

УДК 0.007

**Фролов І.В.**, магістрант  
науковий керівник **Попов В.А.**, д-р.техн.наук, проф  
кафедра електропостачання, Інститут енергозбереження та енергоменеджменту,  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»

## ДОСЛІДЖЕННЯ АЛГОРИТМІВ ОПТИМІЗАЦІЇ ВСТАНОВЛЕННЯ ЗАХИСНОГО ОБЛАДНАННЯ В ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЯХ 6-20 КВ З МЕТОЮ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ.

***Анотація** - В даній статті розглянуті основні питання підвищення надійності електричних мереж у зв'язку з збільшенням використання джерел розосередженої генерації. Зроблено огляд та проведено аналіз, щодо переваг та недоліків оптимізаційних алгоритмів, які на даний час використовуються в різних країнах світу, для оптимального розміщення захисного обладнання в повітряних лініях.*

***Ключові слова:** секціонування, повітряна лінія, надійність електропостачання, реклоузер, розподілена генерація, недовідпуск електроенергії, жорсткий алгоритм, генетичний алгоритм.*

***Abstracts** - This article addresses the main issues of increasing the reliability of power grids due to the increased use of distributed generation sources. The advantages and disadvantages of the optimization algorithms currently in use in different countries around the world have been reviewed and analyzed for the optimal placement of safety equipment in overhead lines.*

***Keywords:** sectionalizing, overhead line, reliability of power supply, recloser, distributed generation, power failure, greedy algorithm, genetic algorithm.*

### **Вступ**

Алгоритми оптимізації встановлення захисного обладнання в повітряних лініях (ПЛ) існують вже на протязі досить довгого часу, проте з ускладненням топології електричних мереж виникла потреба в оновленні (створенні нових) алгоритмів. Основною причиною цього став факт збільшення масштабів електричних мереж та зміна, або не визначеність енергетичних потоків в мережі (децентралізована генерація та введення на енергетичний ринок джерел відновлювальної енергетики), що у свою чергу ускладнює розрахунки та робить попередньо розроблені алгоритми не актуальні з причини обмеженості машинно-розрахункового ресурсу, або занадто великої кількості часу для здійснення розрахунків.

При такому розвитку мережі, актуалізується питання її безпеки та надійності. Також не змінною залишається умова забезпечення нормативно заданого рівня надійності мережі, в умовах обмеженості ресурсів.

Спираючись на задану проблематику та тенденції, які присутні в сьогоденному енергетичному секторі України, важливо ознайомитися з попереднім вітчизняним та іноземним досвідом, провадження алгоритмів для оптимальної роботи електричної мережі.

### **Мета та завдання**

Основною метою даної статті є вивчення попереднього досвіду, щодо створення нових алгоритмів оптимізації, що враховують умови обмеженості ресурсів та працюють з врахуванням наявності в мережі малих джерел генерації. Базуючись на такому досвіді, метою для подальших робіт буде формування в даній роботі, алгоритму, який би зміг поєднати сильні сторони алгоритмів використаних в цій роботі.

### Матеріал досліджень

Одним з головних регуляторів Українського ринку електроенергії виступає НКРЕКП. Проаналізувавши законодавчу базу постанов даного регулятора, стосовно питання рівня надійності електропостачання, важливо виділити постанову від 12.06.2018 № 375 про «порядок забезпечення стандартів якості надання послуг з електропостачання»[1].

Даною постановою регламентуються основні якісні показники (рівень напруги, час перерв електропостачання, відхилення рівня напруги тощо). За перевищення вказаних лімітів (Додаток 1 і 3 постанови), встановлені штрафні санкції (Додаток 2 постанови), що є економічно не вигідним для оператора системи електропостачання.

Для уникнення штрафних санкцій та забезпечення стандартами електропостачання встановленими НКРЕКП, оператор має зменшувати масштаби відмов, які виникають в електричній мережі. Також слід зважати на той факт, що при від'єднанні споживача від мережі, його споживання електроенергії зупиняється, тобто оператор несе додаткові втрати, бо товар, який був вготований не продасься.

Основні показники, які використовуються для аналізу надійності ПЛ це ENS (очікуваний недовідпуск електричної енергії), SAIFI (системний показник середньої частоти перерв електропостачання), SAIDI (системний показник середнього часу перерв електропостачання) [2]. Також, як важливий параметр для прийняття рішення є вартість встановленого обладнання С.

Для мінімізації «зони відмови», використовуються різні види захисного обладнання (плавкі вставки, реклоузери, секціонолайзери тощо). Проте зважаючи на обмеженість фінансового ресурсу, актуальним стає питання «ціни/якість», тобто яким чином досягнути заданого показника при мінімальних витратах. Саме з цією метою оператори електропостачання використовують алгоритми оптимізації.

Для повного розуміння роботи оптимізаційних алгоритмів, була зібрана інформація щодо традиційних алгоритмів оптимізації, та інформація про алгоритми, які були нещодавно розроблені і розробка яких, була зумовлена потребою прогнозування оптимального варіанту розташування захисного обладнання в умовах розосередженої генерації (в тому числі і відновлювальної енергетики).

Одні з основних алгоритмів, які вже досить довгий час використовуються є Гріді (жадібний) та Генетичний алгоритм.

- Гріді алгоритм:

- алгоритм робить оптимальний вибір на кожному кроці, намагаючись знайти загальний оптимальний спосіб вирішення проблеми. На рис 1. зображено граф, який ілюструє, як за Гріді алгоритмом, буде проходити обрання оптимального варіанту. Також даний рис демонструє, що варіант, який обирається даним алгоритмом не є «ідеальним».

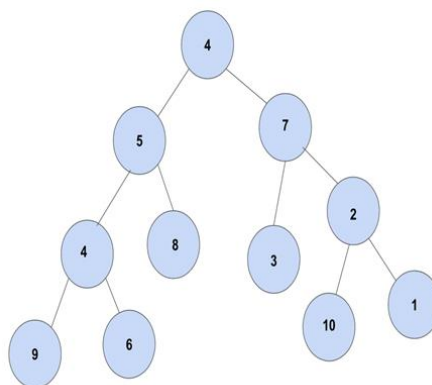


Рис 1. Приклад роботи Гріді алгоритму [3].

- Генетичний алгоритм:

- це алгоритм, який працює аналогічно принципу природнього відбору. Зазначений принцип полягає в знаходженні декількох оптимальних варіантів та об'єднання їх (принцип життєвого циклу хромосом). Після об'єднання найоптимальніших варіантів, відбувається аналогічний 2 етап відбору. Цикли будуть продовжуватися, до моменту поки умови виходу з циклу не будуть виконані [4]. Даний алгоритм можна побачити на рис 2.

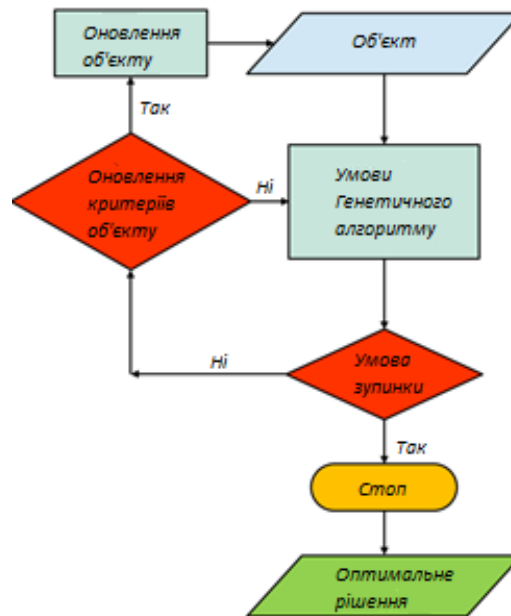


Рис 2. Приклад роботи Генетичного алгоритму.

З розвитком електромережі розвивалися і алгоритми, які використовували для оптимізації встановлення захисного обладнання. Результатом цього стало створення алгоритмів «колонії мурах» та «стрибка жаби»:

- Алгоритм «колонії мурах»:

- даний алгоритм розроблений на основі об'єднання генетичного та жадібного алгоритмів. За ідею було взято умовний «рух мурах» по матриці (матриця представляє собою з'єднання між вузлами), які за мінімальну кількість ітерацій мають знайти оптимальний варіант за заданими параметрами алгоритмом. В даному алгоритмі одразу можна досиджувати, оптимізацію одразу декількох параметрів мережі [5].

- Алгоритм «стрибка жаби»:

-даний алгоритм є багатокритеріальним, та дозволяє зменшити кількість ітерацій за рахунок відкидання певної групи варіантів (перестрибуючи їх «стрибком жаби»), що дає змогу зменшити час та завантаженість розрахунку для великих мереж. Проте за рахунок такого «стрибка» відкидається більша кількість варіантів розташування захисного обладнання, тобто ймовірність знаходження найкращого варіанту розміщення захисного обладнання в ПЛ зменшується [6].

При проведенні загального аналізу алгоритмів, було складено порівняльну таблицю проаналізованих алгоритмів (Таблиця 1).

Таблиця 1. Порівняльна таблиця оптимізаційних алгоритмів.

Алгоритм	Гріді	Генетичний	«Колонія мурах»	«Стрибок жаби»
Переваги	Є успішними в проблемах, таких як пошуку найкоротшого шляху через граф.	Алгоритм має властивість покращення за рахунок селекції. Може працювати одночасно для оптимізації декількох показників.	Має можливість оптимізації одразу декількох параметрів надійності, в даному випадку: SAIFI, SAIDI, TC/ENS.	Зменшує кількість варіантів, які можуть розглядатися.
Недоліки	У багатьох проблемах Гріді алгоритм не дає оптимального рішення.	Потребує глибокого знання програмування.	Створений на базі Гріді та Генетичного алгоритмів, тому має схожі недоліки. Не враховує непостійну генерацію ВДЕ.	За рахунок зменшення часу розрахунку, може видавати варіант, який далекий від оптимального.

### Результати досліджень

Після вивчення основних актуальних питань, щодо надійності електропостачання, було сформульовано та виконано наступні кроки, щодо розробки нового алгоритму оптимізації:

- Було вирішено, що для розрахунку оптимального місця встановлення захисної апаратури буде використовуватися наступна цільова функція:

$$\max \left\{ \frac{\Delta NRI^L(x_n^k)}{\Delta C^L(x_n^k)} \right\}$$

де,  $\Delta NRI^L(x_n^k)$  – нормлізований індекс надійності;

$\Delta C^L(x_n^k)$  – відображає відносний приріст витрат на підвищення надійності після установки в лінію +1 захисного пристрою;

$$\Delta NRI^L(x_n^k) = w_{SAIDI} \frac{SAIDI^{L-1} - SAIDI^L(x_n^k)}{SAIDI^{L-1}} + w_{SAIFI} \frac{SAIFI^{L-1} - SAIFI^L(x_n^k)}{SAIFI^{L-1}} + w_{ENS} \frac{ENS^{L-1} - ENS^L(x_n^k)}{ENS^{L-1}}$$

де,  $w_{SAIDI} + w_{SAIFI} + w_{ENS} = 1$

Також було вирішено, що значення витрат на встановлення захисного обладнання буде обмежуватися, в залежності від умов задачі та виду обладнання, що використовується.

- На основі невеликої електричної мережі (11 вузлів), було розроблено код у програмному забезпеченні Payton, який розраховує оптимальний варіант встановлення захисного обладнання в даній мережі. Даний код розраховує максимальне зменшення недовідпуску електроенергії та оптимальний варіант витрати коштів. Результати даного аналізу можна побачити на рис 3.

```

number of reclosers = 12
edges with reclosers: [(0, 1), (1, 2), (2, 3), (2, 5), (5, 6), (6, 7), (6, 9), (7, 8), (9, 10), (9, 11), (11, 12), (11, 13)]
EESN value = 284800.0
Extra supply enegy (profit) = 402000.0
Profit (PLN) = 212400.0
-----
number of reclosers = 12
edges with reclosers: [(0, 1), (1, 2), (2, 3), (3, 4), (5, 6), (6, 7), (6, 9), (7, 8), (9, 10), (9, 11), (11, 12), (11, 13)]
EESN value = 290400.0
Extra supply enegy (profit) = 396400.0
Profit (PLN) = 209040.0
-----
number of reclosers = 12
edges with reclosers: [(0, 1), (1, 2), (2, 5), (3, 4), (5, 6), (6, 7), (6, 9), (7, 8), (9, 10), (9, 11), (11, 12), (11, 13)]
EESN value = 299000.0
Extra supply enegy (profit) = 387800.0
Profit (PLN) = 203880.0
-----
number of reclosers = 12
edges with reclosers: [(0, 1), (2, 3), (2, 5), (3, 4), (5, 6), (6, 7), (6, 9), (7, 8), (9, 10), (9, 11), (11, 12), (11, 13)]
EESN value = 296000.0
Extra supply enegy (profit) = 390800.0
Profit (PLN) = 205680.0
-----
number of reclosers = 12
edges with reclosers: [(1, 2), (2, 3), (2, 5), (3, 4), (5, 6), (6, 7), (6, 9), (7, 8), (9, 10), (9, 11), (11, 12), (11, 13)]
EESN value = 284000.0
Extra supply enegy (profit) = 402800.0
Profit (PLN) = 212880.0
-----
EESN min value = (284000.0, [(1, 2), (2, 3), (2, 5), (3, 4), (5, 6), (6, 7), (6, 9), (7, 8), (9, 10), (9, 11), (11, 12), (11, 13)])
Profit max value = (214800.0, [(1, 2), (2, 3), (2, 5), (5, 6), (6, 7), (6, 9), (7, 8), (9, 10), (9, 11), (11, 12), (11, 13)])

```

Рис 3. Результати розрахунку програми.

• На даному етапі відбувається розробка алгоритму на базі Гріді, який би одночасно враховував вищезазначені показники мережі. Після завершення його розробки, буде проведений аналіз, щодо його результативності та на основі аналізу зроблені висновки, щодо подальшого напрямку роботи.

### Висновки

За результатами роботи, було зроблено висновки, що за рахунок розвитку електричної мережі, виникла потреба в оновленні оптимізаційних алгоритмів встановлення захисного обладнання. При аналізі вже існуючих алгоритмів були зроблені висновки та висвітлені їх основні переваги та недоліки. На основі даних висновків, були висунуті основні положення, за якими в подальшому буде проводитися розробка нового алгоритму з використанням програмного забезпечення. Результативність такого алгоритму буде оцінена за рахунок порівняння його результатів з вже існуючими алгоритмами та найоптимальнішим варіантом (тобто розрахованим за допомогою перевірки всіх існуючих варіантів). Якщо дані будуть позитивними, то можна буде висунути твердження, що запропонований алгоритм буде показувати кращі результати і при роботі в великих системах.

### Література:

1. Постанова НКРЕКП від 12.06.2018 № 375 про «Порядок забезпечення стандартів якості надання послуг з електропостачання».
2. Попов В.А, Ткаченко В.В., Сахрагард С.Б., Журавлев А.А. Особенности анализа надежности воздушных распределительных сетей с источниками распределенной генерации». Восточно - Европейский журнал передовых технологий. ISSN 1729-3774. 2015. 27-32 с.
3. Електронний ресурс: URL: brilliant.org. (дата звернення 01.05.2020)

4. M. Jafari, H. Monsef, S. Moghadam. Optimum number, placement and capacity of dgs and reclosers using analysis hierarchical process and genetic algorithm, IEEE Trans. on Power Syst., April 2011. vol. 14, no. 2, pp. 132-136.
5. M. Aman , G. Jasmon, H. Mokhlis, A. Bakar. Optimum tie switches allocation and dg placement based on maximization of system loadability using discrete artificial ant colony algorithm. The Institution of Engineering and Technology. IET Gener. Transm. Distrib., 2016, Vol. 10, Iss. 10, pp. 2277–2284
6. Zbigniew Galias. Tree-Structure Based Deterministic Algorithms for Optimal Switch Placement in Radial Distribution Networks, IEEE Trans. on Power Syst., vol. 24, no. 6, pp. 4269-4278, November 2019.