

УДК 621.316.11

А. П. Заболотний канд. техн. наук, Д. В. Федоша, К. І. Парусімова, С. В. Усенко
Запорізький національний технічний університет

Алгоритм визначення проміжних вузлів навантаження радіальних розподільчих мереж

На основі методу потенційної поверхні розроблено алгоритм визначення проміжних вузлів навантаження радіальних розподільчих мереж.

сильна технічна група, слабка технічна група, проміжний вузол навантаження, радіальна розподільча мережа, трансформаторний вузол, без трансформаторний вузол, центру витрат, розподільчий пристрій

Вступ

При проектуванні та модернізації мережі головним завданням є вибір джерел живлення електричної мережі: визначення їх кількості, потужності, місць розташування, розподіл за ними приймачів електроенергії, питання компенсації реактивної потужності, резервування за низькою стороною, улаштування проміжних вузлів навантаження (рівнів розподільчої мережі), що суттєво впливають на обсяги капітальних та експлуатаційних витрат.

Згідно з дослідженням [1], розв'язання питання проміжних вузлів навантаження повинне здійснюватись сумісно з іншими задачами, а саме, визначенням кількості вузлів навантаження, місць їх розташування, потужності трансформаторів та групування приймачів за вузлами навантаження. Даний підхід має виключити фактор суб'єктивізму, збільшити область пошуку оптимальних рішень задачі та отримати більш оптимальне рішення в цілому, але на данному етапі не проводиться розв'язання задачі вибору кількості та місць розташування проміжних вузлів навантаження.

Розв'язання задачі вибору кількості рекомендується проводити, використовуючи оціночні методи [2]. Однак, ці методи не дають можливості визначення місця розташування проміжних вузлів навантаження та їх застосування для розв'язання такої локальної задачі, до всього об'єкту дає велику кількість варіантів для оцінювання, що погіршує якість отриманого результату.

Метою статті є розробка алгоритму визначення проміжних вузлів навантаження радіальних розподільчих мереж в межах алгоритму потенційної поверхні, для побудови оптимальної структури системи електропостачання.

З метою розв'язання даної проблеми було запропоновано алгоритм побудови оптимальної структури мережі електропостачання, в якому, для покращення якості групування вузлів навантаження, електроприймачів умовно були розділені на дві групи: «Слабку технічну групу» та «Сильну технічну групу» [3].

«Сильна технічна група» – це група електроприймачів,

сформована за «технічним» критерієм, яка має оптимальний коефіцієнт завантаження джерела живлення, виходячи з умов надлишковості. Тобто, це ті електроприймачі, для яких, власне, і встановлюється джерело живлення при розрахунках методом потенційної функції. Якщо розглядати споживачів «сильної групи» на рівні напруги 10 кВ, це навантаження промислового підприємства або іншого об'єкта чи групи об'єктів, які розташовані відносно недалеко одне від одного та отримують живлення від єдиного джерела (трансформаторної підстанції 110/10 кВ, або 35/10 кВ), спеціально для цього встановленого. Споживачами при цьому є цехові трансформаторні підстанції 10/0,4 кВ, або 10/0,6 кВ, а також потужне промислове обладнання, для живлення якого використовується напруга 10 кВ.

Для такої мережі характерними є невелика відстань від споживачів до джерела, різнопланові за потужністю та характером навантаження, відносно мінімальні втрати у кабельних лініях і велика вартість кабелів та комірок розподільчого пристрою (КРП). Через це встановлення розподільчих пристроїв для цієї групи частіше за все виявляється недоцільним.

Доцільність формування вузла навантаження може проявитись лише у випадках відносно великої віддаленості та скупченості споживачів, коли витрати на радіальну розподільчу мережу від підстанції (п/ст) до споживачів будуть більші за сумарні витрати на живильну мережу від п/ст до розподільчого пристрою (РП) та на розподільчу мережу від РП до споживачів, тому встановлення проміжних вузлів навантаження у межах цієї групи обумовлюється лише зменшенням витрат на розподільчу мережу, у порівнянні із витратами на мережу без вузлів навантаження (радіально-променевою схемою живлення).

«Частина сильної групи» – це група електроприймачів «сильної групи», яка виділена з неї за додатковими критеріями (наприклад: показник розкиду навантаження, який використовується в тензорному методі).

«Слабка технічна група» – група електроприймачів,

© А. П. Заболотний, Д. В. Федоша, К. І. Парусімова, С. В. Усенко 2010 р.

сформована за «технічним» критерієм з умов недостатності. Тобто, це ті приймачі, приєднання яких до існуючих джерел живлення, власне, небажане, оскільки це погіршує техніко-економічні показники мережі (потужність джерела живлення доводиться завищувати, і при цьому коефіцієнт завантаження джерела живлення менший за прийнятний). У той же час, формування власного джерела для цих приймачів неприйнятне через їх замалу потужність або інші технічні критерії.

Доцільність встановлення проміжних вузлів навантаження у межах цієї групи обумовлюється, зазвичай, значним зменшенням витрат на розподільчу мережу («слабка група» приймачів порівняно віддалена від джерела) у порівнянні з витратами на мережу без вузлів навантаження, а також техніко-економічним обґрунтуванням розподілу приймачів за джерелами живлення (прокладення більш довгої мережі з більшими витратами до іншого джерела може компенсуватися можливістю не збільшувати потужність джерела живлення).

Техніко-економічний розрахунок базується на порівнянні двох варіантів виконання локальної ділянки структури мережі, границі якої визначаються за сильною та слабкою технічними групами. Перший варіант з проміжним вузлом навантаження, другий без проміжного вузла навантаження. Прийняття варіанта з проміжним вузлом навантаження виконується за умовою

$$C_1 + \Delta W_1 \cdot K_{CP} < C_{II} + \Delta W_{II} \cdot K_{CP}, \quad (1)$$

де C_1, C_{II} – капітальні вкладення у перший та другий варіант відповідно;

$\Delta W_1, \Delta W_{II}$ – річні втрати енергії за першим та другим варіантом відповідно;

K_{CP} – коефіцієнт, що враховує пріоритет втрат електричної енергії над капітальними вкладеннями, визначається за формулою

$$K_{CP} = T_O \cdot (C_1 + \sum_{i=2}^{T_O} (C_i - C_1)), \quad (2)$$

де T_O – термін окупності (в місяцях);

C_1 – вартість спожитої електричної енергії в перший місяць;

C_i – вартість спожитої електричної енергії в i -й місяць.

При цьому капітальні вкладення першого варіанту будуть залежати від чотирьох складових:

$$C_1 = f(C_{PWB}; C_M; C_{PB}; C_{Bi}), \quad (3)$$

де C_{PWB} – капітальні вкладення в розподільчу мережу від проміжного вузла навантаження до електроприймачів;

C_M – капітальні вкладення в провідник, з'єднуючий проміжний вузол навантаження з джерелом живлення;

C_{PB} – капітальні вкладення в проміжний вузол навантаження;

C_{Bi} – капітальні вкладення в чарунки джерела живлення.

Капітальні вкладення другого варіанту будуть залежати від двох складових:

$$C_{II} = f(C_{PB}; C_{Bi}), \quad (4)$$

де C_{PB} – капітальні вкладення в розподільчу мережу від джерела живлення до електроприймачів;

C_{Bi} – капітальні вкладення в чарунки джерела живлення.

Таким чином, метод порівняльної оцінки передбачає аналіз локальної ділянки структури мережі з визначенням ряду технічно доцільних варіантів її виконання та подальше порівняння цих варіантів між собою за критерієм питомих витрат. Менш витратний з цих варіантів і буде найбільш оптимальним за техніко-економічними показниками.

Матеріали дослідження

З усього вищезазначеного впливає принцип побудови алгоритму розрахунку проміжних вузлів навантаження, який базується на методиці [4, 5]. Ця методика дає відповідь про оптимальний розподіл приймачів електроенергії промислового об'єкта за заданим числом джерел живлення з визначенням місць розташування останніх в центрах навантажень груп та про оптимальне число джерел живлення для заданої множини приймачів електроенергії промислового об'єкта.

Згідно з цією методикою, необхідно передбачити можливість встановлення джерел живлення (вузлів навантаження) для групи споживачів та розподіл між ними має бути оптимальним. Для вирішення даної задачі усі множина споживачі розподіляються на S груп. Передбачається, що кожна з цих груп буде отримувати живлення від власного вузла навантаження. Для першого варіанту мережі S обирається рівним 2, для другого – 3 і так далі, поки кількість груп не стане рівною $n-1$, де n – загальна кількість споживачів (при числі $S=1$ отримуємо один вузол навантаження, від якого будуть отримувати живлення усі споживачі, тобто ту саму радіальну мережу, а при числі $S=n$ отримуємо вузли навантаження із одним приєднанням кожен, що не має практичного сенсу і фактично знову повертає нас до тієї ж радіальної мережі). Для кожного з цих варіантів визначається найбільш оптимальний розподіл споживачів на групи.

Методика, наведена у [4, 5], була розроблена для визначення джерел живлення у групі приймачів, тобто основним критерієм був розкид навантаження у групах, при цьому зневажалися витрати на живильну мережу. Натомість у рамках поставленої задачі витрати на живильну мережу будуть співвідносні з витратами на розподільчу мережу, тому що передача енергії відбувається на одному рівні напруги без трансформацій та довжина мереж майже однакова. У зв'язку з цим алгоритм [4, 5] було дещо вдосконалено.

Перш за все було додано процедуру коригування центру електричних навантажень (ЦЕН) з врахуванням витрат на живильну мережу, оскільки за нових умов розміщення вузла навантаження є найбільш раціональним вже не у центрі навантажень, а, так би мовити, у «центрі витрат», тобто у точці, де сумарні витрати на розподільчу та живильну мережі досягають найменшого значення.

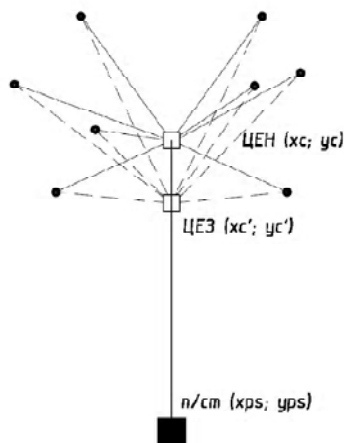


Рис. 1. Зміщення РП до «центру витрат»

Так як розподільча мережа може з'єднувати багато споживачів, розміщених на площі об'єкта, врахувати чітку залежність розташування «центру витрат» не вдасться можливим. Тому при автоматизованому проектуванні найбільш логічним виявилось рішення розбиття живильної мережі на N відрізків. Після цього вузол навантаження зміщується на такий відрізок у напрямку джерела живлення. Наприклад, для ситуації, зображеної на рис. 1, ділянку живильної мережі можна описати вектором

$$L_j = (x_{ps} - x_c; y_{ps} - y_c), \quad (5)$$

де x_{ps}, y_{ps} – координати джерела живлення (живильної підстанції);

x_c, y_c – координати ЦЕН.

При розбитті цього вектора на N частин зміщення центру буде відбуватися на відрізок

$$L_j' = \left(\frac{x_{ps} - x_c}{N}; \frac{y_{ps} - y_c}{N} \right). \quad (6)$$

Звідси,

$$\frac{1}{N} \cdot (x_{ps} - x_c) = (x_{ps} - x_{c'}), \quad (7)$$

$$\frac{1}{N} \cdot (y_{ps} - y_c) = (y_{ps} - y_{c'}), \quad (8)$$

$$x_{c'} = \frac{N-f}{N} \cdot x_{ps} + \frac{f}{N} \cdot x_c, \quad (9)$$

$$y_{c'} = \frac{N-f}{N} \cdot y_{ps} + \frac{f}{N} \cdot y_c, \quad (10)$$

де $f=1$ – перший відрізок наближення;

$x_{c'}, y_{c'}$ – нові координати вузла навантаження.

Для цих нових координат центру обчислюються нові витрати на спорудження мережі. Якщо вони виявилися меншими за попередні, то наближення вузла навантаження до джерела живлення продовжується (f обирається рівним 2, 3, 4 і т. д.). Таким чином отримуємо достатньо точні координати «центру витрат». Більш точне наближення не видається доцільним, бо розміщення РП за реальних обставин обирається враховуючи існуючі особливості топології об'єкта.

Крім того, початковий алгоритм у деяких випадках видає помилкові рішення.

По-перше, виникає так звана «секторна помилка», коли вузол навантаження формується у групі, розташованій близько до джерела живлення, але споживачі якої скупчені, і лише у другу чергу ЦЕН буде утворюватися у віддаленій групі, яка більш розосереджена. Це може призводити до того, що деякі раціональні варіанти побудови мережі не будуть враховані. Тому було прийнято рішення про введення до алгоритму джерела живлення, як одного з вузлів навантаження, координати якого є незмінними. Через це наближені споживачі приєднуються до нього одразу за радіальною схемою. Такий варіант є більш раціональним.

Також при розрахунках виникає комплексна помилка. Якщо після закінчення оцінки варіанту розподілу на S груп порівняти витрати на кожний РП із радіальною мережею, то може виявитися, що деякі РП дорожчі, а деякі дешевші від простої мережі. При цьому весь проект може бути дорогим через те, що дороговизна перших перебиває дешевизну других. Тому було прийнято рішення після закінчення стандартного розрахунку проекту здійснити порівняння кожного РП з відповідною ділянкою радіальної розподільчої мережі. У випадку з'ясування, що радіальний варіант є дешевшим, відбувається заміна на такий варіант. Таким чином, сумарні витрати проекту будуть враховувати лише економічно вигідні вузли навантаження.

«Сильною групою» споживачів на рівні напруги 0,4 кВ можна вважати навантаження цеху промислового підприємства, тобто групу трифазних та однофазних приймачів електроенергії, які отримують живлення від цехової ТП напругою 0,4 кВ. Система електропостачання такого об'єкта має ряд технологічних особливостей. Перш за все, це велике скупчення приймачів на досить малій території. Відстань між ЕП відносно невелика, і зазвичай вони об'єднані у один технологічний процес. Якщо немає особливих вимог до безпеки, розподільча мережа такого рівня виконується алюмінієвими проводами з полімерною ізоляцією, а також низьковольтними кабелями. Їх вартість порівняно невелика, і у даному випадку першочерговою складовою витрат постають електричні втрати у провідниковому матеріалі, адже струми

у низьковольтній мережі значно вищі, ніж у мережах середньої напруги.

Проміжними вузлами навантаження для цехового електропостачання можна вважати силові розподільчі пункти (СП), до яких підключаються групи приймачів цеху і до яких силовим кабелем підводиться живлення від розподільного пристрою цехової ТП. Комутація електричних кіл здійснюється автоматичними вимикачами. Також можуть застосовуватися СП, обладнані запобіжниками, що ще більше знижує їх вартість, але не завжди допустимо.

В цілому, алгоритм розрахунку цехового електропостачання дуже схожий за принципом на розрахунок «сильної групи» електромереж середньої напруги. Усі приймачі так само діляться спочатку на дві, потім на три, чотири і так далі груп, і для кожного з цих варіантів розподілу визначається оптимальна конфігурація мережі та обчислюються питомі витрати на такий проект. Потім усі ці проекти варіантів побудови мережі порівнюються і обирається економічно найвигідніший.

Головною відмінністю та складністю моделювання такої задачі є дискретність кількості приєднань вузлів навантаження. Адже промисловість випускає силові пункти, що містять в основному 5 або 8 фідерних автоматичних вимикачів (також можна знайти аналоги на 3 і 12 приєднань). Шафи на кількість приєднань більше 12 зазвичай виконуються за індивідуальними замовленнями і коштують набагато дорожче. Крім того, така особливість має і технічне підґрунтя: за великої кількості приєднаних споживачів струм у живильній мережі може досягати значної величини. Стандартний ряд перерізів кабельної продукції може не задовольнити такі вимоги, а вартість автоматичних вимикачів для комутації струмів, вищих за 250 А, зростає на декілька порядків. Якщо не передбачити такий фактор при моделюванні, алгоритм призведе до некоректних та нераціональних результатів.

Для вирішення даної проблеми можна використовувати методи тензорного аналізу. Математична модель, заснована на тензорному принципі, є досить гнучкою і дозволяє врахувати такі умови без значних змін основного алгоритму. Очевидно, що для дискретизації кількості приєднань необхідно розподілити приймачі на групи за звичайним алгоритмом, визначивши оптимальні місця розміщення ЦЕН. Після цього треба пересортувати силові пункти, привівши їх до стандартних розмірів, і найбільш придатні до цього приймачі приєднати до інших вузлів. Для досягнення такої мети необхідно виявити критерій сортування приймачів, який був би найбільш доцільним в умовах даної задачі. На основі логічних міркувань та експериментальних досліджень для цього був обраний «критерій бажаної належності»: чим більше за модулем різниця відстаней від даного приймача до РП, якому він належить, та до іншого найближчого РП, тим більш бажана приналежність цього приймача до свого РП. Іншими словами, якщо кількість приєднань вузла більша за стандартну, необхідно

від'єднати від нього ті приймачі, які будуть якомога далі від нього і водночас якомога ближче до іншого вузла, здатного їх прийняти. Даний принцип проілюстрований на рис. 2.

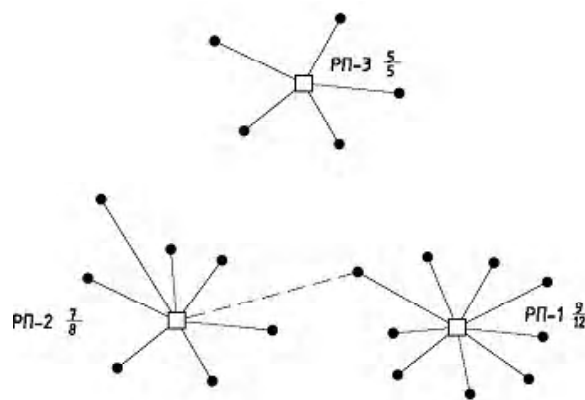


Рис. 2. Ілюстрація дискретизації вузлів за кількістю приєднань

Як видно з рисунка, приймач, що знаходиться у зоні спільного впливу двох вузлів, вигідно приєднати до РП № 2. Тоді РП № 2 заповниться повністю за приєднаннями, а розмір РП № 1 можна буде зменшити з 12 до 8 приєднань. Витрати на провідниковий матеріал при цьому будуть незначними. Після того, як найбільш вдалі приймачі були таким чином відділені від вузлів, їх необхідно знову перерозподілити між вузлами, врахувавши дискретність приєднань останніх. Для вирішення цієї задачі найбільш раціональним рішенням видається оцінка питомих витрат у межах локальної ділянки розподільного пункту. Тобто, для усіх РП, окрім тих, що мають максимальну кількість приєднань, розраховуються витрати на збільшення до наступного більшого числа приєднань за рахунок найближчих до того чи іншого РП приймачів. Цей оціночний критерій можна описати наступним виразом:

$$\Delta Z = \frac{\sum 3i' + (3 \cdot 0_{k+1} - 30_k)}{n'} \quad (11)$$

де $3i'$ – вартість мережі від СП до приймача, що додається до нього;

30_k – вартість СП з існуючим числом приєднань;

30_{k+1} – вартість СП на наступне більше число приєднань;

n' – кількість приймачів, що додаються до вузла.

Таким чином оцінюються питомі витрати в середньому на кожне приєднання до вузла навантаження при його збільшенні, в кінці розрахунків обирається СП, показник питомих витрат якого найменший, і для нього відбувається вже не оціночне, а остаточне збільшення розміру за рахунок приєднання найближчих приймачів. Після розподілу за такою методикою усіх приймачів алгоритм повертається до попередньої схеми, тобто уточнюються точки ЦЕН (вже з урахуванням нового поділу

на групи) і відбуваються наступні ітерації, допоки показник питомих витрат на проект (11) не досягне свого мінімуму.

Крім того, у алгоритмі виникає потреба у внесенні джерела живлення у розрахунки як одного з вузлів навантаження, але з фіксованими координатами. Єдиною відмінністю у даному випадку буде те, що кількість приєднань цього вузла нормувати також не буде потреби, а до показника (11) має додаватися умова не приєднувати приймачі, відстань від яких до даного СП більша, ніж до джерела живлення.

Так само, по закінченні оптимізації кожного варіанта необхідно проводити комплексний аналіз мережі та розформувати ті вузли навантаження, які за витратами перевищують радіальну схему живлення.

«Слабка група» являє собою навантаження, відносно віддалене від центрів живлення та невелике за потужністю. Приєднання споживачів цієї групи до джерела з максимальним ККД і, відповідно, максимально допустимим коефіцієнтом завантаження, призведе до необхідності збільшення джерела живлення при зменшенні його коефіцієнта завантаження. Так, наприклад, «слабкі групи» виникають при проектуванні електропостачання агропромислового комплексу. Для такої групи характерні великі втрати в лініях електропередач (ЛЕП) та їх значна довжина, а також спільність технологічних процесів. Тому, зазвичай, на таких територіях виявляється найбільш доцільним встановлення проміжних вузлів навантаження, які будуть отримувати живлення від найбільш вигідного джерела.

Таким чином, при початковому проектуванні джерела живлення формуються за методом еквіпотенційних поверхонь із забезпеченням найбільшого ККД. «Слабка група» цей показник погіршує та унеможливає проведення безпомилкових розрахунків за вищевказаним методом. Тому першочерговою метою розрахунків є визначення такого джерела, збільшення потужності якого буде найбільш виправданим. Метод порівняльної оцінки дозволяє вирішити таку задачу досить просто та одразу може розрахувати варіант структури мережі, який буде найкращим за економічними показниками, оскільки основним критерієм цього методу є питомі витрати, а не екстремуми потенційної функції.

Моделювання розрахунку «слабкої групи» відбувається аналогічно до попередніх прикладів. Група споживачів, для якої необхідно визначити оптимальну конфігурацію системи електропостачання, так само розподіляється на S груп ($S = 2, 3, 4 \dots n-1$), і визначається склад цих груп за критерієм розкиду навантаження [4, 5]. Після завершення групування схожий цикл повторюється вже відносно живильних ТП та щойно сформованих вузлів навантаження та оцінюється пріоритетність їх підключення до тієї чи іншої ТП. Після цього сформовані таким чином ТП знову переоцінюються: якщо потужність навантаження ТП не задовольняє показник

завантаження трансформатора ($K_{\text{з}} = 0,7 \dots 0,85$), то деякі вузли від'єднуються від ТП за «критерієм бажаної належності»). Коли потужність підстанцій досягне бажаних меж, за принципом, аналогічним до (11), визначається пріоритетність збільшення потужності тієї чи іншої ТП за рахунок вузлів, що залишилися від'єднаними на попередньому кроці:

$$\Delta Z = \frac{\sum Z_j' + (3 \cdot 0_{k+1} - 30_k)}{Cps'} \quad (12)$$

де Z_j' – вартість живильної мережі від підстанції до вузла, що додається;

30_k – витрати на п/ст поточної потужності;

30_{k+1} – витрати на п/ст наступної більшої потужності;

Cps' – потужність вузлів, що додаються до джерела.

В результаті поєднані алгоритми обчислення оптимального співвідношення живильної і розподільчої мережі, розподілення споживачів по групах та обирання приймачів за критерієм бажаної приналежності отримали загальний алгоритм визначення проміжних вузлів навантаження. Алгоритм наведено на рис. 3.

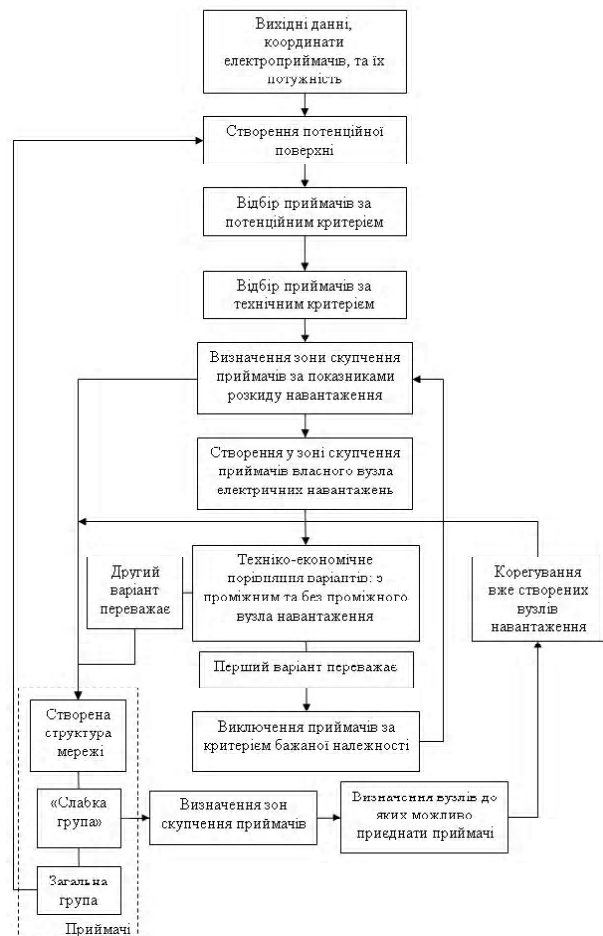


Рис. 3. Алгоритм визначення проміжних вузлів навантаження у складі алгоритму визначення оптимальної структури системи електропостачання

Висновки

В запропонованому алгоритмі для різних підстанцій порівнюється витратність спорудження мережі та необхідності збільшення потужності і в підсумку обирається варіант, найменший за витратами.

Цей принцип може також використовуватися для вже існуючих мереж, коли необхідно визначити схему живлення щойно утвореного споживача або субспоживача та пріоритетність його підключення до тої чи іншої підстанції, що функціонує у даному районі.

Список літератури

1. Заболотний А. П. Удосконалений метод потенційної функції для формування оптимальної структури розподільчої мережі / Заболотний А. П., Федоша Д. В., Криворученко Н. Л., Яценко О. О. // Електротехніка та електроенергетика. – 2008. – № 1. – С.74–80.
2. Раппорт А. Н. Актуальные задачи обеспечения электросетевого комплекса при развитии рыноч-

ных отношений в электроэнергетике. [научный журнал] / Раппорт А. Н., Кучеров Ю. Н. // Энергетик. – 2004. – № 10. – С. 22–24.

3. Заболотный А. П. Построение оптимальной структуры сетей электроснабжения предприятий АПК: Сборник научных трудов международной научно-практической конференции [«Проблемы энергообеспечения предприятий АПК и сельских территорий»] / Федоша Д. В., Мамбаева В. С. – С.- П. : СПбГАУ, 2008. – С. 42–46.
4. Федоров А. А. Определение центра электрических нагрузок для оптимального размещения питающих подстанций промышленных предприятий / Федоров А. А., Каменева В. В., Хмель С. Р. // Электричество. – 1974. – № 8. – С. 31–34.
5. Федоров А. А. Основы электроснабжения промышленных предприятий / Федоров А. А., Каменева В. В. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 473 с.

Поступила в редакцию 05.10.09 г.

После доработки 29.01.10 г.

Заболотный А. П., Федоша Д. В., Парусимова К. И., Усенко С. В. Алгоритм определения промежуточных узлов нагрузки радиальных распределительных сетей.

Разработан алгоритм определения промежуточных узлов загрузки радиальных распределительных сетей на основе метода потенциальной поверхности.

сильная техническая группа, слабая техническая группа, промежуточный узел нагрузки, радиальная распределительная сеть, трансформаторный узел, безтрансформаторный узел, центр потерь, распределительное устройство

Zabolotny A. P., Fedosha D. V., Parusimova K. I., Usenko S. V. An algorithm for determining the intermediate nodes load of radial distribution networks is.

An algorithm based on the method of potential surface is developed for determining intermediate load centers of radial distribution networks.

strong technical group, weak technical group, intermediate node load, radial distribution network, transformer node, transformerless node, center of losses, switchgear