

DOI: 10.26730/1999-4125-2017-5-145-149

УДК 621.316.016.25

**РАЗРАБОТКА МНОГОУРОВНЕВОЙ МОДЕЛИ ОПТИМИЗАЦИИ  
РАЗМЕЩЕНИЯ КОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ  
СЕТЯХ ТЕРРИТОРИАЛЬНЫХ СЕТЕВЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ**

**DEVELOPMENT OF A MULTILEVEL OPTIMIZATION MODEL  
FOR 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 Vesennyya, Kemerovo, 650000, Russian Federation

***Аннотация.** Вопросы энергосбережения и повышения энергоэффективности электросетевого комплекса являются на сегодняшний день одними из наиболее актуальных. Особое место в этом отношении занимают распределительные электрические сети территориальных сетевых организаций. Они характеризуются большой величиной передаваемой реактивной мощности, что вызывает в них существенные потери электроэнергии. Поэтому важную роль играет рациональная компенсация реактивной мощности в указанных сетях. Цель настоящей работы заключается в разработке многоуровневой модели оптимизации размещения компенсирующих устройств в распределительных сетях территориальных сетевых организаций, обеспечивающей повышение эффективности проведения мероприятий по компенсации реактивной мощности. Проведенные исследования основывались на общих положениях теории многоуровневых систем, методах системного анализа, методах планирования и принятия решений, методе неопределенных множителей Лагранжа. В результате исследований разработана многоуровневая модель оптимизации размещения компенсирующих устройств в распределительных сетях территориальных сетевых организаций; рассмотрены общие принципы описания деятельности основных уровней (уровня абстрагирования, уровня принятия решений и организационного уровня) и их внутренняя иерархия; установлено, что между элементами трех основных уровней существуют многочисленные продольные и поперечные связи по передаче информации.*

***Abstract.** Nowadays, the problems of power saving and improving the power efficiency of the electric grid complex are among the most urgent. In this respect, distribution grids of territorial network organizations occupy a special place. They are characterized by large transmitted reactive power. This causes significant power losses. Therefore, an important role is played by rational reactive power compensation in these networks. The purpose of this work is to develop a multilevel optimization model for placement of compensating devices in the distribution grids of territorial network organizations, which provides an increase in efficiency of measures of reactive power compensation. The conducted researches were based on general provisions of multilevel systems theory, methods of system analysis, methods of planning and decision-making, and method of uncertain Lagrange multipliers. As a result of the research, a multilevel optimization model for placement of compensating devices in the distribution grids of territorial network organizations was developed. General principles of the description of the activities of the main levels (level of abstraction, decision-making level and organizational level) and their internal hierarchy are considered. It is established that there are numerous longitudinal and transverse communications on transfer of information between the elements of the three main levels.*

***Ключевые слова:** распределительная электрическая сеть, территориальная сетевая организация, компенсация реактивной мощности, компенсирующее устройство, многоуровневая модель оптимизации, энергоэффективность.*

***Keywords:** distribution grid, territorial network organization, reactive power compensation, compensating device, multilevel optimization model, power efficiency.*

С точки зрения системного подхода, электросетевой комплекс является многоуровневой системой. При этом достаточно разнообразные по конфигурации и значительные по мощности отдельные подсистемы могут быть также отнесены к большому, хорошо структурированным системам, хотя и с неполно или не вполне достоверно заданной входной информацией. В связи с этим существует необходимость структурного описания задачи оптимизации размещения компенсирующих устройств в электрических сетях с различных по-

- замкнутые и разомкнутые распределительные сети 110–220 кВ;
- распределительные сети 6–35 кВ, в том числе распределительные сети ТСО;
- электрические сети напряжением до 1 кВ.

Функциональное описание задачи оптимизации размещения компенсирующих устройств необходимо для определения целей оптимизации и способов их достижения и заключается в построении математических моделей электрических сетей и происходящих в них процессах. При разработке

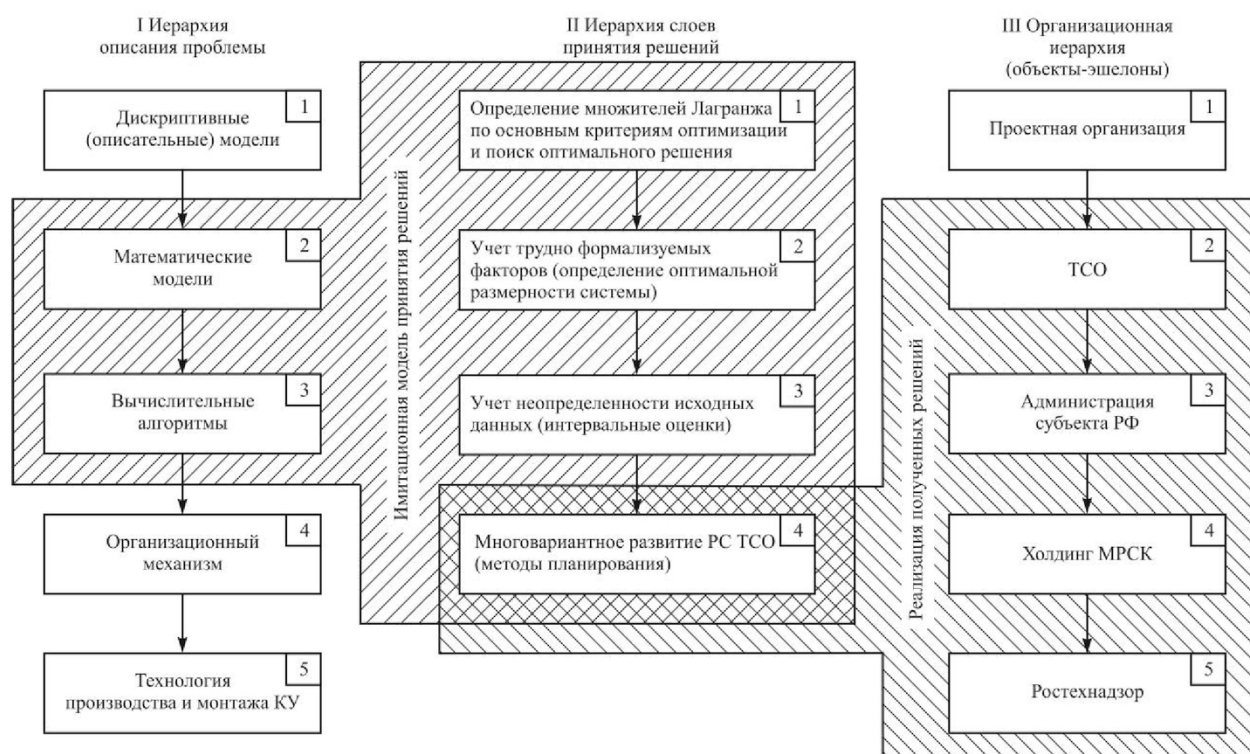


Рис. 1. Многоуровневая модель оптимизации размещения компенсирующих устройств в распределительных сетях территориальных сетевых организаций

Fig. 1. The multilevel model for optimization of compensator devices placement in electrical networks of territorial network organizations

зиций.

Анализ современного состояния задачи следует вести с позиции ее предварительного морфологического, функционального и информационного описания [13].

Под морфологическим описанием в данном случае понимаются принципиальные схемы электрических сетей, границы балансовой принадлежности и эксплуатационной ответственности отдельных подсистем и их технические особенности. С этой точки зрения, электросетевой комплекс можно разделить на следующие подсистемы:

- системообразующие магистральные сети 330–1150 кВ;

математической модели необходимо, чтобы ее точность соответствовала точности входной информации или степени ее неопределенности, т.е. выполнялся принцип «соответствия внешнего правдоподобия модели ее внутреннему правдоподобию» [13].

Информационное описание задачи дает представление об организации системы, включая получение исходных данных об электрической сети, оценку комплекса влияющих факторов, характеристику типовых режимов, а также выражает степень неопределенности данных о конкретной подсистеме.

Применение подобного подхода позволяет комплексно подходить к задаче оптимизации раз-

мещения компенсирующих устройств на разных ее уровнях, четко формулировать цели и критерии оптимизации, производить выбор и учет различных технических и экономических ограничений и получать решения, в наибольшей степени соответствующие реальным условиям.

Процесс оптимизации размещения компенсирующих устройств в электрических сетях можно охарактеризовать с позиции теории многоуровневых систем [14], представив его в виде совокупности иерархически организованных подсистем, различных по своему функциональному назначению. Многоуровневая модель оптимизации размещения компенсирующих устройств в распределительных сетях ТСО приведена на рис. 1.

При изучении многоуровневых систем важную роль играют следующие уровни описания их деятельности:

- уровень описания проблемы или абстрагирования;
- уровень принятия решений;
- организационный уровень [13].

Описание задачи оптимизации размещения компенсирующих устройств в распределительных сетях ТСО можно представить следующими пятью подуровнями:

- понятийным подуровнем, направленном на формирование дискриптивных (описательных) моделей, характеризующих структуру и свойства электрической сети, совокупность происходящих в ней физических процессов и условий ее работы;
- математическим подуровнем, включающем в себя формулировку задачи оптимизации и формирование математических моделей электрической сети;
- вычислительным подуровнем, на основе которого строятся вычислительные алгоритмы и создаются программные средства для расчета режимов и параметров сети;
- организационным подуровнем, характеризующим нормативно-правовую базу и механизмы взаимодействия различных структур по реализации полученных решений;
- технологическим подуровнем, учитывающим особенности производства компенсирующих устройств, их монтаж, эксплуатацию и т.д.

При этом выбор подуровней, т.е. тех моделей, с помощью которых описывается система, зависит от поставленных целей исследования. Так, в прикладных задачах наибольшее внимание уделяется математическому и вычислительному аспектам. Остальные уровни указываются для общей характеристики задачи оптимизации размещения компенсирующих устройств в распределительных сетях ТСО.

Следующий уровень описания данной задачи можно отнести к процессам принятия решений, что сильно осложняется существующими неопреде-

ленностями входной информации. К основным из них относятся:

- развитие и изменение конфигурации электрической сети;
- значения параметров сети (нагрузка, уровень напряжения, частота и др.);
- цели и критерии оптимизации размещения компенсирующих устройств;
- плохая формализуемость факторов организационного характера;
- трудность учета человеческого фактора на различных этапах процесса управления электрическими сетями.

Иерархический подход в этом случае заключается в некоторой совокупности подзадач, которые следует решать последовательно, поскольку решение каждой из них детерминирует какие-либо параметры в последующей задаче, делая ее более определенной. Данная иерархия носит название «иерархии слоев принятия решений», а система в целом – «многослойной системы принятия решений» [14]. Подобная многослойная система, построенная на основе метода неопределенных множителей Лагранжа [9], представлена на рис. 1 и включает в себя:

- определение множителей Лагранжа и поиск оптимального решения по мощности и местам установки компенсирующих устройств;
- учет трудно формализуемых факторов и определение оптимальной размерности системы путем введения различных ограничений (по установленной мощности компенсирующих устройств, по уровням напряжения в узлах сети и др.) [15];
- учет неопределенности исходных данных о параметрах и режимах сети с использованием интервальных оценок;
- оценка вариантов развития распределительной сети ТСО на кратко- и долгосрочную перспективу на основе методов планирования.

Понятие организационной иерархии предполагает, что:

- система включает в себя четко выделенные и взаимодействующие друг с другом подсистемы – организационные структуры различных форм собственности;
- каждая подсистема представляет собой объект, принимающий решение;
- подсистемы иерархически соподчинены, т.е. некоторые из них находятся под управлением других подсистем.

Уровень в такой системе называется «эшелоном», а сама система – «многослойной» [14]. В ряде случаев входящие в нее объекты, обладающие правом принятия решений, могут иметь конфликтные, т.е. противоречащие друг другу цели. Так, для рассмотренной в настоящей статье иерархии, включающей в себя проектную организацию по проектированию электрических сетей, ТСО,

подразделения в администрации субъекта РФ, предприятия холдинга МРСК, органы Ростехнадзора (рис. 1), принимающие решения по выбору и размещению компенсирующих устройств в электрических сетях и контролирующая эту деятельность, подобные противоречия могут иметь место, не являясь при этом решающими. Поэтому необходимо определить перед всеми входящими в систему объектами такие цели, достигая которые наиболее подходящим образом, они обеспечили бы нужное поведение системы в целом.

Следует отметить, что между элементами трех рассмотренных уровней существуют многочисленные поперечные связи по передаче информации. Например, имея исходные данные о распределительной сети ТСО на математическом и вычислительном подуровнях первого уровня, можно получить некоторое решение по размещению компенсирующих устройств в узлах сети. Если данное решение удовлетворяет поставленным целям, то оно может быть передано на уровень организационной иерархии для последующей реализации. Однако часто полученное решение является одним из множества, на основании которого можно только составить представление о размещении компенсирующих устройств в первом приближении, а, следовательно, необходим критерий, позволяющий отклонить заведомо неэффективные решения и

определяющий область решений, среди которых и следует искать оптимальное.

Таким образом, между уровнем описания проблемы и организационной иерархией в качестве промежуточного звена должен располагаться уровень принятия решений. Поэтому важное значение при решении задачи оптимизации размещения компенсирующих устройств в электрических сетях имеет формализация связей, как между параллельными уровнями, так и в пределах каждой отдельной иерархии, что может быть достигнуто путем применения различных математических методов.

Практическая реализация предложенной многоуровневой модели обеспечит повышение организационной и технической эффективности проведения мероприятий по компенсации реактивной мощности в распределительных сетях ТСО. Это будет выражаться в упрощении процедуры согласования условий подключения компенсирующих устройств в узлах сети и последующего выбора режимов генерации и потребления реактивной мощности, а также рациональном планировании схем развития сети. Кроме того, применение предложенной модели приведет к снижению потерь электроэнергии, нормализации режимов напряжений и реактивной мощности, и будет способствовать значительному повышению энергоэффективности распределительных сетей ТСО.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стратегия развития электросетевого комплекса Российской Федерации: утв. распоряжением Правительства Рос. Федерации № 511-р от 03.04.2013.
2. Воротницкий, В. Э. Коммерческие потери электроэнергии в электрических сетях. Структура и мероприятия по снижению / В. Э. Воротницкий, В. Н. Апрыткин // Новости электротехники. – 2002. – № 4(16). – С. 21–25.
3. Беляевский, Р. В. Исследование структуры технологических потерь электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям территориальных сетевых организаций / Р. В. Беляевский // Материалы докладов IX Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения» / Под общ. ред. ректора КГЭУ Э. Ю. Абдуллазянова. В 4 т.; Т. 1. – Казань : Казан. гос. энерг. ун-т, 2014. – С. 120–121.
4. Baran, B. Reactive Power Compensation using a Multi-objective Evolutionary Algorithm / B. Baran, J. Valjejos, R. Ramos, U. Fernandez. – IEEE Porto Power Tech Conference, 2001, Sept.
5. Principles for Efficient and Reliable Reactive Power Supply and Consumption: Staff Report of Federal Energy Regulatory Commission. – Washington, D. C., USA, 2005. – 177 p.
6. 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.
7. Лоскутов, А. Б. Многоцелевая оптимизация компенсации реактивной мощности в электрических сетях / А. Б. Лоскутов, О. И. Еремин // Промышленная энергетика, 2006. – № 6. – С. 39–41.
8. 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.
9. 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.
10. Поспелов, Г. Е. Компенсирующие и регулирующие устройства в электрических системах / Г. Е. Поспелов, Н. М. Сыч, В. Т. Федин. – Л. : Энергоатомиздат, 1983. – 112 с.



11. Вагин, Г. Я. Выбор типа компенсирующих устройств в сетях 6, 10 кВ / Г. Я. Вагин, С. Н. Юртаев // Будущее технической науки: тез. докл. VIII Междунар. молодеж. науч.-техн. конф. – Н. Новгород : НГТУ, 2009. – С. 101–102.
12. 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.
13. Ковалев, И. Н. Выбор компенсирующих устройств при проектировании электрических сетей / И. Н. Ковалев. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 200 с.
14. Месарович, М. Теория иерархических многоуровневых систем / М. Месарович, Д. Мако, И. Такаха. – М. : Мир, 1973. – 344 с.
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. Strategiya razvitiya elektrosetevogo kompleksa Rossiyskoy Federatsii: utv. rasporyazheniem Pravitelstva Ros. Federatsii № 511-r ot 03.04.2013.
2. Vorotneytckiy, V. E. Kommercheskie poteri elektroenergii v elektricheskikh setyakh. Struktura i meropriyatiya po snizheniyu / V. E. Vorotneytckiy, V. N. Apryatkin // Novosti elektrotehniki. – 2002. – № 4(16). – pp. 21–25.
3. Beliaevskiy, R. V. Issledovanie struktury tekhnologicheskikh poter elektro-energii pri ee peredache po elektricheskim setiam territorialnykh setevykh organizatsiy / R. V. Beliaevskiy // IX International Youth Scientific and Practical Conference «Tinchurinskie chteniia» / Pod red. rektora KSEU E. Yu. Abdullazyanova. T. 1. – Kazan : Kazan State Energy University, 2014. – pp. 120–121.
4. 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.
5. Principles for Efficient and Reliable Reactive Power Supply and Consumption: Staff Report of Federal Energy Regulatory Commission. – Washington, D. C., USA, 2005. – p.177.
6. 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.
7. Loskutov, A. B. Mnogotselevaya optimizatsiya kompensatsii reaktivnoy moshchnosti v elektricheskikh setyakh / A. B. Loskutov, O. I. Eremin // Promyshlennaya energetika, 2006. – № 6. – pp. 39–41.
8. Gotman, V. I. Zadachi obsledovaniya sistemy kompensatsii reaktivnoy moshchnosti / V. I. Gotman, G. Z. Markman, P. G. Markman // Promyshlennaya energetika, 2006. – № 8. – pp. 50–55.
9. Efremenko, V. M. Raschet optimalnogo razmeshcheniya kompensiruyushchikh ustroystv metodom mnozhitel'nykh Lagranzha / V. M. Efremenko, R. V. Belyaevskiy // Bulletin of Kuzbass State Technical University, 2012. – № 6. – pp. 138–141.
10. Pospelov, G. E. Kompensiruyushchie i reguliruyushchie ustroystva v elektricheskikh sistemakh / G. E. Pospelov, N. M. Sych, V. T. Fedin. – L. : Energoatomizdat, 1983. – p.112.
11. Vagin, G. Ya. Vybora tipa kompensiruyushchikh ustroystv v setyakh 6, 10 kV / G. Ya. Vagin, S. N. Iurtaev // Budushchee tekhnicheskoy nauki: VIII International Youth Scientific and Practical Conference – N. Novgorod : NSTU, 2009. – pp. 101–102.
12. Vagin, G. Ya. K voprosu o vybere istochnikov reaktivnoy moshchnosti na promyshlennyykh predpriyatiyakh / G. Ya. Vagin, A. A. Sevostyanov, S. N. Iurtaev // Promyshlennaya energetika, 2012. – № 4. – pp. 35–37.
13. Kovalev, I. N. Vybora kompensiruyushchikh ustroystv pri proektirovaniy elektricheskikh setey / I. N. Kovalev. – M. : Energoatomizdat, 1990. – p. 200.
14. Mesarovich, M. Teoriya ierarhicheskikh mnogourovnevnykh sistem / M. Mesarovich, D. Mako, I. Takahara. – M. : Mir, 1973. – p. 344.
15. Beliaevskiy, R. V. Tekhnicheskie ograniicheniya v zadachakh optimizatsii razmeshcheniya kompensiruyushchikh ustroystv / R. V. Beliaevskiy // Aktualnye voprosy sovremennoy tekhniki i tekhnologii: VI International Scientific Conference (Lipetsk, January, 28, 2012). / Otв. red. A.V. Gorbenko. – Lipetsk : Izdatelskiy centr «Gravis», 2012. – pp. 70–72.

Поступило в редакцию 12.10.2017

Received 12.10.2017