

О МЕТОДАХ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ И СЕТЕЙ

А.В. Варганова

*Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,
г. Магнитогорск, Россия*

Работа посвящена обзору методов оптимизации, применяемых для повышения эффективности режимов электроэнергетических систем и систем электроснабжения с собственными источниками электрической и тепловой энергии. Рассмотрены работы В.А. Веникова, В.С. Хачатряна, П.И. Бартоломея, Д.А. Арзамасцева, В.М. Горнштейна и др., посвященные расчету оптимальных режимов электроэнергетических систем. Приведены основные оптимизационные задачи, возникающие в условиях электроэнергетических систем, такие как определение оптимального распределения активных и реактивных мощностей между генераторами электростанций; оптимизация режимов систем по потерям активной мощности, напряжению, по реактивной мощности; определение оптимального состава рабочего оборудования. Рассмотрены способы решения поставленных задач с использованием существующих математических методов оптимизации, адаптированных к условиям объектов электроэнергетики. Дан вывод о том, что подходы к решению оптимизационных задач ориентированы на управление режимами электроэнергетических систем и сравнительно немного исследований проведено в условиях промышленных систем электроснабжения.

Ключевые слова: оптимизация, электроэнергетическая система, промышленная система электроснабжения, тепловая электростанция, энергетический котел, турбогенератор, эксплуатационный режим.

Введение

В настоящее время в Российской Федерации реализуется закон РФ № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» от 23.10.2009 г. и постановление Правительства РФ от 04.05.2012 г. № 442 «О функционировании розничных рынков электрической энергии, полном и (или) частичном ограничении режима потребления электрической энергии» (вместе с «Основными положениями функционирования розничных рынков электрической энергии», «Правилами полного и (или) частичного ограничения режима потребления электрической энергии»). В связи с этим по сравнению с 90-ми годами значительно изменились взаимоотношения между объектами энергетики, что привело к изменению структуры энергетического хозяйства крупных промышленных предприятий. Кроме того, увеличились цены на электроэнергию, покупаемую предприятиями у энергоснабжающих организаций. Таким образом, на крупных промышленных предприятиях наблюдается тенденция увеличения собственной генерирующей базы, что способствует появлению необходимости решения задач, связанных с оптимальным управлением режимами таких объектов.

Оптимизационные задачи в условиях электроэнергетических систем и сетей

Проблемы энергосбережения и энергоэффективности перед учеными и руководителями энер-

гоемких предприятий встали практически сразу после увеличения объемов потребляемой мощности и усложнения процесса производства, передачи, распределения и потребления энергоресурсов и электроэнергии.

В статьях [1] рассматриваются вопросы определения оптимальных режимов работы энергосистем с тепловыми электростанциями, критериями оптимальности являются минимальные затраты на энергоресурсы электростанций с учетом ограничения выбросов вредных веществ в атмосферу.

На решение оптимизационных задач тепловых электростанций влияет также фактор экологичности.

Начиная с середины девяностых годов в энергетике в связи с делением единой энергосистемы в отдельных ее частях возникает дефицит активной мощности, вследствие чего растет себестоимость электроэнергии и величина тарифов на нее. В это время на выбор способов управления системой электроснабжения в эксплуатационных режимах наибольшее влияние оказывают задачи обеспечения её наибольшей экономической эффективности при соблюдении требуемых условий связи с энергосистемой. Как правило, используется два способа управления – выбор рационального состава элементов и выбор параметров режима. При выборе рационального режима эти две задачи часто приходится решать совместно. Данным вопросам посвящены работы В.С. Хачатряна [2–4], С.К. Гурского [5], К.А. Смирнова [6], В.М. Летун [7], Н.И. Сербрунникова [8].

После принятия закона № 261-ФЗ от 23.10.2009 г. появляются работы, направленные на решение проблем энергоэффективности и энергосбережения в условиях оптовых рынков электроэнергии [7]. Также решаются вопросы о рациональной стратегии развития энергосистем. В [9] А.С. Бердиным приводится методика, позволяющая анализировать и определять стратегию развития систем электроснабжения, основанная на положениях теории нечетких множеств, учитывающая «...неопределенность части исходной информации». А.И. Федотовым [10] рассматриваются вопросы энергоэффективной работы химического предприятия путем оптимизации затрат на потребляемую из сети электроэнергию с учетом особенностей технологического процесса. В работе [11] приводится один из способов разработки оптимального электропотребления промышленного предприятия.

Таким образом, необходима постановка и решение основных оптимизационных задач при совместной эксплуатации энергосистем и систем электроснабжения. В работах В.А. Будзко [12], В.Н. Костина [13], В.А. Козлова [14], Е.В. Цветкова [15], В.А. Дале [16] сформулированы обобщенные задачи оптимального управления электроэнергетическими системами. В статье Е.А. Волковой [17] приводится математическое моделирование оптимальных режимов электростанций при перспективном проектировании электроэнергетических систем, включающее в себя подготовку исходной информации о системе, определение ее размеров, суммарной мощности и режимов работы оборудования.

Традиционными задачами оптимизации режимов электроэнергетических систем и систем электроснабжения промышленных объектов являются:

- выбор наилучших конфигураций электрических сетей;
- распределение нагрузок между источниками электроэнергии как действующих, так и проектируемых систем электроснабжения;
- рационализация использования энергетических ресурсов;
- определение оптимальной стратегии развития энергосистем – сооружение или реконструкция их в целом или их отдельных объектов, входящих в эти системы (выбор месторасположения, мощности и срока ввода в эксплуатацию новых электростанций, подстанций, ЛЭП);
- выбор оптимальных маршрутов осмотра энергетических объектов;
- выбор оптимального состава генерирующего оборудования;
- выбор наилучших маршрутов перевозки грузов, в том числе транспортировки топлива.

С целью определения экономически целесообразных конфигураций электрических систем и

сетей научными коллективами поднимались вопросы моделирования электроэнергетических систем, систем электроснабжения, электрических сетей с целью оптимизации их режимов. В данном направлении работали П.С. Абакшина [18], А.В. Бережной [19].

Определению оптимальной загрузки источников электрической и тепловой энергии посвящено множество работ. В статьях Л.С. Фошко [20], В.А. Стенникова [21], Н.М. Щапина [22], предлагается осуществлять оптимизацию нагрузок турбогенераторов и котлоагрегатов тепловых электростанций с целью повышения эффективности их работы.

Уже в середине прошлого столетия ученые, решая поставленную задачу, начали разрабатывать программное обеспечение, позволяющее оптимизировать работу энергетического оборудования электростанций.

В.К. Постников в статье [23] описывает положительный опыт внедрения программного продукта для ЭВМ СМ-4 и СМ-1800 на Ермаковской ГРЭС с целью оптимизации режимов работы исследуемого объекта. Р.З. Аминов [24] в своих работах описывает программный продукт, позволяющий определять нагрузку энергетического оборудования на теплоэлектроцентралях при учете неблочности их тепловых схем, использования в качестве топлива мазута, нефти, природного газа и технического состояния оборудования.

А.М. Заводовский [25] предлагает оптимальное распределение мощности между турбогенераторами и тепла между котлоагрегатами тепловых электростанций, учитывающее эксплуатационное состояние оборудования.

Одним из основных способов повышения энергоэффективности электроэнергетических систем и систем электроснабжения промышленных предприятий является рациональное использование энергетических ресурсов. Р.З. Аминов в своей работе [24] предлагает осуществлять экономию топлива за счет внутростанционного оптимального распределения нагрузок ТЭЦ.

Вопросами оптимальной стратегии развития электрических сетей энергосистем уделено особое внимание в работе [26] Д.А. Арзамасцева, А.В. Липеса и А.Л. Мызина. Ими ставятся основные задачи оптимального развития энергосистем, приводятся «...методы прогнозирования нагрузок и электропотребления в электроэнергетических системах» и подробно описаны основные методы оптимизации, необходимые для решения поставленных задач.

Определение оптимального состава генерирующего оборудования является одной из важнейших задач оптимизации в области электроэнергетики. В работах В.Д. Урина [27] представлен один из способов определения оптимального состава генерирующего оборудования на основании

отыскания загрузок источников электроэнергии при известных расходных характеристиках и диапазонов мощностей генераторов по критерию минимума расхода тепла. Т.Ш. Гайбов [28] предлагает определять экономически целесообразный состав работающего генераторного оборудования по критерию минимума издержек в энергосистеме.

Особое внимание необходимо уделить работам В.А. Веникова и В.М. Горнштейна, намного опередившим свое время. Одним из основных вопросов, рассмотренных в работах В.М. Горнштейна [29], является определение оптимального состава рабочего оборудования энергосистем. В.А. Веников в своих учебниках и научных работах [30–31] рассматривает задачи оптимального распределения активных мощностей между генераторами электростанций, электрической нагрузки в энергосистеме, реактивных нагрузок. В.И. Идельчик в [32] ставит основные задачи оптимизации и приводит методы комплексной оптимизации режимов электроэнергетических систем.

Таким образом, рассмотренные выше оптимизационные задачи предполагают необходимость использования методов оптимизации электроэнергетических систем и систем электроснабжения, применимых для их решения [33–35].

Применение методов оптимизации

Основной оптимизационной задачей электроэнергетических систем, как отмечалось ранее, является определение экономически выгодного распределения активных мощностей между генераторами. С.К. Гурский для определения оптимальных загрузок электростанций предложил использование адаптивного алгоритма «...решения задачи определения удельных приростов потерь активной мощности в сети» [5], так как данный подход позволяет задавать исходную информацию в виде данных о нагрузках узловых подстанций и электростанций за определенный промежуток времени. С целью краткосрочной оптимизации работы агрегатов электростанций автор предлагает использовать метод гарантированного относительного уровня, основанный на методе динамического программирования, учитывающий ограничения по минимуму расхода в целом по энергосистеме, так и для отдельных электростанций. В работе [36] дано описание программного комплекса, позволяющего осуществлять оптимальное распределение тепловой и электрической энергии между двумя турбогенераторами, однако комплекс не учитывает режим работы электрической сети.

А.М. Заводовским рассмотрено определение оптимального распределения загрузок турбогенераторов с учетом теплофикационного отбора методом последовательных приближений, учитывая максимальные мощности, величины регулируемых отборов, диапазон изменения расхода острого пара, расход на собственные нужды и т. д. [25].

В.С. Хачатрян в работах [2–4] решает задачу оптимального распределения нагрузки между электростанциями энергосистем методом скользящего допуска, предполагающего разбивку системы на подсистемы, путем минимизации расхода топлива в системе. Данный метод в отличие от метода Лагранжа позволяет задавать нелинейную целевую функцию, ограничения в виде равенств и неравенств. Кроме того, автором [4] разработан алгоритм оптимизации развития больших электроэнергетических систем, комплексно учитывающий работу тепловых, конденсационных, атомных электростанций и воздушных линий электропередачи, основанный на методе декомпозиции. Критерием оптимальности приняты суммарные приведенные затраты на строительство энергосистемы, а в качестве минимизируемой линейной функции – капитальные вложения на строительство всех вышеперечисленных объектов, эксплуатационные издержки приняты в качестве постоянной части. Результатами оптимизационных расчетов являются: типы и мощности вводимых в рассматриваемый промежуток времени электростанций и потоки мощности в линиях электропередачи.

В статье [18] с использованием программных комплексов «ПРЭС» и «ПРЭС-СУТКИ» позволяющих планировать долгосрочные и краткосрочные режимы электроэнергетических систем, разработана оптимизационная модель установившихся режимов по активной мощности, основанная на сочетании методов линейного программирования и метода разложения по ресурсам.

С целью решения оптимизационных задач в электроэнергетических системах используют методы нелинейного программирования. О.Т. Гераскиным в работах [37, 38] используется симплексный метод. Учет кривизны поверхности заданной целевой функции согласно [39] может быть осуществлен методом Ньютона второго порядка, учитывая ограничения методом проекции вектора поиска.

В работах В.А. Игуменцева [40] и А.В. Малафеева [41] для оптимизации режима работы промышленной системы электроснабжения использован метод динамического программирования, позволяющий определять загрузку генераторов собственных источников электрической энергии по критерию минимума затрат на свежий пар.

В.А. Стенниковым в [21] с помощью метода Лагранжа осуществляется рациональное распределение тепловой энергии между ее источниками по критерию минимума затрат на суммарную загрузку с учетом и без ограничений на тепловую мощность. Предложенная методика позволяет определять последовательность выхода источников на максимальную загрузку.

Б.И. Гольденблат в своей работе [42] ставит основные задачи оптимизации режимов систем электроснабжения и выбор соответствующих им методов. В электроэнергетических системах и сис-

темах электроснабжения важной задачей является оптимизация их режимов по реактивной мощности и напряжению. А.А. Герасименко в работе [43] предлагает оптимизацию режимов электрических систем по реактивной мощности (по критерию минимума потерь в сети) осуществлять методом приведенного градиента, позволяющего определить за один расчетный шаг по величинам средних значений нагрузок экономически целесообразные искомые.

В работах Д.А. Арзамасцева [44, 45] приведен алгоритм определения оптимального распределения реактивной мощности в условиях промышленных систем электроснабжения на основе метода последовательного эквивалентирования и метода неопределенных множителей Лагранжа при условии сохранения баланса мощностей в узле и допустимого уровня напряжения. В качестве целевой функции приняты суммарные затраты на производство и распределение реактивной мощности, приведенные к потерям активной мощности. Позже В.А. Игуменцев в [46] предложил динамическую модель оптимизации реактивной мощности в узлах с резкопеременным характером нагрузки по критерию минимума потерь в электрической сети, учитывающую ограничения по допустимым параметрам систем возбуждения и углам качания роторов синхронных машин и колебаниям напряжения в промышленной системе электроснабжения. В качестве метода оптимизации используется сочетание методов последовательных интервалов и последовательного эквивалентирования.

В работе [47] приведена методика нахождения оптимальной компенсации реактивной мощности в узлах нагрузок энергосистемы по критерию минимума суммарных затрат на приобретение и обслуживание компенсирующих устройств, учитывающая потери активной мощности, реализованная в программных пакетах Б-2/70, Б-2/72, Б-2/75, СД0-4.

А.И. Афанасьев [48] привел методику оптимизации мгновенных режимов разомкнутых электрических сетей по напряжению, коэффициенту трансформации и реактивной мощности по критерию минимума потерь мощности, основанную на методе приведенного градиента с учетом штрафных функций, в качестве штрафного критерия вводится нарушение ограничений по напряжению. На базе разработанной методики получена методика расчета сезонных режимов, критерием которой является минимум затрат на потери и ущерб от нарушения качества электроэнергии (по отклонению напряжения).

Ю.Б. Гуком [49] и позже В.А. Вениковым [30] сформулированы основные положения оптимального планирования электроэнергетических систем методом многоцелевой оптимизации, представляющим собой сочетание методов экспертных оценок и факторного анализа. Использование такого подхода позволяет осуществлять комплекс-

ную оценку оптимальных режимов работы электроэнергетических систем.

С целью оптимального планирования развития электрической сети рассматривается задача выбора рационального уровня напряжения и сечения проводов по критерию минимума приведенных затрат на потери мощности и напряжения в линиях электропередачи разных иерархических уровней методом экономических зон [50].

С.А. Решетовым в [51] предложен подход к оптимальному проектированию электрических сетей, исходя из условий минимума потерь напряжения в них, что, в свою очередь, ставит задачу нахождения оптимальных сечений проводов линий электропередачи методом неопределенных множителей Лагранжа с учетом потерь допустимых потерь напряжения в электрических сетях.

В работе Е.В. Цветкова [52] рассматривается методика определения оптимальных режимов электроэнергетических систем по активной мощности с учетом сетевого фактора методом Лагранжа с учетом балансовой мощности. В.З. Манусовым для оптимизации электроэнергетических систем по активной мощности рассмотрено применение генетического алгоритма [53].

А.П. Чмутов [54] рассматривает вопросы оптимизации режима городских и сельских сетей по напряжению на основе методов теории линейных неравенств.

Т.Б. Лещинской в [55] приведен алгоритм многокритериальной задачи оптимизации городских систем электроснабжения с учетом неопределенности исходной информации. В качестве основных критериев приняты минимум суммарных капитальных вложений в элементы сети, потерь напряжения электроэнергии и минимум суммарной длины линий 10 (20) кВ на основе критерия Байеса.

Кроме вышеперечисленных методов широкое распространение получили методы сепарабельного и аппроксимирующего программирования; они аппроксимируют целевую функцию с помощью отрезков кривых и тем самым приводят решение оптимизационной задачи к методам линейного программирования [56].

С целью оптимизации состава работающего оборудования электростанций Т.Ш. Гайбовым [28] предлагается использовать метод ветвей и границ, критерием оптимальности является минимум суммарных издержек по энергосистеме за рассматриваемый промежуток времени.

Кроме вышеперечисленных оптимизационных задач с целью анализа, планирования и управления режимами электроэнергетических систем в работе Б.И. Аюева [57] приводятся оптимизационные модели предельных режимов для заданных направлений утяжеления с помощью метода Лагранжа.

В результате анализа печатных работ, посвященных методам оптимизации режимов электроэнергетических систем и систем электроснабже-

ния, например [12, 16, 58], можно сделать вывод, что изначально для определения наиболее выгодного режима работы электроэнергетических систем и сетей применялся метод Лагранжа с целью поиска экстремума заданной целевой функции. С развитием цифровой техники для решения задач оптимизации нашли применение методы нелинейного программирования. Кроме того, можно отметить, что существующие методы оптимизации систем электроснабжения в основном позволяют осуществлять оптимизацию режимов по реактивным и активным мощностям, по напряжению, коэффициентам трансформации или по нагрузкам генераторов и котлоагрегатов.

Заключение

Анализ существующих методов оптимизации в области электроэнергетики показал, что для решения задач оптимального управления электроэнергетическими системами существует большое число подходов, достаточно проработанных и внедренных в условия действующих объектов.

Однако решение оптимизационных задач, позволяющих повысить эффективность работы и управления промышленных систем электроснабжения, в литературе встречается сравнительно редко. Актуальность данных исследований обусловлена повышением стоимости на покупную электроэнергию и энергоресурсы для удаленных от энергосистемы промышленных энергоузлов с собственными электростанциями.

Литература

1. Голованов, А.П. Об оптимизации режимов работы энергосистемы / А.П. Голованов // *Электричество*. – 1992. – № 12. – С. 10–14.
2. Хачатрян, В.С. К теории оптимизации режимов больших электроэнергетических систем / В.С. Хачатрян, М.А. Балабекян // *Электричество*. – 1980. – № 10. – С. 55–57.
3. Хачатрян, В.С. Оптимизация режима большой электроэнергетической системы методом декомпозиции по активным мощностям электрических станций / В.С. Хачатрян, М.А. Мнацаканян, К.В. Хачатрян, С.Э. Григорян // *Электричество*. – 2008. – № 2. – С. 10–22.
4. Хачатрян, В.С. Оптимизация структуры объединенной электроэнергетической системы с применением метода декомпозиции / В.С. Хачатрян, А.В. Темурджян // *Электричество*. – 1983. – № 8. – С. 8–13.
5. Гурский, С.К. Распределение активной мощности методом гарантированного относительно уровня / С.К. Гурский, С.В. Домников // *Электричество*. – 1982. – № 9. – С. 10–16.
6. Смирнов, К.А. Оптимизация режимов энергосистемы с учетом ограничений по напряжениям / К.А. Смирнов // *Электричество*. – 1997. – № 6. – С. 8–12.
7. Летун, В.М. Оптимальное управление режимом работы электростанций в условиях оптового рынка / В.М. Летун, И.С. Глуз // *Электрические станции*. – 2003. – № 3. – С. 8–12.
8. Серебряников, Н.И. Совершенствование системы материального стимулирования за оптимизацию режима работы энергообъединений и ТЭС / Н.И. Серебряников, С.Е. Шицман // *Электрические станции*. – 1993. – № 5. – С. 5–9.
9. Бердин, А.С. Оптимизация системы электроснабжения в условиях неопределенности / А.С. Бердин, С.Е. Кокин, Л.А. Семенова // *Промышленная энергетика*. – 2010. – № 4. – С. 29–35.
10. Федотов, А.И. Оптимизация затрат на электроэнергию для производств с продолжительным режимом работы / А.И. Федотов, Г.В. Ваганов // *Промышленная энергетика*. – 2010. – № 10. – С. 2–6.
11. Safonov, G.P. The Optimization of the Production Process for Electrical Insulation Systems / G.P. Safonov, A.M. Sorokin, A.V. Buldakov, P.V. Vorob'ev // *Russian Electrical Engineering*. – 2007. – № 3. – P. 167–169. DOI: 10.3103/S1068371207030145
12. Будзко, И.А. Особенности оптимизационных задач энергетики и методов их решения / И.А. Будзко, Н.А. Васхнил, М.С. Левин // *Электричество*. – 1981. – № 3. – С. 1–6.
13. Костин, В.Н. Оптимизационные задачи электроэнергетики: учеб. пособие / В.Н. Костин. – СПб.: СЗТУ, 2003. – 120 с.
14. Козлов, В.А. К вопросу об оптимизации систем электроснабжения / В.А. Козлов // *Промышленная энергетика*. – 1992. – № 2. – С. 2–3.
15. Цветков, Е.В. Задачи оптимизации режимов в системе экономического управления электроэнергетикой / Е.В. Цветков // *Электрические станции*. – 1988. – № 2. – С. 37–38.
16. Дале, В.А. Математические модели оптимизации развития сетей электроэнергетических систем / В.А. Дале, З.П. Кришан, О.Г. Паэгле // *Электричество*. – 1987. – № 9. – С. 1–6.
17. Волкова, Е.А. Математическая модель оптимизации суточных режимов электростанций при проектировании электроэнергетических систем / Е.А. Волкова, А.Н. Зейлигер, Э.М. Каплинский, А.И. Лазебник, Л.Д. Хабачев // *Электричество*. – 1975. – № 1. – С. 18–22.
18. Абакишин, П.С. Модель оптимизации долгосрочных энергетических режимов ЕЭС России по активной мощности / П.С. Абакишин // *Электрические станции*. – 2004. – № 3. – С. 58–62.
19. Бережной, А.В. Об аналитическом определении характеристик математической модели оптимизации электрической сети / А.В. Бережной, А.Ф. Роценя // *Электричество*. – 1972. – № 7. – С. 75–77.
20. Фошко, Л.С. Оптимальное распределение нагрузок между турбогенераторами тепловых электростанций с помощью ЭВМ / Л.С. Фошко,

Л.Б. Зусманович, С.Л. Флос, В.А. Пальчик, Б.И. Ко-
невский // *Электрические станции*. – 1977. – № 1. –
С. 58–60.

21. Стенников, В.А. Оптимизация совмест-
ной работы источников тепловой энергии /
В.А. Стенников, О.В. Хамисов, Н.В. Стенников //
Электрические станции. – 2011. – № 3. – С. 27–33.

22. Щапин, Н.М. Оптимизация распределения
паровых нагрузок между котельной завода и ТЭЦ
энергосистемы / Н.М. Щапин, В.П. Юстус // *Про-
мышленная теплоэнергетика*. – 1977. – № 54. –
С. 43–44.

23. Постников, В.К. Оптимизация режимов
конденсационной ТЭС с помощью ЭВМ типов
СМ-4 и СМ-1800 / В.К. Постников // *Энергетик*. –
1988. – № 9. – С. 16–17.

24. Аминов, Р.З. Оперативное распределение
нагрузок между котлоагрегатами ТЭЦ с учетом
их эксплуатационного состояния / Р.З. Аминов,
М.С. Доронин, В.И. Лубков, Р.М. Голина // *Элек-
трические станции*. – 1982. – № 9. – С. 34–35.

25. Заводовский, А.М. Метод оптимального
распределения нагрузок между теплофикацион-
ными турбогенераторами / А.М. Заводовский //
Электрические станции. – 1986. – № 1. – С. 71–73.

26. Арзамасцев, Д.А. Модели оптимизации
развития энергосистем: учебник для вузов /
Д.А. Арзамасцев, А.В. Липес, А.Л. Мызин. – М.:
Высшая школа, 1987. – 272 с.

27. Урин, В.Д. Оптимизация состава вклю-
ченного оборудования энергосистемы / В.Д. Урин //
Электричество. – 1980. – № 9. – С. 56–57.

28. Гайибов, Т.Ш. Оптимизация состава ра-
ботающих агрегатов электростанций кусочно-
линейной аппроксимацией нелинейных зависимо-
стей / Т.Ш. Гайибов // *Электрические станции*. –
2009. – № 5. – С. 32–37.

29. Горништейн, В.М. Методы оптимизации
режимов энергосистем / В.М. Горништейн, Б.П. Ми-
рошниченко, А.В. Пономарев и др.; под ред.
В.М. Горништейна. – М.: Энергия, 1981. – 336 с.

30. Веников, В.А. О методах решения многокритер-
иальных оптимизационных задач электроэнерге-
тики с неопределенными величинами / В.А. Веников,
И.А. Будзко, М.С. Левин, Е.Л. Блохина, В.А. Петров //
Электричество. – 1987. – № 2. – С. 1–7.

31. Веников, В.А. Оптимизация режимов
электростанций и энергосистем: учебник для ву-
зов / В.А. Веников, В.Г. Журавлев, Т.А. Филиппова. –
2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат,
1990. – 352 с.

32. Идельчик, В.И. Расчеты и оптимизация ре-
жимов электрических сетей и систем / В.И. Идель-
чик. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 288 с.

33. Belyaev, N.A. *Methods for Optimization of
Power-System Operation Modes* / N.A. Belyaev,
N.V. Korovkin, O.V. Frolov, V.S. Chudnyi // *Russian
Electrical Engineering*. – 2013. – № 2. – P. 74–80.

34. Frangopoulos, C. A. *A Brief review of Me-*

*thods for the Design and Synthesis Optimization of
Energy Systems* / C. A. Frangopoulos, M. R. von
Spakovsky, E. Sciubba // *Applied Thermodynamics*. –
2002. – №4. – P. 151–160.

35. Hilber, P. *Maintenance optimization for pow-
er distribution systems* / P. Hilber. – Sweden: Royal
Institute of Technology Stockholm, 2008. – P. 125.

36. Флос, С.Л. Оптимальное распределение
нагрузок между турбогенераторами ТЭЦ с ис-
пользованием ЭВМ / С.Л. Флос, В.К. Жалялетди-
нова, Н.И. Галкин, В.И. Дорохина, Л.В. Наполь-
ских, А.И. Дорошенко // *Электрические станции*. –
1987. – № 6. – С. 10–13.

37. Гераскин, О.Т. Оптимизация режимов
электроэнергетических систем методом плани-
рования эксперимента / О.Т. Гераскин // *Изв. ву-
зов. Энергетика*. – 1977. – № 8. – С. 10–14.

38. Гераскин, О.Т. Оптимизация режимов
электроэнергетических систем обобщенным сим-
плексным методом нелинейного программирова-
ния / О.Т. Гераскин // *Изв. вузов. Энергетика*. –
1978. – № 9. – С. 9–13.

39. Гераскин, О.Т. Оптимизация режимов
электроэнергетических систем модифицирован-
ным методом Ньютона с аппроксимацией матри-
цы Гессе / О.Т. Гераскин // *Изв. вузов. Энергетика*. –
1979. – № 1. – С. 14–19.

40. Игуменцев, В.А. Оптимизация эксплуата-
ционных режимов систем электроснабжения
промышленных предприятий с собственными
электростанциями / В.А. Игуменцев, А.В. Мала-
феев. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос.
техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2011. – 126 с.

41. Малафеев, А.В. Оптимизация режима вы-
работки электроэнергии тепловыми электро-
станциями промышленных предприятий / А.В. Ма-
лафеев // *Энергосбережение, теплоэнергетика: сб.
науч. тр.* – 2003. – С. 30–41.

42. Гольденблат, Б.И. Применение матема-
тического оптимального программирования для
задач электроснабжения промышленных предприя-
тий / Б.И. Гольденблат // *Электричество*. – 1971. –
№ 2. – С. 21–24.

43. Герасименко, А.А. Оптимизация режимов
электрических систем на основе метода приве-
денного градиента / А.А. Герасименко, А.В. Липес //
Электричество. – 1989. – № 9. – С. 1–7.

44. Арзамасцев, Д.А. АСУ и оптимизация ре-
жимов энергосистем / Д.А. Арзамасцев, П.И. Бар-
толомей, А.М. Холян. – М.: Высшая школа, 1983. –
208 с.

45. Арзамасцев, Д.А. Расчет оптимального
распределения реактивной мощности методом
последовательного эквивалентирования / Д.А. Ар-
замасцев, В.А. Игуменцев // *Электричество*. –
1976. – № 1. – С. 70–72.

46. Игуменцев, В.А. Метод оптимального
управления реактивной мощностью в системах
электроснабжения / В.А. Игуменцев, И.А. Сала-

матов, Ю.П. Коваленко // *Электричество*. – 1987. – №1. – С. 16–21.

47. Ариас-Альварес, Х. Оптимизация режимов энергосистемы по реактивной мощности / Х. Ариас-Альварес, В.П. Дирипаскин, Э.И. Мерпорт // *Электрические станции*. – 1977. – № 6. – С. 41–43.

48. Афанасьев, А.И. Оптимизация эксплуатационных режимов разомкнутых распределительных электрических сетей по напряжению и реактивной мощности / А.И. Афанасьев, В.И. Идельчик, В.Н. Ковалевич, Ю.Г. Кононов // *Электричество*. – 1995. – № 3. – С. 19–22.

49. Гук, Ю.Б. Многоцелевая оптимизация структуры электроэнергетических систем при планировании их развития / Ю.Б. Гук, В.Р. Окорочков, А.А. Папин, С.В. Усов, Д.С. Щавелев // *Электрические станции*. – 1973. – № 3. – С. 9–13.

50. Шнелль, Р.В. Оптимизация основных параметров электропередачи / Р.В. Шнелль, В.В. Картавцев // *Электричество*. – 1982. – № 4. – С. 22–25.

51. Решетов, С.А. Оптимизация электрических сетей при заданной потере напряжения / С.А. Решетов // *Электричество*. – 1982. – № 6. – С. 17–21.

52. Цветков, Е.В. Расчет оптимальных режимов энергосистем при учете потерь в сетях / Е.В. Цветков // *Электричество*. – 1984. – № 8. – С. 1–7.

53. Манусов, В.З. Эволюционный алгоритм оптимизации режимов электроэнергетических систем по активной мощности / В.З. Манусов, Д.А. Павлюченко // *Электричество*. – 2004. – № 3. – С. 2–8.

54. Чмутов, А.П. Оптимизация режима напряжения в электрических распределительных сетях с использованием методов теории линейных неравенств / А.П. Чмутов // *Электрические станции*. – 1991. – № 3. – С. 62–66.

55. Лецинская, Т.Б. Применение методов многокритериального выбора при оптимизации систем электроснабжения сельских районов / Т.Б. Лецинская // *Электричество*. – 2003. – № 1. – С. 14–22.

56. Бартоломей, П.И. Оптимизация режимов энергосистем методами аппроксимирующего и сепарабельного программирования / П.И. Бартоломей, Н.И. Грудинин // *Изв. Ак. наук. Энергетика*. – 1993. – №1. – С. 72–77.

57. Аюев, Б.И. Оптимизационные модели ближайших предельных режимов электрических систем / Б.И. Аюев, В.В. Давыдов, П.М. Ерохин // *Электричество*. – 2011. – № 3. – С. 2–9.

58. Королев, М.Л. Оптимизация режимов электроэнергетических систем на основе моделирования / М.Л. Королев, В.А. Макеечев, О.А. Суханов, Ю.В. Шаров // *Электричество*. – 2006. – № 3. – С. 2–16.

Варганова Александра Владимировна, канд. техн. наук, старший преподаватель, кафедра «Электроснабжение промышленных предприятий», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; aleksandra-khlamova@yandex.ru.

Поступила в редакцию 17 июля 2017 г.

DOI: 10.14529/power170309

ABOUT OPTIMIZATION METHODS OF POWER SUPPLY SYSTEM AND NETWORK MODES

A.V. Varganova, aleksandra-khlamova@yandex.ru

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation

This article is about optimization methods used to improve the effectiveness of power system and industrial power supply system modes with own power stations. The scientific articles of Venikov V.A., Hachatrjan V.S., Bartolomej P.I., Arzamascev D.A., Gornshtejn V.M., etc. are under consideration. The paper studies the optimization matters in terms of power systems, such as optimal active and reactive power distribution between the generators of power stations, optimal condition calculation of power and voltage losses, finding optimal power system equipment configuration. The ways of solution of the set tasks are introduced using mathematical methods adapted to the electric power systems conditions. It is concluded that the approaches to the optimization problems solution are aimed at the control of combined heat and power plants, and very few research under the conditions of industrial power systems have been conducted so far.

Keywords: optimization, industrial power system, combined heat and power plant, power-plant boiler, turbogenerator, parameter table, dynamic programming method.

References

1. Golovanov A.P. [On Power-Transmission System Modes Optimization]. *Electrical Technology Russia*, 1992, no. 12, pp. 10–14. (in Russ.)
2. Hachatrjan V.S., Balabekjan M.A. [To Theory of Optimization of Large Power-Transmission System Modes]. *Electrical Technology Russia*, 1980, no. 10, pp. 55–57. (in Russ.)
3. Hachatrjan V.S., Mnacakanjan M.A., Hachatrjan K.V., Grigorjan S.Je. [Optimizing Operating Modes of Large Electric Power System in Terms of Active Powers at Power Station Nodes]. *Electrical Technology Russia*, 2008, no. 2, pp. 10–22. (in Russ.)
4. Hachatrjan V.S., Temurdzhjan A.V. [Optimization of United Electric Power System Structure Using Decomposition Method]. *Electrical Technology Russia*, 1983, no. 8, pp. 8–13. (in Russ.)
5. Gurskij S.K., Domnikov S.V. [Active Power Distribution Using Guaranty Comparable Level Method]. *Electrical Technology Russia*, 1982, no. 9, pp. 10–16. (in Russ.)
6. Smirnov K.A. [Power System Modes Optimization Taking Into Account Electric Potential Limit]. *Electrical Technology Russia*, 1997, no. 6, pp. 8–12. (in Russ.)
7. Letun V.M., Gluz I.S. [Optimal Control of Power Station Modes under Wholesale Electricity Market]. *Power Technology and Engineering*, 2003, no. 3, pp. 8–12. (in Russ.)
8. Serebrjanikov N.I., Shicman S.E. [System of Material Encouragement Rationalization for Interconnection and Thermal Power Station Mode Optimization]. *Power Technology and Engineering*, 1993, no. 5, pp. 5–9. (in Russ.)
9. Berdin A.S., Kokin S.E., Semenova L.A. [Power System Optimization Under Uncertainty]. *Industrial Power Engineering*, 2010, no. 4, pp. 29–35. (in Russ.)
10. Fedotov A.I., Vagapov G.V. [Electric Power Cost Optimization With a View to Production with Continuous Running Duty]. *Industrial Power Engineering*, 2010, no. 10, pp. 2–6. (in Russ.)
11. Safonov G.P., Safonov G.P., Sorokin A.M., Buldakov A.V., Vorob'ev P.V. Optimization of Production Process for Electrical Insulation Systems. *Russian Electrical Engineering*, 2007, no. 3, pp. 167–169. DOI: 10.3103/S1068371207030145
12. Budzko I.A., Vashnil N.A., Levin M.S. [Special Aspects of Energetics Optimization Problems and Ways of Their Solution]. *Electrical Technology Russia*, 1981, no. 3, pp. 1–6. (in Russ.)
13. Kostin V.N. [Electric Power Optimization Problems]. St. Petersburg, SZTU Publ., 2003. 120 p.
14. Kozlov V.A. [About Power System Optimization]. *Industrial Power Engineering*, 1992, no. 2, pp. 2–3. (in Russ.)
15. Cvetkov E.V. [Mode Optimization Problems Within System of Economical Management of Electrical Energy Industry]. *Power Technology and Engineering*, 1988, no. 2, pp. 37–38. (in Russ.)
16. Dale V.A., Krishan Z.P., Pajegle O.G. [Mathematical Models of Optimization of Network Evolution of Power Systems]. *Electrical Technology Russia*, 1987, no. 9, pp. 1–6. (in Russ.)
17. Volkova E.A., Zejliger A.N., Kaplinskij Je.M., Lazebnik A.I., Habachev L.D. [Mathematical Models of Power Station Diurnal Mode Optimization in the Design of Electric Power Systems]. *Electrical Technology Russia*, 1975, no. 1, pp. 18–22. (in Russ.)
18. Abakshin P.S. [Optimization Model of Power Long-Term Mode of United Power Grid of Russia Under Active Power]. *Power Technology and Engineering*, 2004, no. 3, pp. 58–62. (in Russ.)
19. Berezhnoj A.V., Roshhenja A.F. [About Analytical Calculation of Power System Optimal Mathematical Model]. *Electrical Technology Russia*, 1972, no. 7, pp. 75–77. (in Russ.)
20. Foshko L.S., Zusmanovich L.B., Flos S.L., Pal'chik V.A., Konevskij B.I. [Optimal Load Distribution Between Generators of Thermal Power Station Using ECM]. *Power Technology and Engineering*, 1977, no. 1, pp. 58–60. (in Russ.)
21. Stennikov V.A., Hamisov O.V., Stennikov N.V. [Optimization of Collaborative Work of Thermal Power Sources]. *Power Technology and Engineering*, 2011, no. 3, pp. 27–33. (in Russ.)
22. Shhapin N.M., Justus V.P. [Optimal Heat Load Distribution Between Plant Boilers and Power System TPP]. *Industrial Power Engineering*, 1977, no. 54, pp. 43–44. (in Russ.)
23. Postnikov V.K. [Mode Optimization of Condensing Power Plant Using ECM SM-4 and CM-1800]. *Energetik*, 1988, no. 9, pp. 16–17. (in Russ.)
24. Aminov R.Z., Doronin M.S., Lubkov V.I., Golina R.M. [On Line Load Distribution Between Boilers of TPP Taking Into Account Theirs State of Repair]. *Power Technology and Engineering*, 1982, no. 9, pp. 34–35. (in Russ.)
25. Zavodovskij A.M. [Optimal Load Distribution Method of District Heating Turbinoalternator]. *Power Technology and Engineering*, 1986, no. 1, pp. 71–73. (in Russ.)
26. Arzamascev D.A., Lipes A.V., Myzin A.L. [Power System Development Optimization Model]. Moscow, Vysshaja shkola Publ., 1987. 272 p.

27. Urin V.D. [Optimization of Power System Equipment Configuration]. *Electrical Technology Russia*, 1980, no. 9, pp. 56–57. (in Russ.)
28. Gajibov T.Sh. [Optimization of Power Station Equipment Configuration Using Piecewise Approximation of Nonlinear Relationship]. *Power Technology and Engineering*, 2009, no. 5, pp. 32–37. (in Russ.)
29. Gornshtejn V.M., Miroshnichenko B.P., Ponomarev A.V. [Electrical Power Systems Mode Optimization Methods]. Moscow, Jenergija Publ., 1981. 336 p.
30. Venikov V.A., Budzko I.A., Levin M.S., Blohina E.L., Petrov V.A. [About Multi-Objective Optimization Problem of Electrical Grid Industry with Undetermined Value]. *Electrical Technology Russia*, 1987, no. 2, pp. 1–7. (in Russ.)
31. Venikov V.A., Zhuravlev V.G., Filippova T.A. [Optimization of Power Stations and Electrical Power System Modes]. Moscow, Jenergoatomizdat Publ., 1990. 352 p.
32. Idel'chik V.I. [Electrical Power Systems Modes Calculation and Optimization]. Moscow, Jenergoatomizdat Publ., 1988. 288 p.
33. Belyaev N.A., Korovkin N.V., Frolov O.V., Chudnyi V.S. Methods for Optimization of Power-System Operation Modes. *Russian Electrical Engineering*, 2013, no. 2, pp. 74–80.
34. Frangopoulos C.A., M.R. von Spakovsky, Sciubba E. A Brief Review of Methods for the Design and Synthesis Optimization of Energy Systems. *Applied Thermodynamics*, 2002, no. 4, pp. 151–160.
35. Hilber P. Maintenance Optimization for Power Distribution Systems. Sweden, Royal Institute of Technology Stockholm, 2008, pp. 125.
36. Flos S.L., Zhaljaletdinova V.K., Galkin N.I., Dorohina V.I., Napol'skih L.V., Doroshenko A.I. [Load Distribution Between Generators of Thermal Power Station Using ECM]. *Power Technology and Engineering*, 1987, no. 6, pp. 10–13. (in Russ.)
37. Geraskin O.T. [Power System Mode Optimization Using Experimental Design Method]. *Energetika. Proceedings of higher education institutions*, 1977, no. 8, pp. 10–14. (in Russ.)
38. Geraskin O.T. [Power System Mode Optimization Using United Simplex Method Non-Linear Programming]. *Energetika. Proceedings of higher education institutions*, 1978, no. 9, pp. 9–13. (in Russ.)
39. Geraskin O.T. [Power System Mode Optimization Using Newton's Method With Approximation of Hessian Matrix]. *Energetika. Proceedings of higher education institutions*, 1979, no. 1, pp. 14–19. (in Russ.)
40. Igumenshhev V.A., Malafeev A.V. [Optimization of Industrial Power Station Operation Modes]. Magnitogorsk, Nosov Magnitogorsk St. Technical Univ. Publ., 2011. 126 p.
41. Malafeev A.V. [Power Load Optimization of Thermal Power Station of Industrial Plant]. *Jenergosberezenie, teplojenergetika: sb. nauch. tr.* [Energy Savings, Heat Power Engineering: Collected Papers]. Magnitogorsk, Nosov Magnitogorsk St. Techn. Univ. Publ., 2003, pp. 30–41. (in Russ.)
42. Gol'denblat B.I. [Use Of Optimal Mathematical Programming under Power Systems Problem Solution]. *Electrical Technology Russia*, 1971, no. 2, pp. 21–24. (in Russ.)
43. Gerasimenko A.A., Lipes A.V. [Power System Mode Optimization Using Reduced Gradient Method]. *Electrical Technology Russia*, 1989, no. 9, pp. 1–7. (in Russ.)
44. Arzamascev D.A., Bartolomej P.I., Holjan A.M. [Computer-Assisted Management and Power System Mode Optimization]. Moscow, Vysshaja shkola Publ., 1983. 208 p.
45. Arzamascev D.A., Igumenshhev V.A. [Optimal Distribution Calculation of Reactive Power Using Step-by-Step Method]. *Electrical Technology Russia*, 1976, no. 1, pp. 70–72. (in Russ.)
46. Igumenshhev V.A., Salamatov I.A., Kovalenko Ju.P. [Optimal Management Method of Reactive Power Within the Power Distribution System]. *Electrical Technology Russia*, 1987, no. 1, pp. 16–21. (in Russ.)
47. Arias-Al'vares H., Diripaskin V.P., Merport Je.I. [Power System Optimization Under Reactive Power]. *Power Technology and Engineering*, 1977, no. 6, pp. 41–43. (in Russ.)
48. Afanas'ev A.I., Idel'chik V.I., Kovalevich V.N., Kononov Ju.G. [Optimization of Operating Modes of Distribution Power Networks with Open Configuration with Respect to Voltage and Reactive Power]. *Electrical Technology Russia*, 1995, no. 3, pp. 19–22. (in Russ.)
49. Guk Ju.B., Okorokov V.R., Papin A.A., Usov S.V., Shhavelev D.S. [Multi-Objective Optimization of Electric Power System Structure in Terms of its Development Planning]. *Power Technology and Engineering*, 1973, no. 3, pp. 9–13. (in Russ.)
50. Shnell' R.V., Kartavcev V.V. [Optimization of Main Parameters of Power Transmission]. *Electrical Technology Russia*, 1982, no. 4, pp. 22–25. (in Russ.)
51. Reshetov S.A. [Power System Optimization at Predetermined Loss of Voltage]. *Electrical Technology Russia*, 1982, no. 6, pp. 17–21. (in Russ.)
52. Cvetkov E.V. [Power System Mode Optimization Taking into Account Power Losses]. *Electrical Technology Russia*, 1984, no. 8, pp. 1–7. (in Russ.)

53. Manusov V.Z., Pavljuchenko D.A. [Evolutionary Algorithm to Optimize Operating Modes of Power System for Active Power]. *Electrical Technology Russia*, 2004, no. 3, pp. 2–8. (in Russ.)
54. Chmutov A.P. [Optimization of Voltage Mode of Power Systems Using Linear Inequality Theory Method]. *Power Technology and Engineering*, 1991, no. 3, pp. 62–66. (in Russ.)
55. Leshhinskaja T.B. [Use of Multi-Criteria Selection Methods for Optimization of Electric Power Supply Systems for Rural Areas]. *Electrical Technology Russia*, 2003, no. 1, pp. 14–22. (in Russ.)
56. Bartolomej P.I., Grudin N.I. [Power System Mode Optimization Using Approximation and Separable Programming Method]. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*, 1993, no. 1, pp. 72–77. (in Russ.)
57. Ajuev B.I., Davydov V.V., Erohin P.M. [Optimization Models of Closest Marginal Power System Operating Modes]. *Electrical Technology Russia*, 2011, no. 3, pp. 2–9. (in Russ.)
58. Korolev M.L., Makeechev V.A., Suhanov O.A., Sharov Ju.V. [Power System Mode Optimization Using Simulation]. *Electrical Technology Russia*, 2006, no. 3, pp. 2–16. (in Russ.)

Received 17 July 2017

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Варганова, А.В. О методах оптимизации режимов работы электроэнергетических систем и сетей / А.В. Варганова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2017. – Т. 17, № 3. – С. 76–85. DOI: 10.14529/power170309

FOR CITATION

Varganova A.V. About Optimization Methods of Power Supply System and Network Modes. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2017, vol. 17, no. 3, pp. 76–85. (in Russ.) DOI: 10.14529/power170309