

УДК 621.316

**О.Б. БУРИКІН** (канд.техн.наук, доц.), **Ю.В. МАЛОГУЛКО**  
**Вінницький національний технічний університет**  
**Juliya Malogulko@ukr.net**

## **ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМУ ЛОКАЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ З ВІДНОВЛЮВАЛЬНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ**

*У статті приведено аналіз досвіду розв'язання ряду задач оптимізації розподільних електричних мереж з відновлювальними джерелами енергії різних країн. Виконано систематизацію розглянутих задач та досліджено можливість їх застосування з метою оптимізації режимів локальних електричних систем (ЛЕС). Запропоновано цільову функцію оптимізації режиму локальних електричних систем з відновлювальними джерелами енергії за умов зменшення втрат електроенергії, покращення її якості в ЛЕС, а також підвищення надійності електропостачання.*

**Ключові слова:** локальна електрична система, відновлювальні джерела енергії, критерії оптимізації, задачі оптимізації, оптимальне місце приєднання ВДЕ, оптимальна потужність ВДЕ, оптимізація схеми ЛЕС.

**Вступ.** Останнім часом, у світі спостерігається стійкий інтерес до проблем використання відновлювальних джерел енергії (ВДЕ). Причинами цього є багато факторів. Насамперед, це викликано тим, що ВДЕ в електроенергетичних системах (ЕЕС) є тим резервом, що за певних умов може забезпечити суттєву економію енергоресурсів. Економія енергоресурсів досягається в результаті використання відновлюваних джерел первинної енергії та децентралізації вироблення електроенергії і, як наслідок, зменшення витрат на її транспортування та розподіл [1-3].

Недослідженість питань проектування та експлуатації ВДЕ в сучасних умовах, їх впливу на режими роботи електричних мереж (ЕМ), неузгодженість номінальних параметрів основного обладнання з потребами таких джерел, відсутність типових рішень стосовно засобів захисту та автоматизації процесу виробництва електроенергії не дозволяє приймати обґрунтовані проектні рішення під час їх розбудови, крім того не дозволяє ефективно їх експлуатувати. Тому, актуальним є розвиток методичного, інформаційного і технічного забезпечення їх експлуатації. Важливим в цьому напрямку є комплексність і методологічна єдність в прийнятті рішень щодо покращення експлуатаційних характеристик ВДЕ при роботі їх в електричних мережах.

**Аналіз задач оптимізації ЕМ з ВДЕ.** В інженерній практиці різних країн розв'язується ряд задач оптимізації розподільних електричних мереж з ВДЕ. Їх можна поділити на такі, що розв'язуються на етапах проектування та експлуатації (рис. 1). Такі задачі оптимізації, як автономна робота ВДЕ, розташування комутаційного обладнання та формування комунікаційної мережі тісно взаємопов'язані та практично не можуть бути розв'язані в сучасних умовах. Автономна робота ВДЕ, зважаючи на умовну-керуваність та нестабільність цих джерел енергії, є фактично не можливою без розвиненої комунікаційної мережі. Наявність останньої дозволить отримувати двосторонній зв'язок між ВДЕ та споживачами електроенергії, відповідно до концепції Smart Grid, та регулювати режими електроспоживання підтримуючи умови автономної роботи.

Зазвичай вказані задачі розв'язуються шляхом декомпозиції на задачі оптимізації функціонування ВДЕ та задачі функціонування ЕМ. В залежності від поставлених задач кожному із них розв'язують використовуючи один із критеріїв оптимальності, таких як: мінімум втрат електроенергії [4,5], якість електроенергії [6], надійність електропостачання [7], пропускна спроможність [8,9], швидкість відновлення напруги [10-12], максимум видачі потужності [13], максимум прибутку [14], мінімум інвестицій [15] тощо.

При виборі критерію оптимальності і формуванні відповідної математичної моделі слід враховувати, що одночасно з розвитком розосередженого генерування змінюються також економічні умови функціонування електроенергетики як галузі, зокрема перехід до нової конкурентної моделі оптового ринку електроенергії – ринку двосторонніх договорів та балансуєного ринку електроенергії (РДДБ).

У випадку реалізації електропостачання за двосторонніми договорами за участі ВДЕ, коли останні видають потужність в електричну мережу, постає необхідність узгодження їх роботи з енергосистемою, від якої здійснюється централізоване живлення. Це стає обов'язковим, коли встановлена потужність ВДЕ в ЕМ складає суттєву частку від її сумарного навантаження (наприклад, 20% і більше). В цьому випадку РЕМ можна і доцільно розглядати як локальну електричну систему (ЛЕС), в якій окрім зазначених вище задач постають задачі дослідження статичної і динамічної стійкості ВДЕ та інші, характерні для електричної системи [16].

Серед комплексу задач, що виникають в процесі впровадження ВДЕ, доцільно вивчати і розв'язувати в першу чергу ті, які безпосередньо впливають на масштаби й інтенсивність розбудови альтернативних джерел енергії, зокрема ВДЕ, та правильне рішення яких зможе сформувати наряду з «зеленими тарифами» стійку мотивацію у інвесторів та енергопостачальних компаній щодо розбудови ВДЕ в Україні.

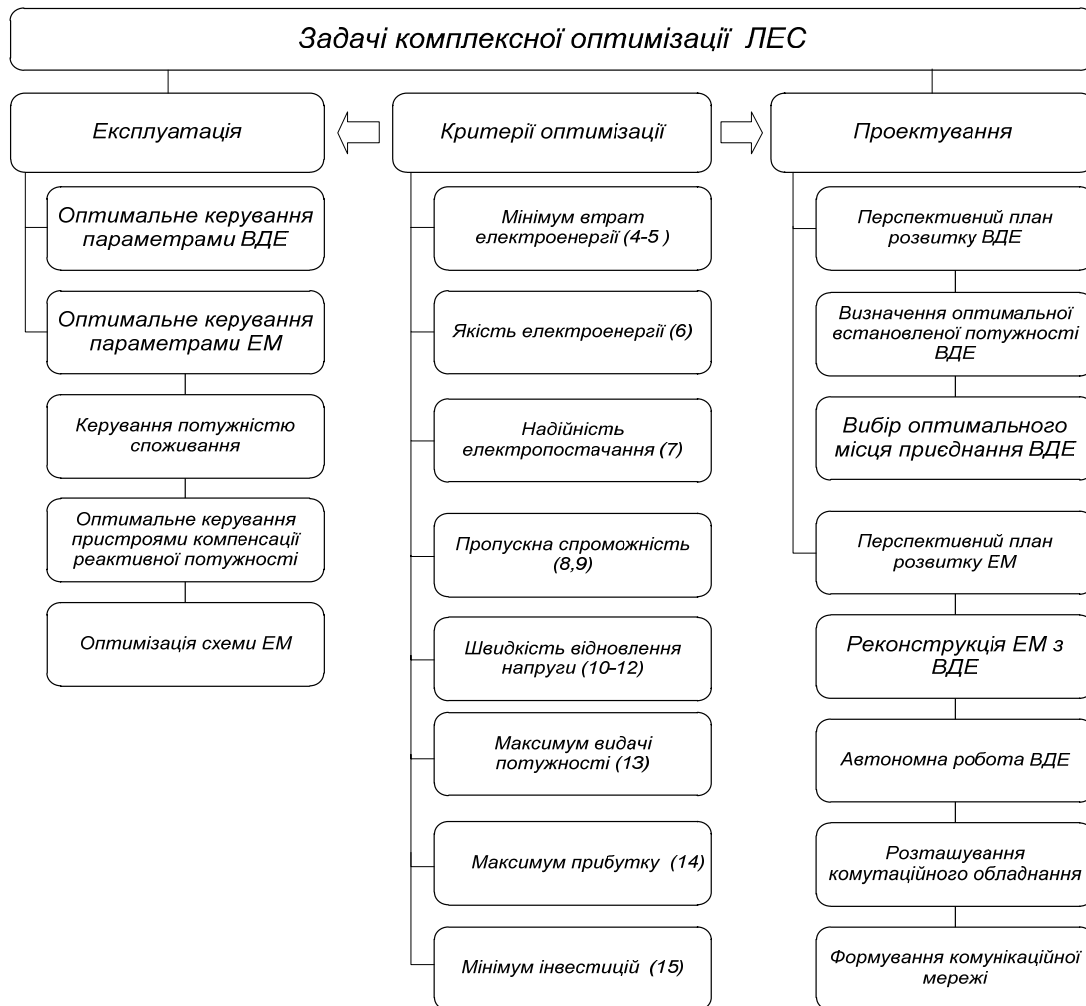


Рисунок 1 – Задачі комплексної оптимізації ЛЕС

Такою задачею, зокрема, є задача отримання максимального прибутку від експлуатації ВДЕ для їх розбудови за умови зменшення втрат електроенергії та покращення її якості в ЛЕС, а також підвищення надійності електропостачання [16]. При цьому, враховуючи що електроенергія від ВДЕ передається лініями ЛЕС одночасно з електроенергією інших джерел, то необхідно виділяти з сумарних втрат електроенергії ту частку, яка стосується транзиту від ВДЕ.

Враховуючи специфіку забезпечення рентабельності ЛЕС, доцільно розв'язувати комплексну задачу оптимізації перспективного плану розвитку умовно-керованих відновлювальних джерел енергії  $P_{ВДЕ_i}$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$  для забезпечення максимальних надходжень від реалізації їх електроенергії за умов багатоступеневого тарифу енергоринку  $c_i$  та умов зменшення втрат електроенергії, покращення її якості в ЛЕС, а також підвищення надійності електропостачання.

#### Комплексна задача оптимізації перспективного плану розвитку ЛЕС з ВДЕ.

Вираз для визначення сумарного прибутку від експлуатації ВДЕ приєднаних на паралельну роботу у ЛЕС можна записати таким чином:

$$\Pi_{ВДЕ} = \sum_{i=1}^n y_i \cdot P_{ВДЕ_i} \cdot k_{e_i} \cdot T, \quad (1)$$

де  $P_{ВДЕ_i}$  – встановлена потужність  $i$ -го ВДЕ;  $k_{e_i}$  – коефіцієнт використання встановленої потужності  $i$ -го ВДЕ;  $T$  – тривалість графіка навантажень.

Цільову функцію задачі оптимізації перспективного плану розвитку ВДЕ в ЛЕС пропонується представити так:

$$\Pi = \Pi_{ВДЕ} \cdot e^{(k_1 \cdot (1 - v_{інд}))} \cdot e^{(k_2 \cdot K_G)} - \Pi_{P_{sp}} - \Pi_{P_n} \rightarrow \max \quad (2)$$

де  $v_{інд}$  – індекс напруги, значення якого у відносних одиницях визначається у вигляді математичного очікування незмінності профілю напруги, за виразом:  $v_{інд} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i$ ;  $K_G$  – коефіцієнт гармонічних спотворень або

коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги;  $k_1, k_2$  – вагові коефіцієнти, використання яких дозволяє змінювати вплив показників якості напруги на результати оптимізації;  $\mathcal{H}_{P_{zp}}$ ,  $\mathcal{H}_{P_n}$  – штрафні функції, введені в цільову функцію  $\mathcal{C}$  для врахування обмежень типу нерівностей за втратами активної потужності та пропускну здатністю ЛЕС:

$$\mathcal{H}_{P_{zp}} = \left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^n P_{ВДЕ_i} - \sum_{j=1}^m P_{н_j} \leq P_{zp} \rightarrow 0 \\ \sum_{i=1}^n P_{ВДЕ_i} - \sum_{j=1}^m P_{н_j} > P_{zp} \rightarrow B_{рек} \end{array} \right. ; \quad \mathcal{H}_{P_n} = \left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^n P_{ВДЕ_i} \leq \sum_{j=1}^m P_{н_j} \rightarrow 0 \\ \sum_{i=1}^n P_{ВДЕ_i} > \sum_{j=1}^m P_{н_j} \rightarrow B_{\Delta W} \end{array} \right. ,$$

де  $P_{н_j}$  – потужність навантаження  $j$ -го вузла споживання;  $P_{zp}$  – пропускну здатність ЛЕС, що обмежується найбільш слабкою ділянкою мережі;  $B_{рек}$  – витрати на реконструкцію ЛЕС для забезпечення працездатності у разі перевищення граничної потужності;  $B_{\Delta W}$  – втрати на додаткові втрати електроенергії, у разі якщо сумарна потужність ВДЕ перевищить сумарну потужність навантаження.

Значення критерію вирівнювання профілю напруги, як показника якості електроенергії визначається за виразом:

$$V_i = \frac{(U_i - U_{\min}) \cdot (U_{\max} - U_i)}{(U_{\text{ном}} - U_{\min}) \cdot (U_{\max} - U_{\text{ном}})},$$

де  $U_{\text{ном}}$ ,  $U_{\min}$ ,  $U_{\max}$  – номінальне, мінімальне та максимальне значення напруги на шинах  $i$ -го ВДЕ.

Коефіцієнт гармонічних спотворень або коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги визначається за [17]:

$$K_{\Gamma} = \frac{\sqrt{U_{\Gamma 2}^2 + U_{\Gamma 3}^2 + \dots + U_{\Gamma N}^2}}{U_{\Gamma 1}},$$

де  $U_{\Gamma N}$  – дійсне значення напруги  $N$  – і гармоніки;  $U_{\Gamma 1}$  – дійсне значення напруги основної гармоніки.

Розв'язком задачі оптимізації (2) буде оптимальне місце розташування ВДЕ з оптимальною встановленою потужністю за умов багатоступеневого тарифу енергоринку ці та умов зменшення втрат електроенергії, покращення її якості в ЛЕС, а також підвищення надійності електропостачання.

Для розв'язку цієї задачі існує ціла низка методів та підходів, які вже широко застосовуються у традиційній електроенергетиці [16] і призначені для знаходження чисельних розв'язків оптимізаційних задач, що відповідають заданій сукупності вхідних даних (поточному вектору стану системи), чого є достатньо з практичних цілей.

**Висновки.** 1. Аналіз досвіду розв'язання ряду задач оптимізації розподільних електричних мереж з відновлювальними джерелами енергії різних країн дозволив виконати систематизацію розглянутих задач та дослідити можливості їх комплексного застосування для оптимізації режимів локальних електричних систем. У якості критеріїв оптимізації режимів ЛЕС доцільно використовувати максимум прибутку від виробленої електричної енергії ВДЕ, з урахуванням їх впливу на роботу ЕМ.

2. Розв'язок запропонованої задачі оптимізації перспективного плану розвитку відновлювальних джерел енергії дозволить визначити оптимальне місце розташування та оптимальну встановлену потужність ВДЕ у ЛЕС за умов їх сумісної експлуатації. Функціональні обмеження враховуються штрафними функціями по втратам електроенергії та пропускну здатності ЛЕС. Обмеження на параметри – у ітераційному процесі пошуку розв'язку. Цільова функція (2) враховує показники якості електроенергії, недотримання яких різко віддаляє отриманий розв'язок від оптимуму функції (1).

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Лежнюк П. Д. Розосереджені джерела електроенергії в електричних мережах / П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик, О. А. Ковальчук, В. О. Хоменко // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. – 2011. – №1. – С. 104–108.
2. Celso Penche. Layman's Handbook On How To Develop A Small Hydro Site (Second Edition). – DG XVII European Commission 200 rue de la Loi B-1049 Bruselas Belgica. – 1998. – 266 p.
3. Нікіторович О.В. Мала гідроенергетика в Україні: перспективи і проблеми її розвитку. Енергоефективність, екологія та безпека // Гідроенергетика України. – 2003. – №1. – 40–44.
4. Walid El-Khattam, Kankar Bhattacharya, Yasser Hegazy and M. M. A. Salama, “Optimal Investment Planning for Distributed Generation in a Competitive Electricity Market”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 19, no. 3, pp. 1674-1684, August 2004. Analytical Approaches for Optimal Placement of Distributed Generation Sources in Power Systems.
5. Andrew Keane, Mark O'Malley “Optimal Allocation of Embedded Generation on Distribution Networks”,

IEEE Transactions on Power Systems, vol. 20, no. 3, pp. 1640-1646, August 2005.

6. N. S. Rau and Y.-H. Wan, Optimum location of resources in distributed planning, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 9, pp. 2014-2020, Nov. 1994.

7. Caisheng Wang, M. Hashem Nehrir "An Analytical Method for DG Placements Considering Reliability Improvements", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 19, no. 4, pp. 2068-2076, November 2004.

8. Hamid Falaghi, Mahmood-Reza Haghifam "ACO Based Algorithm for Distributed Generation Sources Allocation and Sizing in Distribution Systems", PowerTech, pp. 555-560, 2007.

9. Víctor H. Méndez Quezada, Juan Rivier Abbad, and Tomás Gómez San Román "Assessment of Energy Distribution Losses for Increasing Penetration of Distributed Generation", IEEE Transactions on power systems, vol. 21, no. 2, pp.533-540, May 2006.

10. Seyed Mohammad Hossein Nabavi, Somayeh Hajforoosh, Mohammad A.S. Masoum, "Placement and Sizing of Distributed Generation Units for Congestion Management and Improvement of Voltage Profile using Particle Swarm Optimization", IEEE, 2011.

11. Andrew Keane, Luis (Nando) F. Ochoa, Eknath Vittal, Chris J. Dent, Gareth P. Harrison "Enhanced Utilization of Voltage Control Resources With Distributed Generation" IEEE Transactions on Power Systems, vol. 26, no. 1, pp. 252-260, February 2011.

12. Nikhil K. Ardesha, Badrul H. Chowdhury, "Supporting Islanded Microgrid Operations in the Presence of Intermittent Wind Generation", IEEE, pp. 1-8, 2010.

13. C. L. T. Borges, and D. M. Falcao, Optimal distributed generation allocation for reliability, losses, and voltage improvement, International Journal of Power and Energy Systems, vol. 28, no. 6, pp. 413-420, July 2006.

14. Y. Alinejad-Beromi, M. Sedighzadeh, M. Sadighi "A Particle Swarm Optimization for Siting and Sizing of Distributed Generation in Distribution Network to Improve Voltage Profile and Reduce THD and Losses".

15. Liu Zifa, Wu Ziping, Xue Xiaoqiang, Zhang Jianhua "Optimal Configuration for Capacity of Distributed Generation Interconnected to Distribution Network Based on Improved".

16. Лежнюк П. Д. Оптимальне керування розосередженими джерелами енергії в локальній електричній системі / П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик, О. А. Ковальчук // Праці Інституту електродинаміки НАН України. Збірник наукових праць. Спеціальний випуск. Ч. 1. – 2011. – С. 48–55. – ISSN 1727-9895.

17. ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

#### REFERENCES

1. P. Lezhnyuk Distributed sources in electric networks/ P. Lezhnyuk, V. Kulik, O. Kovalchuk, V. Khomenko // Chernihiv State Technological University . – 2011. – №1. – P. 104–108.

2. Celso Penche. Layman's Handbook On How To Develop A Small Hydro Site (Second Edition). – DG XVII European Commission 200 rue de la Loi B-1049 Bruselas Belgica. – 1998. – 266 p.

3. O. Nikitorovych Small hydropower in Ukraine: Prospects and problems of development. Energy and Environment // Hydropower of Ukraine. – 2003. – №1. – P. 40-44.

4. Walid El-Khattam, Kankar Bhattacharya, Yasser Hegazy and M. M. A. Salama, "Optimal Investment Planning for Distributed Generation in a Competitive Electricity Market", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 19, no. 3, pp. 1674-1684, August 2004. Analytical Approaches for Optimal Placement of Distributed Generation Sources in Power Systems.

5. Andrew Keane, Mark O'Malley "Optimal Allocation of Embedded Generation on Distribution Networks", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 20, no. 3, pp. 1640-1646, August 2005.

6. N. S. Rau and Y.-H. Wan, Optimum location of resources in distributed planning, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 9, pp. 2014-2020, Nov. 1994.

7. Caisheng Wang, M. Hashem Nehrir "An Analytical Method for DG Placements Considering Reliability Improvements", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 19, no. 4, pp. 2068-2076, November 2004.

8. Hamid Falaghi, Mahmood-Reza Haghifam "ACO Based Algorithm for Distributed Generation Sources Allocation and Sizing in Distribution Systems", PowerTech, pp. 555-560, 2007.

9. Víctor H. Méndez Quezada, Juan Rivier Abbad, and Tomás Gómez San Román "Assessment of Energy Distribution Losses for Increasing Penetration of Distributed Generation", IEEE Transactions on power systems, vol. 21, no. 2, pp.533-540, May 2006.

10. Seyed Mohammad Hossein Nabavi, Somayeh Hajforoosh, Mohammad A.S. Masoum, "Placement and Sizing of Distributed Generation Units for Congestion Management and Improvement of Voltage Profile using Particle Swarm Optimization", IEEE, 2011.

11. Andrew Keane, Luis (Nando) F. Ochoa, Eknath Vittal, Chris J. Dent, Gareth P. Harrison “Enhanced Utilization of Voltage Control Resources With Distributed Generation” IEEE Transactions on Power Systems, vol. 26, no. 1, pp. 252-260, February 2011.
12. Nikhil K. Ardehna, Badrul H. Chowdhury, “Supporting Islanded Microgrid Operations in the Presence of Intermittent Wind Generation”, IEEE, pp. 1-8, 2010.
13. C. L. T. Borges, and D. M. Falcao, Optimal distributed generation allocation for reliability, losses, and voltage improvement, International Journal of Power and Energy Systems, vol. 28, no. 6, pp. 413-420, July 2006.
14. Y. Alinejad-Beromi, M. Sedighzadeh, M. Sadighi “A Particle Swarm Optimization for Siting and Sizing of Distributed Generation in Distribution Network to Improve Voltage Profile and Reduce THD and Losses”.
15. Liu Zifa, Wu Ziping, Xue Xiaoqiang, Zhang Jianhua “Optimal Configuration for Capacity of Distributed Generation Interconnected to Distribution Network Based on Improved”.
16. P. Lezhnyuk Optimal control of distributed sources of energy in the local electrical system / P. Lezhnyuk, V. Kulik, O. Kovalchuk // Proceedings of the Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine. Collected works. Special Issue. Part 1. – 2011. – P. 48–55. – ISSN 1727-9895.
17. ГОСТ 13109-97. Quality standards for power supply systems for general purpose.

Надійшла до редакції 02.04.2013

Рецензент: В.Ф. Сивокобиленко

О.Б. БУРЫКИН, Ю.В. МАЛОГУЛКО  
Винницкий национальный технический университет

**Оптимизация режима локальных электрических сетей с возобновляемыми источниками энергии.** В статье приведен анализ опыта решения ряда задач оптимизации распределительных электрических сетей возобновляемыми источниками энергии разных стран. Выполнено систематизацию рассмотренных задач и исследованы возможности их применения для оптимизации режимов локальных электрических систем. Предложено целевую функцию оптимизации режима локальных электрических систем с возобновляемыми источниками энергии в условиях уменьшения потерь электроэнергии, улучшение ее качества в ЛЭС, а также повышение надежности электроснабжения.

**Ключевые слова:** локальная электрическая система, возобновляемые источники энергии, критерии оптимизации, задачи оптимизации, оптимальное место присоединения ВИЭ, оптимальная мощность ВИЭ, оптимизация схемы ЛЭС.

О. BURYKIN, J. MALOGULKO  
Vinnytsia National Technical University

**Optimization of Local Power Systems with Renewable Energy Sources.** Recently, in the world there is proof interest to the problems of using renewable energy sources (RES). The reasons for that are many factors. First of all, it is because renewables in electric power systems (EPS) is the very reserve, which under certain conditions can provide significant energy savings. Energy saving is achieved by the use of renewables of primary energy and decentralized power generation and, consequently, reducing the cost of its transportation and distribution. The fact that the design and operation of renewables in the present conditions and their impact on modes of power grids (PG) is not investigated properly, inconsistency of the specified key equipment to the needs of these sources, the lack of common decisions on protection and automation of electric power can't make sound design decisions during their development also does not allow to use them effectively. So, the development of methodological, informational and technical support of their operation is a question of urgent importance. A comprehensive and methodological unity in decision-making to improve the performance of renewable energy in electrical systems is also very important in this regard. In engineering practice a variety of optimization problems solved a number of electrical distribution networks with renewable energy. They can be divided into those that can be resolved during the design and operation. The analysis of solving some optimization problems of distribution power networks with renewable energy sources around the world is done in the article. Systematization of considered problems and investigation of their possible application in order to optimize the local electric systems (LES) is fulfilled. It is determined that as an optimization criteria of LES it is reasonable to use the maximum profit got from renewable electricity, taking into account their impact on the work of PG. The survey showed that the solution proposed to optimize the problem of perspective for the development of renewable energy sources will determine the optimal location and the optimal installed capacity of renewable energy in LES under the terms of their joint operation. A purpose-oriented optimization function of local power systems mode with renewable energy in terms of reducing energy losses, improving its quality in LES and improving the reliability of power supply is suggested in the article.

**Keywords:** local power system, renewable energy sources, optimization criteria, optimization problems, the optimal point of attachment renewable energy sources, optimal power of renewable energy sources, optimization schemes of local power systems.