

DOI: 10.26730/1999-4125-2017-5-150-155

УДК 621.316.016.25

**ФОРМИРОВАНИЕ ЦЕЛЕВОЙ ФУНКЦИИ И СИСТЕМЫ ОГРАНИЧЕНИЙ  
ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ РАЗМЕЩЕНИЯ КОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ В  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ ТЕРРИТОРИАЛЬНЫХ СЕТЕВЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ  
FORMATION OF OBJECTIVE FUNCTION AND CONSTRAINT SYSTEM IN OP-  
TIMIZATION OF PLACEMENT OF COMPENSATING DEVICES  
IN POWER GRIDS OF TERRITORIAL NETWORK ORGANIZATIONS**

**Беляевский Роман Владимирович,**  
кандидат техн. наук, доцент, e-mail: brv.egpp@kuzstu.ru  
**Roman V. Belyaevsky, C. Sc. (Engineering), Associate Professor**

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28  
T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28 street Vesennyaya, Kemerovo, 650000, Russian Federation

**Аннотация.** В настоящее время проблемы рациональной компенсации реактивной мощности являются одними из наиболее актуальных проблем распределительного электросетевого комплекса. Распределительные сети 6–35 кВ территориальных сетевых организаций характеризуются особой структурой и свойствами, поэтому важно решать для них задачу оптимизации размещения компенсирующих устройств. При этом, очевидно, что данная задача относится к классу задач многокритериальной оптимизации. Цель настоящей работы заключается в формировании целевой функции и системы ограничений при оптимизации размещения компенсирующих устройств в распределительных сетях территориальных сетевых организаций, обеспечивающих получение оптимальных решений, максимально соответствующих реальным условиям работы электрических сетей. Проведенные исследования основывались на общих положениях теории электрических цепей, методах оптимизации, а также методах планирования и принятия решений. В результате исследований рассмотрены основные проблемы решения задачи оптимизации размещения компенсирующих устройств в электрических сетях как многокритериальной задачи; представлена блок-схема процесса решения задачи многокритериальной оптимизации; рассмотрены особенности постановки задачи оптимизации размещения компенсирующих устройств в распределительных сетях территориальных сетевых организаций; предложена целевая функция и система ограничений задачи, а также матрицы-векторы результатов оптимизации.

**Abstract.** At present, the problems of rational reactive power compensation are among the most pressing problems of the distribution grid complex. Distribution grids of 6-35 kV of territorial network organizations are characterized by a special structure and properties. Therefore, it is important to solve the problem of optimization of compensating devices placement for these networks. It is obvious that this problem belongs to the class of multicriterial optimization problems. The purpose of this work is to form an objective function and a constraint system when optimizing the compensating devices placement in the distribution grids of territorial network organizations. This provides optimal solutions that are most appropriate to the real operating conditions of power grids. The conducted researches were based on general provisions of the theory of electrical circuits, optimization methods and methods of planning and decision-making. As a result of the research, the main problems of solving the issue of optimization of compensating devices placement in power grids as a multicriterial task are considered. A block diagram of the process for solving the multicriterial optimization problem is presented. Features of setting the task of optimization of placement of compensating devices in distribution grids of the territorial network organizations are considered. The objective function and the constraint system of the problem and also matrix-vectors of optimization results are offered.

**Ключевые слова:** распределительная электрическая сеть, территориальная сетевая организация, компенсация реактивной мощности, компенсирующее устройство, целевая функция, система ограничений, многокритериальная оптимизация.

**Keywords:** distribution grid, territorial network organization, reactive power compensation, compensating device, multicriterial optimization, objective function, limitation system.

Как известно, постановка задачи оптимизации размещения компенсирующих устройств в электрических сетях может рассматриваться в различных вариантах [1–6]. Однако независимо от используемого подхода, данная задача является многокритериальной, т.е. все локальные критерии в ней выражаются числовыми или логическими значениями, которые для каждого вектора переменных задачи принимают определенные значения. Для ее решения необходимо, прежде всего, построить многокритериальную математическую модель, которую в дальнейшем необходимо оптимизировать, выбрав наиболее подходящий для этого метод оптимизации.

Очевидно, что решение задач многокритериальной оптимизации является более сложным, чем однокритериальных. Основная сложность в решении многокритериальных задач заключается в определении принципа оптимальности, максимально точно характеризующего свойства оптимального решения. При однокритериальной оптимизации существует только один критерий оптимизации, следовательно, полученное оптимальное решение всегда является объективным и не зависит от экспертной оценки. При многокритериальной оптимизации могут использоваться различные формы и способы оценки эффективности полученных решений. При этом каждый из рассматриваемых способов может приводить к выбору тех или

иных решений. Поэтому выбор оптимального решения в задачах многокритериальной оптимизации всегда является субъективным и напрямую зависит от экспертной оценки.

Еще одной значительной сложностью, с которой приходится сталкиваться при решении многокритериальных задач, является необходимость нормализации векторного критерия оптимизации, т.е. приведения его к единому масштабу измерения, поскольку достаточно часто локальные критерии обладают разными масштабами. Также необходимо учитывать степень приоритета локальных критериев, т.к. каждый из них имеет различный уровень значимости. Поэтому возникает необходимость введения вектора распределения значимости критериев. Кроме того, в ряде случаев одновременно могут использоваться как количественные, так и качественные критерии. В результате для решения задачи следует осуществлять перевод качественных показателей в количественные, что также затрудняет поиск оптимального решения [7].

Таким образом, в общем случае процесс решения задачи многокритериальной оптимизации можно представить в виде блок-схемы, приведенной на рис. 1.

Применительно к распределительным сетям 6–35 кВ территориальных сетевых организаций (ТСО) многокритериальная задача выбора компен-



Рис. 1. Процесс решения задачи многокритериальной оптимизации  
Fig. 1. The process of solving the multicriterial optimization problem

сирующих устройств должна решаться как на этапе проектирования сетей, так и в ходе их эксплуатации. Поэтому оптимизация размещения компенсирующих устройств должна производиться для всех вариантов схем развития сети, и выбор наиболее экономичного варианта сети может быть сделан только с учетом компенсирующих устройств.

При этом следует учитывать, что поскольку режимы реактивных мощностей и напряжений связаны друг с другом, то выбор компенсирующих устройств и средств регулирования напряжения желательно производить совместно. Значительное влияние на них оказывают режимы работы уже имеющихся в узлах сети источников реактивной мощности и силовых трансформаторов. Таким образом, постановка задачи еще более усложняется, т.к. алгоритм решения должен обеспечивать оптимальные режимы работы существующих источников реактивной мощности и трансформаторов при установке дополнительных компенсирующих устройств.

Следовательно, при выборе компенсирующих устройств должны быть решены следующие задачи [8]:

- 1) определение оптимальной мощности компенсирующих устройств, отвечающей требованиям баланса реактивных мощностей в максимальном режиме электрической сети;
- 2) оптимизация их размещения в узлах нагрузки;
- 3) определение оптимальной очередности ввода компенсирующих устройств, т.к. схемы развития сети реализуются поэтапно.

Выбор компенсирующих устройств в распределительных сетях ТСО должен производиться на основании анализа наиболее характерных режимов работы существующих и вновь устанавливаемых устройств. В результате такого анализа должны быть выявлены необходимые диапазоны регулирования и определены соответствующие типы компенсирующих устройств. Что касается целесообразности установки дополнительных средств регулирования напряжения, то она должна определяться как исходя из нормативно допустимых отклонений напряжения по ГОСТ 32144-2013 [9], так и с учетом изменения экономических показателей работы электроприемников при возможных отклонениях напряжения.

Таким образом, при решении задачи оптимизации размещения компенсирующих устройств в распределительных сетях ТСО цели оптимизации можно разделить на две характерные группы [10]:

- 1) режимные, направленные на улучшение экономических показателей сети (снижение потерь электроэнергии, уменьшение капиталовложений в сетевые объекты и др.) и повышение технических показателей за счет изменения напряжений в узлах сети;
- 2) технологические, направленные на снижение технологических сложностей (концентрация

компенсирующих устройств в меньшем количестве узлов сети, повышение коэффициента использования компенсирующих устройств, упрощение систем управления мощностью компенсирующих устройств и др.).

Математически в общем виде задача оптимизации размещения компенсирующих устройств в распределительных сетях ТСО формулируется, исходя из условия минимизации целевой функции приведенных затрат:

$$Z = \sum_{i=1}^I 3_k^{\text{пост}}(Q_{ki}) + \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^I 3_k^{\text{пер}}(Q_{kin}) + \sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^J 3_k^{\text{пер}}(Q_{kjin}) + \sum_{n=1}^N 3_{\text{п}}(Q_{kjin}, Q_{kin}, k_{\text{тн}}) + \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M V(U_{mn}) \rightarrow \min \quad (1)$$

при условии соблюдения установившегося режима сети (системы нелинейных уравнений состояния сети):

$$W(\mathbf{P}, \mathbf{Q}, \mathbf{U}) = 0, \quad (2)$$

где  $\mathbf{P}$  – матрица-вектор активных мощностей;

$\mathbf{Q}$  – матрица-вектор реактивных мощностей;  $\mathbf{U}$  – матрица-вектор напряжений в узлах сети.

Первое слагаемое в формуле (1) связано с затратами на вновь устанавливаемые компенсирующие устройства, не зависящими от режима работы электрической сети и определяемыми мощностью компенсирующего устройства в каждом  $i$ -м узле из  $I$  узлов. Во втором слагаемом учтены затраты, связанные с эксплуатацией вновь устанавливаемых компенсирующих устройств мощностью  $Q_{kin}$  и зависящие от режима работы электрической сети. Общее число рассматриваемых характерных режимов сети при этом равно  $M$ . Третье слагаемое характеризует затраты, связанные с потерями мощности в существующих компенсирующих устройствах  $Q_{kjin}$  в каждом  $j$ -м узле из общего числа  $J$ . Затраты, связанные с потерями мощности и электроэнергии в распределительной сети ТСО учтены в четвертом слагаемом. Они зависят от выбранной мощности в данном режиме сети существующих  $Q_{kjin}$  и вновь устанавливаемых компенсирующих устройств  $Q_{kin}$ , а также коэффициентов трансформации трансформаторов  $k_{\text{тн}}$ . Пятое слагаемое учитывает ущерб, возникающий в распределительной сети ТСО из-за неоптимальных напряжений  $U_{mn}$  в каждом  $m$ -м узле из общего числа узлов  $M$ .

Из анализа формулы (1) следует, что решение задачи оптимизации размещения компенсирующих устройств в распределительных сетях ТСО, сформулированной в общем виде, представляет собой значительные трудности, т.к. взаимосвязь приведенных факторов достаточно сложна. Попытка их одновременного учета даже в простейшей сети ведет к неоправданному усложнению целевой

функции [11]. Поэтому естественными представляются подходы к ее решению, содержащие некоторые допущения. В частности, важное значение имеет «очерчивание областей доминирования отдельных факторов и обоснование возможности неучета других факторов» [12].

Исходя из этого, в формуле (1) третье слагаемое, характеризующее затраты, связанные с потерями мощности в существующих компенсирующих устройствах, можно не учитывать, ввиду низкой оснащенности распределительных сетей ТСО данными устройствами, а также вследствие того, что удельные потери активной мощности на генерацию реактивной в современных компенсирующих устройствах малы и не превышают 0,1–0,5 Вт/кВАр [13]. Для распределительных сетей ТСО можно также не учитывать ущерб, возникающий у потребителей из-за неоптимальных напряжений в узлах сети, т.к. данные сети, как правило, характеризуются небольшой протяженностью [14].

С учетом указанных допущений целевая функция примет вид:

$$Z = \sum_{i=1}^I 3_{\kappa}^{\text{пост}}(Q_{\kappa i}) + \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^I 3_{\kappa}^{\text{пер}}(Q_{\kappa in}) + \quad (3)$$

$$\sum_{n=1}^N 3_{\pi}(Q_{\kappa in}, Q_{\kappa in}, k_{\pi n}) = 3_{\kappa} + 3_{\pi} \rightarrow \min.$$

Решение задачи оптимизации размещения компенсирующих устройств в электрических сетях невозможно без ряда ограничений. Это вызвано относительной сложностью задачи и необходимостью учета большого числа влияющих факторов [15]. Поэтому при решении задачи оптимизации размещения компенсирующих устройств в распределительных сетях ТСО должны быть введены следующие ограничения:

- по загрузке и установленной мощности компенсирующих устройств

$$Q_{\kappa i} \min \leq Q_{\kappa in} \leq Q_{\kappa i} \max; \quad (4)$$

- по напряжениям в узлах сети

$$U_{mn} \min \leq U_{mn} \leq U_{mn} \max; \quad (5)$$

- по диапазонам регулирования коэффициентов трансформации силовых трансформаторов

$$k_{\pi n} \min \leq k_{\pi n} \leq k_{\pi n} \max; \quad (6)$$

- по допустимым токам в каждом  $k$ -м элементе сети из общего числа элементов  $K$  во всех рассматриваемых режимах

$$I_{\kappa n} \leq I_{\kappa} \text{ доп.} \quad (7)$$

В ходе оптимизации целевой функции должны быть получены:

- матрица мощностей устанавливаемых компенсирующих устройств, характеризующая их загрузку в характерных режимах работы электрической сети

$$Q_{\kappa} = \begin{bmatrix} Q_{\kappa 11} & Q_{\kappa 12} & \dots & Q_{\kappa 1N} \\ Q_{\kappa 21} & Q_{\kappa 22} & \dots & Q_{\kappa 2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Q_{\kappa I1} & Q_{\kappa I2} & \dots & Q_{\kappa IN} \end{bmatrix}; \quad (8)$$

- матрица, характеризующая очередность ввода дополнительных компенсирующих устройств

$$Q_{\kappa}^{\text{оч}} = \begin{bmatrix} Q_{\kappa 11} & Q_{\kappa 12} & \dots & Q_{\kappa 1D} \\ Q_{\kappa 21} & Q_{\kappa 22} & \dots & Q_{\kappa 2D} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Q_{\kappa D1} & Q_{\kappa D2} & \dots & Q_{\kappa DD} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

где  $D$  – число этапов ввода компенсирующих устройств;

- матрица коэффициентов трансформации трансформаторов в характерных режимах электрической сети

$$K = \begin{bmatrix} k_{\pi 11} & k_{\pi 12} & \dots & k_{\pi 1N} \\ k_{\pi 21} & k_{\pi 22} & \dots & k_{\pi 2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ k_{\pi T1} & k_{\pi T2} & \dots & k_{\pi TN} \end{bmatrix}; \quad (10)$$

- матрица напряжений в узлах сети в характерных режимах ее работы

$$U = \begin{bmatrix} U_{11} & U_{12} & \dots & U_{1N} \\ U_{21} & U_{22} & \dots & U_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ U_{M1} & U_{M2} & \dots & U_{MN} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

- матрица, элементы которой характеризуют экономический эффект от установки компенсирующих устройств в соответствующих узлах сети

$$\Theta = \begin{bmatrix} \Theta_{11} & \Theta_{12} & \dots & \Theta_{1N} \\ \Theta_{21} & \Theta_{22} & \dots & \Theta_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \Theta_{I1} & \Theta_{I2} & \dots & \Theta_{IN} \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Для реализации указанного подхода необходимо формализовать процесс решения задачи с использованием математических методов оптимизации. При этом данные методы должны удовлетворять требованиям точности, полноты и удобства реализации для того, чтобы получать опти-

мальные решения, в наибольшей степени соответствующие реальной задаче. В итоге полученное решение будет максимально эффективно характеризовать результаты процесса оптимизации размещения компенсирующих устройств в распределительных сетях ТСО.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лоскутов, А. Б. Многоцелевая оптимизация компенсации реактивной мощности в электрических сетях / А. Б. Лоскутов, О. И. Еремин // Промышленная энергетика, 2006. – № 6. – С. 39–41.
2. Готман, В. И. Задачи обследования системы компенсации реактивной мощности / В. И. Готман, Г. З. Маркман, П. Г. Маркман // Промышленная энергетика, 2006. – № 8. – С. 50–55.
3. Шклярский, Я. Э. Оптимизация компенсации реактивной мощности в сложных электрических сетях / Я. Э. Шклярский, И. Гонсалес палау // Записки Горного института, 2011. – Т. 194. – С. 349–352.
4. Вагин, Г. Я. К вопросу о выборе источников реактивной мощности на промышленных предприятиях / Г. Я. Вагин, А. А. Севостьянов, С. Н. Юртаев // Промышленная энергетика, 2012. – № 4. – С. 35–37.
5. Ефременко, В. М. Расчет оптимального размещения компенсирующих устройств методом множителей Лагранжа / В. М. Ефременко, Р. В. Беляевский // Вестн. Кузбасского гос. тех. унив., 2012. – № 6. – С. 138–141.
6. Shklyarskiy, A. Y. Influence of the energy characteristics on the electrical grid simulation / A. Y. Shklyarskiy, S. V. Solovov // Proceedings of 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS 2015, 2015. – P. 7414917.
7. Зак, Ю. А. Принятие многокритериальных решений / Ю. А. Зак. – М. : Экономика, 2011. – 236 с.
8. Поспелов, Г. Е. Компенсирующие и регулирующие устройства в электрических системах / Г. Е. Поспелов, Н. М. Сыч, В. Т. Федин. – Л. : Энергоатомиздат, 1983. – 112 с.
9. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения : введ. 01.07.2014.
10. Baran, B. Reactive Power Compensation using a Multi-objective Evolutionary Algorithm / B. Baran, J. Valls, R. Ramos, U. Fernandez. – IEEE Porto Power Tech Conference, 2001, Sept.
11. Delfanti, M. Optimal Capacitor Placement Using Deterministic and Genetic Algorithms / M. Delfanti, G. Granelli, P. Marannino, M. Montagna // IEEE Trans. Power Systems, vol. 15, 2000. – № 3, Aug.
12. Ковалев, И. Н. Выбор компенсирующих устройств при проектировании электрических сетей / И. Н. Ковалев. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 200 с.
13. Инструкция по организации в Министерстве энергетики Российской Федерации работы по расчету и обоснованию нормативов технологических потерь электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям : утв. Приказом М-ва энергетики Рос. Федерации № 326 от 30.12.2008.
14. Шклярский, Я. Э. Оценка вклада нагрузки и питающей сети в искажения напряжения / Я. Э. Шклярский, Ю. Е. Бунтеев // Естественные и технические науки, 2015. – № 3 (81). – С. 130–133.
15. Беляевский, Р. В. Технические ограничения в задачах оптимизации размещения компенсирующих устройств / Р. В. Беляевский // Актуальные вопросы современной техники и технологии: Сборник докладов VI-й Международной научной конференции (Липецк, 28 января 2012 г.). / Отв. ред. А.В. Горбенко. – Липецк : Издательский центр «Гравис», 2012. – С. 70–72.

## REFERENCES

1. Loskutov, A. B. Mnogotcelelevaya optimizatsiya kompensatsii reaktivnoy moshchnosti v elektricheskikh setyakh / A. B. Loskutov, O. I. Eremin // Promyshlennaya energetika, 2006. – № 6. – pp. 39–41.
2. Gotman, V. I. Zadachi obsledovaniua sistemy kompensatsii reaktivnoy moshch-nosti / V. I. Gotman, G. Z. Markman, P. G. Markman // Promyshlennaia energetika, 2006. – № 8. – pp. 50–55.
3. Shklyarskiy, Ya. E. Optimizatsiya kompensatsii reaktivnoy moshchnosti v slozhnykh elektricheskikh setyakh / Ya. E. Shklyarskiy, I. Gonsales palau // Zapiski Gornogo in-stituta, 2011. – №. 194. – pp. 349–352.
4. Vagin, G. Ya. K voprosu o vybore istochnikov reaktivnoy moshchnosti na pro-myshlennykh predpriatiyakh / G. Ya. Vagin, A. A. Sevostyanov, S. N. Iurtaev // Promysh-lennaya energetika, 2012. – № 4. – pp. 35–37.
5. Efremenko, V. M. Raschet optimalnogo razmeshcheniya kompensiruiushchikh ustroystv metodom mnozhiteley Lagranzha / V. M. Efremenko, R. V. Belyaevskiy // Bulletin of Kuzbass State Technical University, 2012. – № 6. – pp. 138–141.



6. Shklyarskiy, A. Y. Influence of the energy characteristics on the electrical grid simulation / A. Y. Shklyarskiy, S. V. Solovov // Proceedings of 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS 2015, 2015. – P. 7414917.
7. Zak, Yu. A. Prinyatie mnogokriterialnykh resheniy / Yu. A. Zak. – M. : Eko-nomika, 2011. – p. 236.
8. Pospelov, G. E. Kompensiruyushchie i reguliruyushchie ustroystva v elektriche-skikh sistemakh / G. E. Pospelov, N. M. Sych, V. T. Fedin. – L. : Energoatomizdat, 1983. – p.112.
9. GOST 32144-2013. Elektricheskaya energiya. Sovmestimost tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya : vved. 01.07.2014.
10. Baran, B. Reactive Power Compensation using a Multi-objective Evolutionary Algorithm / B. Baran, J. Val-lejos, R. Ramos, U. Fernandez. – IEEE Porto Power Tech Conference, 2001, Sept.
11. Delfanti, M. Optimal Capacitor Placement Using Deterministic and Genetic Algorithms / M. Delfanti, G. Granelli, P. Marannino, M. Montagna // IEEE Trans. Power Systems, vol. 15, 2000. – № 3, Aug.
12. Kovalev, I. N. Vybora kompensiruyushchikh ustroystv pri proektirovanii elektricheskikh setey / I. N. Kovalev. – M. : Energoatomizdat, 1990. – p. 200.
13. Instruktsiya po organizatsii v Ministerstve energetiki Rossiyskoy Federatsii raboty po raschetu i obosno-vaniyu normativov tekhnologicheskikh poter elektroenergii pri ee peredache po elektricheskim setyam : utv. Prikazom M-va energetiki Ros. Federatsii № 326 ot 30.12.2008.
14. Shklyarskiy, Ya. E. Ocenka vklada nagruzki i pitayushchey seti v iskazheniya napryazheniya / Ya. E. Shklyarskiy, Yu. E. Bunteev // Estestvennye i tekhnicheskie nauki, 2015. – № 3 (81). – pp. 130–133.
15. Belyaevskiy, R. V. Tekhnicheskie ogranicheniya v zadachakh optimizatsii razme-shcheniya kompensiruyushchikh ustroystv / R. V. Belyaevskiy // Aktualnye voprosy sovre-mennoy tekhniki i tekhnologii: VI International Scientific Conference (Lipetsk, January, 28, 2012). / Otv. red. A.V. Gorbenko. – Lipetsk : Izdatelskiy centr «Gravis», 2012. – pp. 70–72.

Поступило в редакцию 12.10.2017

Received 12.10.2017