

УДК 620.9.001.5

## ВЫБОР МОЩНОСТИ КОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ УРОВНЕЙ ПОТЕРЬ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

*Ю.П. Кубарьков, К.А. Голубева, Я.В. Макаров*

Самарский государственный технический университет  
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

*Одной из основных задач в электрических сетях является задача оптимизации режима и сокращения потерь мощности. Для ее решения применяются статические конденсаторные батареи, мощность которых необходимо определять в каждом конкретном случае. Рассматривается оптимизация режима работы радиальной схемы электрической сети. Методом нелинейного программирования произведен расчет мощности компенсирующих устройств, которые устанавливаются в местах расположения нагрузок. Выполнен анализ потерь активной и реактивной мощности для линий электропередач (ЛЭП) и трансформаторов.*

**Ключевые слова:** *оптимизация, потери мощности, батареи статических конденсаторов, метод нелинейного программирования.*

### **Введение**

Оптимизацией называется задача, которая выявляет оптимальный процесс из ряда других по критерию оптимальности.

Общую задачу управления режимами электроэнергетической системы подразделяют на составляющие – а именно отдельные системы управления.

Управление режимами энергосистемы – это сложная комплексная задача, решаемая в среде постоянно меняющихся нагрузок. Уменьшение потерь мощности при управлении режимами работы электроэнергетической системы – одна из главных целей оптимизации.

При оптимизации решают следующие задачи:

- определяют оптимальную стратегию развития энергосистемы (ее проектирование или реконструкция) и отдельных объектов (выбор места расположения, мощности, установка сроков введения в работу новых электростанций, линий электропередач, подстанций);
- выбирают наилучшую конфигурацию электрической сети;
- распределяют нагрузки между отдельными электростанциями;
- выбирают стратегию, обеспечивающую лучшее использование материальных ресурсов (виды топлива и т. д.).

Во время оптимизации в результате возможности изменения параметров режима производят выбор таких значений параметров, которые обеспечивают меньшие общие потери активной мощности в сети или меньший общий расход условного топлива.

С целью оптимизации режима работы и снижения потерь мощности возможно использование батарей статических конденсаторов (БСК). БСК обеспе-

---

*Юрий Петрович Кубарьков (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Электрические станции».*

*Ярослав Викторович Макаров, аспирант.*

*Кристина Анатольевна Голубева, аспирант.*

чивают поддержку параметров качества электроэнергии за счет уменьшения потерь в электрических сетях и увеличения величины напряжения на шинах потребителей [1, 2, 3].

Достоинствами конденсатора в качестве компенсатора реактивной мощности являются небольшие потери активной мощности (в диапазоне 0,3–0,4 % Вт/вар) и удобство в обслуживании. Недостатком можно считать отсутствие возможности плавного регулирования реактивного сопротивления, так как коммутация позволяет давать лишь ступенчатое изменение общей емкости. Однако этот недостаток может быть устранен применением тиристорной системы управления.

При любом допустимом режиме должны обеспечиваться условия качества электрической энергии и надежности электроснабжения. При расчете допустимого режима условия надежности и качества учитывают по типу ограничений (равенств и неравенств) на контролируемые параметры режима.

Существует много методов оптимизации расчетов режима в энергосистеме [4]. В данной работе рассматривается метод нелинейного программирования.

### **Метод нелинейного программирования**

Общим для различных методов нелинейного программирования является то, что целевая функция – нелинейная. В свою очередь, налагаемые ограничения возможны и линейные, и нелинейные.

Задачу нелинейного программирования можно сформулировать так: необходимо произвести минимизацию целевой функции  $\psi(x_1, x_2, \dots, x_n)$  при наличии линейных или нелинейных ограничений в виде равенств  $f_j(x) = 0$  или неравенств  $q_j(x) < 0$ .

Методы нелинейного программирования различны. При выборе нужного метода необходимо иметь в виду следующие факторы: надежность отыскания оптимума, скорость его достижения, удобство подготовки начальных данных, возможность учета ограничивающих параметров, наличие имеющихся алгоритмов и программ для использования метода на компьютере.

### **Исследования и расчеты**

В качестве примера применения метода нелинейного программирования была рассмотрена радиальная схема электрической сети (рис. 1). Электрическая сеть состоит из 7 подстанций с трансформаторами Т1-Т7, мощность которых отмечена на рисунке, и 14 линий электропередач (W1-W14).

Марка и длина каждой линии электропередач указаны на рисунке. Нагрузки подстанций (N1-N7) приведены в таблице.

**Нагрузки потребителей**

№ узла	4 (N1)	7 (N2)	10 (N3)	13 (N4)	16 (N5)	19 (N6)	22 (N7)
P, кВт	150	250	250	70	65	80	160
Q, квар	80	130	130	40	35	45	72

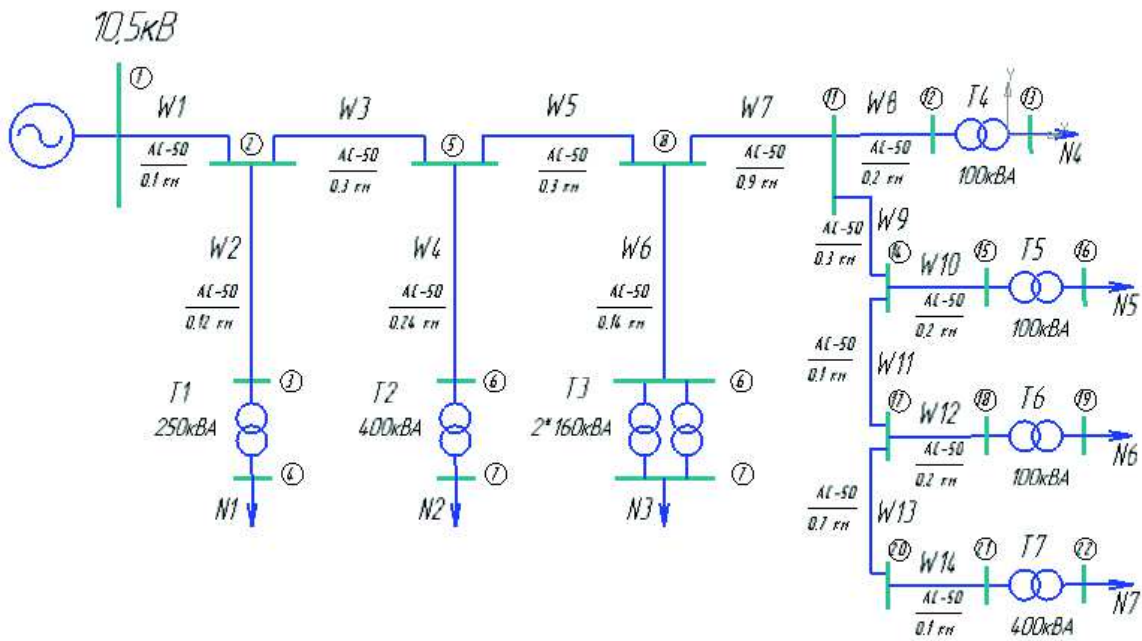


Рис. 1. Схема электрической сети

В местах расположения нагрузок предполагается установка компенсирующих устройств БСК1-БСК7, расчет мощности которых осуществляется методом нелинейного программирования. Для этого рассмотрим участок цепи, состоящий из линий электропередач W13–W14 (узлы 17→20→21→22) и нагрузки N7. Целевая функция в этом случае будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} \Delta P_{\Sigma} = & \Delta P_{W1} + \Delta P_{W2} + \Delta P_{W3} + \Delta P_{W4} + \Delta P_{W5} + \Delta P_{W6} + \Delta P_{W7} + \\ & + \Delta P_{W8} + \Delta P_{W9} + \Delta P_{W10} + \Delta P_{W11} + \Delta P_{W12} + \Delta P_{W13} + \Delta P_{W14} + \\ & \Delta P_{T1} + \Delta P_{T2} + \Delta P_{T3} + \Delta P_{T4} + \Delta P_{T5} + \Delta P_{T6} + \Delta P_{T7}. \end{aligned} \quad (1)$$

Потери мощности в трансформаторе T7:

$$\Delta P_{T7} = \frac{P_{N7}^2 + (Q_{N7} - Q_{БСК7})^2}{U^2} \cdot R_{T7}. \quad (2)$$

Тогда мощность перед трансформатором T7 будет составлять:

$$P_{T7} = P_{N7} + \Delta P_{T7}. \quad (3)$$

Потери мощности в линии W14:

$$\Delta P_{W14} = \frac{P_{T7}^2 + (Q_{N7} - Q_{БСК7})^2}{U^2} \cdot R_{W14}. \quad (4)$$

Мощность в начале линии W14:

$$P_{W14} = P_{T7} + \Delta P_{W14}. \quad (5)$$

Аналогичным образом рассчитываем потери и мощность в начале линии W13:

$$\Delta P_{W13} = \frac{P_{W14}^2 + (Q_{W14} - Q_{БСК7})^2}{U^2} \cdot R_{W13}. \quad (6)$$

Подставляя полученные выражения в целевую функцию, получим:

$$P_{W13} = P_{N7} + \frac{P_{N7}^2 + (Q_{N7} - Q_{БСК7})^2}{U^2} \cdot R_{T7} + \frac{P_{T7}^2 + (Q_{N7} - Q_{БСК7})^2}{U^2} \cdot R_{W14} + \frac{P_{W14}^2 + (Q_{W14} - Q_{БСК7})^2}{U^2} \cdot R_{W13}. \quad (7)$$

Продифференцировав целевую функцию по величине  $Q_{БСК7}$ , имеем:

$$-2(Q_{N7} - Q_{БСК7}) \cdot R_{T7} - 2(Q_{T7} - Q_{БСК7}) \cdot R_{W14} - (Q_{W14} - Q_{БСК7}) \cdot R_{W13} = 0; \quad (8)$$

$$-Q_{N7} \cdot R_{T7} - Q_{T7} \cdot R_{W14} - Q_{W14} \cdot R_{W13} + Q_{БСК7}(R_{T7} + R_{W14} + R_{W13}) = 0. \quad (9)$$

Упрощая, получим выражение для определения мощности БСК7:

$$Q_{БСК7} = \frac{Q_{N7} \cdot R_{T7} - Q_{T7} \cdot R_{W14} - Q_{W14} \cdot R_{W13}}{R_{T7} + R_{W14} + R_{W13}}; \quad (10)$$

$$Q_{БСК7} = \frac{170 \cdot 3,38 + 199 \cdot 0,065 + 200 \cdot 0,455}{3,38 + 0,065 + 0,455} = 174 \text{ Мвар}. \quad (11)$$

Расчетная мощность БСК7 ( $Q_{БСК7}$ ) была скорректирована под стандартный номинал выпускаемого оборудования до 175 Мвар.

Далее аналогичным образом производится расчет для остальных участков сети с нагрузками N1-N6 для определения мощностей БСК1-БСК6.

С установкой БСК уровни напряжений на шинах потребителей повысились. Это видно из графика напряжений в узлах подключения нагрузки на рис. 2.

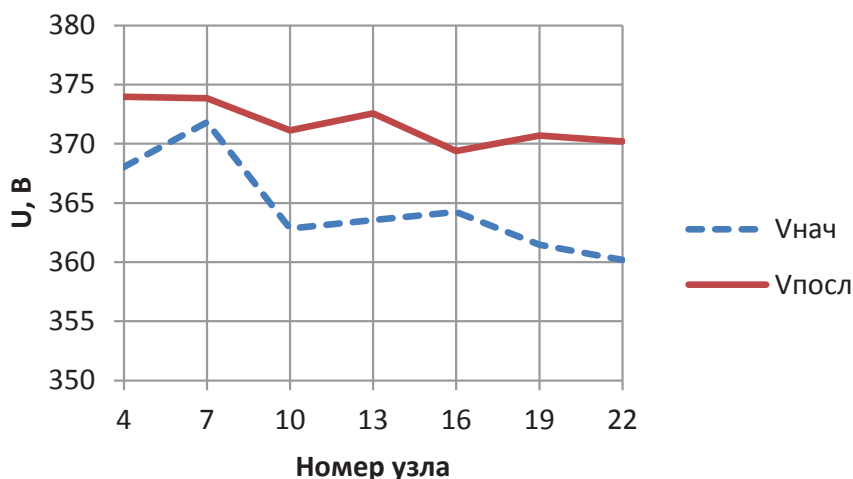


Рис. 2. График напряжений в узлах подключения нагрузки

Далее был проведен анализ потерь активной и реактивной мощности для линий электропередач (ЛЭП) и трансформаторов [5, 6].

Результаты анализа представлены на графиках (рис. 3).

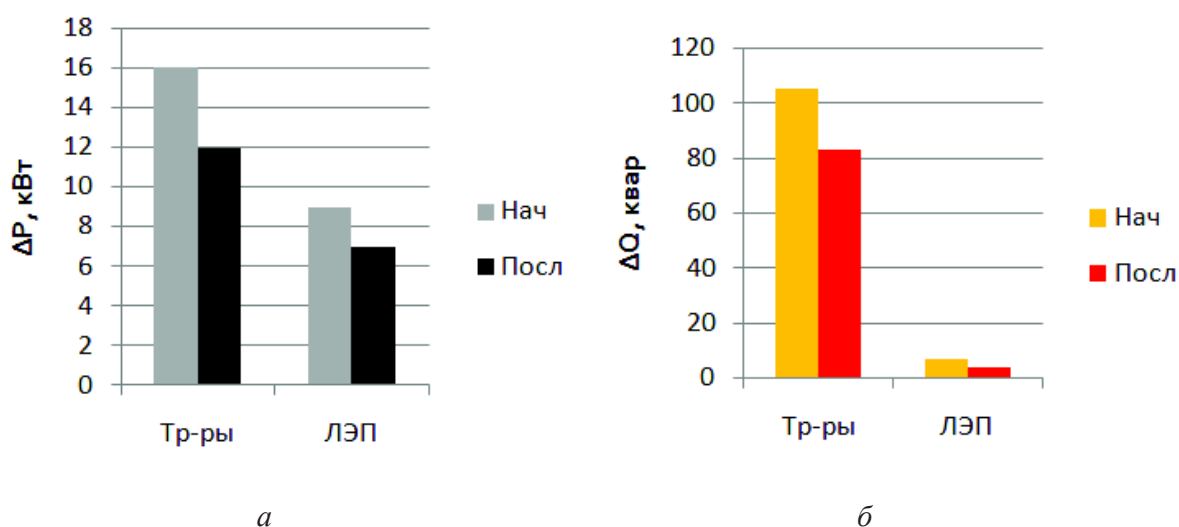


Рис. 3. Графики суммарных потерь мощностей для ЛЭП и трансформаторов: *а* – активной; *б* – реактивной

### Выводы

Для радиальной распределительной сети методом нелинейного программирования были рассчитаны мощности БСК для их распределенной установки вблизи потребителей. Анализ полученных результатов показал увеличение уровня напряжения на шинах низкого напряжения подстанций и сокращение уровня потерь активной и реактивной мощностей во всей сети.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Jahani R., Shafighi Malekshah A., Chahkandi Nejad H.* Applying a new advanced intelligent algorithm for optimal distributed generation location and sizing in radial distribution systems. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*. 2011; 5(5): 642–649.
2. Методы моделирования и оптимизации в задачах электроэнергетики: учеб. пособие / Сост. Л.А. Гурина. – Благовещенск, 2012. – 91 с.
3. *Abdolreza Sadighmanesh, Kazem Zare, Mehran Sabahi.* Distributed Generation unit and Capacitor Placement for Loss Voltage profile and ATC Optimization. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. 2012; 2(6): 774–780.
4. *Кубарьков Ю.П., Голубева К.А.* Управление уровнем напряжения и потерь в электрических сетях с активно-адаптивными элементами // *Электроэнергетика глазами молодежи: труды VI международной научно-технической конференции, 9–13 ноября 2015, Иваново.* – В 2 т.
5. *Borges C.L.T., Falcao D.M.* Impact of Distributed Generation Allocation and Sizing on Reliability, Losses, and Voltage Profile. *IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings*. Bologna. 2013.
6. *Araujo W.J., Ekel P.Ya., Filho R.P.F., Kokshenev I.V. and Schuffner H.S.* (2011) Monocriteria and Multicriteria Based Placement of Reactive Power Sources in Distribution Systems. *International Journal of Applied Mathematics and Informatics*, 5, 240–248.

Статья поступила в редакцию 29 сентября 2016 г.

## **POWER SELECTION OF COMPENSATING DEVICES TO OPTIMIZE THE LEVEL OF LOSSES IN THE ELECTRIC NETWORK**

***Y.P. Kubarkov, K.A. Golubeva, Y.V. Makarov***

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya str., Samara, 443100, Russian Federation

*One of the main tasks in electrical networks is the task of mode optimization and power loss reduction. For these purpose static capacitor batteries are used the power of which must be determined in each particular case.*

*This paper discusses optimization of the operating mode of the radial design of the electrical network. The calculation method of the nonlinear programming produces power compensation devices, which are installed in the locations of load. The analysis of active and reactive power losses for transmission lines (PTL) and transformers is made.*

***Keywords:*** *optimization, power loss, capacitor banks, non-linear programming method.*

---

*Yury P. Kubarkov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.  
Yaroslav V. Makarov, Postgraduate Student.  
Kristina A. Golubeva, Postgraduate Student*