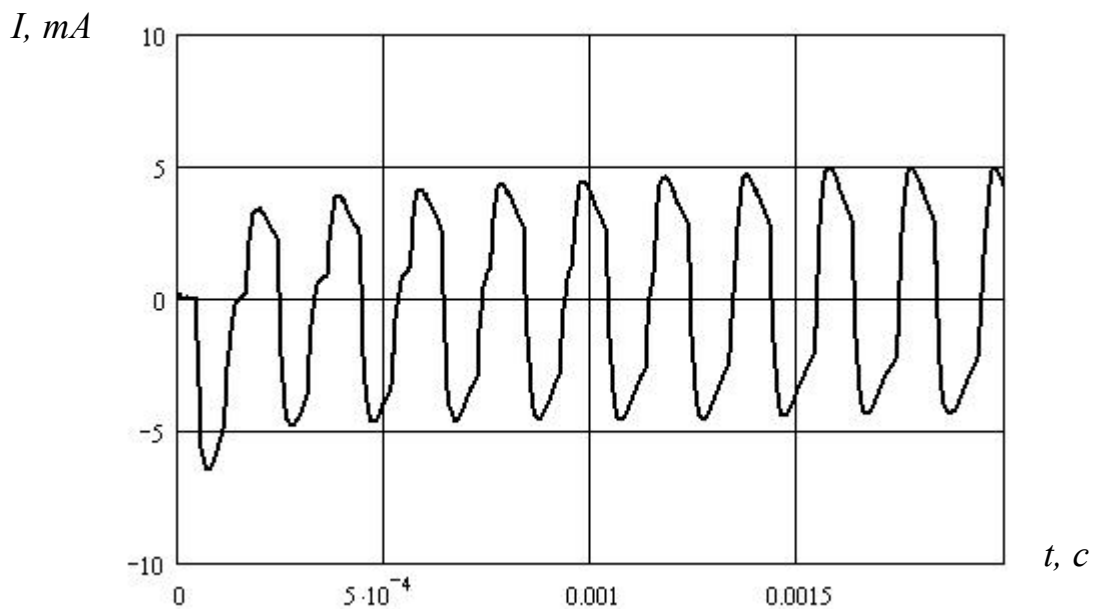


Рисунок 3.13 – Осцилограма струму витoku на землю в комбінованій електромережі при компенсації струму витoku із загороджувальним фільтром (несна частота ПЧ 5000Гц, $L\phi = 3$ мГн)

У момент виникнення кола однофазного витоку на землю в комбінованій системі виникає перехідний процес, який закінчується квазістаціонарними коливаннями струму витоку розглянутими вище. Його ілюстрацією є результати моделювання за наступних умов: після встановлення процесів формування ємнісних струмів при симетричному режимі роботи ($C1 = C2 = C3$, $R1 = R2 = R3 = \infty$) опір $R1$ стрибкоподібно змінювався від нескінченності (∞) до 1кОм. Осцилограма параметрів перехідного процесу представлена на рис.3.14 [27].

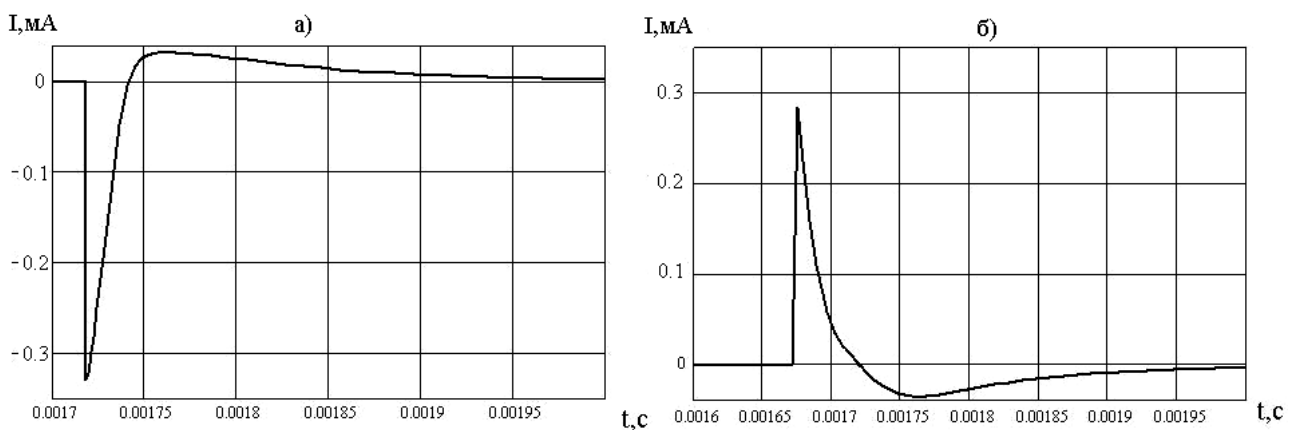


Рисунок 3.14 – Осцилограми параметрів перехідного процесу компенсації ємнісного струму витоку на землю ($C1 = C2 = C3$, $R2 = R3 = \infty$; $\infty \geq R1 \geq 1$ кОм)

У залежності від моменту виникнення кола витоку на землю може мінятися форма, максимальна величина і полярність імпульсу (рис.3.14а рис.3.14б). На форму імпульсу суттєво впливає ємність ізоляції мережі, швидкодія операційного підсилювача і глибина компенсації ємнісного струму витоку на землю.

Вище викладене дослідження квазістаціонарних і перехідних процесів показало, що компенсатор суттєво знижує струм витоку на землю і кількість електрики в опорі витоку ($R_{вум} = 1$ кОм).

3.2. Раціональні параметри засобу компенсації ємнісного струму витоку на землю в комбінованій мережі шахтної ділянки

Для синтезу пристрою компенсації ємнісної складової струмів витоку на землю і розробки його принципової схеми мають бути обґрунтовані раціональні параметри електронних і електротехнічних компонентів, що входять до його складу. Величина зниження ємнісної складової струму витоку безпосередньо залежить від міри компенсації ємнісної провідності електромережі відносно землі. Прийнятна ступінь компенсації може бути досягнута при різних поєднаннях значень параметрів компонентів системи. З них необхідно вибрати такі, при яких задовольняються певні критерії якості компенсаційного пристрою. Таким чином, для визначення раціональних параметрів пристрою необхідно задати критерії якості, діапазон варійованих параметрів компонентів системи, вибрати метод мінімізації кількості планованих експериментів.

У якості критеріїв якості приймемо:

- величину ємнісної складової струму витоку на землю;
- максимальну напругу на електронних компонентах системи;
- максимальну потужність розсіювання на активних компонентах системи.

На основі викладеного, аналізуючи розрахункову схему, представлену на рис.3.9, можна записати критерії якості в наступному вигляді:

- $I_{\text{вит}} \rightarrow \min;$
- $U_{\text{max Cос}} \rightarrow \min;$
- $U_{\text{max Cпр}} \rightarrow \min;$
- $P_{\text{max вых}} \rightarrow \min;$

де $I_{\text{вит}}$ – ємнісний струм витоку на землю, $U_{\text{max Cос}}$ – напруга на конденсаторі зворотного зв'язку КНО, $U_{\text{max Cпр}}$ – напруга на конденсаторах приєднання, $P_{\text{max вых}}$ - вихідна потужність КНО.

При дослідженні математичної моделі комбінованої мережі мають бути визначені параметри, що безпосередньо впливають на величину приведених критеріїв якості: індуктивність загороджувального фільтру L_{ϕ} ; величина

ємності приєднання C_{np} ; ємність зворотного зв'язку КНО C_{oc} ; коефіцієнт негативного зворотного зв'язку КНО $K_{оoc} = R4/R5$; ємність комбінованої мережі відносно землі $C_{сети}$. Очевидно, що детальний аналіз динаміки даної системи залежно від кожного з основних параметрів вельми громіздкий, оскільки для такого аналізу потрібно проводити моделювання системи при різних комбінаціях поєднань її параметрів.

З врахуванням викладеного, доцільно застосувати метод планованого ЛП-пошуку (ПЛП-пошуку) [28] для того, щоб проаналізувати залежність критеріїв якості системи від значень окремих електричних параметрів мережі в широкому діапазоні зміни їх величин. Даний метод, об'єднує методи Монте-Карло, що дозволяють квазірівномірний вибір крапок в багатовимірній області простору параметрів, в якій проводиться моделювання, і підходи планування експериментів, виділяючи значимі параметри і області концентрації найкращих рішень. На основі методу покладена рандомізація розташування векторів $\bar{\alpha}$ в області $G(\bar{\alpha})$, що задається нерівностями типу $\alpha_{j*} \leq \alpha_j \leq \alpha_{j**}$ ($j = \overline{1, J}$, а саме J – число варійованих параметрів, $J = \overline{1, N}$) і що розраховуються за допомогою ЛП_т-сіток [29]. Зазвичай в ПЛП-пошуку використовуються величини $J < 51$ та $N < 2^{20}$.

Процес рандомізації розташування векторів $\bar{\alpha}$ в області $G(\bar{\alpha})$ полягає у випадковому змішенні рівнів параметрів α_{ijk} тим або іншим способом, де $i = \overline{1, M(j)}$ - номер рівня, а $M(j)$ - число рівнів варійованого j -го параметра по k -му критерію; $h = \overline{1, H_{ijk}}$ – число значень k -го критерію $\Phi_k(\bar{\alpha})$ на i -м рівні j -го параметра; $k = \overline{1, K}$ - номер критерію, де K – кількість критеріїв якості. В результаті обробки всіх N обчислювальних експериментів, проведених на математичній моделі, з'являється вибіркова множина значень $\{\bar{\Phi}_{ijk}(\alpha_{ij})\}$, де $\bar{\Phi}_{ijk}(\alpha_{ij})$ - середнє значення k -го критерію якості в i -м перетині j -го варійованого параметра.

Можливість визначення параметрів, що утворюють вплив на критерії якості з необхідною довірчою вірогідністю, значною мірою вирішує проблему інтеграції значних об'ємів числової інформації, отриманої в експерименті, в характеристики, що піддаються логічному аналізу.

Таким чином, метод ПЛП-пошуку не лише дозволяє на основі проведення імітаційних модельних експериментів здійснити квазірівномірний перегляд простору параметрів в заданих діапазонах їх зміни, але і в результаті спеціального рандомізованого характеру планування цих експериментів застосувати кількісні статистичні оцінки впливу зміни варійованих параметрів і їх парних поєднань на аналізовані властивості даної системи.

У якості варійованих мають бути обрані наступні параметри комбінованого електротехнічного комплексу: індуктивність загороджувального фільтру L_{ϕ} ; величина ємності приєднання C_{np} ; коефіцієнт негативного зворотного зв'язку КНОН $K_{оос}$; ємність комбінованої мережі відносно землі $C_{сети}$. Введемо вектор $\bar{\alpha}$ варійованих параметрів, використовуючи наступні позначення: $\alpha_1 = L_{\phi}$, $\alpha_2 = C_{np}$, $\alpha_3 = K_{оос}$, $\alpha_4 = C_{сети}$, $\alpha_5 = C_{oc}$. Це узгоджується з алгоритмом ПЛП-пошуку, який ґрунтується на спеціальному плануванні вибраних векторів, де k - номер обчислювального експерименту.

Вибір вказаних діапазонів зміни варійованих параметрів обумовлений наступними міркуваннями: індуктивність загороджувального фільтру L_{ϕ} вибиралася з таблиць, наданих виробниками дроселів для електродвигунів з ПЧ; величина ємності приєднання C_{np} , ємності в зворотному зв'язку КНОН і коефіцієнт негативного зворотного зв'язку $K_{оос}$ вибиралася з умови забезпечення стійкості компенсатора на підставі результатів числового експерименту; ємність електромережі відносно землі $C_{мер}$ розраховувалася на основі довідкових даних кабельної продукції і можливих довжин лав [11,30].

Відповідно до [28], мінімальну кількість випробувань системи можна оцінити за формулою:

$$N = 2^{(2+\sqrt{M})}, \quad (3.26)$$

де N – кількість випробувань; M – кількість параметрів, що оптимізуються. При $M = 5$, N дорівнює 16. Оскільки (згідно [29]) при збільшенні N точність методу підвищується, то прийнятним є подвоєння кількості випробувань і прийняття $N = 32$.

Розроблена блок-схема алгоритму програми розрахунку оптимальних значень системи компенсації ємнісних складових струмів витоку на землю реалізована на мові програмування Паскаль і представлена в Додатку В.

В результаті серії з 32 експериментів на математичній моделі набуті наступні значення раціональних параметрів системи компенсації для лінійної напруги 380 В (табл.3.1).

Таблиця 3.1 – Раціональні параметри пристрою компенсації ємнісної складової струму витоку для електромережі напругою 380 В

$C_{мер} = 0.1$ мкФ		$C_{мер} = 0.25$ мкФ		$C_{мер} = 0.5$ мкФ	
L_{ϕ} , мГн	12,33	L_{ϕ} , мГн	4,58	L_{ϕ} , мГн	2,87
$C_{пр}$, мкФ	0,21	$C_{пр}$, мкФ	0,28	$C_{пр}$, мкФ	0,53
$C_{ос}$, мкФ	0,18	$C_{ос}$, мкФ	0,3	$C_{ос}$, мкФ	0,49
$K_{оос}$	37	$K_{оос}$	79	$K_{оос}$	68

Критерії якості прийняті наступними:

$$I_{вит} = 23..45 \text{ мА};$$

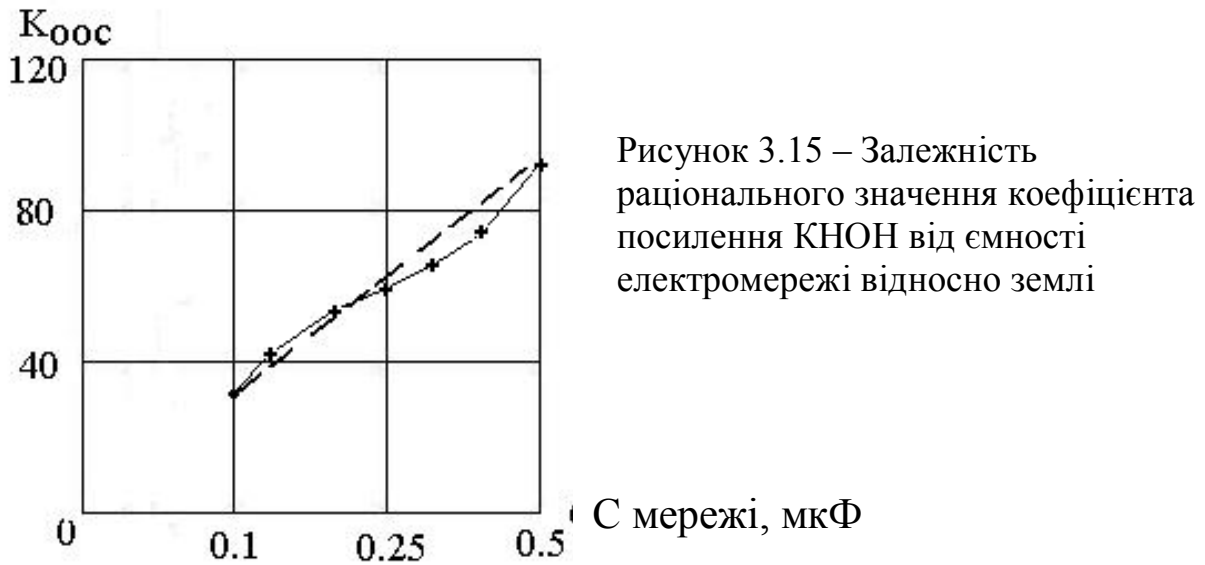
$$U_{\max C_{ос}} = 712..940 \text{ В};$$

$$U_{\max C_{пр}} = 690..1020 \text{ В};$$

$$P_{\max вих} = 51 \text{ Вт};$$

В процесі вибору раціональних параметрів встановлена закономірність співвідношень величин значення $K_{оос}$ і величини ємності мережі відносно землі. З цією метою виконані дослідження при наступних заданих стандартних значеннях компонентів вибраних відповідно до табл.3.1: $L_{\phi}=8$ мГн; $C_{пр}=0,5$ мкФ; $C_{ос}=0,5$ мкФ.

В результаті обробки даних числових експериментів отримана наступна залежність рис.3.15.



При цьому критерії якості відповідали обраним обмеженням і знаходилися в наступному діапазоні:

$$I_{вит} = 23..65 mA;$$

$$U_{\max C0c} = 712..1005 B;$$

$$U_{\max Cnp} = 690..1031 B;$$

$$P_{\max вих} = 70 Bm;$$

Виходячи з набутих значень і на основі залежності рис.3.15, можна зробити висновок, про те, що для забезпечення якісної компенсації з обраними значеннями параметрів компонентів при збільшенні ємності від 0.1 мкФ/фазу до 0.5 мкФ/фазу, K_{00c} необхідно змінювати від 40 до 95 за лінійним законом.

На основі ЛП-пошуку раціональних параметрів визначені вимоги до електронних компонентів системи і залежність необхідного коефіцієнта підсилення КНО від величини ємності ізоляції мережі. Отримані дані необхідні і достатні для розробки схемотехніки системи автоматичної компенсації ємнісних складових струмів витоку на землю в комбінованому електротехнічному комплексі технологічної дільниці шахти.

3.3. Приклад технічної реалізації конденсатора ємнісного струму на основі конвертора негативного опору

Можливість ефективної компенсації ємнісних складових струмів витоку на землю в приєднанні, що відходить від силового напівпровідникового перетворювача частоти, засобами конвертації негативного опору, може бути досягнута, зокрема, при локальному застосуванні компенсуючого засобу (безпосередньо відносно приєднання, що відходить від перетворювача частоти). Виходячи з цих міркувань, може бути запропонована наступна структура функціональної схеми автокомпенсації ємнісних струмів витоку на землю на виході перетворювача частоти (рис.3.16). Автокомпенсатор має містити наступні основні вузли: *ФП* – фільтр приєднання до фаз електричної мережі; *ВК* – високовольтний каскад; *КНО* – конвертор негативного опору; *ДП* – диференціальний підсилювач; коло позитивного зворотного зв'язку *ПЗ*; *Rn* – регулятор коефіцієнта підсилення *ДП*; *ДЖ1*, *ДЖ2* – джерела живлення пристрою. Фільтр приєднання *ФП* призначений для приєднання пристрою до штучної нейтралі мережі, утвореної трьома конденсаторами. Диференційний підсилювач *ДП* спільно з ланкою *ПЗС* і регулятором коефіцієнта підсилення *Rn* є конвертором негативного опору, що інвертує знак комплексного опору ланкою *ПЗ* з масштабом, заданим потенціометром *Rn*. Високовольтний каскад *ВК* призначений для масштабного перетворення вихідної напруги *ДП* в рівень напруги відповідний мережевому (380В, 660В або 1140В).

Прийнятною структурою автокомпенсатора, обґрунтованою раніше, є двополюсник, що має ємнісну провідність, узяту із зворотним знаком. Ця вимога виконується при використанні у якості *ПЗ* конденсатора. В цьому випадку провідність пристрою віднімається з еквівалентної ємнісної провідності мережі відносно землі, зменшуючи її і, відповідно, ємнісну складову струму витоку на землю.

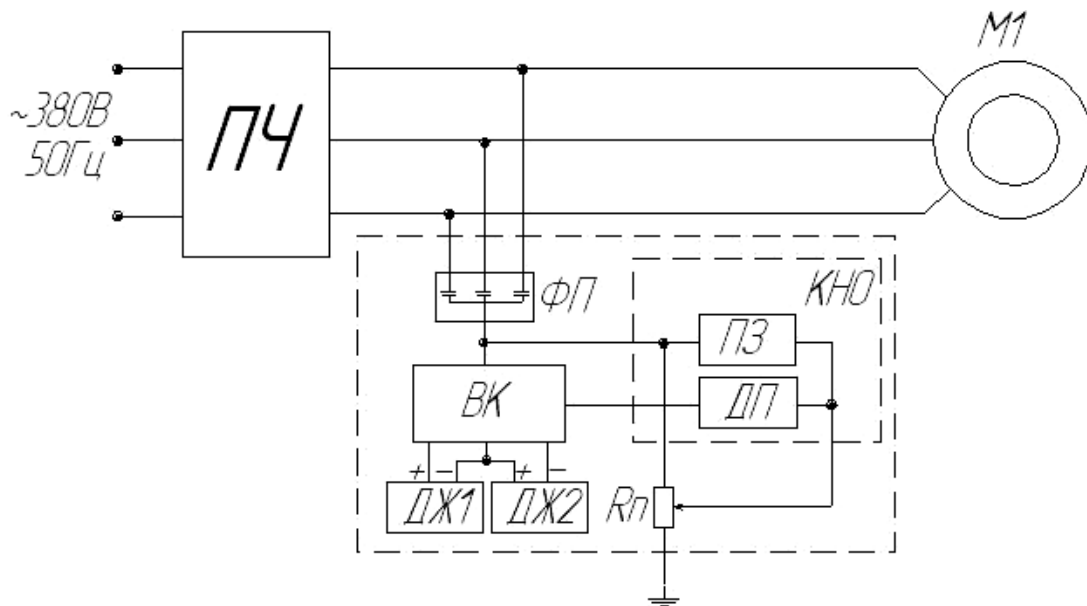


Рисунок 3.16 – Функціональна схема пристрою автокомпенсації ємнісних складових струмів витoku у відхiдному вiд ПЧ приєднаннi

З урахуванням реальних параметрів об'єкта автокомпенсації і попередньо обґрунтованих прийнятних параметрів схема автокомпенсатора, що виконана на основі КНО, має задовольняти наступним технічним вимогам:

- вихідна потужність пристрою, не менше 150 Вт;
- амплітуда вихідної напруги, не менше 1500 В;
- коефіцієнт підсилення 30 – 100;
- максимальний вихідний струм, не менше 0.15 А.

Принципова схема конвертора негативного опору КНО, адаптована до умов експлуатації у складі автокомпенсатора ємнісних струмів витoku на землю в комбінованому електротехнічному комплексі, представлена на рис.3.17 [31].

Схема складається з буферних каскадів, виконаних на операційних підсилювачах $DA1$ і $DA2$ відповідно утворюючи неінвертуючий і інвертуючий вхід диференційного підсилювача $ДП$. Супресори $VD1-V D3$ призначені для захисту цих входів від перевантаження за напругою. Операційний підсилювач $DA3$ забезпечує необхідний коефіцієнт підсилення крізного каналу $ДП$. Операційні підсилювачі $DA4$ і $DA5$ забезпечують необхідний постійний зсув робочих струмів оптронів $VH1$ і $VH2$ для лінеаризації їх характеристик.

Оптрони $VH1$ і $VH2$ призначені для гальванічної розв'язки високовольтних вихідних транзисторів $VT1$ і $VT2$ (рис.4.3) від низьковольтного виходу ДП і завдання початкового струму зсуву цих транзисторів.

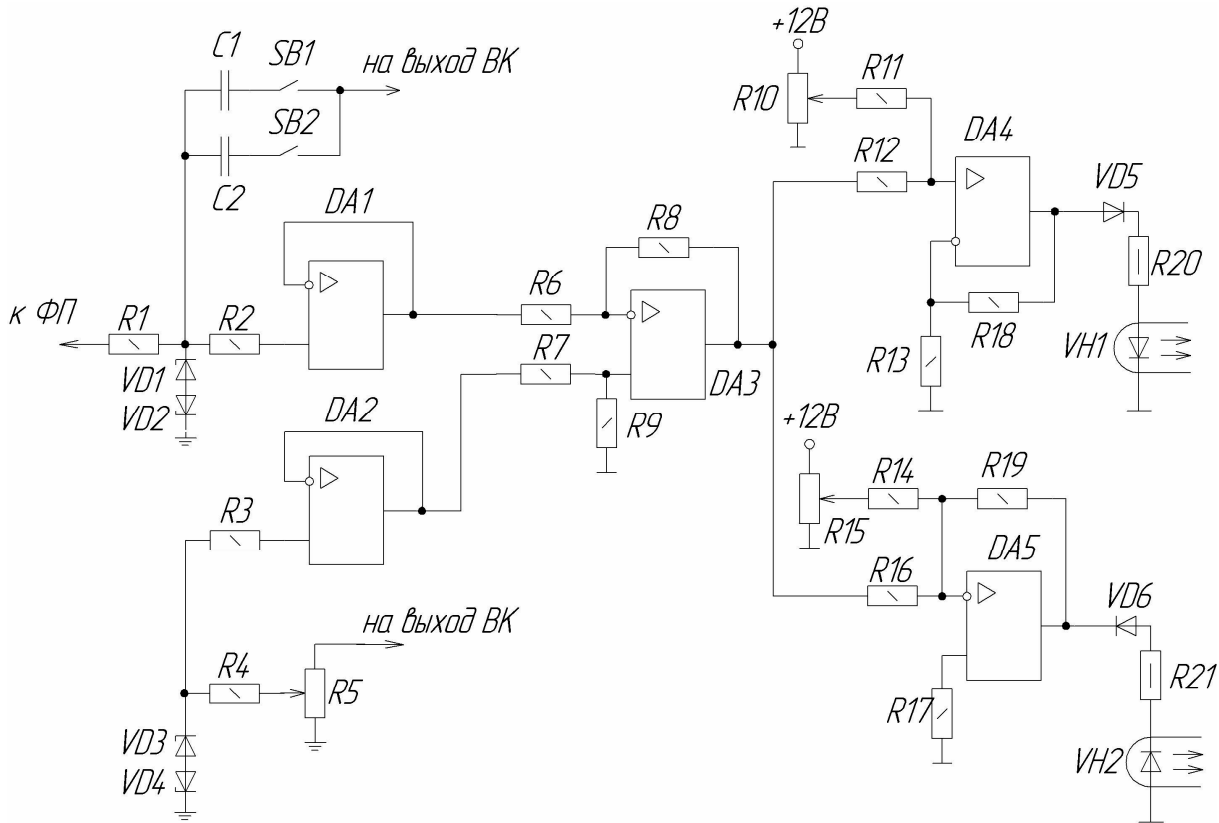


Рисунок 3.17 – Принципова схема конвертера негативного опору

Узгодження функціонування КНО з параметрами силової мережі може бути досягнуте на основі вживання високовольтного каскаду (рис.3.18). Його функцію може виконувати двотактний підсилювач потужності, виконаний на високовольтних транзисторах $VT1$ і $VT2$, що працює в режимі АВ. Режим АВ досягається встановленням початкових струмів бази транзисторів за допомогою налаштування величини опору змінних резисторів $R1$ і $R2$ [32]. Живлення базових ланок транзисторів здійснюють, застосовуючи гальванічну розв'язку DC/DC перетворювачами постійної напруги. Транзистори $VH1.1$ і $VH2.1$ є вихідними відповідними частинами оптронів і здійснюють зміну базових струмів вихідних транзисторів відповідно до вхідних сигналів ДП. Джерела

живлення ДЖ1 і ДЖ2 мають ідентичні параметри і забезпечують живлення вихідного двотактного каскаду підсилювача потужності.

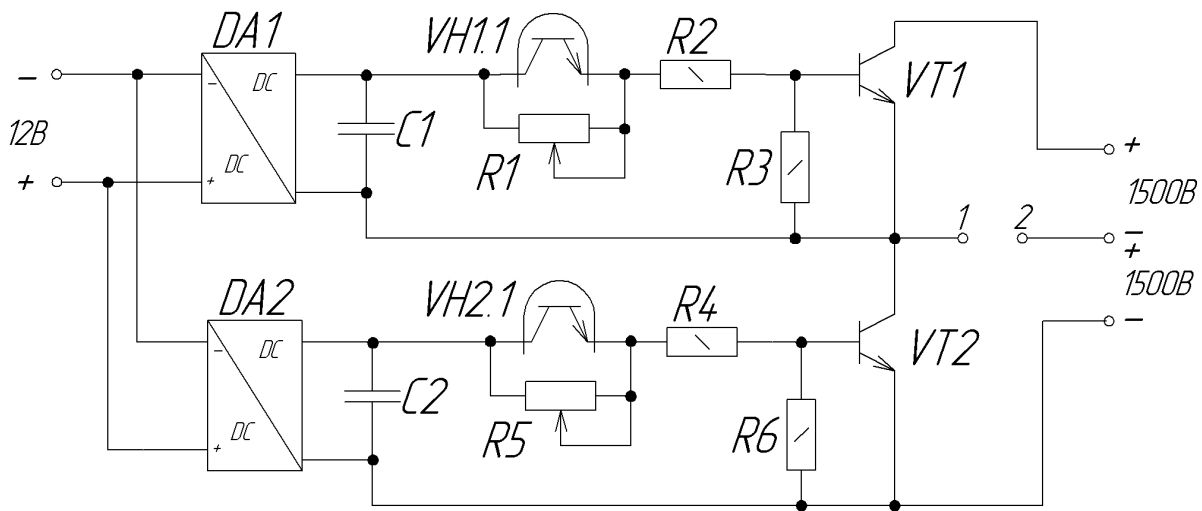


Рисунок 3.18 – Принципова схема високовольтного каскаду

3.4. Властивості конвертора негативного опору як засоба автоматичної компенсації ємнісного струму витоку на землю

З урахуванням актуальності проблематики автокомпенсації ємнісних струмів витоку на землю в шахтній дільничній мережі з перетворювачем частоти і результатів теоретичних обґрунтувань практичну актуальність набуває експериментальна перевірка властивостей конвертування негативного опору як компенсуючого засобу. Супутнім завданням є встановлення сумісності досягнутих параметрів комбінованого електротехнічного комплексу (за умови вживання КНО-пристрою автокомпенсації) з параметрами загальномережевого апарату захисту від витоків струму на землю. Схема дослідницького стенду (рис. 3.19) передбачає використання наступних компонентів: трифазний трансформатор *ТР*; перетворювач частоти *ПЧ* (Danfoss VLT 6002); асинхронний двигун *АД*; індуктивні фільтри L_A , L_B , L_C ; автокомпенсатор за запропонованою схемою (рис.3.17 – рис.3.18).

Ємність кабелю приєднання в діапазоні від 0,001 мкФ/фазу до 0,2 мкФ/фазу створювалася «магазином» конденсаторів C_A , C_B , C_C що підключаються між фазами мережі і землею. Коло однофазного витoku на землю створювалося активним опором ($R_{вум}=1$ кОм). З метою встановлення спрацьовування апарату захисту від витоків струму на землю, контакти його виконавчого реле виведені на вузол світлової індикації BCI .

Індуктивними фільтрами є дроселі на основі Ш-образного сердечника з електротехнічної сталі Ш 20x32. Обмотка дроселя містить 412 витків дроту ПЕВ-2-0,5мм. Індуктивність фільтру регулювалася зміною зазору між сердечником і магнітною перемичкою.

Високовольтний каскад (рис. 3.20) і автокомпенсатор (рис. 3.21) ємнісних складових струму витoku на землю на виході ПЧ виготовлені як окремі макети.

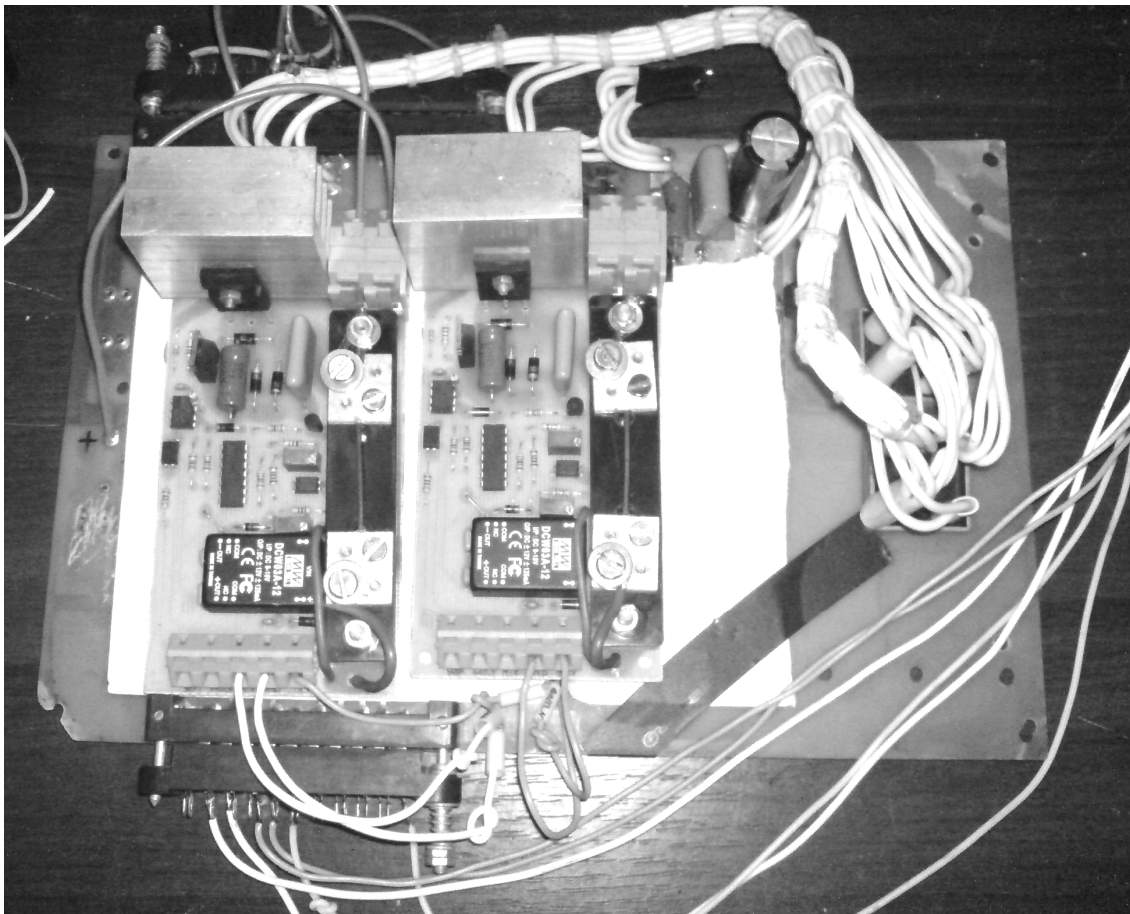


Рисунок 3.20 – Вид високовольтного каскаду

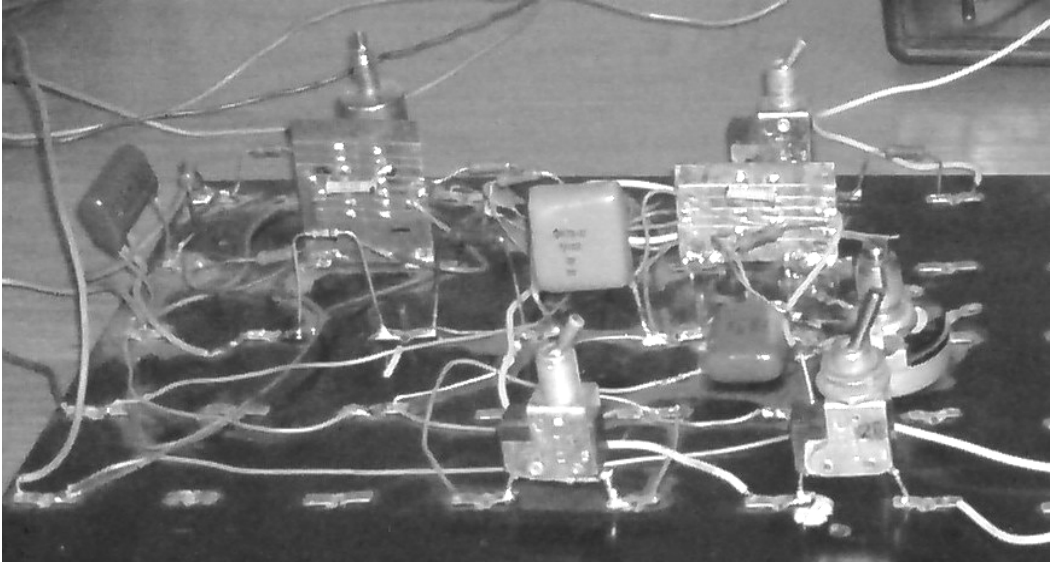


Рисунок 3.21 – Вид макетного зразку конвертора зворотного опору

В процесі експериментів оброблялися результати виміру однофазного струму витоку, який оцінювався по величині напруги на вимірювальному резисторі $R_{вим} = 10$ Ом. Для перевірки експериментальних даних застосований статистичний метод обробки результатів виміру з використанням критерію Уїлкінсона [22]. Результуючий струм витоку підрахований за формулою:

$$I_{вим} = \sqrt{\frac{1}{n} \times \sum_{i=1000}^n (U_i)^2} / R_{вим}; \quad (3.27)$$

Типові осцилограми струмів витоку на землю наведені на рис.3.22 та рис.3.23. Зіставлення результатів експериментальних даних і теоретичних досліджень показало, що дієве значення струму витоку на землю відрізняється не більше ніж на 10%.

Отримані результати експериментів зведені в таблицю 3.2. З аналізу цієї таблиці можна зробити висновок, що вживання автокомпенсатора на основі конвертування негативного опору (КНО) дозволяє ефективно знижувати короточасний струм витоку за рахунок зниження ємнісної складової до безпечного рівня.

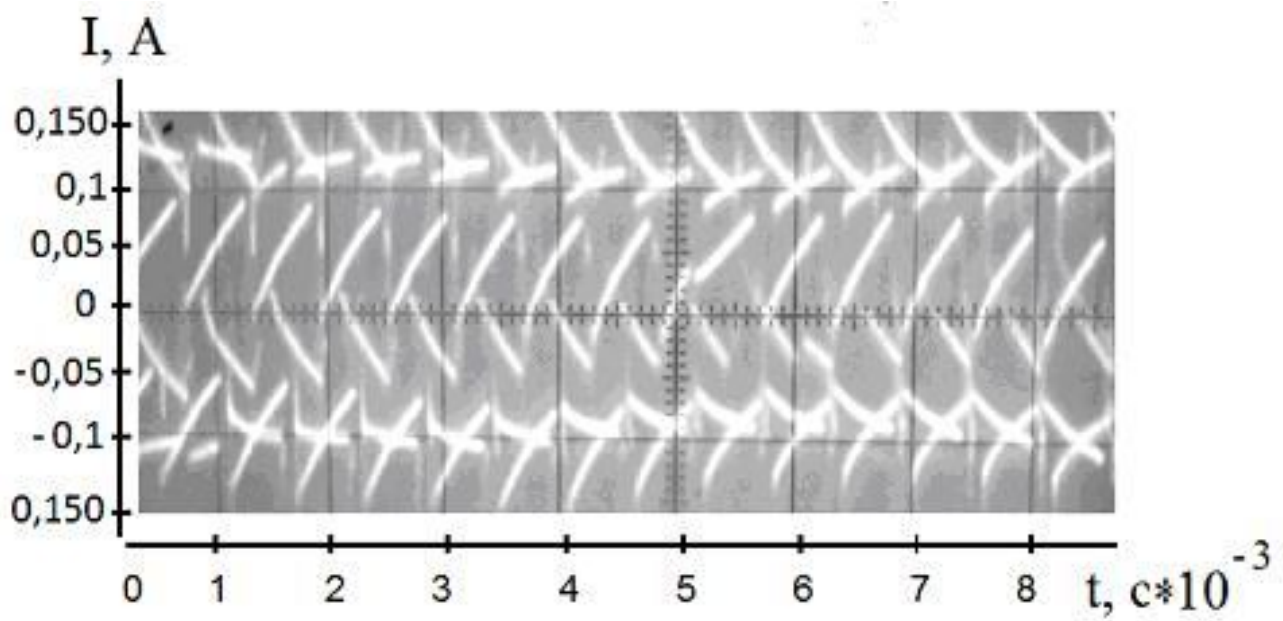


Рисунок 3.22 – Осцилограма струму витоку на землю на виході перетворювача частоти без компенсатора ($C_c = 0.1 \text{ мкФ}$)

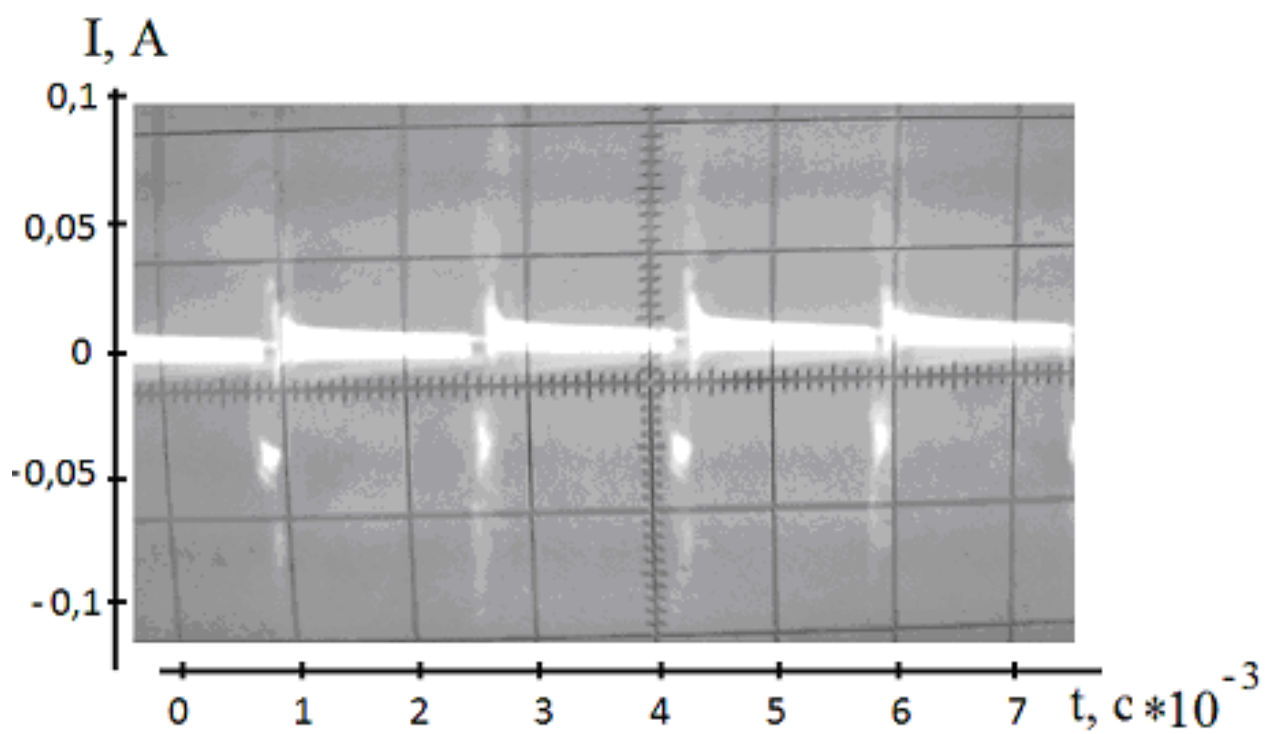


Рисунок 3.23 – Осцилограма струму витоку на землю на виході перетворювача частоти при застосуванні компенсатора ($C_c = 0.1 \text{ мкФ}$)

Проблематика узгодження роботи дільничного апарата захисту від ємнісних складових струмів витоку на землю на виході ПЧ ілюструється результатами досліджень, наведених у таблиці 3.3.

Таблиця 3.2

Зіставлення значень однофазних діючих струмів витоку на землю без компенсатора і з компенсатором (несна частота 1000 Гц)

Ємність мережі на фазу, після перетворювача, мкФ	Значення діючого струму витоку на землю, мА, при частоті перетворювача, Гц					
	Без компенсатора			З компенсатором		
	10	15	20	10	15	20
0.001	68	69	67	31	31	28
0.01	135	130	130	42	43	40
0.1	142	141	141	49	50	48
0.2	141	137	138	51	50	49

Таблиця 3.3

Результати випробування автокомпенсатора з апаратом захисту АЗУР – 1

Ємність мережі на фазу, після перетворювача, мкФ	Значення діючого струму витоку на землю, мА, при частоті перетворювача, Гц					
	АЗУР – 1			АЗУР – 1 з автокомпенсатором		
	10	15	20	10	15	20
0.001	65	64	64	31	33	30
0.01	132	133	130	40	41	40
0.1	136	137	138	47	45	45
0.2	139	140	138	50	48	47

Отримані дані дозволяють зробити висновок про принципову можливість спільної роботи автокомпенсатора за схемою КНО і апарата захисту від витоків струму на землю типу АЗУР-1 і досягнення в цьому разі ефекту зменшення струму витоку на землю в мережі з ПЧ до рівней, що не перевищують припустимих значень.

ВИСНОВКИ

На основі запровадження апробованих методів теоретичних і експериментальних досліджень визначені фактори небезпеки електроураження, обумовлені структурою і специфікою функціонування силового напівпровідникового перетворювача частоти в складі електротехнічного комплексу шахтної дільниці, обґрунтовані заходи із забезпечення параметрів електробезпеки шляхом застосування удосконалених засобів автокомпенсації ємнісної складової струму витоку на землю в приєднанні, що відходить від силового перетворювача частоти і можливість використання у якості автокомпенсатора схеми на основі конвертора негативного опору, що визначено наступними результатами:

- встановлені закономірності формування ємнісних складових струмів витоку на землю в комбінованому електротехнічному комплексі дільниці шахти, що містить перетворювач частоти, з врахуванням впливу параметрів загороджувального фільтру і ємності мережі;

- обґрунтовані принципова можливість застосування конвертора негативного опору в якості засобу автокомпенсації ємнісних складових струмів витоку на землю та принцип компенсації цих струмів (методом конвертації реактивного опору) в приєднанні виходу перетворювача частоти в умовах експлуатації електротехнічного комплексу дільниці шахти;

- обґрунтовані параметри і структура автоматичного компенсатора ємнісних складових струмів витоку на землю в комбінованому електротехнічному комплексі дільниці шахти з перетворювачем частоти;

- виявлена можливість використання базового варіанту апарату захисту АЗУР у складі ЕТК дільниці шахти за наявності КНО, як автокомпенсатора ємнісної складової струму витоку на землю, в приєднанні, що відходить від ПЧ.

Додаток А

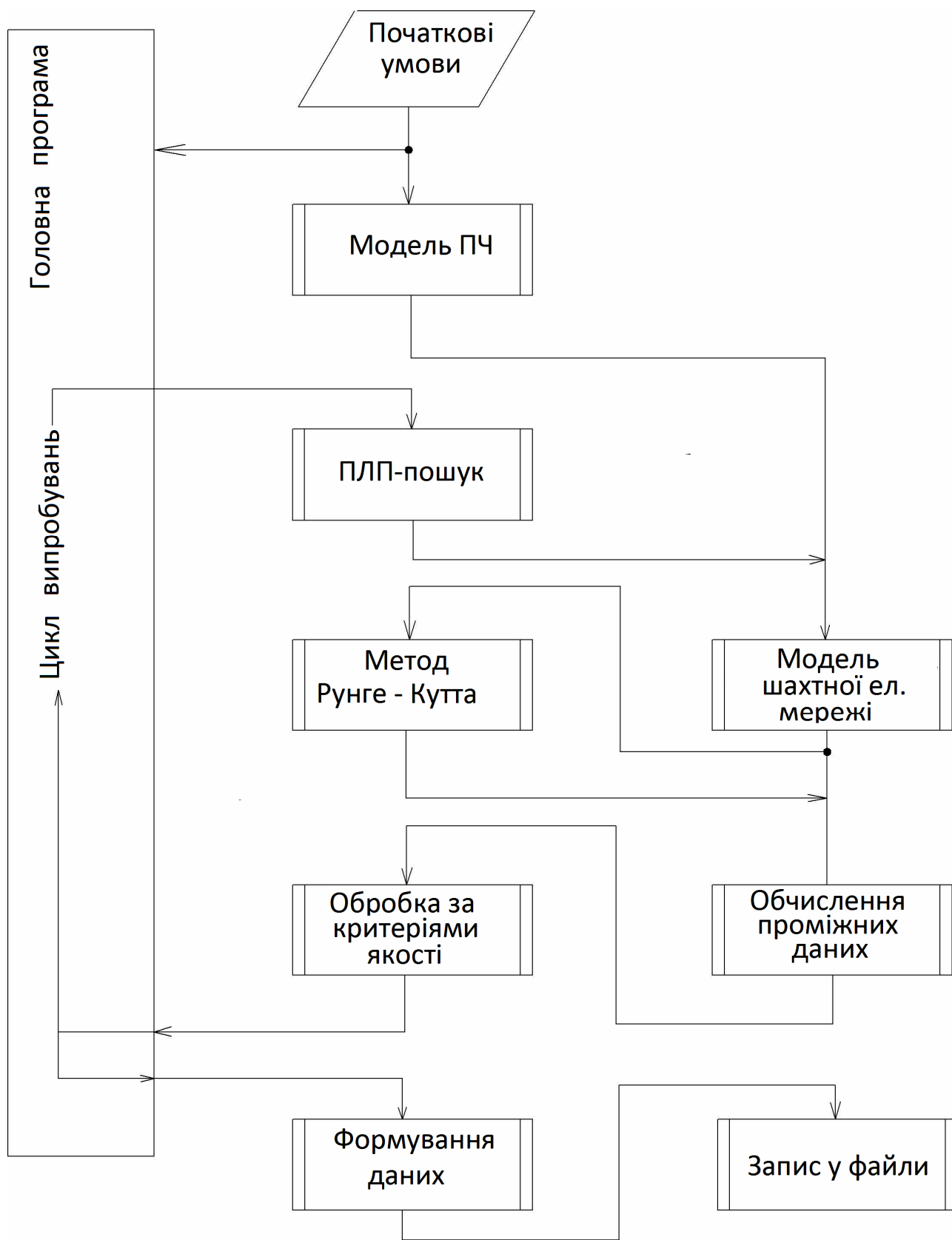
Таблиця 1 - Діючі значення однофазних струмів витоку на землю при опорі витоку рівному 1 кОм і лінійної робочої напруги мережі 660 В

Ємність мережі (на фазу), після перетворювача, мкФ	Діюче значення струму витоку на землю, мА, при частоті напруги на виході перетворювача, Гц					
	Несна частота 1 кГц			Несна частота 5 кГц		
	10	25	50	10	25	50
0.0005	75	74	72	91	89	87
0.001	98	96	95	120	118	117
0.005	110	107	105	124	123	120
0.01	160	155	155	170	170	168
0.025	184	180	180	190	188	187
0.05	210	205	204	215	214	213
0.075	224	223	220	234	232	231
0.1	245	243	242	250	249	248
0.2	268	268	267	270	268	267
0.3	272	270	268	272	269	268
0.4	270	270	269	270	269	269
0.5	269	268	268	269	268	267

Таблиця 1 - Діючі значення однофазних струмів витоку на землю при опорі витоку рівному 1 кОм і лінійної робочої напруги мережі 1140 В

Ємність мережі (на фазу), після перетворювача, мкФ	Діюче значення струму витоку на землю, мА, при частоті напруги на виході перетворювача, Гц					
	Несна частота 1 кГц			Несна частота 5 кГц		
	10	25	50	10	25	50
0.0005	132	135	130	141	144	142
0.001	139	138	138	142	145	145
0.005	168	167	165	170	169	167
0.01	211	209	206	215	212	210
0.025	230	228	226	235	232	230
0.05	260	257	255	261	258	257
0.075	289	285	284	290	288	286
0.1	346	340	325	347	342	330
0.2	380	375	348	379	375	347
0.3	382	378	350	382	377	349
0.4	381	378	348	380	378	350
0.5	380	375	347	380	377	348

Додаток Б
Алгоритм ПЛП - пошуку



ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ

1. Лейбов Р.М., Электрificazione подземных горных работ [учебн для студ. вузов] / Р. М. Лейбов, М.И. Озерной. – М.: Недра, 1972, - 464с.
2. Колосюк В.П. Защитное отключение рудничных электроустановок. / В.П. Колосюк. – М.: Недра, 1980. – 334 с.
3. Дзюбан В.С. Аппараты защиты от токов утечки в шахтных электрических сетях./ В.С. Дзюбан. - М.: Недра, 1982. -152с.
4. Вареник Е.А. Ограничения и защита от токов утечки в рудничных электроустановках напряжением 1200В: дис. кандидата техн. наук: 05.09.03 / Вареник Евгений Александрович.– Днепропетровск, 2004.–191 с.
5. Аппараты защиты от токов утечки рудничные для сетей напряжением до 1200 В. Общие технические условия. ГОСТ 22929-78 (СТ СЭВ 2309-80).
6. Маренич К.М. Електрообладнання технологічних установок гірничих підприємств: [підруч. для студентів вищих навч. закладів] / Маренич К.М., Калінін В.В., Товстик Ю.В., Лізан І.Я., Коломієць В.В. - Донецьк: ДонНТУ, Харків: УПА, 2009 .-372 с.
7. Дзюбан В.С. Взрывозащищенные аппараты низкого напряжения / В.С. Дзюбан. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 240 с
8. Дзюбан В.С. Резонансные напряжения в шахтных электрических сетях. / В.Дзюбан, Е. Вареник // Взрывозащищенное электрооборудование. Сборник научных трудов УкрВНИИВЭ.- Донецк, Юго-Восток, 2002. с.129-133.
9. Бикфорд Дж.П. Основы теории перенапряжений в электрических сетях / Мюлине Н., Рид Дж. Р.- М.: Энергоиздат, 1981.- 162 с.
10. Руководство по ревизии, наладке и испытанию подземных электроустановок шахт / [Чумаков В.А., Глухов М.С., Осипов Э.Р. и др.]; под ред. Дехтярева В.И. – М.: Недра, 1989. – 614 с.
11. Дзюбан В.С., Справочник энергетика угольной шахты / В.С. Дзюбан, И.Г. Ширнин, Б.Н. Ванеев, В.М. Гостищев; Под общ. ред. канд. техн. наук

Б.Н. Ванеева. – Изд. 2-е доп. и перераб. – Донецк; ООО «Юго-Восток, Лтд», 2001- Т.1: (Гл. 1-21). – 447 с; Т.2: (Гл. 22 - 44). – 440 с.

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

13. Автоматизований електропривод машин і установок шахт і рудників. Навчальний посібник для вузів / [К.М. Маренич, Ю.В. Товстик, В.В. Турупалов, С.В. Василюк, І.Я. Лізан]; під ред. К.М. Маренича. Донецьк, ДонНТУ, 2012.- 245 с.

14. Бабокин Г.И., Частотно-регулируемый электропривод механизмов подачи очистных комбайнов / Г.И. Бабокин, В.И.. - Горные машины и автоматика. №8, 2001.с. 38 – 40.

15. Товстик Ю.В. Проблемы защиты от утечек тока на землю распределительных сетей угольных шахт, с силовыми полупроводниковыми элементами / Ю.В. Товстик, В.Н. Савицкий // Гірнична електротехніка та автоматика.: Наук. техн. зб. – 2005. – Вип.. №74.-с.36-42

16. Щуцкий В.И. Повышение надежности и безопасности электромеханических систем с ПЧ / В.И. Щуцкий, Г.И. Бабокин, Ставцев В.А. – М.: Недра, 1996. -169с.

17. Белошистов А.И. Проблемы защиты от утечек тока на землю распределительных сетей угольных шахт, содержащих силовые полупроводниковые элементы. /А. Белошистов, В. Савицкий // Взрывозащищенное электрооборудование: Сб. науч. тр. УкрНИИВЭ. – Донецк: ООО «Юго-Восток, Лтд», 2004. – С. 78-83

18. Савицкий В.Н. Защита от токов утечки в комбинированных распределительных сетях угольных шахт / Савицкий В.Н., Стадник Н.И.- 13 с. http://ukrniive.com.ua/ru/article/current_leakage.htm.

19. Киампо Е.М. Токи утечки в комбинированной электрической сети горных машин / Е.М. Киампо, В.А. Коровкин // Изв. вузов. Горный журнал. – 1986. – N2. – С. 97-99
20. Danfoss, VLT6000 HVAC, Design guide SW 2.5, 2005.- 202 p.
21. S. Kwak, H.A. Toliyat. A Hybrid Converter System for High Performance Large Induction Motor Drives, IEEE Proc. APEC'04, vol.1, 2004.
22. Бронштейн И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев // 13-е изд. – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. – 544 с.
23. Эдуард Чекотовский. Графический анализ статистических данных в Microsoft Excel 2000.: - М.: Издательский дом "Вильямс", 2002. – 464 с.
24. Дубинин М.С. Исследование влияния LC-фильтра на емкостной ток утечки на землю в шахтной участковой сети с преобразователем частоты М.С. Дубинин. - Міжнар. конференція „Форум гірників-2007”. Дніпропетровськ, НГУ, 2007. - С. 236-240.
25. Макаренко Н.П. Сетевые преобразователи электроэнергии комплексов технических средств промышленных предприятий Н.П. Макаренко //Вісник УБЕНТЗ.-1999.-№1.-С.13-17.
26. Марше Ж. Операционные усилители и их применение. / Ж. Марше пер.с франц. Л., “Энергия”, 1974.
27. Маренич К.Н. Повышение эффективности компенсатора емкостной составляющей тока утечки на землю в электрических сетях с преобразователем частоты./ К.Н. Маренич, В.Н. Ставицкий, М.С. Дубинин // Гірничя електротехніка та автоматика.: Наук. техн. зб. – 2005. – Вип.. №73.-с.55-60.
28. Соболев И.М. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями / И.М. Соболев, Р.Б. Статников Р.Б.; - М., 1985, 112 с.
29. Keith H. Sueker, Power Electronics Design - A Practitioner's Guide. 2005, 250 p.
30. Доронина О.В. Оценка качества состояния изоляции присоединения собственных нужд кабель-двигатель в отключенном состоянии / О.В.Доронина,

Н.В. Гребченко // Электротехнические и электромеханические системы: Материалы студ. науч.-техн. конф., 28-30 апр. 2003г., Севастополь.:СевНТУ,2003.

31. Маренич К.Н. Исследование процессов компенсации емкостных токов утечки на землю в комбинированном электротехническом комплексе участка шахты. / К.Н. Маренич, М.С. Дубинин. - Наукові праці ДонНТУ. Серія „Гірничо-електромеханічна”. Вип. 14 (127), Донецьк, ДонНТУ, 2007 р, С. 167-174.

32. Розанов Ю.К. Основы силовой электроники./ Ю.К. Розанов - М.: Энергоатомиздат, 1992. – 296 с.

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

ДУБІНІН Сергій Васильович
МАРЕНИЧ Костянтин Миколайович

**АВТОКОМПЕНСАЦІЯ ЄМНІСНИХ СТРУМІВ ВИТОКУ
НА ЗЕМЛЮ В МЕРЕЖІ З ПЕРЕТВОРЮВАЧЕМ
ЧАСТОТИ КОНВЕРТУВАННЯМ НЕГАТИВНОГО
ОПОРУ**

Монографія

Коректор *І.В. Ковальова*
Редакційно-технічне оформлення, комп'ютерна верстка *С.В. Дубінін*
Дизайн обкладинки *К.М. Маренич*

Підп. до друку 22.03.2013. Формат 60x84/16.
Папір PolSpeed. Друк різнографія.
Ум. друк. арк. 6,05. Обл.-вид. арк. 6,5.
Тираж 300 прим. Замовлення № 280.

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