

УДК 621.311

**МОДЕЛЮВАННЯ ОПТИМАЛЬНИХ МІСЦЬ РОЗТАШУВАННЯ ТА
ВЕЛИЧИНИ ПОТУЖНОСТІ ДЖЕРЕЛ РОЗПОДІЛЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ В
РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ НАПРУГОЮ 10 кВ В
УМОВАХ ЇХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ**

А. М. Скрипник, кандидат технічних наук

Д. П. Кожан, аспірант

e-mail: nni.elektrik@gmail.com

Анотація. *Запропоновано методику пошуку оптимальних місць розташування та величини потужності джерел розподіленої генерації в розподільних електричних мережах напругою 10 кВ в умовах їх експлуатації з проведенням відповідних експериментальних досліджень.*

Ключові слова: *розподільна електрична мережа, джерело розподіленої генерації (ДРГ), градієнтний метод, вектор – градієнт*

Впровадження ДРГ (такі як, перетворювачі сонячної і вітрової енергії, ГЕС на малих ріках тощо) у розподільних електричних мережах забезпечує чистоту навколишнього середовища, збільшує економію паливних ресурсів та зменшує втрати електроенергії в мережах за рахунок наближення виробництва електроенергії до споживачів [1].

При цьому одними із проблемних є питання щодо визначення оптимальних місць розташування ДРГ в системах електропостачання та величин активної і реактивної потужності з врахуванням розподілу між генеруючими об'єктами.

Можливі два підходи щодо визначення оптимальних місць розташування ДРГ та величини їх потужності:

1) у процесі проектування системи електропостачання з врахуванням її елементів узагальненими параметрами [2, 3].

2) в умовах експлуатації розподільних електричних мереж, що живляться від системного електропостачання.

Перший підхід вигідно відрізняється від другого тим, що дозволяє зміну конфігурації (топологію) системи електропостачання, яка проектується.

В основу другого підходу покладено існуючі фізичні та електричні параметри системи електропостачання, тому зміна її конфігурації пов'язана з додатковими капітальними затратами і не завжди можлива. Крім того на визначення оптимальних місця розташування та величини активної потужності ДРГ значний вплив мають: величина напруги центру живлення, величини напруги та генерація реактивної потужності в місці приєднання ДРГ до системи електропостачання та співвідношення вузлового навантаження за схемою споживання електроенергії.

Мета досліджень – розробка математичної моделі пошуку оптимальних місця розташування та величини потужності ДРГ в розподільних електричних мережах напругою 10 кВ в умовах їх експлуатації.

Матеріали та методика досліджень. Як перше наближення в основу математичної моделі пошуку оптимального місця розташування ДРГ в системі електропостачання (мережі напругою 10 кВ) пропонується використання градієнтного методу, в якому елементи вектор – градієнта є похідні від цільової функції (небаланси активної і реактивної потужностей або величини активної і реактивної потужностей у вузлах розрахункової схеми) за відповідними пошуковими характеристиками режиму електричної мережі, в якості яких можуть виступати як кути, такі модулі вузлових напруг.

$$\text{grad}\varphi = \begin{pmatrix} \partial\varphi / \partial x_1 \\ \partial\varphi / \partial x_n \\ \dots \\ \partial\varphi / \partial x_n \end{pmatrix}$$

де φ – цільова функція.

Вектор – градієнт визначається для всіх вузлів розрахункової схеми (крім центру живлення) в максимальному режимі її навантаження.

Для визначення оптимальних величин активної і реактивної потужностей ДРГ в оптимальному місці його встановлення використовується модифікація методу Ньютона [4], матриця частинних похідних (матриця Якобі), яка включає похідні по активній і реактивній вузлових потужностях, що дозволяє виконати оптимальний перерозподіл вказаних потужностей між центром живлення і ДРГ.

Експериментальні дослідження вище вказаних пропозицій виконані на прикладі фрагменту схеми електричної мережі напругою 10 кВ (рисунок) з параметрами ділянок та величинами вузлового навантаження, наведеними відповідно в табл. 1 і 2.

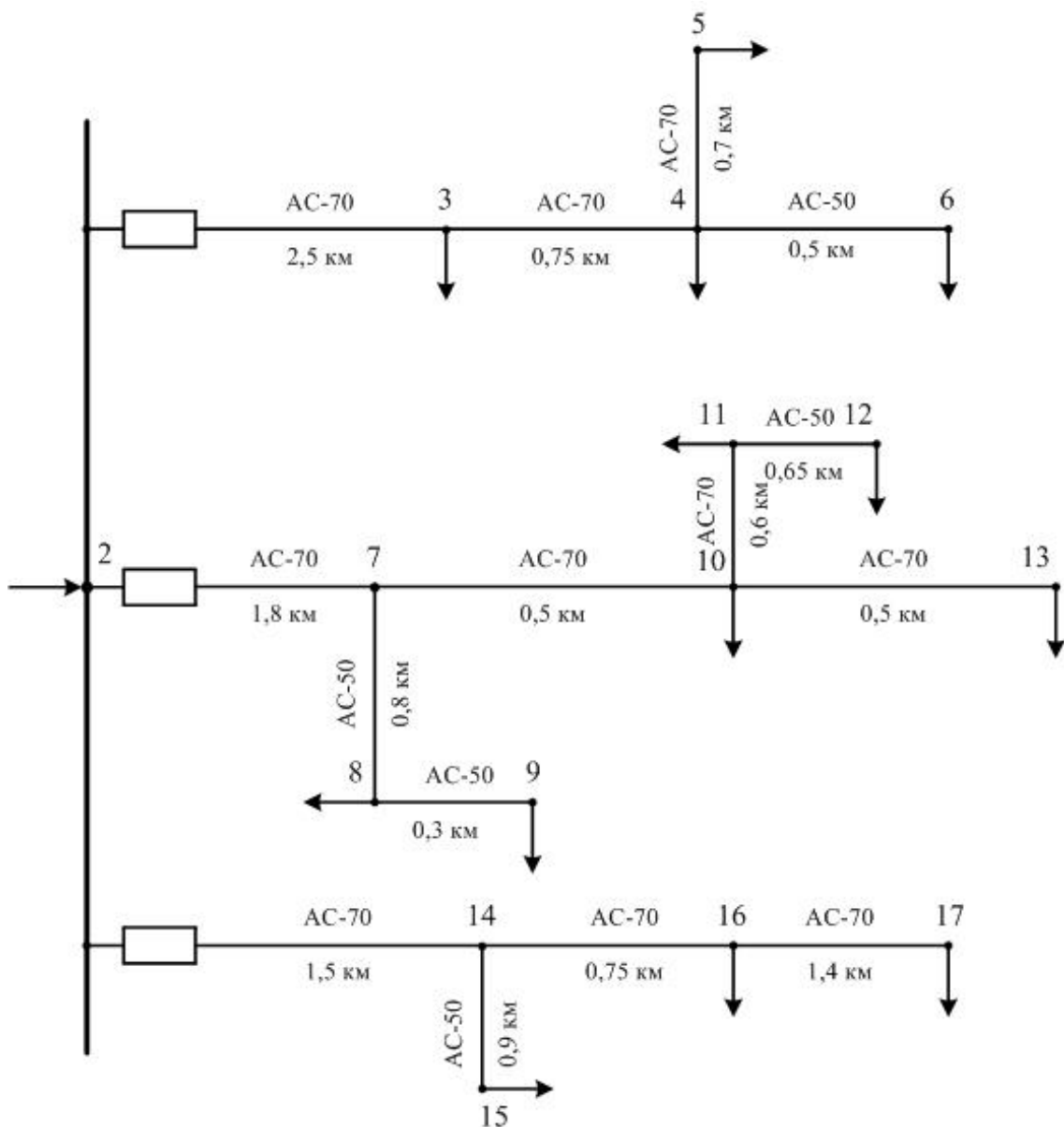


Рис. Фрагмент схеми електричної мережі напругою 10 кВ

1. Параметри ділянок мережі

| Ділянка мережі | Номинальна напруга, кВ | Марка проводу, тип трансформатора | L, км | r_0 , Ом/км | x_0 , Ом/км | b_0 , мкСм/км | R, Ом | X, Ом | K, в.о. |
|----------------|------------------------|-----------------------------------|-------|---------------|---------------|-----------------|--------|-------|---------|
| 2-3 | 10 | АС-70 | 2,5 | 0,65 | 0,4 | - | 1,625 | 1,0 | - |
| 3-4 | 10 | АС-70 | 0,75 | 0,65 | 0,4 | - | 0,4875 | 0,3 | - |
| 4-5 | 10 | АС-70 | 0,7 | 0,65 | 0,4 | - | 0,455 | 0,28 | - |
| 4-6 | 10 | АС-50 | 0,5 | 0,46 | 0,4 | - | 0,23 | 0,2 | - |
| 2-7 | 10 | АС-70 | 1,8 | 0,65 | 0,4 | - | 1,17 | 0,72 | - |
| 7-8 | 10 | АС-50 | 0,8 | 0,46 | 0,4 | - | 0,368 | 0,32 | - |
| 8-9 | 10 | АС-50 | 0,3 | 0,46 | 0,4 | - | 0,138 | 0,12 | - |
| 7-10 | 10 | АС-70 | 0,5 | 0,65 | 0,4 | - | 0,325 | 0,2 | - |
| 10-11 | 10 | АС-70 | 0,6 | 0,65 | 0,4 | - | 0,39 | 0,24 | - |
| 11-12 | 10 | АС-50 | 0,65 | 0,46 | 0,4 | - | 0,299 | 0,26 | - |
| 10-13 | 10 | АС-70 | 0,5 | 0,65 | 0,4 | - | 0,325 | 0,2 | - |
| 2-14 | 10 | АС-70 | 1,5 | 0,65 | 0,4 | - | 0,975 | 0,6 | - |
| 14-15 | 10 | АС-50 | 0,9 | 0,46 | 0,4 | - | 0,414 | 0,36 | - |
| 14-16 | 10 | АС-70 | 0,75 | 0,65 | 0,4 | - | 0,4875 | 0,3 | - |
| 16-17 | 10 | АС-70 | 1,4 | 0,65 | 0,4 | - | 0,91 | 0,56 | - |
| 6-13 | 10 | АС-50 | 1,0 | 0,46 | 0,4 | - | 0,46 | 0,4 | - |
| 13-17 | 10 | АС-70 | 1,2 | 0,65 | 0,4 | - | 0,78 | 0,48 | - |

2. Вузлові навантаження мережі в максимальному режимі

| № вузла | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
|---------|-----|-----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| P, кВт | 220 | 194 | 68 | 88 | 490 | 229 | 193 | 305 | 180 | 170 | 235 | 186 | 186 | 313 | 308 |
| Q, кВАр | 75 | 63 | 32 | 42 | 180 | 82 | 94 | 126 | 85 | 90 | 110 | 92 | 92 | 149 | 140 |

Результати досліджень. Результати розрахунку режиму максимального навантаження у виді вузлових напруг наведені в табл. 3.

3. Розрахункові значення вузлових напруг схеми

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| № вузла | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
| U, кВ | 10, 39 | 10, 37 | 10, 37 | 10, 37 | 10, 24 | 10, 22 | 10, 21 | 10, 20 | 10, 19 | 10, 18 | 10, 19 | 10, 38 | 10, 37 | 10, 34 | 10, 31 |

Втрати активної потужності в режимі максимального навантаження фрагменту електричної мережі склали $\Delta P = 68,32$ кВт.

Результати досліджень проводилися так.

1. На основі результатів режиму максимального навантаження фрагменту схеми проведені розрахунки вектор – градієнта, елементи якого складають похідні від цільової функції (небаланси активної потужності у вузлах схеми) по кутах вузлових напруг, результати яких для різних напруг центру живлення приведені в табл. 4.

4. Результати розрахунку вектор-градієнта

| Номер вузла | Величина похідних | |
|-------------|-------------------|----------|
| | 10,5 кВ | 10,75 кВ |
| 3 | 0,08757 | 0,08754 |
| 4 | 0,06012 | 0,06021 |
| 5 | 0,01428 | 0,01430 |
| 6 | 0,03934 | 0,03935 |
| 7 | 0,07993 | 0,07986 |
| 8 | 0,13342 | 0,13342 |
| 9 | 0,08408 | 0,08411 |
| 10 | 0,08957 | 0,08957 |
| 11 | -0,00726 | -0,00729 |
| 12 | 0,06586 | 0,06589 |
| 13 | 0,05022 | 0,05023 |
| 14 | -0,01434 | -0,01450 |
| 15 | 0,07945 | 0,07951 |
| 16 | 0,06331 | 0,06339 |
| 17 | 0,07188 | 0,07192 |

2. Використовуючи модифікований метод Ньютона, проведені експериментальні розрахунки щодо визначення величин активної і реактивної генерації для всіх вузлів схеми відповідних величин похідних вектор – градієнта (табл. 5). Аналіз результатів виявив характерну особливість, що оптимальному місцю впровадження ДРГ відповідає не максимальне значення похідної, а величина похідної наступної за максимальною. Так, для відгалуження схеми (рисунок), що починається з вузла 3 оптимальному місцю впровадження ДРГ відповідає вузол 4, а не вузол 3 з найбільшим значенням похідної цього відгалуження. Для відгалуження, що починається з вузла 7 – оптимальному місцю впровадження ДРГ відповідає вузол 10, а не вузол 8, а для відгалуження, яке починається з вузла 14 – оптимальним є впровадження ДРГ у вузлі 16. Аналогічна тенденція відслідковується і з використанням схем других об'ємів і конфігурації.

5. Результати розрахунків активної і реактивної потужності при $U_2 = 10,5$ кВ

| Вузли мережі | Вузлове навантаження | | $P_{\text{ген}}$, кВт | $Q_{\text{ген}}$, кВАр | ΔP , кВт | Вектор-градієнт |
|--------------|----------------------|------------|------------------------|-------------------------|------------------|-----------------|
| | P , кВт | Q , кВАр | | | | |
| 2 | - | - | - | - | - | - |
| 3 | 220 | 75 | 569,82 | 211,90 | 62,73 | 0,08757 |
| 4 | 194 | 63 | 515,74 | 192,10 | 62,29 | 0,06012 |
| 5 | 68 | 32 | 439,08 | 165,74 | 63,05 | 0,01428 |
| 6 | 88 | 42 | 468,96 | 184,04 | 62,67 | 0,03934 |
| 7 | 490 | 180 | 1804,37 | 768,48 | 25,05 | 0,07993 |
| 8 | 229 | 82 | 1426,90 | 659,23 | 30,25 | 0,13342 |
| 9 | 193 | 94 | 1313,58 | 623,00 | 32,49 | 0,08408 |
| 10 | 305 | 126 | 1603,18 | 689,42 | 24,42 | 0,08957 |
| 11 | 180 | 85 | 1348,04 | 585,24 | 29,12 | -0,00726 |
| 12 | 170 | 90 | 1163,24 | 538,12 | 32,94 | 0,06586 |
| 13 | 235 | 110 | 1364,65 | 589,53 | 29,66 | 0,05022 |
| 14 | 186 | 92 | 994,60 | 473,78 | 57,23 | -0,01434 |
| 15 | 186 | 92 | 721,34 | 380,95 | 59,23 | 0,07945 |
| 16 | 313 | 149 | 869,07 | 411,72 | 55,63 | 0,06331 |
| 17 | 308 | 140 | 654,75 | 308,04 | 56,68 | 0,07188 |

Результати табл. 5 показують, що найбільш економічним впровадженню одного ДРГ відповідає вузол 10.

Зміна напруги центру живлення з 10,5 кВ до 10,75 кВ не впливає на місце оптимального розташування ДРГ. Результати розрахунків наведені в табл. 6.

6. Результати розрахунків активної і реактивної потужності при $U_2 = 10,75$ кВ

| Вузли мережі | Вузлове навантаження | | $P_{\text{ген}}$, кВт | $Q_{\text{ген}}$, кВАр | ΔP , кВт | Вектор-градієнт |
|--------------|----------------------|------------|------------------------|-------------------------|------------------|-----------------|
| | P , кВт | Q , кВАр | | | | |
| 2 | - | - | - | - | - | - |
| 3 | 220 | 75 | 328,19 | 63,19 | 60,86 | 0,08754 |
| 4 | 194 | 63 | 320,40 | 70,67 | 60,30 | 0,06021 |
| 5 | 68 | 32 | 284,26 | 70,59 | 60,76 | 0,01430 |
| 6 | 88 | 42 | 301,57 | 75,75 | 60,50 | 0,03935 |
| 7 | 490 | 180 | 1465,80 | 559,31 | 25,55 | 0,07986 |
| 8 | 229 | 82 | 1175,59 | 487,11 | 30,35 | 0,13342 |
| 9 | 193 | 94 | 1088,12 | 465,59 | 32,36 | 0,08411 |
| 10 | 305 | 126 | 1330,47 | 521,72 | 24,67 | 0,08957 |
| 11 | 180 | 85 | 1133,35 | 452,48 | 28,85 | -0,00729 |
| 12 | 170 | 90 | 985,70 | 422,16 | 32,40 | 0,06589 |
| 13 | 235 | 110 | 1145,79 | 455,19 | 29,37 | 0,05023 |
| 14 | 186 | 92 | 591,18 | 224,85 | 56,42 | -0,01450 |
| 15 | 186 | 92 | 457,01 | 197,74 | 57,79 | 0,07951 |
| 16 | 313 | 149 | 598,66 | 245,36 | 54,26 | 0,06339 |
| 17 | 308 | 140 | 488,76 | 205,99 | 54,74 | 0,07192 |

3. Для підтвердження вибору оптимальних як місця впровадження ДРГ, так і його потужності проведені експериментальні розрахунки за зміною величини потужності ДРГ на прикладі даних табл. 5. Так, зменшення P_{10} до величини 1403,18 кВт і Q_{10} до величини 589,42 кВАр призводить до збільшення втрат в фрагменті мережі до $\Delta P = 25,14$ кВт, а збільшення P_{10} до величини 1803,18 кВт і Q_{10} до величини 789,42 кВАр втрати в фрагменті збільшуються до $\Delta P = 25,04$ кВт.

Необхідно також відмітити, що використання модифікованого методу Ньютона надає можливість визначати оптимальну потужність ДРГ за відомими реактивною генерацією і модуля напруги в місці встановлення джерела розподіленої генерації.

Висновки

1. Проведені експерименти щодо впровадження одного ДРГ в фрагмент розподільної мережі напругою 10 кВ показали можливість використання запропонованої методики.

2. При значних об'ємах розподільних мереж може виникнути необхідність у впровадженні більшої кількості ДРГ. Проте вплив значної кількості електричних параметрів на вибір оптимальних місць розташування ДРГ та величин їх потужностей може призвести до необхідності удосконалення запропонованої методики.

Список літератури

1. Зміни встановленої потужності ОЕС України [Електронний ресурс]. – 2014.

Режим доступу:

http: // www.ukrenergo.energy.gov.ua/ukrenergo/control/uk/publish/article?art_id=149524&cat_id=35061.

2. Кирик В. В. Сенсорний метод пошуку місця встановлення джерела розподіленого генерування / В. В. Кирик, О. С. Губатюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2015. – № 6. – С. 136 – 140.

3. Козирський В. В. Рекомендації щодо вибору потужності джерел розподіленої генерації в розподільних електричних мережах сільських регіонів / В. В. Козирський, О. В. Гай, В. М. Бодунов // Науковий вісник НУБіП України. Серія «Техніка та енергетика АПК». – 2012. – Випуск 174. – С. 24 – 30.

4. Скрипник А. Н. Модификация метода Ньютона и ее использование при расчетах режимов распределительных электрических сетей напряжением до 110 кВ

/ А. Н. Скрипник, Д. П. Кожан, В. В. Ковалева // Инновации в сельском хозяйстве. – 2015. – Вып. 4 (14). – С. 14 – 20.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ И
ВЕЛИЧИНЫ МОЩНОСТИ ИСТОЧНИКОВ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ
ГЕНЕРАЦИИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ
НАПРЯЖЕНИЕМ 10 кВ В УСЛОВИЯХ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

А. Н. Скрипник, Д. П. Кожан

Аннотация. *Предложена методика поиска оптимальных местоположения и величины мощности источников распределенной генерации в распределительных электрических сетях напряжением 10 кВ в условиях их эксплуатации с проведением соответствующих экспериментальных исследований.*

Ключевые слова: *распределительная электрическая сеть, источник распределенной генерации (ИРГ), градиентный метод, вектор – градиент*

**SIMULATION OF OPTIMAL DO PLACEMENTS AND THE MAGNITUDE
OF POWER OF SOURCES DISTRIBUTED GENERATION IN DISTRIBUTION
ELECTRIC NETWORKS WITH VOLTAGE 10 kV IN CONDITIONS THEIR
OPERATION**

A. Skrypnyk, D. Kozhan

Annotation. *The methodology of search of optimal do placements and magnitude of power of sources distributed generation in distribution electric networks with voltage 10 kV in conditions their operation to bringing the relevant experimental studies.*

Keywords: *distribution electrical network, the source of distributed generation, the gradient method, vector – gradient*