

# Анализ качества электроэнергии в распределительной сети Египта и выбор устройств компенсации реактивной мощности

ТУЛЬСКИЙ В. Н., МОХАМЕД А. ТОЛБА, ВАНИН А. С., АХМЕД А. ЗАКИ ДИЯБ

*Представлены результаты измерения и анализ качества электроэнергии в распределительной сети Среднего Египта. Это – часть исследовательского проекта по развитию египетской электрической сети. Проведен анализ проблем нарушения допустимого уровня напряжения в распределительной сети. Предложена нормализация напряжения путем компенсации реактивной мощности. Для расстановки компенсирующих устройств был применен новый гибридный оптимизационный алгоритм на основе метода роя частиц. Моделирование было выполнено в программной среде MATLAB. Предлагаемый подход к расстановке компенсирующих устройств на основе оптимизации гибридным методом роя частиц показал высокую эффективность для нормализации напряжения и снижения потерь активной мощности.*

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** *распределительная сеть, качество электроэнергии, компенсация реактивной мощности, коэффициент чувствительности потерь, гибридный алгоритм оптимизации роя частиц*

Проблемы качества электроэнергии (КЭ) в настоящее время актуальны для многих электросетевых компаний по всему миру [1]. Эти проблемы в Единой электроэнергетической сети Египта (ЕЭСЕ) связаны с ростом численности населения за последние десятилетия и высоким износом инфраструктуры электрических сетей. Для изучения данной проблемы Министерством энергетики Египта были организованы масштабные исследования состояния КЭ в национальных электрических сетях [1–8].

В статье рассмотрено текущее состояние качества электроэнергии в распределительной сети Среднего Египта (РССЕ). Основные нарушения в сети связаны с превышением значений отклонения напряжения допустимых границ. Недопустимые отклонения напряжения приводят к увеличению потерь электроэнергии в системе, ухудшению функционирования сети и нарушениям в работе электроприёмников.

Одним из возможных решений для снижения отклонений напряжения является компенсация реактивной мощности. Важны оптимальное размещение и выбор емкости батарей конденсаторов. Предлагаемый подход к расстановке компенсирующих устройств состоит из двух этапов:

- 1) предварительный анализ коэффициентов чувствительности [9, 10];
- 2) оптимизация размещения компенсирующих устройств гибридным методом роя частиц (HPSO).

**Результаты измерений показателей качества электроэнергии в распределительной сети Среднего Египта.** Схема Единой электроэнергетической сети Египта (рис. 1) включает в себя шесть географических регионов: Каир, Канал, Дельта, Александрия, Средний и Южный Египет [11, 12].

Система передачи электроэнергии Египта (рис. 1) включает в себя сети с уровнями напряжения 500, 400, 220, 132 и 66 кВ. Электрическая сеть в г. Минья представлена следующими основными объектами: ПС Самолут 500 кВ, линии электропередачи 132 и 33 кВ, распределительные сети 11 кВ.

Измерения были проведены в распределительной городской сети 11 кВ г. Минья, который находится в Среднем Египте (Распределительная сеть Среднего Египта «РССЕ»). На рис. 2 показаны места установки средств измерений. В качестве примера были выбраны 15 узлов одного фидера, показанные на рис. 3.

На рис. 4 показан суточный график напряжения на центре питания. На рис. 5 изображены суточные графики активной и реактивной мощности на головном участке фидера 11 кВ. Максимальный пик нагрузок наблюдается с 10:00 до 16:00 часов, а также с 19:00 до 23:00 часов. На рис. 6 представлено суточное распределение напряжения на шинах 0,4 кВ трансформаторных подстанций 11/0,4 кВ. В течение продолжительного периода времени в течение суток напряжение у части подстанций ниже минимально допустимого значения (90%  $U_{ном}$ ). Как видно из рис. 7, коэффициент искажения си-

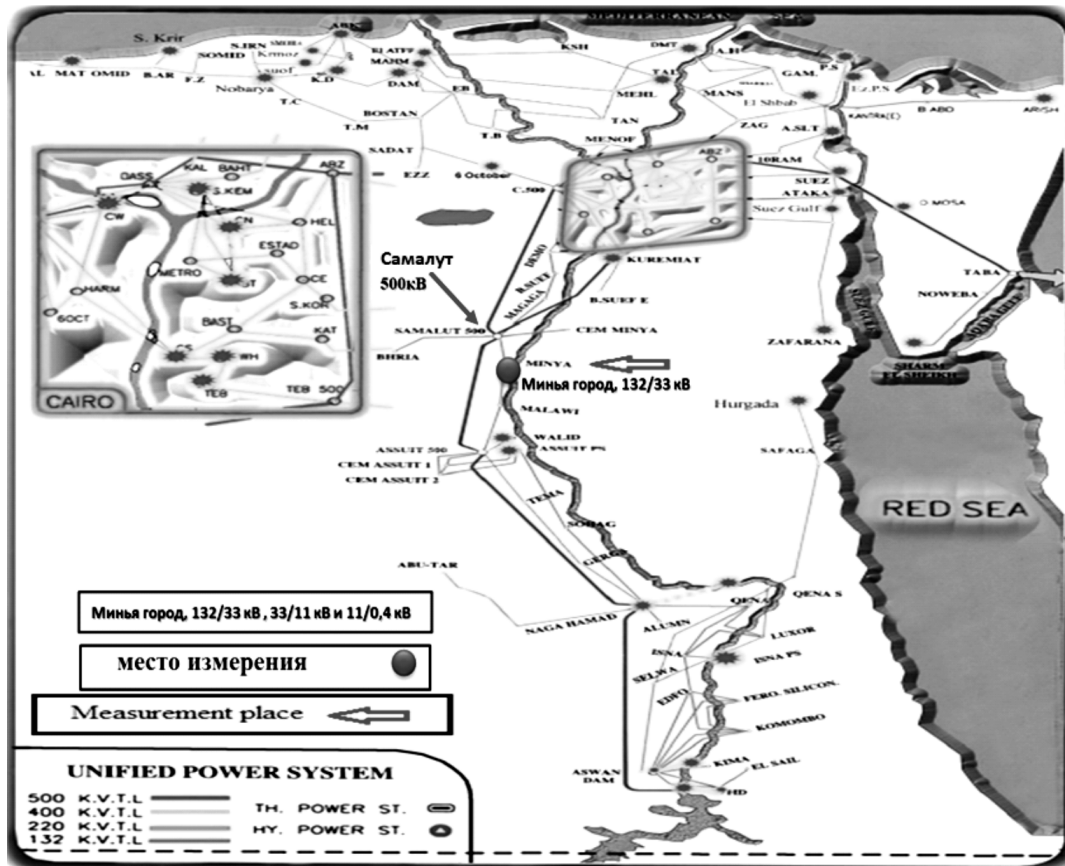


Рис. 1. Схема Единой электроэнергетической сети Египта

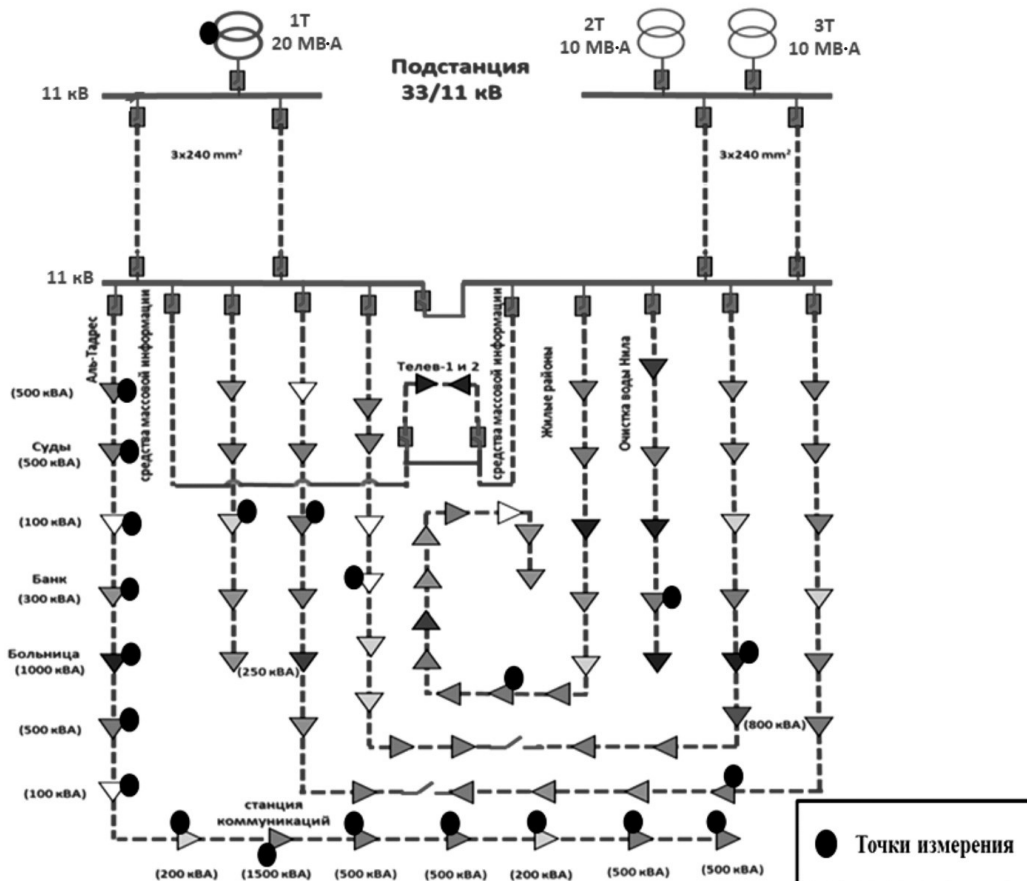


Рис. 2. Схема распределительной сети Среднего Египта (г. Минья)

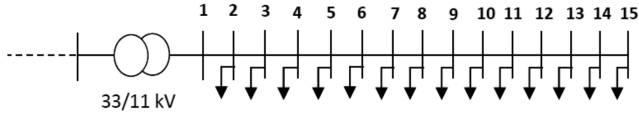


Рис. 3. Схема фидера, на котором выполнялись измерения

нусоидальности напряжения находится в допустимых пределах (< 5%). Из рис. 8 видно, что несимметрия напряжения находится в пределах нормы (< 3%). Отклонение частоты выходит за пределы допустимых значений (> 50,2 Гц), как показано на рис. 9.

Рассмотрим возможность нормализации уровня напряжения посредством компенсации реактивной мощности. Оптимальное размещение батарей конденсаторов в распределительной сети позволяет улучшить уровень напряжения и снизить потери активной мощности. Целью установки компенсирующих устройств является минимизация суммарных эксплуатационных издержек электросетевой компании. Математически эту задачу можно описать как минимизацию целевой функции (функции затрат на компенсацию потерь мощности и стоимость установки батарей конденсаторов):

$$Cost\_fun = K_p \Delta P + \left[ \left( \sum_j^J K_j^C Q_j^C \right) + (1000 \$/\text{год}) K \right] \$/\text{год} \tag{1}$$

где  $\Delta P$  – полные потери активной мощности в сети;  $J$  – число узлов, в которых устанавливаются БСК;  $K_p$  – эквивалентная годовая стоимость одного киловатта потерь (\$/кВгод);  $K_j^C$  – эквивалентная годовая стоимость установки 1 квар батарей конденсаторов емкостью  $Q_j^C$ , расположенных на  $j$ -й подстанции.

Значения емкости батарей конденсаторов  $Q_j^C$  и соответствующие им эквивалентные годовые стоимости  $K_j^C$  приведены в [10, 13]; 1000 \$/год – стоимость технического обслуживания (размещение и эксплуатационные расходы);  $K$  – число БСК.

При оптимизационном расчете накладываются следующие ограничения.

1. Напряжение на шинах распределительной сети должно находиться в допустимых пределах,  $i=1,2,\dots,n$  ( $n$  – число узлов нагрузки):

$$U_{\min} \leq U_{(i)} \leq U_{\max} \tag{2}$$

2. Наибольшая суммарная емкость используемой батареи конденсатора  $Q_{\Sigma}$  ограничена максимальной суммарной потребляемой реактивной мощностью  $Q_{H\Sigma}$ :

$$Q_{\Sigma} \leq Q_{H\Sigma} \tag{3}$$

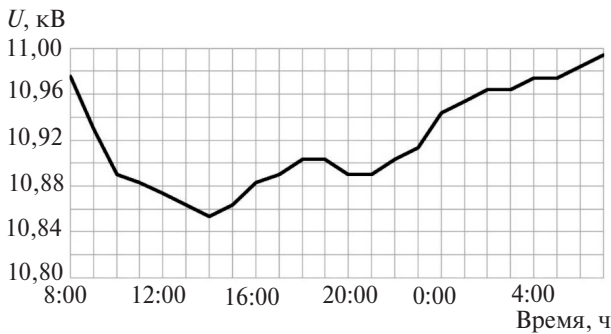


Рис. 4. График напряжения на подстанции

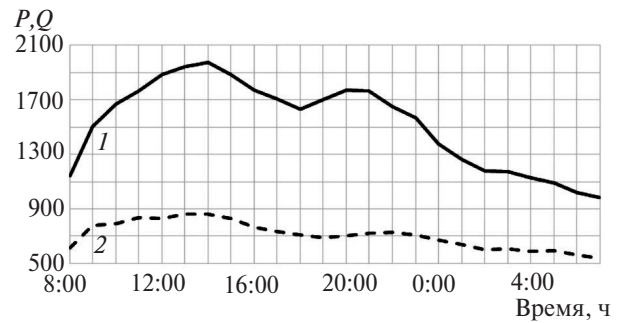


Рис. 5. Графики активной и реактивной мощности на головном участке фидера 11 кВ: 1 –  $\Sigma P$ , кВт; 2 –  $\Sigma Q$ , квар

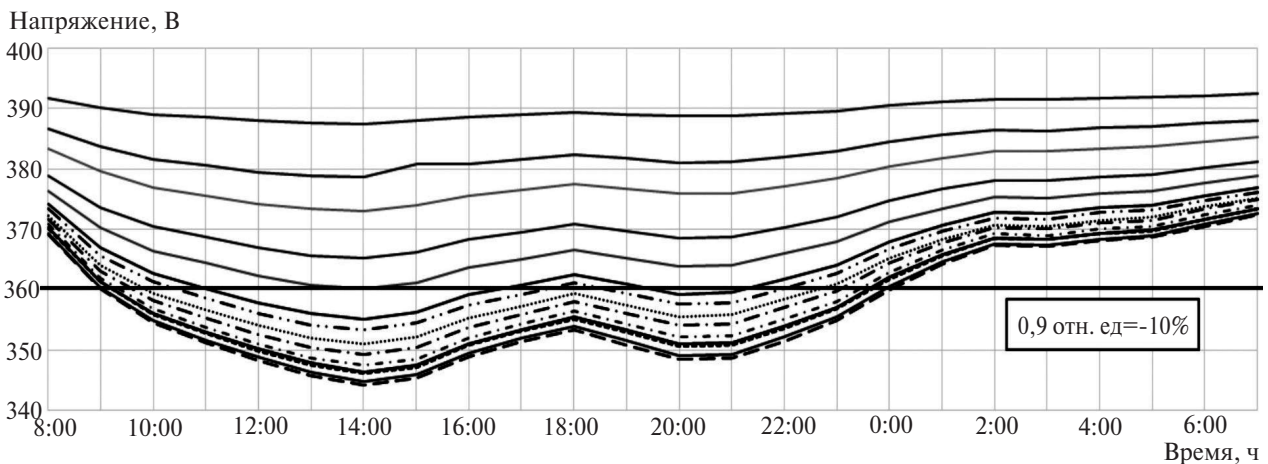


Рис. 6. Графики напряжения на стороне 0,4 кВ трансформаторных подстанций 11/0,4 кВ

0,9 отн. ед=-10%

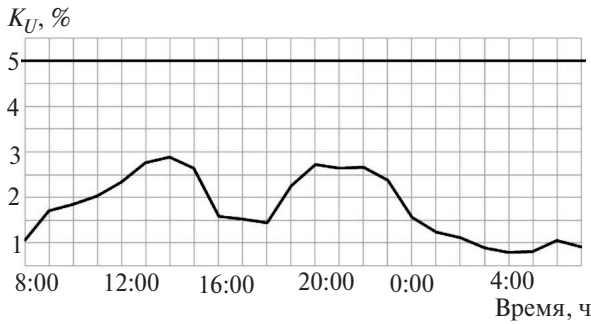


Рис. 7. Суммарный коэффициент несинусоидальности напряжения  $K_U$  в узле 15

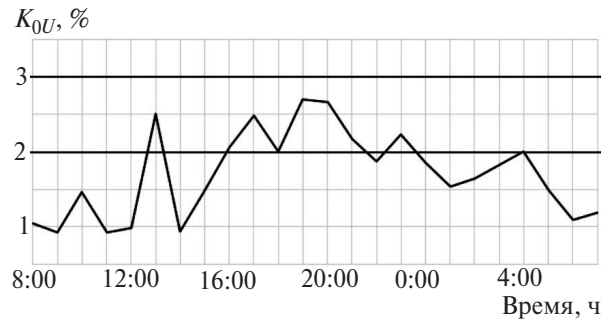


Рис. 8. Коэффициент несимметрии напряжения по нулевой последовательности  $K_{0U}$  в узле 15

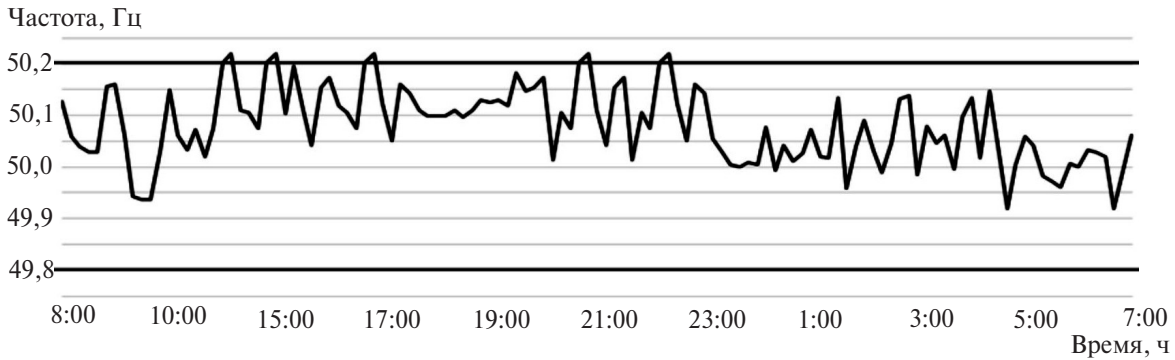


Рис. 9. Частота в узле 15

3. Полная мощность  $S$ , передаваемая по линиям распределительной сети, должна быть меньше предельных допустимых значений:

$$S_{i(j)} \leq S_{i(j)}^{доп}, \quad (4)$$

где  $j=1,2,\dots,N$  – число линий электропередачи.

**Анализ коэффициента чувствительности.** Предполагаемые узлы, в которых следует установить батареи конденсаторов, выбираются с учетом коэффициентов чувствительности потерь. Установка батарей конденсаторов в таких предполагаемых узлах необходима для уменьшения области исследования при выполнении оптимизации предложенным алгоритмом.

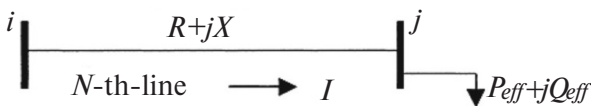


Рис. 10. Схема распределительной линии между шинами  $i$  и  $j$

Рассмотрим распределительную линию, подключенную между узлами  $i$  и  $j$ , с сопротивлением  $Z=R+jX$ , током  $i$  и нагрузкой ( $P$  и  $Q$ ) (рис.10).

Потери активной мощности в линии между узлами  $i$  и  $j$  равны:

$$\Delta P_{ij} = R_{ij} \frac{(P_j^2 + Q_j^2)}{U_j^2}, \quad (6)$$

где  $P_j$  и  $Q_j$  – активная и реактивная мощности, передаваемые по линии.

Коэффициент чувствительности потерь активной мощности в данной линии к компенсации реактивной мощности в ее конце можно определить как

$$K_{\Delta P(ij)} = \frac{\partial \Delta P_{ij}}{\partial Q_j} = \frac{2Q_j R_{ij}}{U_j^2}. \quad (7)$$

Данный подход позволяет быстро определить предварительный список узлов, предназначенных для установки компенсирующих устройств (узлы с наибольшим значением  $K_{\Delta P}$ ) [9, 10].

**Гибридный оптимизационный метод роя частиц (HPSO).** Оптимизационный метод роя частиц (MPЧ) является одним из эволюционных алгоритмов, который впервые был предложен в 1995 г. [14–16]. Идея оптимизации основана на обобщении результатов наблюдения за стайными животными. В MPЧ популяции особей эволюционируют посредством сотрудничества и конкуренции между собой. Каждая особь, именуемая частицей популяции, является потенциальным решением задачи.

Каждому положению в пространстве решений соответствуют определенные значения целевой функции. Каждая частица стремится занять наилучшую позицию, изменяя направление и скорость движения в пространстве решений. Основные элементы описаны подробно в [9, 10, 13].

В статье для расстановки БСК и выбора их емкости предлагается гибридный оптимизационный алгоритм, совмещающий метод роя частиц в начальной фазе и квазиньютоновский метод на последующем этапе (когда достигнут критерий остановки оптимизации МРЧ).

Эти методы обладают сильными сторонами, дополняющими друг друга. В данном комбинированном подходе два метода применяются последовательно. Результат оптимизационного расчета методом роя частиц является стартовой точкой для квазиньютоновского метода [16–19].

Предложенный метод оптимальной расстановки компенсирующих устройств в радиальной распределительной сети включает в себя следующие этапы.

1. Расчет установившегося режима и определение напряжения в каждом узле и суммарных потерь активной мощности.

2. Формирование первоначального роя частиц (значений емкостей конденсаторных батарей в различных узлах сети)  $(x_i^t)$ ,  $[x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,N_p}] =$

$$=[Q_1^C, Q_2^C, \dots, Q_j^C]$$

3. Генерация скорости частицы  $v_i^t$ .

4. Расчёт установившегося режима для каждой частицы и выбор наилучшего решения.

5. Вычисление целевой функции годовых затрат для каждой частицы с принятыми ограничениями.

6. Запуск квазиньютоновского алгоритма с полученным результатом в качестве начального приближения.

7. Повторение этапов с (4) по (6) до достижения критерия окончания оптимизации.

**Результаты тестового расчета.** Для исследуемой сети были выполнены тестовые расчеты на основе разработанного алгоритма, реализованного в программной среде MATLAB. Расчет был выполнен для схемы распределительной сети Среднего Египта, содержащей 15 узлов (см. рис. 3). Допустимые границы по уровню напряжения были заданы в (0,9 – 1,1 отн. ед). Номинальное напряжение тестовой сети 11 кВ. Максимальное пиковое значение нагрузок приходится на 14:00 часов для тестовой системы и является наиболее тяжелым для всех узлов. Общая полная мощность системы  $S = 2201,8 + j1018,9$  кВА, полная мощность нагрузки  $S_{\text{н\c{c}}} = 1976,3 + j865,2$  кВА и потери мощности  $\Delta S = 225,46 + j153,67$  кВА. Годовая стоимость 1 кВт потерь электроэнергии составляет  $K_p = 168$  \$.

Сравнение режимов до и после компенсации реактивной мощности представлены в таблице. По результатам оптимизационного расчета для уста-

Параметр	Без компенсации	С компенсацией
Полные потери (кВт)	225,46	175,9526
Снижение потерь %	–	21,958
U <sub>min</sub> (отн.ед.), узел 15	0,8593	0,9032
Общий PF (коэффициент мощности)	0,881	0,9856
Оптимальное расположение емкости конденсатора (квар)		10/600 14/300
$\sum Q_C$ , квар		900
Полная стоимость \$/год	37878	29560
$P_{\text{пот}}$ $Q_C$ годовая	37878	2237 31797
Чистая экономия, \$/год	–	6081
Экономия, %	–	16,054 %

новки компенсирующих устройств были выбраны узлы 10 и 14. Суммарная мощность компенсации составила 900 квар. Изменение профиля напряжения в результате компенсации реактивной мощности приведено на рис. 11. Видно, что в результате установки компенсирующих устройств был значительно улучшен уровень напряжения в сети и снижены потери активной мощности.

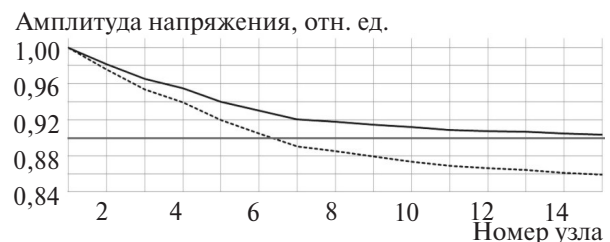


Рис. 11. Профиль напряжения (отн. ед.) вдоль узлов сети: --- – напряжение до компенсации; — – после компенсации

**Выводы.** Распределительная сеть среднего Египта характеризуется нарушениями показателей качества электроэнергии по отклонению напряжения. Для решения данной проблемы предложена компенсация реактивной мощности. Выбор мест установки и емкости компенсирующих устройств предлагается осуществлять на основе оптимизационного расчета гибридным методом роя частиц. Результаты, полученные в ходе математического моделирования, доказывают, что предлагаемый подход имеет высокую эффективность при решении данной задачи. Для рассмотренной модели были достигнуты повышение уровня напряжения, снижение потерь мощности, минимизация общих годовых затрат, повышение коэффициента мощности в сети.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tulsy V.N., Vanin A.S., Tolba Mohamed A., Zaki Diab A.A. «Study and analysis of power quality for an electric power distribution system – Case study: Moscow region», IEEE NW,

Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Con. (EIConRusNW), 2016, pp. 710 – 716.

2. **Dugan R.C., McGranaghan M.F., Santoso S., Beaty H.W.** «Electrical Power Systems Quality. 2nd edition», McGraw-Hill, New York, 2002.

3. **Bollen M.H.J.** «Understanding power quality problems: voltage sags and interruptions», IEEE Press, New York, 2000.

4. **Ewald F. Fuchs, Mohammad A.S. Masoum.** «Power Quality in power systems and Electrical Machines», Book, 2008 & 2015.

5. **Roger C. Dugan, Mark F. McGranaghan, Surya Santoso, H. Wayne Beaty.** «Electrical Power Systems Quality», Book, McGraw Hill, Second edition, New York, 1996.

6. **Chattopadhyay S. et al.** «Electric Power Quality, Power Systems», Springer Science B.V., 2011.

7. **Meheub Alam, Mandela Gain.** «Power Quality Problems and Solutions: An Overview», International Journal of Science and Research (IJSR), vol. 3, iss. 10, October 2014.

8. **Delgado J.** «Total Quality Management Applied to the Electric Power Supply Sector», Thesis submitted to fulfilment of the requirements for the degree of PhD. in Electrotechnical Engineering, Coimbra, September, 2002.

9. **Prakash K., Sydulu M.** Particle Swarm Optimization Based Capacitor Placement on Radial Distribution Systems, IEEE power engineering society general meeting, 2007, pp. 1–5.

10. **Elsheikh A., Helmy Y., Abouelseoud Y., Elsherif A.** Optimal capacitor placement and sizing in radial electric power systems, Hosted by Elsevier B. V. on behalf of faculty of engineering, Alexandria university journal 53, the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/>), 2014, pp. 809–816.

11. **Ahmed Awaise.** «Case study of flexible operations in Egypt», IAEA, Technical Meeting on Flexible (Non-BaseLoad) Operation for Load Following and Frequency Control in New NPP's, <https://www.iaea.org/NuclearPower/Meetings/2014/>, 6–8 Oct. 2014.

12. **Tamer Fetouh, Tamer A. Kawady, H. Shaaban, Abdallah Elsherif,** «Impact of the New Gabl El-Zite Wind Farm Addition on the Egyptian Power System Stability», Inter. Conf., IEEE, 2013.

13. **Ching-Tzong Su, Chih-Cheng Tsai.** A New Fuzzy-Reasoning Approach to Optimum Capacitor Allocation for Primary Distribution Systems, Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology, 1996.

14. **Eberhart R. C., Kennedy J.** A new optimizer using particles swarm theory, Proceedings of the 6th International Symposium on Micro Machine and Human Science, 4–6 October 1995, pp. 39–43.

15. **Kennedy J., Eberhart R.C.** Particle swarm optimization, Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks IV, Piscataway, NJ: IEEE Service Center, 1995, pp. 1942–1948.

16. **Santos Coelho L.D., Mariani V.C.** Particle Swarm Optimization with Quasi-Newton Local Search for Solving Economic Dispatch Problem”, IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, Taipei, Taiwan, 8–11 October 2006.

17. **Preux Ph., Talbi E.G.** Towards hybrid evolutionary algorithms, International Transactions in Operational Research, vol. 6, 1999, pp. 557–570.

18. **Krasnogor N., Smith J.** A tutorial for competent memetic algorithms; model, taxonomy, and design issues, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2005, vol. 9, no. 5, pp. 474–488.

19. **Coelho L.S., Mariani V.C.** Combining of chaotic differential evolution and quadratic programming for economic dispatch optimization with valve-point effect, IEEE Transactions on Power Systems, 2006.

[11.10.2017 ]

*А в т о р ы: Тульский Владимир Николаевич окончил Московский энергетический институт – ныне Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт («НИУ «МЭИ») в 2001 г. В 2004 г. защитил кандидатскую диссертацию «Развитие методики определения фактического вклада при оценке качества электрической энергии в точке общего присоединения». Доцент кафедры «Электроэнергетические системы» «НИУ «МЭИ».*

*Ванин Артем Сергеевич окончил «НИУ «МЭИ» в 2011 г. В 2014 г. защитил кандидатскую диссертацию «Разработка методики расчета надежности систем электроснабжения относительно узлов нагрузки с учетом провалов напряжения». Научный сотрудник, канд. техн. наук «НИУ «МЭИ».*

*Толба Мохамед Али Хассан в 2013 г. получил степень магистра в университете Минья (Эль-Минья, Египет). Аспирант кафедры «Электроэнергетические системы» «НИУ «МЭИ».*

*Дияб Ахмед А. Заки в 2009 г. получил степень магистра в университете Минья (Эль-Минья, Египет). В 2015 г. защитил кандидатскую диссертацию в Новосибирском государственном техническом университете. Научный сотрудник университета Минья (Егунет).*

*Elektrichestvo (Electricity), 2018, No. 2, pp. 52–59*

*DOI:10.24160/0013-5380-2018-2-52-58*

## Analyzing the Electric Power Quality in the Egyptian Distribution Network and Selecting the Reactive Power Compensation Devices

**TUL'SKY Vladimir N.** (*National Research University «Moscow Power Engineering Institute» («NRU «MPEI»), Moscow, Russia*) – Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.)

**TOLBA Mohamed Ali Hassan** – Citizen of Egypt («NRU «MPEI», Moscow, Russia) – Ph.D. Student

**VANIN Artem S.** («NRU «MPEI», Moscow, Russia) – Scientific Researcher, Cand. Sci. (Eng.)

**DIAB Ahmed A. Zaki** (*Minia University, Minia, Egypt*) – Scientific Researcher

*The article presents the results from measuring and analyzing the parameters characterizing the quality of electric power in the distribution network of Middle Egypt. This study is part of the research project for further development of the Egyptian electric network. Problems concerned with deviations from the*

*permissible level of voltage in the distribution network are analyzed. Measures to normalize the voltage levels by using reactive power compensation devices are proposed. A new hybrid algorithm based on the particle swarm method was applied for arranging the compensating devices. The network operating conditions were simulated in the Matlab software system environment. The proposed approach for arranging the compensating devices based on optimization using the hybrid particle swarm method has shown high efficiency for normalizing the voltage levels and reducing active power losses.*

**Key words:** *distribution network, electric power quality, reactive power compensation, loss sensitivity factor, hybrid particle swarm-based optimization algorithm*

## REFERENCES

1. **Tulsky V.N., Vanin A.S., Tolba Mohamed A., Zaki Diab A.A.** «Study and analysis of power quality for an electric power distribution system – Case study: Moscow region», IEEE NW, Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Con. (EIConRusNW), 2016, pp. 710–716.
2. **Dugan R.C., McGranaghan M.F., Santoso S., Beaty H.W.** «Electrical Power Systems Quality. 2nd edition», McGraw-Hill, New York, 2002.
3. **Bollen M.H.J.** «Understanding power quality problems: voltage sags and interruptions», IEEE Press, New York, 2000.
4. **Ewald F. Fuchs, Mohammad A.S. Masoum.** «Power Quality in power systems and Electrical Machines», Book, 2008 & 2015.
5. **Roger C. Dugan, Mark F. McGranaghan, Surya Santoso, H. Wayne Beaty.** «Electrical Power Systems Quality», Book, McGraw Hill, Second edition, New York, 1996.
6. **Chattopadhyay S. et al.** «Electric Power Quality, Power Systems», Springer Science B.V., 2011.
7. **Meheub Alam, Mandela Gain.** «Power Quality Problems and Solutions: An Overview», International Journal of Science and Research (IJSR), vol. 3, iss. 10, October 2014.
8. **Delgado J.** «Total Quality Management Applied to the Electric Power Supply Sector», Thesis submitted to fulfilment of the requirements for the degree of PhD. in Electrotechnical Engineering, Coimbra, September, 2002.
9. **Prakash K., Sydulu M.** Particle Swarm Optimization Based Capacitor Placement on Radial Distribution Systems, IEEE power engineering society general meeting, 2007, pp. 1–5.
10. **Elsheikh A., Helmy Y., Abouelseoud Y., Elsherif A.** Optimal capacitor placement and sizing in radial electric power systems, Hosted by Elsevier B. V. on behalf of faculty of engineering, Alexandria university journal 53, the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/>), 2014, pp. 809–816.
11. **Ahmed Awaise.** «Case study of flexible operations in Egypt», IAEA, Technical Meeting on Flexible (Non-BaseLoad) Operation for Load Following and Frequency Control in New NPP's, <https://www.iaea.org/NuclearPower/Meetings/2014/>, 6–8 Oct. 2014.
12. **Tamer Fetouh, Tamer A. Kawady, H. Shaaban, Abdallah Elsherif,** «Impact of the New Gabl El-Zite Wind Farm Addition on the Egyptian Power System Stability», Inter. Conf., IEEE, 2013.
13. **Ching-Tzong Su, Chih-Cheng Tsai.** A New Fuzzy-Reasoning Approach to Optimum Capacitor Allocation for Primary Distribution Systems, Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology, 1996.
14. **Eberhart R.C., Kennedy J.** A new optimizer using particles swarm theory, Proceedings of the 6th International Symposium on Micro Machine and Human Science, 4–6 October 1995, pp. 39–43.
15. **Kennedy J., Eberhart R.C.** Particle swarm optimization, Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks IV, Piscataway, NJ: IEEE Service Center, 1995, pp. 1942–1948.
16. **Santos Coelho L.D., Mariani V.C.** Particle Swarm Optimization with Quasi-Newton Local Search for Solving Economic Dispatch Problem”, IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, Taipei, Taiwan, 8–11 October 2006.
17. **Preux Ph., Talbi E.G.** Towards hybrid evolutionary algorithms, International Transactions in Operational Research, vol. 6, 1999, pp. 557–570.
18. **Krasnogor N., Smith J.** A tutorial for competent memetic algorithms; model, taxonomy, and design issues, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2005, vol. 9, no. 5, pp. 474–488.
19. **Coelho L.S., Mariani V.C.** Combining of chaotic differential evolution and quadratic programming for economic dispatch optimization with valve-point effect, IEEE Transactions on Power Systems, 2006.

[11.10.2017 ]