

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

ПЕТРИЧЕНКО АНДРІЙ АНДРІЙОВИЧ

УДК 621.316.933.8:621.316.14

**МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ОБМЕЖЕННЯ СТРУМІВ ВИТОКУ НА ЗЕМЛЮ
В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗАЛІЗОРУДНИХ ШАХТ**

Спеціальність 05.09.03 – Електротехнічні комплекси та системи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Вінниця – 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у ДВНЗ «Криворізький національний університет» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Сінчук Олег Миколайович,
ДВНЗ «Криворізький національний університет»,
завідувач кафедри автоматизованих електромеханічних систем в промисловості та транспорті.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Кутін Василь Михайлович,
Вінницький національний технічний університет,
завідувач кафедри електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті.

доктор технічних наук, професор
Колосюк Володимир Петрович,
Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського,
професор кафедри безпеки життєдіяльності.

Захист відбудеться «17» березня 2017 р. о 10:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 05.052.05 у Вінницькому національному технічному університеті за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ГНК, ауд. 210.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Вінницького національного технічного університету за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95.

Автореферат розісланий «16» лютого 2017 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

В. В. Кулик

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Енергетика підприємств залізорудної промисловості України є важливою складовою впливу на рівень собівартості видобуваної залізорудної сировини (більше 30%), яка, в свою чергу, є одним із основних джерел поповнення валютних запасів нашої країни. Майже 90% загального обсягу енергоспоживання цих підприємств складають електрозатрати. Тому для підвищення енергоефективності видобутку залізорудної сировини необхідно зосередитися на вирішенні задачі підвищення саме електроефективності.

Між тим, для вищенаведених видів підприємств, що відносяться до категорії підприємств з максимально підвищеною безпекою функціонування і де системи електропостачання виконуються виключно з ізольованим режимом нейтралі трансформаторів, електроефективність не може бути достатньою без вирішення, з одного боку, проблеми надійності електропостачання електромеханічних систем та комплексів, а з іншого – без забезпечення електробезпеки гірників, що обслуговують ці комплекси.

Слід підкреслити, що особливо це стосується дільничних мереж напругою до 1000 В, як сегментів систем електропостачання всіх видів залізорудних підприємств. Так, наприклад, в одному з видів залізорудних підприємств – залізорудних шахтах, в останні 5-ть років кількість хибних відключень технологічного електроустаткування сягає в середньому 2-3 рази за робочу зміну з тривалістю відсутності живлення 90-100 хв. Водночас, майже щорічно зростає кількість уражень гірників електричним струмом з летальними наслідками. Все це є результатом хибних спрацювань чи навпаки – не спрацювань відповідних пристроїв захисного відключення (ПЗВ) або так званих апаратів захисту від витоків струму на землю і обумовлено масовим застосуванням технологічного обладнання з електроприводами на базі імпульсних та частотних перетворювачів електричної енергії, оскільки в результаті цього звичайна дільнична мережа промислової частоти перетворюється фактично в комбіновану, яка складається із ділянок змінного струму промислової частоти, ділянок постійного струму та ділянок змінного струму змінної частоти, відмінної від промислової. Така «гамма» постійно змінюваних частот – гармонік струму та напруги створює в даних мережах систем електропостачання залізорудних шахт додатковий дестабілізуючий вплив на захисні характеристики ПЗВ, що негативно впливає на вищенаведений комплекс ефективності їх функціонування.

Більш того, аналіз процесів щодо формування струмів витоку на землю в комбінованих електричних мережах засвідчив, що короточасні струми витоку можуть набувати значень, котрі значно перевищують їх нормований рівень, а існуючі методи та засоби їх обмеження мають ряд недоліків або навіть є зовсім непридатними для використання в мережах, що аналізуються.

Саме тому обґрунтування та розроблення ефективної системи компенсації ємнісних струмів витоку на землю в сегментах комбінованих електричних мереж напругою до 1000 В сучасних систем електропостачання залізорудних шахт з метою підвищення ефективності функціонування ПЗВ

в напрямку мінімізації хибних відключень електроприймачів та забезпечення електробезпеки є актуальною науковою задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота відповідає пріоритетному напрямку розвитку науки і техніки «Енергетика та енергоефективність» (закону України №2519-VI від 09.09.2010), Загальнодержавній соціальній програмі покращення стану безпеки, гігієни праці та виробничого середовища на 2014 - 2018 роки та виконувалась в рамках держбюджетних робіт «Розробка комплексу заходів з енергозбереження на підприємствах залізорудної промисловості» (№ державної реєстрації 0114U003457), «Розробка енергозберігаючих заходів на підприємствах гірничодобувної промисловості» (№ державної реєстрації 0115U003180). Автор брав участь у виконанні держбюджетних науково-дослідних робіт як виконавець.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є розроблення методів та засобів обмеження до нормованого рівня короточасних струмів витоку на землю в сегментах комбінованих електричних мереж напругою до 1000 В сучасних систем електропостачання залізорудних шахт шляхом компенсації ємнісних струмів витоку.

Для досягнення мети дисертаційної роботи поставлені та розв'язані наступні наукові задачі досліджень:

- оцінювання рівня ефективності функціонування та впливу на працездатність апаратів захисту від витоків струму на землю, що нині експлуатуються, комплексу дестабілізуючих факторів комбінованих мереж напругою до 1000 В сучасних систем електропостачання залізорудних шахт;
- дослідження електричних параметрів ізоляції відносно землі розподільчих електричних мереж сучасних вітчизняних залізорудних шахт;
- розроблення вимірювальної функції «оперативний струм – параметри ізоляції мережі та витоків струму» апарата захисту, що працює на змінному оперативному струмі в умовах комбінованих електричних мереж;
- теоретичне обґрунтування методу і розроблення регулятора автоматичної компенсації ємнісних струмів витоку на землю для комбінованих електричних мереж напругою до 1000 В сучасних систем електропостачання залізорудних шахт та розроблення методу вимірювання ємності ізоляції фаз комбінованих електричних мереж відносно землі під робочою напругою.

Об'єкт дослідження – електромагнітні процеси формування струмів витоку на землю в комбінованих мережах залізорудних шахт.

Предмет дослідження – методи та засоби обмеження короточасних струмів витоку на землю в комбінованих мережах залізорудних шахт.

Методи дослідження. Для аналізу та вирішення поставлених завдань використовувались такі методи: системний аналіз – для узагальнення раніше виконаних досліджень щодо підвищення надійності електропостачання та забезпечення електробезпеки гірничих робіт залізорудних підприємств; загальна теорія електричних кіл – для складання заступних схем компенсуючого дроселя, розрахунку короточасних струмів витоку на землю та отримання виразів вимірювальної функції змінного оперативного струму;

методи математичної статистики – для оцінювання результатів експериментальних досліджень електричних параметрів ізоляції відносно землі розподільчих електричних мереж вітчизняних залізорудних шахт; математичне моделювання – для дослідження точності вимірювання і контролю електричних параметрів ізоляції відносно землі комбінованих електричних мереж змінним оперативним струмом; фізичне моделювання – для дослідження ефективності запропонованої системи автоматичної компенсації ємнісних струмів витоку.

Наукова новизна одержаних результатів:

- *вперше* отримано статистичні характеристики електричних параметрів ізоляції відносно землі розподільчих мереж сучасних систем електропостачання залізорудних шахт, що дозволяє використовувати отримані результати в якості вихідних даних для розроблення нових пристроїв захисного відключення, призначених для використання в підземних гірничих виробках вищезгаданих вітчизняних залізорудних підприємств;

- *вперше* обґрунтовано систему захисту від витоків струму на землю для комбінованих електричних мереж напругою до 1000 В сучасних систем електропостачання залізорудних шахт, де в якості оперативного струму використано змінний струм зниженої частоти, а джерело оперативної напруги разом з вимірювальним шунтом підключається до мережі через статичний компенсуючий дросель та ємнісний фільтр приєднання, налаштовані в резонанс на оперативній та промисловій частотах, що дозволяє підвищити надійність електропостачання та забезпечити електробезпеку гірників;

- *розроблено* новий метод вимірювання ємності ізоляції фаз комбінованих електричних мереж під робочою напругою, що на відміну від відомих, забезпечує пропорційну вимірювальну функцію «оперативний струм - ємність ізоляції мережі» і тим самим дозволяє виконувати з необхідним рівнем точності резонансне налаштування статичного компенсуючого дроселя у всьому робочому діапазоні ємності ізоляції комбінованих електричних мереж;

- *удосконалено* метод автоматичної компенсації ємнісних струмів витоку на землю в комбінованих електричних мережах напругою до 1000 В з застосуванням статичного компенсуючого дроселя, що проявляється у його резонансному налаштуванні на ємність середини встановлених інтервалів робочого діапазону ємності ізоляції комбінованих електричних мереж та дозволяє обмежувати до нормованого рівня короточасні струми витоку.

Практичне значення одержаних результатів полягає в розробленні методики оцінювання захисних властивостей і оптимізації принципів схем апаратів захисту від витоків струму та реалізації цих принципів в конкретне рішення схеми пристрою автоматичної компенсації ємнісних струмів витоку, що забезпечує ефективне зниження короточасних струмів витоку до нормованого рівня в усьому робочому діапазоні ємності ізоляції комбінованих мереж напругою до 1000 В систем електропостачання залізорудних шахт.

Результати досліджень передані для практичної реалізації спеціалізованій організації по розробленню ПЗВ ТОВ «Електрозахист» (м. Харків) (акт впровадження від 23.01.2016 р.), втілюються у практику роботи ПАТ «Криворізький залізорудний комбінат» (акт впровадження від

05.01.2016 р.), а також використовуються в навчальному процесі ДВНЗ «Криворізький національний університет» під час проведення лекційних та лабораторних занять (акт впровадження від 29.08.2016 р.).

Особистий внесок здобувача полягає у формулюванні мети та основних завдань досліджень, отриманні захисних характеристик апаратів захисту, що працюють на постійному оперативному струмі в умовах комбінованих мереж, збиранні, обробці та аналізі результатів досліджень електричних параметрів ізоляції розподільчих мереж, розробленні системи захисту від витоків струму на землю для комбінованих електричних мереж, удосконаленні методу та розробленні регулятора автоматичної компенсації ємнісних струмів витоку.

Наукові положення, які містяться у дисертації, одержані автором самостійно. У публікаціях, що видані у співавторстві, автору належить: [14] – встановлені властивості комбінованих електричних мереж залізородних шахт Криворіжжя; [3] – проаналізовано умови досягнення захисних рівнів під час використання апаратів захисту від витоків струму на землю; [7,8] – встановлені захисні характеристики апаратів захисту типу АЗАК, АЗУР, САЗУ в умовах комбінованих електричних мереж; [1] – обґрунтовано необхідність розробки апаратів захисту від витоків струму, що працюють на змінному оперативному струмі; [9] – виконано статистичний аналіз електричних параметрів ізоляції розподільчих мереж залізородних шахт Криворіжжя; [15] – розроблено метод формування захисних характеристик апаратів захисту, що працюють на змінному оперативному струмі в умовах комбінованих електричних мереж; [16] – встановлено точність контролю параметрів ізоляції комбінованих електричних мереж змінним оперативним струмом; [6] – розроблено спосіб функціональних перетворень вимірювальної функції змінного оперативного струму; [5, 11, 12, 17] – розроблено систему автоматичної компенсації ємнісних струмів витоку на землю для комбінованих електричних мереж; [2, 4] – розроблено принципіві схеми регулятора автоматичної компенсації ємнісних струмів витоку та досягнута пропорційність вимірювальної функції «оперативний струм – ємність ізоляції мережі» пристроїв вимірювання ємності ізоляції фаз комбінованих електричних мереж під робочою напругою.

Результати досліджень, що викладені у [1–17], були отримані у ДВНЗ «Криворізький національний університет».

Апробація результатів дисертації. Основні положення, наукові та практичні результати, отримані в дисертаційній роботі, доповідалися та одержали схвалення на міжнародних науково-технічних конференціях: «Проблеми енергоефективності та енергозбереження» (м. Кіровоград, 2012 р.); Міжнародному форумі - конкурсі молодих вчених «Проблеми недриспользования» (Росія, м. Санкт-Петербург, 2014 р.); «Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика» (м. Кременчук, 2014 р., 2016 р.); «Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації» (м. Кременчук, 2014-2016 рр.); «Сталий розвиток промисловості та суспільства» (м. Кривий Ріг, 2014-2016 рр.); «SMART-технології в енергетиці і електроніці» (м. Херсон, 2016 р.); «Проблеми сучасної електротехніки» (м. Київ, 2016 р.).

Публікації. Основні наукові результати дисертаційної роботи опубліковані у 17 наукових працях, у тому числі: 6 – у фахових виданнях України, 3 – у закордонних виданнях (Російська Федерація), 7 – у матеріалах конференцій, а також в отриманому патенті України на корисну модель.

Структура і обсяг дисертаційної роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел (123 найменувань) і шести додатків. Основний зміст викладений на 156 сторінках друкованого тексту, містить 55 рисунків, 25 таблиць. Загальний обсяг дисертації – 201 сторінка.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі дана загальна характеристика роботи, обґрунтовано актуальність обраної теми, сформульовано мету та наукові задачі досліджень, вказано на зв'язок роботи з науково-дослідними державними програмами та темами НДР. Наведено складові наукової новизни, практичного значення одержаних результатів та стан їх апробації.

У першому розділі наведено результати аналізу стану безперебійності електропостачання та електробезпеки комбінованих електричних мереж напругою до 1000 В сучасних систем електропостачання залізничних шахт (КЕМ). В розділі проаналізовано роботи вітчизняних та зарубіжних вчених, які зробили вагомий внесок у вирішення проблеми забезпечення надійності електропостачання та електробезпеки гірників під час експлуатації електроустаткування в КЕМ.

Показано, що кількість уражень гірників електричним струмом та нештатних відключень електроприймачів, що в свою чергу приводять до технологічних простоїв електрообладнання, в КЕМ щорічно збільшується.

Встановлено, що короткочасні струми витоку, які виникають в КЕМ, можуть набувати значень, котрі значно перевищують їх нормований рівень в 100 мА, а існуючі методи та засоби їх обмеження мають низку недоліків або є зовсім непридатними для використання в умовах КЕМ.

Виконаний аналіз дозволив формалізувати сутність та цілісність наукової задачі, визначити мету і конкретні задачі досліджень.

Другий розділ присвячений обґрунтуванню необхідності використання змінного оперативного струму в апаратах захисту від витоків струму на землю (АЗ) для КЕМ. Проаналізовано захисні рівні, які можливо досягнути за допомогою використання АЗ та наведено результати експериментальних досліджень ефективності функціонування АЗ, що працюють на постійному оперативному струмі і нині використовуються в КЕМ.

Показано, що захисна дія, яка створюється під час використання АЗ, може бути досягнута за допомогою вибору різних значень уставок реле захисту, необхідних для їх спрацювання. Таким чином можливо досягнути різних захисних рівнів, що характеризуються значенням найбільшого струму, який протікатиме крізь тіло людини у випадку її дотику до струмовідних частин електроустановок.

В розділі визначено, що АЗ, котрі призначені реалізовувати *максимальний рівень захисту*, тобто повинні запобігати навіть можливості протікання через тіло людини струму витoku I_l , що перевищує його довготривале допустиме значення $I_{дов.д} = 25\text{мА}$, будуть спрацьовувати під час першого ж включення КЕМ з низьким рівнем опору ізоляції.

Якщо ж небезпека ураження електричним струмом $I_l \leq I_{дов.д} = 25\text{мА}$ може бути попереджена достатньою швидкістю відключення мережі, то достатньо обмежитись вибором значень уставок АЗ, котрі будуть здійснювати *мінімальний рівень захисту* якщо виконуються вимоги:

$$g'_e \leq g'_{в.зр} = I_{дов.д} / U_\phi, \quad (1)$$

$$\sqrt{G^2 + B^2} \leq I_{к.д} / U_\phi = Q_{дон} / (t_l \cdot U_\phi), \quad (2)$$

де g'_e – провідність однофазного витoku струму в каналі пробую ізоляції; $g'_{в.зр}$ – граничне значення провідності каналу однофазного витoku струму, коли $I_{дов.д} = 25\text{мА}$; U_ϕ – фазна напруга мережі; G – активна провідність ізоляції фаз мережі відносно землі; B – ємнісна провідність фаз мережі відносно землі; $I_{к.д}$, $Q_{дон}$ – короткочасно допустимі значення струму витoku і кількість електрики, що проходять через мінімальний розрахунковий опір тіла людини $R_l = 1000\text{Ом}$ під час критичного опору ізоляції і ємності ($0 - 3,0\text{мкФ}$) мережі в періоди дії напруги мережі і ЕРС вибігу електродвигунів t_l , що визначає загальний можливий час перебування людини під дією електричного струму.

Виконанням умови (1) запобігається можливість перевищення $I_{дов.д} \leq 25\text{мА}$, а умови (2) – не перевищення $I_{к.д}$ за нормами електробезпеки.

Розрахунок значень уставок захисту, що забезпечуватиме *мінімальний рівень захисту*, здійснюється на основі нормованих ГОСТ 12.1.038-82 значень струмів $I_{дов.д}$ і $I_{к.д}$ за вимогами:

$$I_l \leq I_{дов.д}, \quad g'_{в.зр} \leq g'_{уст} = I_{дов.д} / U_\phi, \quad (3)$$

$$t_{в.м} \leq 0,2\text{с}, \quad I_{к.д(0,2)} \leq 100\text{мА}, \quad Q_{дон} = \int_0^{t_l} i_l(t) dt \leq 50\text{мА} \cdot \text{с}. \quad (4)$$

Виконані дослідження з оцінювання виконання умов досягнення мінімального рівня захисту показали, що існуючі АЗ, які працюють на постійному оперативному струмі, принципово не можуть забезпечити мінімальний рівень захисту в КЕМ, оскільки їх захисні характеристики в 2-7 разів відрізняються від необхідної характеристики, що свідчить про функціональні відмови АЗ або про значний «перезахист» електричних мереж, що є причиною нештатних відключень електроустаткування і смертельного електротравматизму в КЕМ.

Встановлено, що для контролю активного опору ізоляції і витоків струму в КЕМ необхідно використовувати змінний оперативний струм непромислової частоти в АЗ, що принципово зможе забезпечити виконання умови (1) досягнення мінімального рівня захисту. Для цього обов'язкового вирішення

потребує задача усунення впливу ємності ізоляції мережі на захисні характеристики таких АЗ, оскільки вони будуть вимикати мережу навіть коли опір ізоляції буде набувати нескінченно великого значення. Це обумовлене тим, що ємнісний опір оперативному струмові фактично виявляється значно меншим за значення уставки спрацьовування АЗ (1). Тому виникає необхідність розроблення уніфікованої системи автоматичної компенсації ємнісних струмів витоку на землю для КЕМ, що забезпечить виконання умови (2) досягнення мінімального рівня захисту.

У третьому розділі викладені результати досліджень щодо розроблення системи захисту гірників від витоків струму на землю в КЕМ, що працює на змінному оперативному струмі з пропорційною вимірювальною функцією АЗ, а також результати дослідження рівня точності вимірювання та контролю параметрів ізоляції і витоків струму в КЕМ змінним оперативним струмом.

Розроблений та рекомендований, як базовий, авторський варіант структурної схеми захисту від витоків струму на землю приведений на рис. 1.

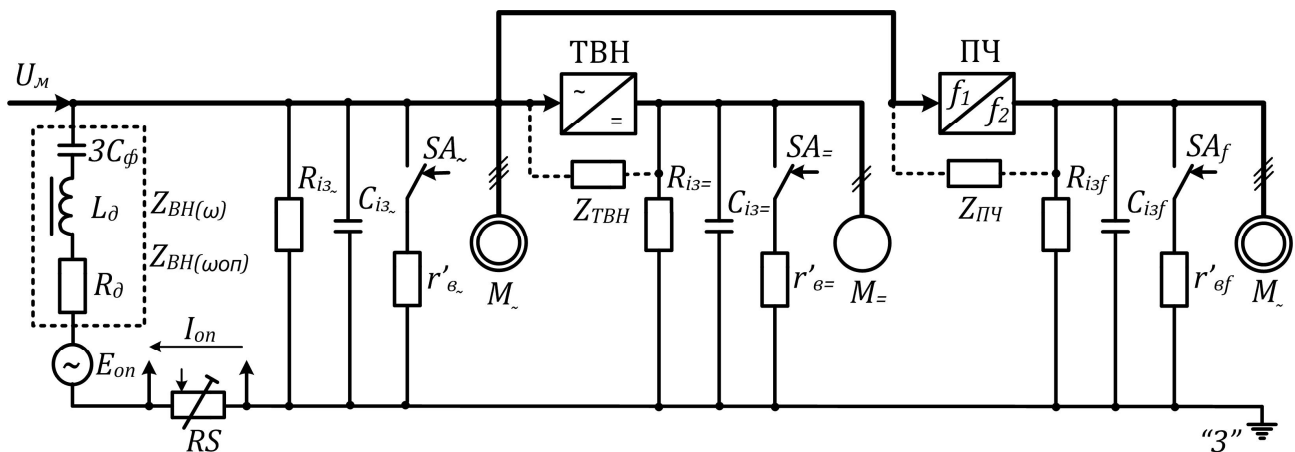


Рисунок 1 – Структурна схема захисту від витоків струму на землю для комбінованих електричних мереж з апаратом захисту, що працює на змінному оперативному струмі: *ТВН* – тиристорний випрямляч напруги; *ПЧ* – перетворювач частоти; *M* – електричні двигуни; U_M – напруга мережі; "3" – заземлення мережі; $r'_{e~}, r'_{e=}, r'_{ef}$ – опір однофазного (однополюсного) витоку; $SA_{~}, SA_{=}, SA_f$ – вимикачі, що імітують дотик людини; $Z_{BH(\omega)}, Z_{BH(\omega_{on})}$ – внутрішній опір апарата захисту на промисловій та оперативній частотах; $Z_{ТРН}, Z_{ПЧ}$ – опір перетворювачів енергії змінному оперативному струму; *RS* – вимірювальний шунт; E_{on}, I_{on} – параметри джерела змінного оперативного струму; $R_{i3~}, C_{i3~}, R_{i3=}, C_{i3=}, R_{i3f}, C_{i3f}$ – еквівалентні опори ізоляції та ємності на відповідних ділянках комбінованої мережі; $3C_{\phi}$ – еквівалентна ємність фільтра приєднання; R_{δ}, L_{δ} – активний опір та індуктивність компенсуючого дроселя.

Встановлено, що для переходу з постійного на змінний оперативний струм вимірювальна функція умов спрацьовування захисту $I_{on(\sim)}$ стає залежною і від реактивних опорів, що присутні між фазами мережі та землею (рис. 1):

$$I_{on(\sim)} = f(R_{i3}; C_{i3}; r_{\epsilon}; \omega_{on}; L_{\delta}; Z_{BH}), \quad (5)$$

де $R_{i3}; C_{i3}$ – активний та реактивний опір ізоляції фаз комбінованої мережі; r_{ϵ} – активний опір однофазного витоку; ω_{on} – частота оперативного струму; L_{δ} – індуктивність компенсуючого дроселя; Z_{BH} – внутрішній опір апарата захисту.

Для досягнення пропорційності вимірювальної функції (5), необхідної для вимірювання з мінімальною похибкою і контролю параметрів ізоляції КЕМ, усунення впливу компенсуючого дроселя L_{δ} та зменшення впливу перетворювачів енергії на неї, як результат досліджень пропонується джерело змінної оперативної напруги зниженої частоти E_{on} з вимірювальним шунтом RS включити в вітку компенсуючого дроселя R_{δ}, L_{δ} з ємнісним фільтром $3C_{\phi}$ його приєднання до мережі.

Для цього параметри компенсуючого дроселя і фільтра приєднання визначаються так, щоб на оперативній частоті вони утворювали послідовний коливальний контур з мінімальним опором оперативному струму, а на промисловій – паралельний коливальний контур із заданою ємністю ізоляції мережі відносно землі з максимальним опором струму витоку:

$$Z_{BH(\omega)} = R_{\delta} + j(\omega L_{\delta} - (1/\omega \cdot 3C_{\phi})) = 1/\omega \cdot C_{i3(рез)}, \quad (6)$$

$$Z_{BH(\omega_{on})} = R_{\delta} + j(\omega_{on} L_{\delta} - (1/\omega_{on} \cdot 3C_{\phi})) \approx R_{\delta}. \quad (7)$$

Оскільки на оперативній частоті компенсуючий дросель та ємнісний фільтр приєднання знаходяться в режимі резонансних напруг і складають внутрішній опір АЗ - $Z_{BH(\omega_{on})}$, то його значення на резонансній частоті буде практично рівним активному опорю компенсуючого дроселя R_{δ} .

Розв'язавши систему рівнянь (6) і (7) були встановлені значення індуктивності дроселя L_{δ} і ємності фільтра приєднання $3C_{\phi}$:

$$L_{\delta} = \frac{1}{\omega_{on}^2 \cdot 3C_{\phi}}; \quad 3C_{\phi} = \left[\left(\frac{\omega}{\omega_{on}} \right)^2 - 1 \right] \cdot C_{i3(рез)}. \quad (8)$$

З урахуванням цих встановлених значень $3C_{\phi}$ та L_{δ} , а також спрощення вимірювальної функції (5) отримано комплексний вираз для визначення оперативного струму:

$$\dot{I}_{on} = \frac{\dot{E}_{on}}{R_{\delta} + 1/(g_{i3(m)} + g_{(\epsilon)} + jb_{C_{i3(m)}})} \approx \dot{E}_{on}(G_m + jb_{C_{i3(m)}}), \quad (9)$$

де $g_{i3(m)} = g_{i3(\sim)} + g_{i3(=)} + g_{i3(f)}$ – сумарна провідність ізоляції фаз всіх ділянок комбінованої мережі відносно землі; $b_{C_{i3(m)}} = \omega_{on}(C_{i3(\sim)} + C_{i3(=)} + C_{i3(f)})$ – сумарна ємнісна провідність ізоляції фаз всіх ділянок комбінованої мережі на оперативній частоті; $G_m = g_{i3(m)} + g_{(\epsilon)}$ – активна провідність ізоляції фаз мережі відносно землі; $g_{(\epsilon)}$ – провідність однофазного витоку; $\dot{E}_{on} = E_{on(m)} \cdot \sin(\omega_{on} \cdot t)$ – джерело змінного оперативного струму непромислової частоти.

В умовах спрацювання АЗ значення опору дроселя R_D фактично буде на порядок меншим за значення уставки (1), тому у виразі (9) ним можна знехтувати без значних похибок у кінцевому результаті. Після цього можливо виконати розподіл вимірювальної функції на активну і реактивну складові:

$$I_{on(a)} = E_{on} \cdot G_m = E_{on} (g_{iz(\sim)} + g_{iz(=)} + g_{iz(f)} + g'_v), \quad (10)$$

$$I_{on(p)} = E_{on} \cdot b_{C_{iz(m)}} = E_{on} \cdot \omega_{on} (C_{iz(\sim)} + C_{iz(=)} + C_{iz(f)}). \quad (11)$$

Аналіз виразів (10) і (11) свідчить, що вимога пропорційності вимірювальної функції виконана, оскільки виключено вплив компенсуючого дроселя на умови спрацювання захисту.

З метою перевірки правильності обраного технічного рішення для досягнення пропорційності вимірювальної функції були проведені експериментальні дослідження щодо встановлення точності вимірювання і контролю параметрів ізоляції та витоків струму в КЕМ.

Для цього першочергово були проведені дослідження щодо встановлення діапазонів зміни електричних параметрів розподільчих електричних мереж відносно землі шахт Криворізького залізорудного басейну (ш. Батьківщина, ш. Гвардійська, ш. Жовтнева, ш. Леніна, ш. Артем-1, ш. Артем-2), необхідних для прийняття їх в якості реальних вихідних даних (рис. 2).

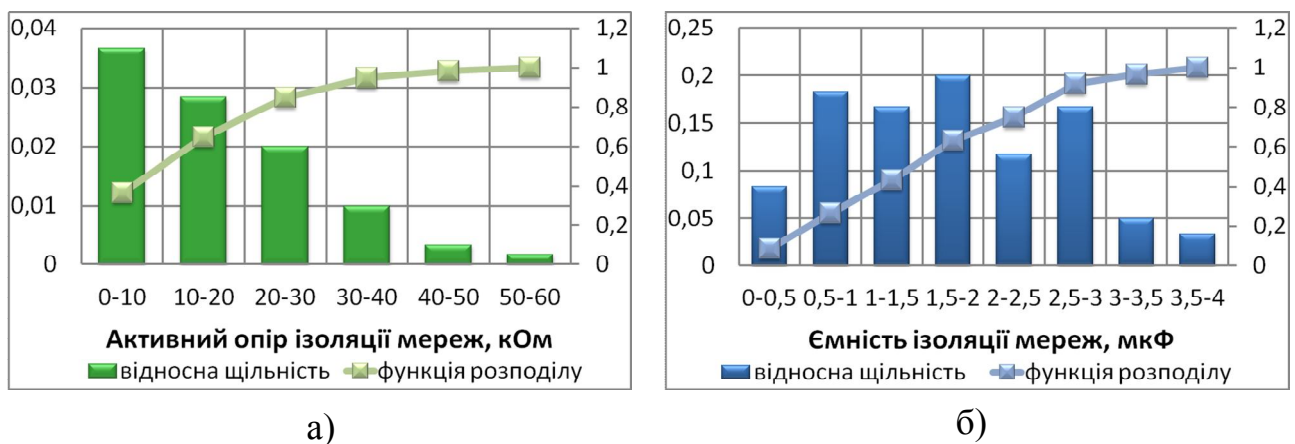


Рисунок 2 - Функція і щільність розподілу активного опору (а) та ємності (б) ізоляції розподільчих електричних мереж

Аналіз і оцінка отриманих результатів досліджень електричних параметрів ізоляції відносно землі розподільчих мереж дозволив встановити їх стійкі рівні (табл. 1), а встановлений коефіцієнт кореляції $R_{R,C} = -0,566$ свідчить про середній взаємозв'язок між ємністю та активним опором ізоляції в розподільчих електричних мережах залізорудних шахт.

Таблиця 1 – Стійкі рівні електричних параметрів розподільчих мереж залізорудних шахт Криворіжжя

Параметр ізоляції	min	max	Стійкий рівень
Активний опір, кОм	3,94	52,2	4,0 – 30,0
Ємність, мкФ	0,235	3,72	0,5 – 3,0

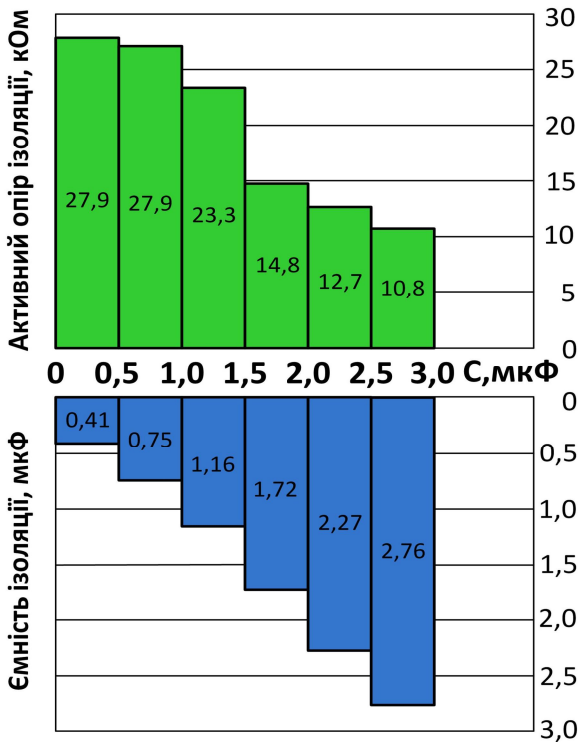


Рисунок 3 – Розподіл активного опору і ємності ізоляції по інтервалах робочого діапазону ємності розподільчих мереж

перевищувала 10%, а також дозволяє мінімізувати гармонічний вплив, який створюють напівпровідникові перетворювачі енергії на вимірювальну функцію $I_{on(-)}$, і тому рекомендується для використання в АЗ, що працюють на змінному оперативному струмі.

У **четвертому** розділі наведені результати досліджень з удосконалення методу автоматичної компенсації ємнісних струмів витоку на землю в КЕМ, розроблення регулятора автоматичної компенсації ємнісних струмів витоку та розроблення методу вимірювання ємності ізоляції мережі під робочою напругою для резонансного налаштування статичного компенсуючого дроселя.

Розглядаючи принцип забезпечення мінімального рівня електробезпеки, встановлено, що в КЕМ короточасні струми витоку на землю не обмежуються до нормованого ГОСТ 12.1.038-82 рівня у випадку відсутності компенсації ємнісної складової струмів витоку. Умовою повної компенсації ємнісних струмів витоку є: $\omega C_{із(м)} = 1 / \omega L_{др}$. Сила струму витоку I_{ϵ} у разі використання ідеального компенсатора без втрат та активній провідності ізоляції, що дорівнює нулю складає:

$$I_{\epsilon} = U_{\phi} / \sqrt{R_{\epsilon}^2 + \frac{1}{\omega^2 (C_{із(м)} - C_{н})^2}}, \quad (12)$$

де R_{ϵ} – опір однофазного витоку; $C_{із(м)}$ – значення ємності ізоляції фаз мережі; $C_{н}$ – ємність ізоляції фаз мережі, на яку налаштований компенсатор.

Також в ході досліджень вперше було встановлено статистичні характеристики електричних параметрів ізоляції розподільчих мереж залізородних шахт, які доцільно використовувати в якості вихідних даних для розроблення нових ПЗВ (рис. 3).

Аналіз отриманих результатів щодо дослідження точності вимірювання і контролю параметрів ізоляції КЕМ відносно землі змінним оперативним струмом дозволив зробити висновок, що запропонований метод досягнення пропорційності вимірювальної функції змінного оперативного струму зниженої частоти $I_{on(-)}$ в умовах КЕМ, оснований на включенні джерела оперативної напруги з вимірювальним шунтом у вітку компенсуючого дроселя з ємнісним фільтром приєднання, є прийнятним, оскільки похибка під час вимірювання параметрів ізоляції КЕМ не

Аналізуючи вираз (12), встановлено, що статичні компенсатори, які мають фіксоване налаштування на визначену ємність ізоляції мережі, можуть забезпечити зниження ємнісних струмів витоку на землю лише у випадку, коли значення ємності ізоляції близькі до значення, на яке налаштований компенсатор (рис. 4).

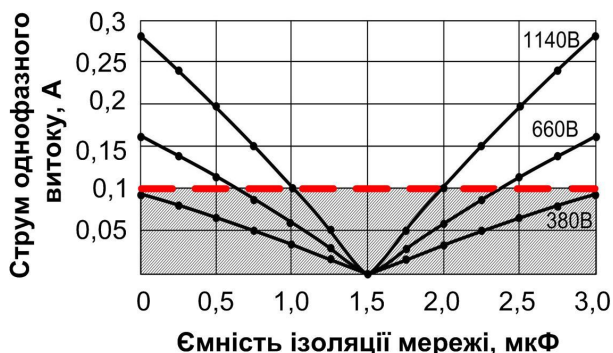


Рисунок 4 – Залежність струму (12) в каналі однофазного витоку опором 1 кОм під час підключення статичного компенсатора ($R_{др} = 0$), налаштованого на ємність 1,5 мкФ

Використання статичного компенсуючого дроселя забезпечує обмеження короткочасного струму до нормованого рівня в 100 мА в межах усього робочого діапазону ємності ізоляції лише в КЕМ напругою 380 В, тому використання таких дроселів в КЕМ напругою вище 380 В потребує подальшого розподілу робочого діапазону ємності ізоляції на інтервали та налаштування дроселя на ємність середини цих інтервалів. Згідно з цим статичний компенсуючий дросель необхідно виконувати з відпайками котушки.

Цей висновок був покладений в основу авторської розробки удосконаленого методу автоматичної компенсації ємнісних струмів витоку на землю в КЕМ.

Даний метод оснований на по-інтервальному обмеженні статичним компенсуючим дроселем короткочасних струмів витоку на землю. В межах заданих інтервалів робочого діапазону ємності ізоляції КЕМ короткочасні струми витоку на землю не перевищують їх нормоване значення завдяки створенню статичним дроселем коливального контуру з ємністю середини цих інтервалів.

Для визначення необхідного інтервалу, в якому знаходиться поточне значення ємності ізоляції мережі, на неї під робочою напругою накладають змінний оперативний струм зниженої частоти. Після цього виконується перемикання витків статичного компенсуючого дроселя для створення коливального контуру з ємністю середини визначеного інтервалу.

В ході подальших досліджень встановлено, що для робочого діапазону ємності ізоляції КЕМ (0-3,0 мкФ) мінімальна кількість інтервалів для забезпечення обмеження короткочасних струмів витоку до нормованого рівня по мережах складає (рис. 5): 1) мережа 380 В – один інтервал; 2) мережа 660 В – два інтервали (0-1,5 мкФ та 1,5-3,0 мкФ); 3) мережа 1140 В – три інтервали (0-1,0 мкФ, 1,0-2,0 мкФ та 2,0-3,0 мкФ).

Згідно запропонованого методу обмеження короткочасних струмів витоку на землю до нормованого рівня та системи захисту від витоків струму на землю для КЕМ розроблено регулятор автоматичної компенсації ємнісних струмів витоку на землю. Блок-схема регулятора приведена на рис. 6.

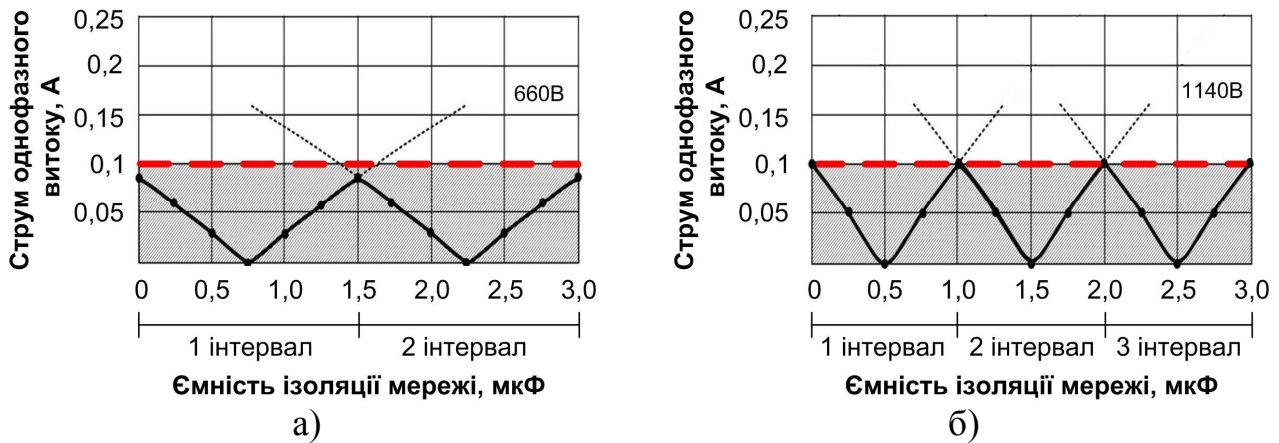


Рисунок 5 – Залежність струму (12) в каналі однофазного витоку опором 1 кОм під час розподілу робочого діапазону ємності ізоляції на інтервали в комбінованій електричній мережі напругою 660 В (а) та 1140 В (б)

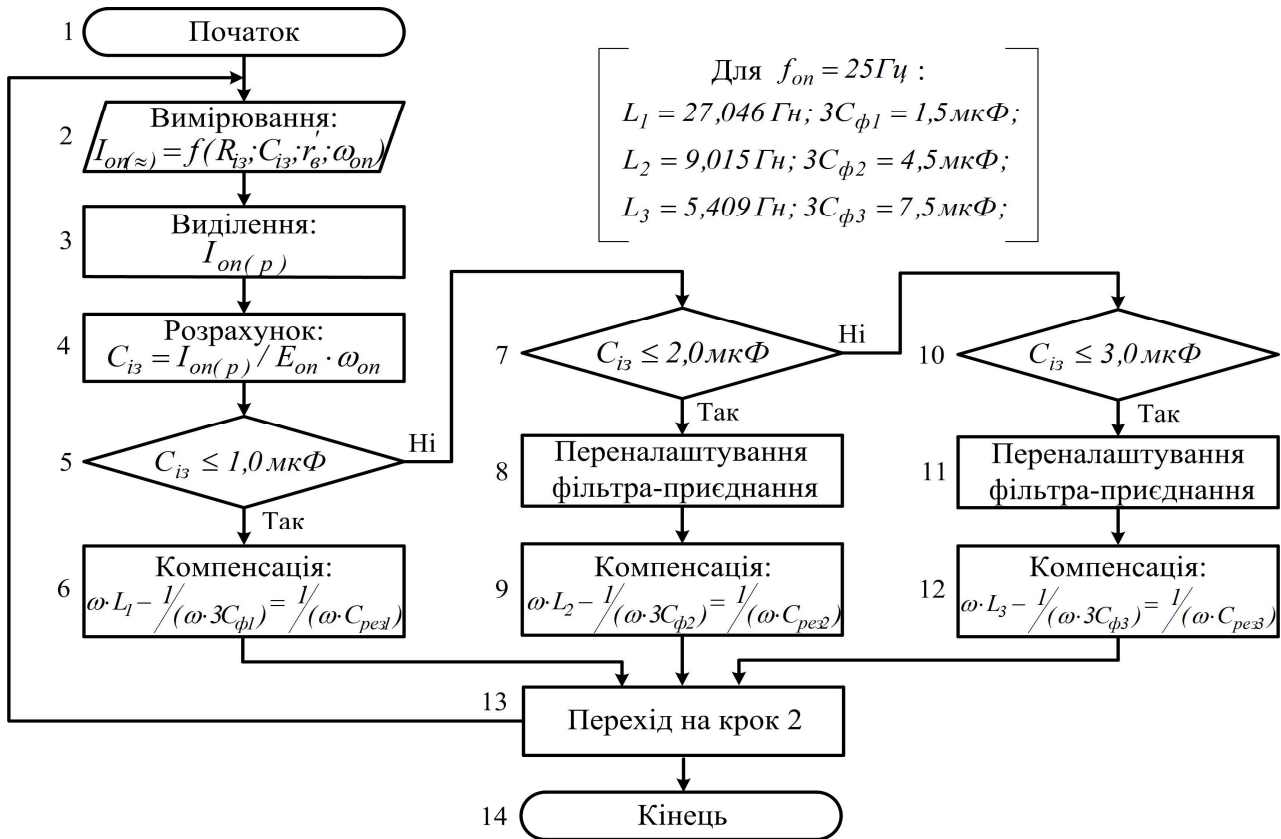


Рисунок 6 – Алгоритм роботи регулятора автоматичної компенсації ємнісних струмів витоку на землю

Після вимірювання значення змінного оперативного струму $I_{on(\sim)}$ виконується виділення його реактивної складової $I_{on(p)}$ та визначення діючого значення ємності ізоляції фаз мережі C_{iz} відносно землі.

Параметри фільтра приєднання $3C_{\phi l}$ компенсуючого дроселя до мережі визначені так, що на оперативній частоті ω_{on} він налаштований в резонанс зі значенням індуктивності L_l першої відпайки компенсуючого дроселя, що

необхідно для налаштування дроселя в резонанс з серединою першого інтервалу регулювання (0-1,0 мкФ) $C_{рез1} = 0,5$ мкФ на промисловій частоті ω .

Якщо $C_{із} \leq 1,0$ мкФ, то відбувається компенсація ємнісної складової струмів витоку (блок 6).

Коли в процесі експлуатації електричних кабелів в підземних виробках залізрудних шахт значення ємності фаз мережі збільшується та переходить в другий інтервал регулювання (1,0-2,0 мкФ), то відбувається автоматичне переналаштування фільтра приєднання $3C_{\phi2}$ (додаткове підключення ємності ФННП) для його резонансного налаштування на оперативній частоті $\omega_{он}$ зі значенням індуктивності L_2 другої відпайки компенсуючого дроселя, що необхідно для налаштування дроселя в резонанс з серединою другого інтервалу регулювання $C_{рез2} = 1,5$ мкФ та відбувається компенсація ємнісної складової струмів витоку (блок 9).

Якщо ж в процесі експлуатації значення ємності фаз мережі збільшується та переходить в третій інтервал регулювання (2,0-3,0 мкФ) – відбувається черговий етап переналаштування фільтра-приєднання $3C_{\phi3}$ (додаткове підключення ємності ФННП) для його резонансного налаштування на оперативній частоті $\omega_{он}$ зі значенням індуктивності L_3 третьої відпайки компенсуючого дроселя, що необхідно для налаштування дроселя в резонанс з серединою третього інтервалу регулювання $C_{рез3} = 2,5$ мкФ та відбувається компенсація ємнісної складової струмів витоку (блок 12).

Таким чином, розроблений регулятор автоматичної компенсації ємнісних струмів витоку дозволить здійснити обмеження короткочасних струмів витоку на землю в КЕМ до нормованого рівня 100 мА у всьому робочому діапазоні ємності ізоляції цих мереж (0-3,0 мкФ).

В розділі також виконані дослідження щодо встановлення ефективності автоматичної компенсації ємнісних струмів витоку на землю згідно запропонованого методу (рис. 7, рис. 8).

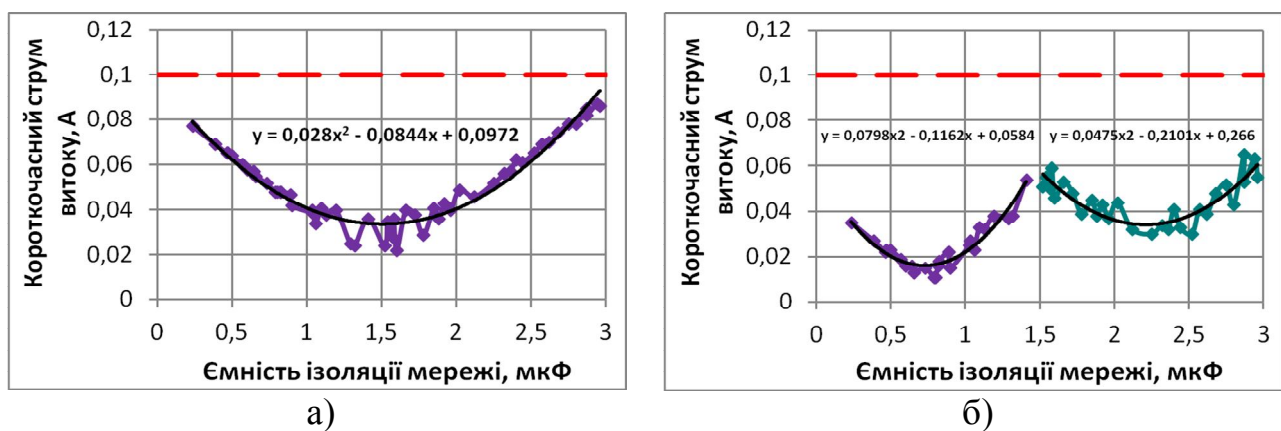


Рисунок 7 – Обмеження короткочасних струмів витоку статичним дроселем під час розподілу робочого діапазону ємності ізоляції комбінованої електричної мережі напругою 380 В на один (а) та два (б) інтервали:

— — — — — допустиме значення короткочасного струму витоку

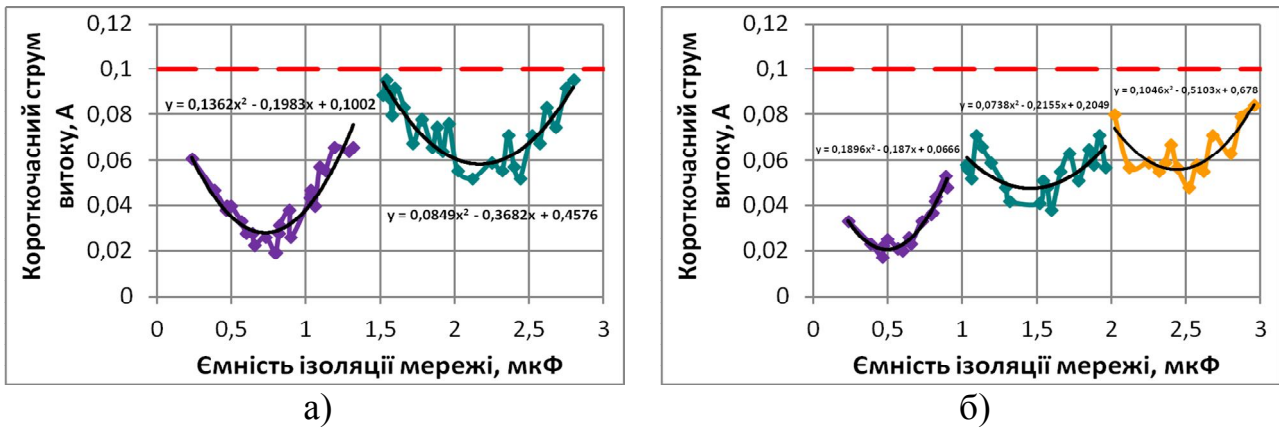


Рисунок 8 – Обмеження короткочасних струмів витоку статичним дроселем під час розподілу робочого діапазону ємності ізоляції комбінованої електричної мережі напругою 660 В (а) та 1140 В (б)

Аналіз встановлених залежностей короткочасного струму витоку показав, що умова (2) досягнення мінімального рівня захисту також виконується і в комбінованих електричних мережах напругою 660 та 1140 В. У разі збільшення кількості інтервалів розподілу ємності ізоляції мереж короткочасні струми витоку знижуються ще більше, тобто рівень електробезпеки зростає.

Між тим, в даний час в більшості серійних АЗ пристрій автоматичної компенсації ємнісних струмів витоку (рис. 9) містить вимірювальний L,C-генератор звукової частоти, що вимірює ємність ізоляції фаз мережі відносно землі і передає сигнал через багатокаскадний підсилювач і випрямляч на обмотку керування компенсуючим дроселем насичення з позитивним зворотним зв'язком з метою регулювання його індуктивності для резонансного налаштування з ємністю ізоляції мережі.

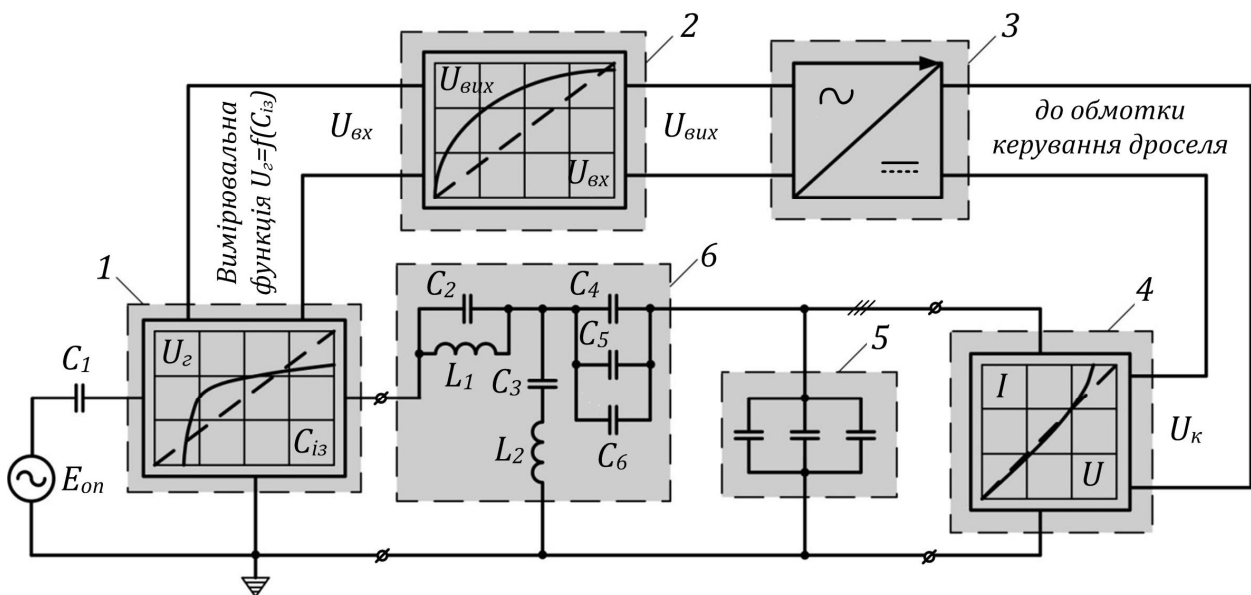


Рисунок 9 – Функціональна схема пристрою автоматичної компенсації ємнісних струмів витоку на землю з дроселем насичення: 1 – L,C-генератор; 2 – підсилювач; 3 – випрямляч; 4 – компенсуючий дросель; 5 – ємність ізоляції мережі; 6 – фільтр приєднання

Для ефективної компенсації ємнісних струмів витоку на землю необхідно, щоб струм в обмотці керування компенсуючого дроселя по можливості змінювався пропорційно ємності ізоляції фаз КЕМ. Однак аналіз графіків залежностей всіх вузлів схеми автоматичного компенсатора (рис.9) показав, що їх передатні функції не є пропорційними. Особливо сильний дестабілізуючий вплив виникає у вимірювальному L,C-генераторі 1.

Основним недоліком таких генераторів є наявність початкової напруги на їх виході, коли ємність ізоляції мережі дорівнює нулю. Якщо ємність ізоляції мережі незначна, то спостерігається значний початковий струм керування компенсуючим дроселем, що приводить до перекомпенсації, а отже і до збільшення струму витоку.

Саме тому виникає необхідність розроблення нового метода вимірювання ємності ізоляції фаз КЕМ під робочою напругою з пропорційною вимірювальною функцією «оперативний струм - ємність ізоляції мережі».

На основі еквівалентного перетворення розробленої схеми регулятора автоматичної компенсації було обґрунтовано розрахункову схему для знаходження вимірювальної функції $I_{on} = f(C_{iz})$, а для визначення похибки вимірювання ємності ізоляції було введено оціночну функцію $K = I_{on(\sim)} / I_{on(p)}$, яка відображає частку ємнісної складової в повному оперативному струмі.

Вимірювальна функція буде практично пропорційною, якщо похибка під час вимірювання не перевищує 10% ($K \leq 1,1$). Це означає, що частка активної складової в змінному оперативному струмі не перевищує 10% і нею можна знехтувати без значних похибок у кінцевому результаті.

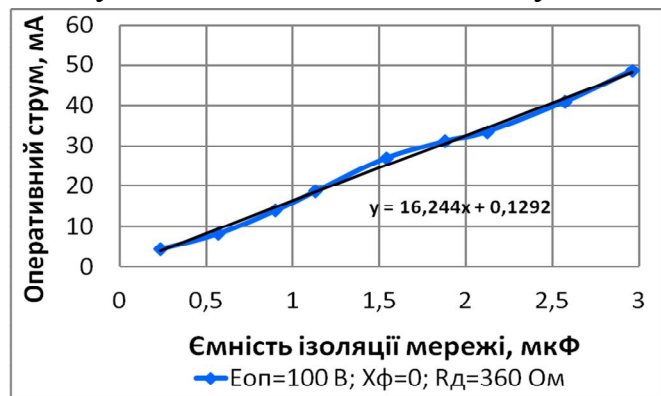


Рисунок 10 – Вимірювальна функція $I_{on} = f(C_{iz})$ в умовах комбінованої електричної мережі

В результаті досліджень було встановлено, що для отримання пропорційної вимірювальної функції «оперативний струм - ємність ізоляції мережі», необхідної для вимірювання з мінімальною похибкою ємності ізоляції КЕМ під робочою напругою у разі підключення джерела оперативної напруги до фаз мережі через статичний компенсуючий дросель, рекомендується використовувати оперативну частоту 25 Гц (рис. 10).

У п'ятому розділі наведені результати експериментальних досліджень працездатності авторських розробок. Стендові дослідження ефективності системи автоматичної компенсації ємнісних струмів витоку показали, що короточасні струми, які виникають на різних ділянках КЕМ напругою 380 В, обмежуються до нормованого рівня в 100 мА, а характер встановлених залежностей повністю відповідає теоретично отриманим (рис. 7), що свідчить про правильність запропонованої логіки побудови технічних рішень, закладених в пристрій автоматичної компенсації ємнісних струмів витоку.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на основі теоретичних і експериментальних досліджень вирішена актуальна наукова задача, що полягає в підвищенні ефективності функціонування пристроїв захисного відключення в напрямку мінімізації хибних відключень електроприймачів та забезпечення електробезпеки в комбінованих електричних мережах напругою до 1000 В сучасних систем електропостачання залізрудних шахт шляхом розроблення ефективної системи компенсації ємнісних струмів витоку на землю.

Основні наукові результати, висновки і практичні рекомендації дисертаційної роботи полягають у наступному:

1. Дослідження існуючих і необхідних функціональних захисних можливостей електротехнічних пристроїв захисту від витоків струму на землю, що використовуються в комбінованих електричних мережах напругою до 1000 В сучасних систем електропостачання залізрудних шахт, підтвердило неприпустиму якісну різницю між першими і другими в координатах сучасних реалій їх експлуатації, що є причиною недопустимого простою технологічного обладнання внаслідок нештатних відключень живлення цих типів мереж та збільшення кількості електротравм гірників.

2. Узагальнення основних тенденцій розвитку апаратів захисту від витоків струму на землю дозволило констатувати факт доцільності і необхідності розроблення нових їх видів на основі оптимальної структури і багатофункціональної керованості щодо забезпечення захисних вимог. Підтверджено і доповнено обґрунтуванням необхідність створення нових апаратів захисту від витоків струму на землю для комбінованих електричних мереж, що працюють на змінному оперативному струмі.

3. Формалізований комплекс оцінювання електричних параметрів ізоляції відносно землі розподільчих електричних мереж сучасних залізрудних шахт та уточнені стійкі рівні ізоляції: активний опір 4,0-30,0 кОм і ємність мереж 0,5-3,0 мкФ дозволяють використовувати отримані результати в якості вихідних даних для розроблення нових пристроїв захисного відключення, призначених для використання в комбінованих електричних мережах.

4. Розроблена система захисту від витоків струму на землю, що працює на змінному оперативному струмі з пропорційною вимірювальною функцією апарата захисту, дозволяє забезпечити електробезпеку гірників та підвищити надійність електропостачання шляхом зменшення кількості хибних відключень електроустаткування в комбінованих електричних мережах залізрудних шахт.

5. Запропоновано удосконалений метод автоматичної компенсації ємнісних струмів витоку на землю з використанням статичного компенсуючого дроселя та розроблено уніфікований регулятор автоматичної компенсації ємнісних струмів витоку, що дозволяє обмежувати до нормованого рівня короткочасні струми витоку на землю в комбінованих електричних мережах напругою до 1000 В сучасних систем електропостачання залізрудних шахт.

6. Розроблений метод вимірювання ємності ізоляції фаз комбінованих електричних мереж під робочою напругою дозволяє отримати пропорційну вимірювальну функцію «оперативний струм – ємність ізоляції мережі», забезпечуючи з достатнім рівнем точності резонансне налаштування компенсуючого дроселя у всьому робочому діапазоні ємності ізоляції комбінованих електричних мереж.

7. Реалізація і впровадження отриманих результатів наукових досліджень дозволяють підвищити надійність електропостачання та забезпечити електробезпеку в комбінованих електричних мережах напругою до 1000 В систем електропостачання залізорудних шахт. Проведені в роботі дослідження є підґрунтям для розроблення селективного захисту від витоків струму на землю, що істотно знизить економічні збитки гірничих підприємств з підземним способом видобутку залізорудної сировини в разі виникнення аварійних ситуацій.

8. Результати досліджень передані ТОВ «Електрозахист» (м. Харків) для розроблення технічної документації та випуску пристроїв автоматичної компенсації ємнісних струмів витоку на землю. Тестовий зразок пристрою автоматичної компенсації ємнісних струмів витоку на землю проходить апробацію на шахті Батьківщина ПАТ «Криворізький залізорудний комбінат».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Синчук О.Н. К вопросу защиты от токов утечки в условиях рудничных комбинированных электрических сетей / О.Н. Синчук, В.С. Моркун, А.Г. Ликаренко, А.А. Петриченко // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КрНУ, 2013. – Вип. 5/2013 (82). – С. 39-43. – ISSN 1995-0519. (Ulrich's Web Global Serials Directory, eLIBRARY, Index Copernicus, Polish Scholarly Bibliography, Infobase Index, Inspec, Open Academic Journals Index, Google Scholar, CiteFactor, ВІНІТИ РАН)

2. Синчук О.Н. Автоматическая компенсация емкостной составляющей тока утечки статическим дросселем с по-интервальным регулированием резонансной настройки / О.Н. Синчук, А.Г. Ликаренко, А.А. Петриченко // Электробезопасность. – Челябинск, 2014. – Вып. №3. – С. 3-16. (Ulrich's Periodicals Directory, РИНЦ, ВИНІТИ РАН)

3. Синчук О.Н. Аппаратурное решение проблем электробезопасности при эксплуатации участковых распределительных сетей железорудных шахт / О.Н. Синчук, А.Г. Ликаренко, А.А. Петриченко, Ф.П. Шкрабец // Горный журнал. – М., 2015. – №5(2015). – С. 77-83. – ISSN 0017-2278. (SCOPUS, Chemical Abstracts Service, РИНЦ)

4. Синчук О.Н. Измерение емкости изоляции сети под рабочим напряжением в устройствах автоматической компенсации токов утечки в рудничных комбинированных сетях / О.Н. Синчук, А.Г. Ликаренко, А.А. Петриченко // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – Екатеринбург: УГГУ, 2015. – Вып. №3(2015). – С. 133-142. – ISSN 0536-1028. (Ulrich's Periodicals Directory, РИНЦ, ВИНІТИ РАН)

5. Ликаренко А.Г. Концепция автоматической компенсации емкостных токов утечки в рудничных электрических сетях / А.Г. Ликаренко, А.А. Петриченко, А.В. Омельченко // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчук: КрНУ, 2015. – Вип. 2/2015(30). – С. 127-136. – ISSN 2072-2052. (Ulrich's Periodicals Directory, Index Copernicus, CiteFactor, Polish Scholarly Bibliography, Directory of Research Journals Indexing, Scientific Indexing Services, eLIBRARY, ВІНІТІ РАН)
6. Синчук О.Н. Аппаратные проблемы электробезопасности при эксплуатации электротехнических комплексов с регулируемыми электроприводами в рудничных участковых распределительных сетях до 1200 В / О.Н. Синчук, А.Г. Ликаренко, А.А. Петриченко, Р.В. Зиманков, Ф.П. Шкрабец // Технічна електродинаміка. – 2016. – Вип. 5. – С. 79-81. – ISSN 1607-7970. (SCOPUS, COMPENDEX, eLIBRARY, EBSCO, PROQUEST, ВІНІТІ РАН)
7. Синчук О.Н. Исследование защитных характеристик аппаратов защиты от токов утечки в условиях комбинированных электрических сетей / О.Н. Синчук, А.Г. Ликаренко, А.А. Петриченко // Вісник Криворізького національного університету. – 2014. – Вип. 36. – С. 157-160. – ISSN 2306-5451.
8. Синчук О.Н. Исследование защитных характеристик аппаратов защиты от токов утечки рудничных на постоянном оперативном токе в условиях дестабилизирующих факторов комбинированных сетей / О.Н. Синчук, А.Г. Ликаренко, А.А. Петриченко // Гірнична електромеханіка та автоматика: наук.– техн. зб. – 2015. – Вип. 94. – С. 3-12. – ISSN 0201-7814.
9. Ликаренко А.Г. Оценка электрических параметров изоляции распределительных сетей железорудных шахт Кривбасса в нынешних условиях их эксплуатации / А.Г. Ликаренко, А.А. Петриченко, Р.В. Зиманков // Вісник Криворізького національного університету. – 2016. – Вип. 42. – С. 192-196. – ISSN 2306-5451.
10. Петриченко А.А. Дослідження стану ізоляції електричних мереж шахт Криворізького залізрудного басейну / А.А. Петриченко // Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації: XII Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених і спеціалістів: матеріали конференції. – Кременчук: КрНУ, 2014. – С. 118-119. – ISSN 2079-5106.
11. Петриченко А.А. Концепция автоматической компенсации емкостной составляющей токов утечек в рудничных комбинированных сетях до 1200 В с изолированной нейтралью / А.А. Петриченко, А.Г. Ликаренко // Проблемы недропользования: IX Международный форум-конкурс молодых ученых: Сборник научных трудов. Ч.1. – СПб.: НМСУ «Горный», 2014. – С. 205-207. – ISBN 978-5-94211-689-7.
12. Синчук О.Н. Автоматическая компенсация емкостных токов утечки в рудничных электрических сетях с изолированной нейтралью / О.Н. Синчук, А.Г. Ликаренко, А.А. Петриченко // Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах: XV Міжнародна науково-технічна конференція: матеріали конференції.– Кременчук: КрНУ, 2014. – Вип. 1/2014 (2).– С. 234-236. – ISSN 2221-5160.

13. Петриченко А.А. Дослідження працездатності апаратів захисту від витоків струму в рудникових розподільчих мережах до 1000 В / А.А. Петриченко // Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації: XIII Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених і спеціалістів: матеріали конференції. – Кременчук: КрНУ, 2015. – С. 182-183. – ISSN 2079-5106.

14. Петриченко А.А. Современная структура и особенности комбинированных электрических сетей железорудных шахт / А.А. Петриченко, М.В. Шпак // Актуальні проблеми гірничо – металургійного виробництва: Всеукраїнська науково-практична конференція: матеріали конференції. – Кривий Ріг: ДВНЗ «КНУ», 2016. – С. 50-51.

15. Петриченко А.А. Измерительная функция аппарата защиты на переменном оперативном токе для комбинированных электрических сетей / А.А. Петриченко, Р.В. Зиманков // Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації: XIV Міжнародна конференція молодих учених і спеціалістів: матеріали конференції. – Кременчук: КрНУ, 2016. – С. 149-150. – ISSN 2079-5106.

16. Петриченко А.А. Дослідження точності контролю параметрів ізоляції та витоків струму в комбінованій електричній мережі змінним оперативним струмом / А.А. Петриченко, А.Г. Лікаренко, Р.В. Зіманков // Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах: XVII Міжнародна науково-технічна конференція: матеріали конференції. – Кременчук: КрНУ, 2016. – Вип. 1/2016(4) – С. 242-244. – ISSN 2221-5160.

17. Патент України 95475 МПК Н02J 3/00 Пристрій автоматичної компенсації ємнісних струмів витоків в електричних мережах з ізольованою нейтраллю / О.М. Сінчук, А.Г. Лікаренко, А.А. Петриченко; заявл. 04.07.2014, опубл. 25.12.2014, Бюл. №24.

АНОТАЦІЯ

Петриченко А.А. Методи та засоби обмеження струмів витоків на землю в системах електропостачання залізорудних шахт. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – Електротехнічні комплекси та системи. – Вінницький національний технічний університет МОН України, Вінниця, 2017.

Дисертація присвячена підвищенню ефективності функціонування пристроїв захисного відключення в напрямку мінімізації хибних відключень електроприймачів та забезпечення електробезпеки в комбінованих мережах напругою до 1000 В систем електропостачання залізорудних шахт (КЕМ).

Доведено необхідність розроблення нових апаратів захисту від витоків струму на землю в КЕМ, що здійснюють контроль опору ізоляції мереж та витоків струму змінним оперативним струмом зниженої частоти. Представлено результати по розробленню прямопропорційної вимірювальної функції апаратів захисту, що працюють на змінному оперативному струмі в умовах КЕМ.

Удосконалено метод та розроблено регулятор автоматичної компенсації ємнісних струмів витоку на землю шляхом застосування статичного компенсуючого дроселя та його налаштування на ємність середини встановлених інтервалів робочого діапазону ємності ізоляції КЕМ, що дозволяє обмежувати до нормованого рівня короточасні струми витоку на землю.

Розроблено новий метод для вимірювання ємності ізоляції фаз комбінованих електричних мереж під робочою напругою з прямопропорційною вимірювальною функцією «оперативний струм – ємність ізоляції» та виконано вибір оптимальної частоти змінного оперативного струму, що дозволяє виконувати з достатнім рівнем точності резонансне налаштування статичного компенсуючого дроселя у всьому робочому діапазоні ємності ізоляції КЕМ.

Ключові слова: комбінована електрична мережа, струми витоку, апарати захисту, змінний оперативний струм, автоматична компенсація.

ABSTRACT

Petrychenko A.A. Methods and means of limiting leakage currents to ground in power supply systems of iron ore mines. – Manuscript.

Thesis for a Candidate's Degree in Technical Science, speciality 05.09.03 – Electrotechnical Complexes and Systems. – Vinnytsia National Technical University MES of Ukraine, Vinnytsia, 2017.

The thesis is devoted to increase functioning efficiency of protection devices in the direction of minimize false shut-offs of electric consumers and improve electrical safety in combined electrical networks with voltage up to 1000 V power supply systems of iron ore mines (CEN).

Proved necessity of the developing new protection devices against leakage current to ground in the CEN, which performs control of the impedance network isolation and leakage current by means of alternating operational current. Presents the results of development direct proportional measuring function of protection devices which working on alternating current in the operational conditions of the CEN.

An improved method and designed automatic compensation controller of capacitive leakage currents by applying a static compensating reactor and its configuration on the capacity of the middle of the established intervals of the operating range isolation capacitance of the CEN which allows to limit short-time leakage currents to earth to normalized level.

Developed a new method of measuring isolation capacitance of the CEN with direct proportional measuring function "operational current – isolation capacitance" and made the choice of the optimal frequency of the alternating operating current, which enables resonant tuning of the static compensating reactor with sufficient level of accuracy.

Keywords: combined electrical network, leakage currents, protection devices, alternating operational current, automatic compensation.

АННОТАЦИЯ

Петриченко А.А. Методы и средства ограничения токов утечки на землю в системах электроснабжения железорудных шахт. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы. – Винницкий национальный технический университет МОН Украины, Винница, 2017.

Диссертация посвящена повышению эффективности функционирования устройств защитного отключения в направлении минимизации ложных отключений электроприемников и обеспечения электробезопасности в сегментах комбинированных электрических сетей напряжением до 1000 В современных систем электроснабжения железорудных шахт (КЭС) путем разработки эффективной системы компенсации емкостных токов утечки на землю.

Проанализированы особенности КЭС и установлено, что кратковременные токи утечки, возникающие на различных участках комбинированных электрических сетей, могут достигать значений, которые значительно превышают их нормированный ГОСТ 12.1.038-82 уровень, а существующие методы и средства их ограничения имеют ряд недостатков или являются совсем непригодными для использования в таких типах электрических сетей.

Установлено, что решить на практике проблему электробезопасности и минимизации нештатных отключений электроприемников в КЭС «традиционным путем» невозможно, поскольку полупроводниковые преобразователи энергии, используемые для регулирования момента и скорости регулируемых электроприводов электротехнических комплексов горных машин и механизмов, создают дополнительное дестабилизирующее влияние на защитные характеристики существующих аппаратов защиты от утечек тока на землю.

Доказано, что применяемые ныне аппараты защиты от утечек тока на землю, работающие на постоянном оперативном токе, не могут обеспечить минимальный уровень защиты горнорабочих в КЭС, что является причиной увеличения количества нештатных отключений электроприемников и поражения горнорабочих электрическим током, поскольку их защитные характеристики значительно отличаются от требуемой (в 2-7 раз). Поэтому для достижения минимального уровня защиты в КЭС предлагается сосредоточиться на разработке аппаратов защиты от утечек тока на землю, осуществляющих контроль сопротивления изоляции сетей и утечек тока относительно земли переменным оперативным током пониженной частоты.

В работе проведен комплекс оценивания электрических параметров изоляции относительно земли распределительных электрических сетей систем электроснабжения современных железорудных шахт Криворожского железорудного бассейна и получены их статистические характеристики, что позволяет использовать полученные результаты в качестве исходных данных

для разработки новых устройств защитного отключения, предназначенных для использования в КЭС.

Изложены результаты по разработке эффективной системы защиты от утечек тока на землю в КЭС, работающей на переменном оперативном токе с пропорциональной измерительной функцией аппарата защиты «оперативный ток – параметры изоляции сети и утечек тока», что позволяет обеспечить электробезопасность горнорабочих и повысить надежность электроснабжения путем уменьшения количества ложных отключений технологического электрооборудования.

Усовершенствован метод и разработан унифицированный регулятор автоматической компенсации емкостных токов утечки на землю в КЭС путем разделения рабочего диапазона емкости изоляции сети на установленные интервалы и настройки статического компенсирующего дросселя на создание колебательного контура с емкостью середины этих интервалов. Для идентификации необходимого интервала, в котором находится текущее значение емкости изоляции сети, на сеть под рабочим напряжением накладывают переменный оперативный ток пониженной частоты. Переключением витков дросселя осуществляется создание колебательного контура с емкостью середины идентифицированного интервала. Использование этого метода позволяет ограничивать кратковременные токи утечки до их нормируемого уровня в 100 мА во всем рабочем диапазоне емкости изоляции КЭС.

В работе приведены результаты исследований по разработке нового метода измерения емкости изоляции фаз КЭС под рабочим напряжением, который в отличие от известных, позволяет получить пропорциональную измерительную функцию «оперативный ток – емкость изоляции», которая обеспечивает точное регулирование индуктивности статического компенсирующего дросселя, необходимое для эффективной компенсации емкостных токов утечки на землю. Осуществлен выбор оптимальной частоты переменного оперативного тока пониженной частоты. При подключении источника оперативного напряжения к фазам комбинированной сети, непосредственно через компенсирующий дроссель с фильтром его присоединения, рекомендуется использовать частоту 25 Гц для получения пропорциональной измерительной функции.

Реализация и внедрение полученных результатов научных исследований позволили повысить электробезопасность горнорабочих и надежность электроснабжения путем минимизации ложных отключений технологического электрооборудования в КЭС. Проведенные в работе исследования являются основой для разработки селективной защиты от утечек тока на землю, что позволит существенно снизить экономические убытки горных предприятий с подземным способом добычи железорудного сырья в случае возникновения аварийных ситуаций.

Ключевые слова: комбинированная электрическая сеть, токи утечки, аппараты защиты, переменный оперативный ток, автоматическая компенсация.

Підписано до друку 02.02.17
Формат 60 □ 84¹/32. Папір офсетний.
Ум. др. арк 09. Обл. вид. арк. 1.04
Наклад 100 прим. Замовлення № 07.02.17

Віддруковано в Видавничому центрі
ДВНЗ «Криворізький національний університет»
50027, м. Кривий Ріг, вул. XXII Партз'їзду, 11. Тел. 409-17-23
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК №4328 від 24.05.2012 р.