

International Ukraine-Poland Seminar

**Power quality in distribution networks with distributed generation**

Kiev, July 4-5, 2019

---

---

DOI: 10.32073/iepl.2019.17

**РОЗРОБКА ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ ПРИСТРОЇВ РЕЛЕЙНОГО  
ЗАХИСТУ ДЛЯ МЕРЕЖ З РОЗПОДІЛЕНОЮ ГЕНЕРАЦІЄЮ**

**Володимир Кузнецов, Людмила Сабарно, Всеволод Кошман, Ігор Севастюк**

Інститут електродинаміки Національної академії наук України

Abstract: The features of the relay protection work in distributed network power networks are considered. Model for analysis of current protection: maximum current protection, maximum current cutoff, protection against single-phase earth faults is proposed.

**1. ВСТУП**

В останні роки тенденції розвитку електроенергетики у світі пов'язані не тільки зі зростанням масштабів виробництва електроенергії на традиційних великих електростанціях, але і зі збільшенням частки розподіленої генерації (РГ). Це обумовлено появою нових вискоєфективних енергетичних технологій, посиленням екологічних вимог, що стимулюють використання відновлювальних джерел енергії (ВДЕ), прагненням зменшити вплив вуглеводнів на економіку тощо. Світові тенденції органічного поєднання централізованої і розподіленої генерації характерні і для України. Однак, крім безумовних переваг розвитку і впровадження розподіленої генерації, це створює і ряд проблем, серед яких можна виділити наступні:

- РГ - це нові елементи енергосистеми з новими динамічними характеристиками і необхідністю керування ними;
- ускладнюється диспетчерське управління енергосистеми, зміщуючи його функції на розподільчу мережі внаслідок невизначеності режимів роботи РГ, нерівномірності завантаження агрегатів, відсутності поточної інформації про їх роботу;
- ускладнюється протиаварійне керування енергосистеми, розподільча мережа з появою в ній установок РГ набуває рис основної мережі, що потребує розробки пристроїв автоматики, аналогічних основній мережі;
- ускладнюється система релейного захисту і автоматики (РЗА).

Такі особливості РГ потребують детального вивчення властивостей і характеристик установок, розробки їх математичних моделей при роботі в різних режимах. Виникає необхідність розробки нових методів аналізу режимів роботи систем електропостачання, що вміщують РГ, їх надійності, стійкості тощо, а також розробки

математичних моделей і методів планування розвитку систем електропостачання з урахуванням розподіленої генерації.

## 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ РОБОТИ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ У МЕРЕЖАХ З РГ

Розглянемо релейних захист у розподільчій мережі, на роботу якої впливає підключення генератора ВДЕ. Розподільні електричні мережі напругою 6-10 кВ, як правило, мають радіальну структуру з одностороннім живленням чи працюють у розімкнутому режимі і у більшості все ще працюють з ізольованою або компенсованою нейтраллю. Для захисту ліній електропередавання (ЛЕП) напругою 6-10 кВ згідно з ПУЕ повинні бути передбачені наступні види захистів:

- від міжфазних коротких замикань (КЗ), що виконуються, як правило, у двофазному і дворелейному виконанні (струмова відсічка, максимальний струмовий захист, струмова відсічка з витримкою часу);

- від однофазних замикань на землю (ОЗЗ) ненаправлений або направлений селективний захист, що діє на сигнал чи на відключення, захист, що реагує на основну гармонійну складову струму нульової послідовності через трансформатор струму нульової послідовності; пристрій контролю ізоляції;

- від дугових замикань.

Розподільча мережа 6-10 кВ по відношенню до мережі з ВДЕ, як правило, є нижчою мережею; однак у деяких випадках через ЛЕП 6-10 кВ може здійснюватись зв'язок генераторів ВДЕ з джерелами вищої мережі. Підключення генераторів може призвести до необхідності зміни параметрів спрацьовування струмових відсічок на ЛЕП нижчої мережі; у деяких випадках – внаслідок збільшення струму КЗ – до необхідності встановлення струмової відсічки на кабельній лінії. Зменшення складової струму КЗ зі сторони еквівалентного джерела зовнішньої мережі пов'язане зі зниженням ефективності захистів дальнього резервування, що встановлені зі сторони центрів живлення (на вищих ЛЕП); крім того, у зв'язку з появою двостороннього живлення буде необхідна зміна параметрів спрацьовування цих захистів і/або введення направленості їх дії.

Збільшення ємнісних струмів при підключенні до мережі генераторів ВДЕ буде незначним, і, як правило, не призведе до необхідності зміни режимів заземлення нейтралі і типів захистів від ОЗЗ, що застосовуються на ЛЕП.

Таким чином, підключення мережі з розподіленою генерацією до енергосистеми має особливості, що відображається на ефективності РЗА. За рахунок частоті зміни схеми живлення змінюються значення струмів КЗ, що призводить до хибних спрацьовувань і порушень узгодженості дії пристроїв РЗА.

Розглянемо мережу електропостачання (рис. 1), що живиться від джерела Г і захищається пристроями захисту Р1, Р2 і Р3. Основна функція кожного пристрою захисту направлена на усунення пошкоджень в границях зони, яку він охороняє (зони дії реле), друга функція направлена на усунення пошкоджень на суміжних ділянках або ділянках, розташованих нижче на схемі. У цьому випадку наступний пристрій РЗА, що розташований вище на схемі, або їх група повинні забезпечувати резервний захист.

Коли два пристрої РЗА, що розташовані поряд, функціонують належним чином, виконуючи покладені на них первинну і вторинну функції під час будь-яких пошкоджень і аномальних режимів, їх називають узгодженими. Правильна узгодженість досягається селективністю між наступними пристроями. При правильній узгодженості у момент появи пошкодження F1 час спрацьовування реле Р2 повинен бути більшим, ніж час спрацьовування реле Р1 як мінімум на значення часу «шабелю

селективності». Як показано на рис. 1, реле P2 здійснює резервний захист зони, яку захищає реле P1.

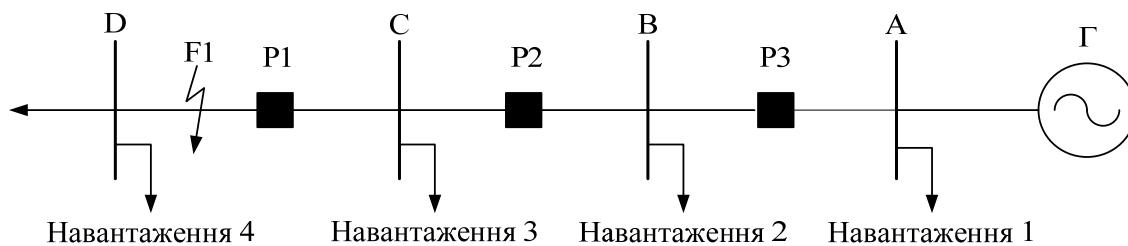


Рис. 1. Приклад мережі електропостачання з джерелом живлення Г і пристроями захисту P1, P2 і P3

Захист для розподільчих мереж з РГ не може бути досягнутий за допомогою концепції, яка застосовується для захисту традиційних розподільчих мереж.

Системи, що розробляються для захисту розподільчих мереж з РГ, повинні враховувати наступні фактори: напрямок струму мережі, оскільки джерела розподіленої генерації можуть віддавати надлишки енергії, що виробляють, назад у мережу, а також зміну топології мережі.

Якщо джерела розподіленої генерації РГ1 і РГ2 підключені до мережі, як показано на рис. 2, через захисти P1 і P2 будуть проходити однакові значення струмів при пошкодженні у точці F1 (нижчій ділянці) або пошкодженні у точці F2 (ділянка, що розташована вище). При пошкодженні на F2 для забезпечення селективності необхідно спрацювання захистів P2 швидше, ніж захисту P1, а при пошкодженні на F1 (ділянка, що розташована нижче) захисти P1 повинні спрацювати швидше, ніж захисти P2.

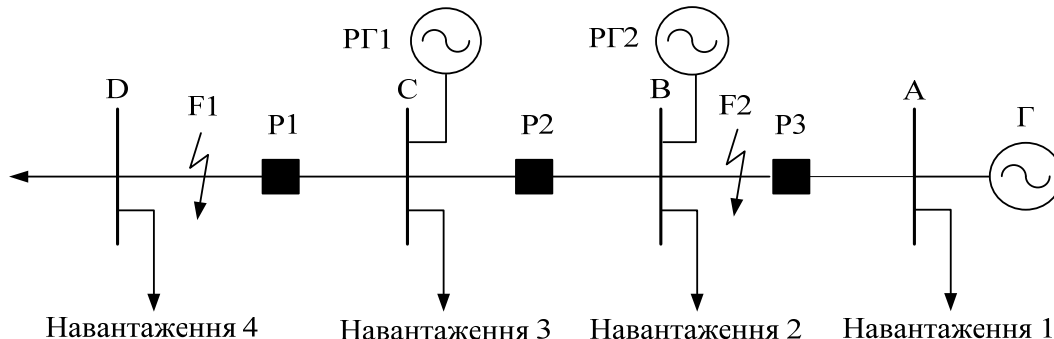


Рис. 2. Приклад мережі електропостачання з джерелами живлення Г, РГ1 і РГ2 та пристроями захисту P1, P2 і P3

Внаслідок підключення джерел РГ на вхід пристроїв РЗА поступають однакові значення струмів при будь-якому пошкодженні, при цьому неможливо забезпечити необхідний рівень селективності. Дана ситуація потребує застосування направлених захистів на кожній ділянці мережі для забезпечення правильної локалізації пошкодження.

Струм КЗ у точці F1 має два складових компоненти, один з яких від основного джерела Г, а другий від джерел розподіленої генерації РГ1 і РГ2. У випадку зміни потужності, що віддається від одного з джерел розподіленої генерації, або його відключення від мережі, змінюються значення максимального і мінімального струмів КЗ мережі. В таких умовах налаштування пристроїв РЗА мережі мають бути змінені у відповідності до діючої конфігурації мережі.

Оскільки у діючих мережах з РГ не здійснюється адаптація налаштувань РЗА, для підтримання функціонування мережі при виникненні пошкоджень відключаються всі джерела РГ. Такий підхід допомагає відновити структуру радіальної розподільчої мережі і узгоджену дію пристроїв РЗА, однак при цьому порушується живлення споживачів, що живляться від джерел РГ.

Найбільш відповідним рішенням цієї проблеми є застосування методів адаптивного захисту [2]. У зарубіжних джерелах часто зустрічається принцип роботи адаптивного захисту на основі використання локальної інформації про топологію мережі і стан її комутаційного обладнання [1]. Ця інформація передається між пристроями РЗА за допомогою системних інтерфейсів. Уставки спрацьовування захистів підлаштовуються у відповідності з діючою топологією мережі.

Для реалізації такого алгоритму необхідно створити систему, яка збирає інформацію про стан мережі, і у відповідності з її поточною конфігурацією координує дії захистів, а також виконує обчислення нових адаптивних уставок РЗА.

Для розробки цієї системи в середовищі SIMULINK була побудована модель мережі 6 кВ з ізолюваною нейтраллю (рис. 3), яка дозволяє моделювати робочі і аварійні режими, контролювати параметри, що впливають на спрацьовування пристроїв захисту. За допомогою цієї моделі можна виконувати наступні дії:

- перевіряти правильність розрахунку уставок спрацьовування пристроїв захистів для конкретних умов експлуатації;
- виявляти режими, що призводять до неселективних спрацьовувань пристроїв захисту;
- аналізувати поведінку пристроїв захисту в реальних умовах експлуатації.

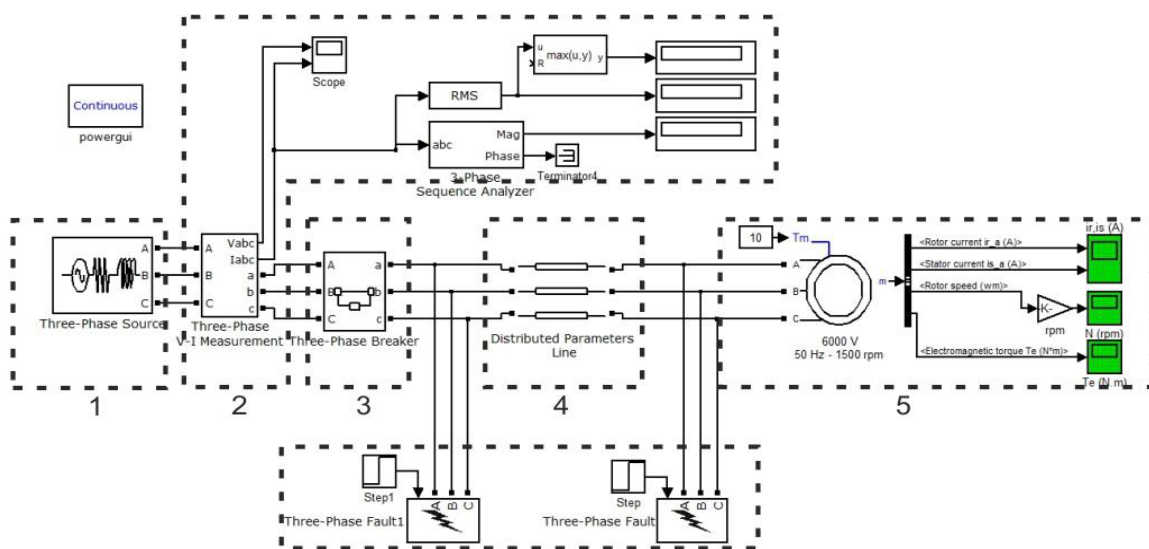


Рис. 3. Модель електричної мережі з ізолюваною нейтраллю

Модель складається з наступних головних компонентів: 1 - трифазне джерело електроенергії (Three-Phase Source); 2 - вимірювальний блок з пристроями вимірювання симетричних складових струму (Three-Phase Sequence Analyzer), вимірювач миттєвих значень струму і напруги мережі (Three-Phase V-I Measurement), вимірювач діючого значення струму мережі (RMS), вимірювач максимальних значень пускових струмів і струмів КЗ ( $\max(u, y)$ ); 3 - високовольтний комутаційний пристрій (Three-Phase Breaker); 4 - ЛЕП (Distributed Parameters Line); 5 - асинхронний електродвигун (Asynchronous machine); 6 - трифазні пристрої, що замикають фази між собою, а також на землю, встановлені на початку і у кінці захищеної лінії (Three-Phase Fault).

### 3. ПОБУДОВА ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ ПРИСТРОЇВ СТРУМОВИХ ЗАХИСТІВ

Відомі імітаційні моделі пристроїв захисту розроблені для окремих задач, тоді як сучасні цифрові мікропроцесорні пристрої є комплексними і реалізують широкий спектр захистів.

У зарубіжних джерелах зустрічаються праці [4], присвячені розробці алгоритму моделі пристрою захисту в середовищі MATLAB SIMULINK. Розроблений алгоритм завантажується в пам'ять процесора обробки цифрових сигналів за допомогою спеціального програмного інструменту Real-TimeWorkshop. До недоліків такої системи можна віднести відсутність можливості інтеграції з моделями електричних мереж. У таких моделях не відображаються процеси, що протікають в первинній мережі, а також відсутні елементи відключення пошкоджених ділянок, що не дозволяє проаналізувати процеси, що відбуваються в первинних і вторинних ланцюгах мережі в момент виникнення аварійних режимів і подальшого відключення. Ці моделі також не дають можливість виставити і перевірити уставки релейних захистів.

Для наших подальших досліджень прийнято узагальнену імітаційну модель пристроїв струмових захистів, оскільки струмові захисти є основою будь-якої системи РЗА. Проведений аналіз принципів дії і структур сучасних цифрових пристроїв струмових захистів, розроблених провідними зарубіжними фірмами Siemens, Merlin Gerin (Schneider Electric), Areva тощо [3, 5, 6] типу максимальна струмова відсічка (МСВ), максимальний струмовий захист (МСЗ) і захист від ОЗЗ, показав, що їх можна представити у вигляді узагальненої функціональної схеми, наведеної на рис. 4.

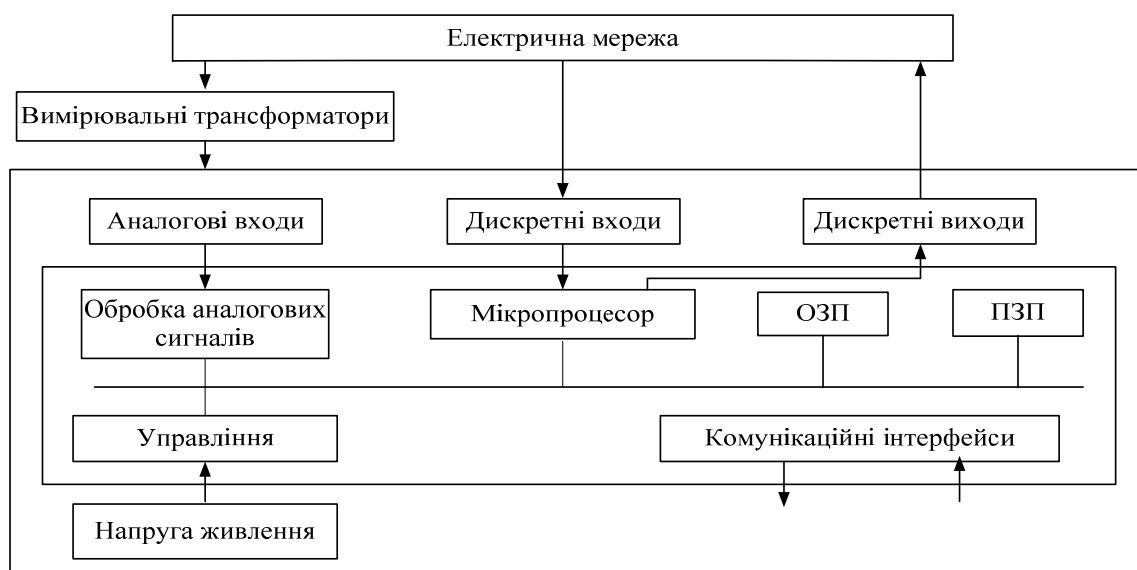


Рис. 4. Узагальнена функціональна схема пристрою струмових захистів

Аналогові входи струмів і напруги служать для введення сигналів від вимірювальних трансформаторів струму, трансформаторів напруги та трансформаторів струму і напруги нульової послідовності. З аналогових входів значення струмів і напруги надходять в контур обробки аналогових значень, де відбувається фільтрація і аналогово-цифрове перетворення. Дискретні входи призначені для введення логічної інформації (0/1), яка в подальшому використовується в програмній частині для прийняття рішення. Алгоритм захисту, який є частиною програмного забезпечення мікропроцесора, обробляє зібрану інформацію. За допомогою методів обробки інформації обчислюються амплітуда, вектори та фазові кути зсуву напруги і струму, за

необхідності - частота мережі, імпеданс ділянки, що захищається, та ін. Попередньо обчислені значення записуються в оперативний записуючий пристрій, а потім порівнюються з попередньо встановленими уставками спрацьовування, записаними в незалежний постійний запам'ятовуючий пристрій мікропроцесорного пристрою РЗА.

Якщо поточні значення струмів мережі перевищують уставку спрацьовування, то спрацьовує таймер, який реалізує часову затримку. Затримка встановлюється відповідно до реалізованого виду захисту (МСВ, МСЗ, ОЗЗ). Для МСВ часова затримка спрацьовування не передбачається, тоді як для МСЗ вона встановлюється в залежності від розташування пристрою захисту по відношенню до джерела живлення. Після завершення роботи таймера формується сигнал на спрацьовування (або сигналізацію), який для локалізації пошкодженого приєднання передається за допомогою дискретних виходів пристрою захисту на керуючий вхід комутаційного пристрою.

Спираючись на узагальнену функціональну схему пристроїв струмових захистів, нами була розроблена відповідна модель. Імітаційна модель пристрою струмових захистів, розроблена за допомогою графічного середовища імітаційного моделювання SIMULINK і його бібліотеки SimPowerSystems, представлена на рис. 5.

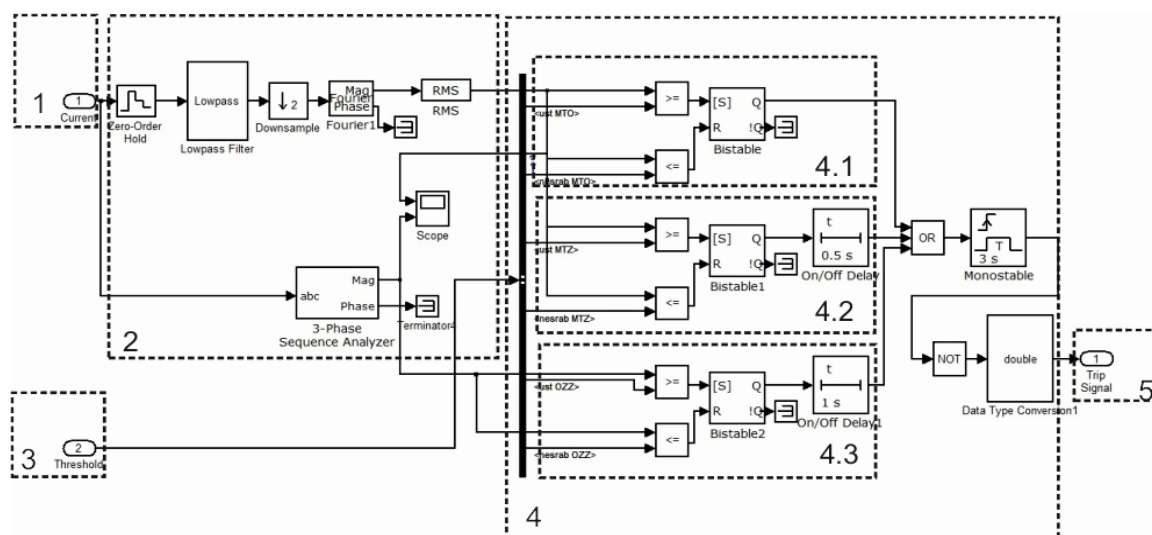


Рис. 5. Імітаційна модель пристрою струмових захистів

Імітаційна модель складається з наступних компонентів: 1 - аналогові входи 3-фазного змінного струму (Current); 2 - перетворювальна частина; 3 - уставки спрацьовування (блок Threshold); 4 - логічна частина: 4.1 - МСВ, 4.2 - МСЗ, 4.3 - ОЗЗ; 5 - сигнал на спрацьовування комутаційного пристрою.

Алгоритм роботи представленої імітаційної моделі пояснює блок-схема на рис. 6.

На вхід моделі пристрою струмових захистів надходять значення струмів фаз мережі з раніше розробленої моделі мережі з ізольованою нейтраллю (1 - Current). У перетворювальній частині (2 - ПЧ) за допомогою блоку Zero-Order Hold здійснюється аналогово-цифрове перетворення сигналів, що надходять з аналогового входу 1.

Для фільтрації завад і спотворень використовується фільтр низьких частот Lowpass Filter. Для отримання періодичної складової струму КЗ використовується блок Fourier. За допомогою блоку Three-Phase Sequence Analyzer вимірюються струми нульової послідовності. Логічна частина аналізатора пристрої захисту (4 - ЛЧ) реалізована за допомогою блоків порівняння і тригерів Bistable, тимчасова затримка виставляється в блоках On/Off Delay. Отримані значення струмів КЗ (МСВ, МСЗ) і струмів нульової послідовності (ОЗЗ) порівнюються з уставками спрацьовування, які надходять з блоку задання уставок спрацьовування (3 - Threshold). Блок Monostable

призначений для запобігання зворотного включення комутаційного обладнання, що використовується в моделі мережі з ізольованою нейтраллю, в момент відновлення значення струму мережі до значення повернення реле, так як управління станом комутаційного устаткування реалізовано за допомогою одного входу. Вихід пристрою струмових захистів видає керуючий сигнал на комутаційний пристрій (5 - TripSignal).

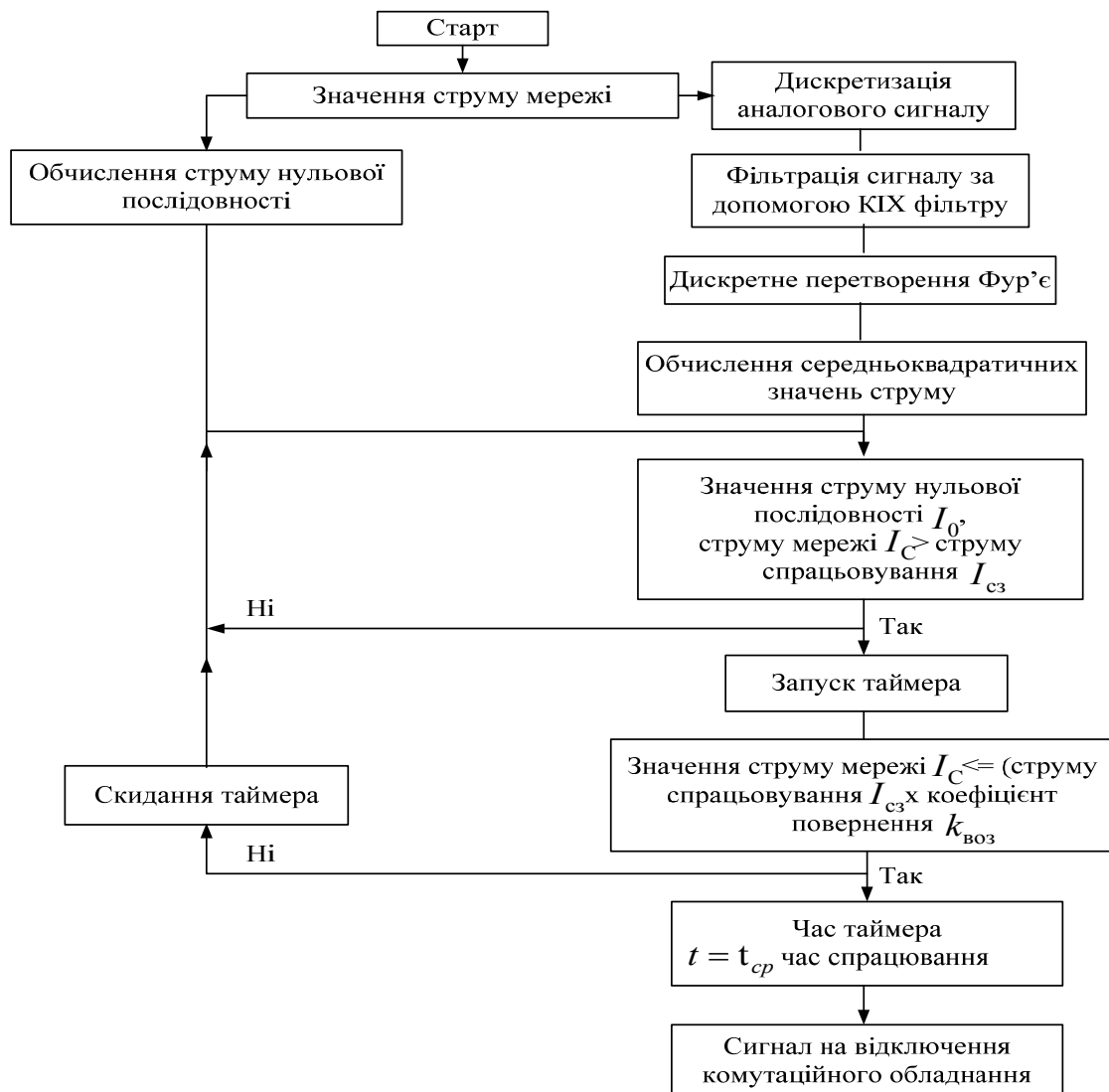


Рис.6. Алгоритм роботи розробленої імітаційної моделі пристроїв захисту

#### 4. ВИСНОВКИ

У роботі представлена модель, призначена для моделювання роботи пристроїв струмових захистів максимального струмового захисту, максимальної струмової відсічки та захисту від ОЗЗ разом з розробленою моделлю мережі з ізольованою нейтраллю. Модель дозволяє задавати уставки спрацювання, а також уставки повернення пристрою захистів, в залежності від обраного користувачем коефіцієнта повернення. Так само можлива установка часу спрацювання для кожного з захистів окремо. Дії захистів налаштовані на відключення комутаційного обладнання, але структура моделі пристрою захистів наочна і зрозуміла, що дає можливість реалізації дії окремих або всіх захистів відразу на сигнал. Запропонована модель дозволяє

інтегрувати її в якості функціонального блоку в модель мережі з ізольованою нейтраллю для розробки пристроїв захисту, адаптивних до змін режимів роботи і експлуатаційних параметрів мережі з розподіленою генерацією..

## 5. ЛІТЕРАТУРА

1. An Adaptive Protection Scheme based on Fault Location for Smart Micro-Grids / R.Jafari, M.S.Naderi, G.B.Gharehpetain // International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'14) Cordoba (Spain), 2014. - ISSN 2172-038 X. - No.12.
2. A Simple Adaptive Overcurrent Protection of Distribution Systems With Distributed Generation / Mahat, Zhe Chen, B.Bak-Jensen, C.L.Bak, // IEEE Transactions on Smart Grid, Sept, 2011. - vol. 2, no. 3. - P. 428-437.
3. Catalogue 2013. Sepam series 20, series 40, series 60, series 80. <http://www.schneider-electric.com>. SEPED303005EN.
4. Evaluation of DSP based Numerical Relay for Overcurrent Protection / Yin Lee Goh, Agileswari K.Ramasamy, Farrukh Hafiz Nagi, Aidil Azwin Zainul Abidin // International journal of systems applications, engineering & development, Issue 3, Volume 5. - 2011.
5. Руководство по установке и применению. Sepam 1000+ серии 40. Функции защиты 3/1. MerlinGerin.SchneiderElectric. – 196 с.
6. Инструкции по эксплуатации. Цифровая максимальная токовая защита с выдержкой времени и защитой от термической перегрузки с функциями АПВ SIPROTEC 7SJ602 v.3.1. Siemens AG1999. – 2010 – 206 с.

### **Професор, Володимир Кузнецов**

Інститут електродинаміки НАН України  
Пр. Перемоги, 56, 03057, м. Київ, Україна  
[kuznetsov@ied.org.ua](mailto:kuznetsov@ied.org.ua)

### **Старший науковий співробітник, Людмила Сабарно**

Інститут електродинаміки НАН України  
Пр. Перемоги, 56, 03057, м. Київ, Україна  
[sabarno@ied.org.ua](mailto:sabarno@ied.org.ua)

### **Старший науковий співробітник, Всеволод Кошман**

Інститут електродинаміки НАН України  
Пр. Перемоги, 56, 03057, м. Київ, Україна  
[koshman@ied.org.ua](mailto:koshman@ied.org.ua)

### **Інженер, Ігор Севастюк**

Інститут електродинаміки НАН України  
Пр. Перемоги, 56, 03057, м. Київ, Україна  
[sevastjuk@ied.org.ua](mailto:sevastjuk@ied.org.ua)