

Значения, равные единице, присвоены элементам, расположенным над главной диагональю, так, чтобы было очевидным, что минимальной цепью является последовательность дуг  $(a,b)$ ,  $(b,c)$ ,  $(c,d)$ ,  $(d,e)$ , для которой значение

критерия равно 4. Параметры матрицы  $\vartheta$  и принятые граничные значения для назначения приоритетов дуг  $\vartheta_{cp}$  и остановки поиска  $T_{cp}$  представлены в таблице.

$\min(\vartheta_{ij})$	$\max(\vartheta_{ij})$	$\vartheta_{cp}$	$\vartheta_{гр}$	$T_{\min}$	$T_{\max}$	$T_{cp}$	$T_{гр}$
1	15	6,55	6	4	55	26,2	10

В соответствии с предложенным методом из рассмотрения исключены дуги с весом, превышающим  $\vartheta_{cp}$ . Это следующие 10 дуг:  $(a, c)$ ,  $(a, e)$ ,  $(b, e)$ ,  $(c, a)$ ,  $(c, b)$ ,  $(c, e)$ ,  $(d, a)$ ,

$(e, b)$ ,  $(e, c)$ ,  $(e, d)$ . При выборе в качестве начальной дуги  $(a,b)$  алгоритм сразу формирует оптимальный вариант цепи с суммарной длиной 4 ед. Поиск может быть остановлен. При выборе дуги  $(d, e)$  или  $(c, d)$  алгоритм формирует варианты цепей с одинаковой длиной равной 8 ед. И в этих случаях требования к решению выполнены. Если ужесточить требования к объему поиска, например, приняв  $T_{cp} = 7$ , то оптимальное решение будет найдено не более, чем с третьей попытки.

При решении серии тестовых задач размерностью до 10 работ были получены аналогичные результаты по эффективности метода. Это позволяет рекомендовать его для применения в производственных условиях при решении задач оперативного планирования загрузки технологических аппаратов с учетом длительностей переналадок.

### Литература

1. Архипов А. В. Эвристические методы в управлении производством: на материале текстильной и легкой промышленности. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1983. – 163 с.
2. Андрейчиков А. В., Андрейчикова О.Н. Системный анализ и синтез стратегических решений в инноватике: Математические, эвристические и интеллектуальные методы системного анализа и синтеза инноваций. – М.: ЛЕНАНД, 2015. – 306 с.
3. Танаев В. С., Шкурба В. В. Введение в теорию расписаний. – М.: «Наука», 1975. – 256 с.
4. Конвей Р. В., Максвелл В. Л., Миллер Л. В. Теория расписаний. – М.: «Наука», 1975. – 360 с.
5. Кристофидес Н. Теория графов. Алгоритмический подход. Пер. с англ.-М.: Мир, 1978. – 432 с.
6. Рейнгольд Э., Нивергельд Ю., Део Н. Комбинаторные алгоритмы. Теория и практика. Пер. с англ. - М.: Мир, 1980. - 476 с.

## ОСОБЕННОСТИ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СЕТЯХ И СИСТЕМАХ

**Бабенко Владимир Владимирович**  
аспирант,

*Воронежский государственный технический университет*  
Россия, г. Воронеж

**Хайченко Илья Александрович**  
аспирант,

*Воронежский государственный технический университет*  
Россия, г. Воронеж

**Нефедов Юрий Васильевич**  
аспирант,

*Воронежский государственный технический университет*  
Россия, г. Воронеж

## FEATURES OF REACTIVE POWER COMPENSATION IN ELECTRIC POWER NETWORKS AND SYSTEMS

**Babenko Vladimir Vladimirovich**  
aspirant,

*Voronezh State Technical University*  
Russia, g. Voronezh

**Haichenko Ilya Aleksandrovich**  
aspirant,

*Voronezh State Technical University*  
Russia, g. Voronezh

**Nefedov Yuriy Vasilyevich**  
aspirant,

*Voronezh State Technical University*

### АННОТАЦИЯ

В статье рассмотрены концептуальные вопросы специфики оптимизации режимов электроэнергетических систем путем компенсации реактивной мощности, с учетом уровня напряжения. С учетом уровня качества электроэнергии, режимов изменения нагрузки, удельной стоимости средств регулирования и функциональных задач, определены алгоритмические требования к процессу оптимизации: по критерию минимума потерь электроэнергии в сетях и минимума ущерба конкретных потребителей (группы потребителей), соответственно. Предложены наиболее эффективные аппаратные средства на основе статических устройств технологической платформы FACTS.

### ABSTRACT

The article considers the conceptual issues of the specifics of optimizing the modes of electric power systems by compensating for reactive power, taking into account the voltage level. Taking into account the level of electric power quality, load change modes, specific cost of the control means and functional tasks, it is determined the algorithmic requirements for the optimization process: according to the criterion of the minimum loss of electric power in the networks and the minimum damage of specific consumers (consumer groups), respectively. The most efficient hardware based on static devices of the FACTS process platform is proposed.

**Ключевые слова:** электроэнергетические сети и системы, компенсация реактивной мощности, снижение потерь электроэнергии, аппаратные средства, критерии оптимального управления

**Keywords:** electric power networks and systems, reactive power compensation, reduction of electric power losses, hardware, optimal control criteria

Важным фактором успешного развития экономики любого государства является реализация современных технологий повышения энергоэффективности функционирования его энергетического комплекса. С учетом роли последнего для нашей страны, поставленная задача становится первоочередной. Подтверждению сказанному находит отражение во многих законодательных актах нашего государства [1,2]. В них даны рекомендации по использованию широкого перечня энергосберегающих технологий и предметные области их применения. В основном, техническая реализация задач подобного рода лежит в переходе от имеющихся электроэнергетических сетей к современным системам на базе концепции Smart Grid, которые позволяют обеспечить качественную оптимизацию их режимов работы по основным критериям: минимальные потери электрической мощности и затраты на эксплуатацию сетей, высокое качество электрической энергии [3]. В области технических решений, концепцией Smart Grid предусматриваются решение следующих вопросов: максимально широкое использование активно-адаптивных элементов (объектов) электроэнергетических систем, применение статических устройств на основе энергоэффективных электрических машин и силовой электроники (технологическая платформа FACTS, программные пути минимизации технико-экономических потерь на всех этапах передачи, преобразования и потребления электроэнергии[4].

Специфика передачи и распределения электрической энергии (ЭЭ) по системам переменного тока, позволяет эффективно реализовывать основные функции активно-адаптивных элементов (объектов) электроэнергетических систем только при регулировании не только напряжения, но и реактивной мощности. Специфика определяется неотъемлемыми потерями электрической энергии

при ее передаче (которые называют «технологическими потерями»), обусловленными загрузкой сетей электроснабжения активной и реактивной мощностью, передаваемой потребителям по линиям электропередачи. Изменения активной мощности определяются только режимом работы потребителей электроэнергии. Поэтому важным фактором реализации энергоэффективных технологий, является возможности изменения потоков реактивной мощности через сети электроснабжения с помощью дополнительных компенсирующих устройств. Это дает возможность оптимизировать баланс производства и потребления электроэнергии в системе, который нормативно контролируется уровнем напряжения в контрольных точках.

При этом снижаются потоки (а, следовательно, и потери электроэнергии) реактивной мощности, повышается запас статической устойчивости сетевых объектов, увеличивается их пропускная способность по активной мощности, повышается надежность электроснабжения за счет снижения реакции автоматизированных систем энергетических объектов к возмущениям и аварийным режимам [5]. Данные факторы, позволяют считать вопросы компенсации реактивной мощности во всех сегментах электроэнергетического комплекса, одной из наиболее перспективных технологий повышения энергоэффективности их функционирования [6].

Отмеченная выше концепция Smart Grid призвана обеспечить в области энергетики, таких показателей, как, доступность, надёжность, экономичность [7]. Однако, учитывая существенные различия в структуре, функциональной назначении, параметрах, для каждого сегмента электроэнергетических систем, приоритеты в реализации технологий повышения энергоэффективности сильно различаются. Существенную роль в этом играет уровень

напряжения рассматриваемых объектов электроэнергетики.

Системы передачи и распределения электроэнергии по функциональному назначению делятся на системообразующие и распределительные электрические сети. К системообразующим относят электрические сети (на напряжения 330, 500, 750 и 1150 кВ), которые объединяют электрические станции и крупные узлы нагрузки и обеспечивают передачи больших потоков мощности. Функция распределительных сетей состоит в передачи электроэнергии от подстанций системообразующей сети к центрам питания сетей городов, промышленных предприятий и сельской местности. К первой ступени распределительных сетей относятся сети напряжением 220, 110 и 35 кВ, а ко второй — сети 20, 10, 6 кВ, 0,4. [4]. Ко всем электроэнергетическим объектам предъявляются определённые требования по надёжности, качеству электроэнергии и энергетической эффективности. Исходя из этих основных факторов и формируются критерии организации технологического процесса передачи и распределения электроэнергии. Как правило, все требования по надёжности строго определены нормативными документами и отраслевыми руководящими указаниями. Что касается требований по качеству и эффективности, то здесь существует существенное отличие конкретно для каждого уровня напряжения.

Так, наибольшее рабочее напряжение (в % от номинального, определяемое надёжностью изоляции) для сетей свыше 500 кВ не должно превышать 5%; для сетей 220, 330 кВ – 10%; для сетей 35, 110 кВ – 15%; для сетей 6, 10 кВ – 20%. Наибольшее допустимое значение несинусоидальности (ТДН) составляет: для сетей свыше 110 кВ – 2%; для сетей 110, 35 кВ – 4%; для сетей 10, 6 кВ – 5%/ ГОСТ 32144–2013/. Таким образом, для высоковольтных сетей от 35 кВ и до 1150 кВ, предъявляются более строгие требования по качеству ЭЭ по таким показателям как предельно допустимые отклонения уровня напряжения, несинусоидальность, чем для распределительных сетей второй ступени -10, 6, 0,4 кВ. Данное обстоятельство требует применение соответствующих технологий регулирования режимов работы сетей как на аппаратном, так и на программно-алгоритмическом уровне. В тоже время, кроме выполнения обязательных требований по качеству ЭЭ, основные алгоритмические требования по управлению должны формироваться в направлении оптимизация (на основании алгоритмов Лагранжа или Ньютона-Рафсона) по критерию минимума потерь активной мощности при сезонных и суточных колебаниях уровня потребления электрической мощности [8]. Информация о реальном потребляемой мощности конечным потребителем используется обобщённая, в виде статических нагрузочных характеристик (СНХ), что снижает точность анализа, прогноза и реализации оптимального режима [9].

Потери активной мощности, в основном, определяются: нагрузочными потерями активной мощности; условно-постоянными потерями активной мощности (за исключением потерь на корону); потерями активной мощности на корону и потерями от зарядной мощности мало загруженных высоковольтных линий электропередач (ЛЭП) [10]. Основными факторами, влияющими на потери активной мощности, являются: величина питающего напряжения, величина полной потребляемой мощности, величина активного сопротивления элементов системы электроснабжения, график работы потребителей ЭЭ, сезонность и погодные условия. Для рассматриваемого сегмента энергетических систем (распределительные сети), как правило, величина нагрузочных потерь выше потерь мощности от остальных факторов, поэтому в целях повышения уровня энергосбережения стремятся поддерживать напряжение на элементах транспорта перетоков мощности на предельно допустимом уровне. Такое положение дел не позволяет обеспечить качественную оптимизацию режима по критерию минимума потерь активной мощности. Тем более, в настоящее время, существующие аппаратные средства оперативного регулирования режимов ЭС имеют ограниченные функциональные возможности. Они могут выполнять строго определённые функции – либо регулирование напряжения, либо регулирование реактивной мощности, либо повышение пропускной способности ЛЭП и т.д.). Применение современных многофункциональных статических устройств (например, различных вариаций СТАТКОМ), успешно решает критериальную задачу минимизации потерь активной мощности, но сопряжено с существенными материальными затратами [11,12]. В связи с чем, в аппаратном плане целесообразно применение статических устройств с совмещёнными функциями – статические компенсаторы, регуляторы перетоков мощности, трансформаторно- тиристорные регуляторы напряжения с функцией компенсации реактивной мощности. Последние представляют собой систему силового трансформатора (трех автотрансформаторов), в нейтраль которого через силовые тиристорные ключи подключен вольтодобавочный трансформатор. Данная система способна регулировать не только напряжение в ЭС, но и компенсировать реактивную мощность недогруженных высоковольтных ЛЭП (подобно управляемому шунтирующему реактору) при определенном алгоритме работы ключей [13,10].

Как было отмечено выше, для распределительных сетей второй ступени, кроме выполнения обязательных требований по качеству электроснабжения, целесообразна оптимизация режима их работы по критериям энергоэффективности. Учитывая непосредственную связь таких сетей с конечными потребителями ЭЭ, как правило, в узлах нагрузки и на промышленных предприятиях реализуются более разнообразные мероприятия [4,14,15].

Для этих сетей ставится задача реализация управления, близкого к оптимальному (теоретический экстремум). Однако, максимальное приближение к идеальному оптимому сопровождается увеличением затрат на программную и аппаратную часть средств управления.

Следует отменить целесообразность использования энергоэффективных алгоритмов оптимизации на основе энергоэкономических характеристик [4]. Это позволяет с необходимой степенью точности, учесть максимальное число факторов оптимизации режимов работы распределительных сетей и объектов потребления ЭЭ, создать экономически обоснованный информационно-вычислительный комплекс.

В аппаратной части, целесообразно максимально широкое применение современных устройств технологической платформы FACTS, на основе современной силовой электроники [11,16].

Функции регулирования напряжения, как правило выполняются индивидуально для наиболее ответственных потребителей (группы потребителей) трансформаторными и трансформаторно-тиристорными преобразователями на стороне 0,4 кВ [17]. Что касается функции регулирования реактивной мощности, то в настоящее время основным средством компенсации реактивной мощности узлов нагрузки и промышленных предприятий являются батареи силовых конденсаторов, подключаемые параллельно к электросети.

Им присущи известные недостатки (отсутствие плавного автоматического регулирования отдаваемой в сеть реактивной мощности, негативное воздействие высших гармоник, вероятность возникновения резонансных и автоколебательных процессов при определенных сочетаниях с индуктивностью элементов системы электроснабжения), которые и предопределили широкое внедрение статических компенсаторов РМ [17]. В отличие от сетей высокого класса напряжения (используются управляемые шунтирующие реакторы с полупроводниковыми ключами и объединенные регуляторы перетоков мощности), для распределительных сетей второй ступени приоритетными являются статические устройства индивидуальной компенсации РМ на стороне 0,4 кВ [11,12,17]. Т.к. в данном сегменте, во главу угла ставятся три основных фактора: невысокая (относительно высоковольтных сетей) удельная стоимость элементов силовой электроники; максимальная эффективность снижения потерь ЭЭ от реактивных перетоков по СЭС при локальной КРМ непосредственно у потребителя; более сложный график нагрузки, требующий динамическую компенсацию (частые изменения РМ во времени). В данном случае, решение задачи энергоэффективности распределительных сетей второй ступени видится в широком использовании автоматизированных тиристорных конденсаторных установок (ТКУ) [18]. Они способны осуществлять динамическую

компенсацию РМ, без бросков тока и генерации высших гармонических напряжений в сеть [18]. При этом их стоимость незначительно превышает обычные конденсаторные установки с электромагнитными контакторами при существенно больших функциональных возможностях.

На основании выше сказанного можно сделать следующие выводы.

1. Для достижения энергоэффективного управления современными электроэнергетическими сетями целесообразна реализация мероприятий по компенсации реактивной мощности на базе технологий FACTS.

2. Для отдельных сегментов электроэнергетических систем, показано существенное различие требований, условий и критериев энергоэффективного управления, связанное с их технологическими особенностями.

3. С учетом специфики функционирования высоковольтных сетей сегмента 35кВ – 750 кВ, основные алгоритмические требования по управлению должны формироваться в направлении оптимизация по критерию минимума потерь электроэнергии. Аппаратная реализация предполагает применение статических устройств с совмещенными функциями – статические компенсаторы, регуляторы перетоков мощности, трансформаторно-тиристорные регуляторы напряжения с функцией компенсации реактивной мощности.

4. С учетом специфики функционирования распределительных сетей 0,4 кВ – 6 (10) кВ, основные алгоритмические задачи управления должны формироваться в направлении учета стандартов качества электроэнергии, графиков нагрузки, требований технологии и оптимизации режима, по критерию минимума ущерба (на основе энергоэкономических характеристик). Аппаратная реализация предполагает применение статических устройств - индивидуальных стабилизаторов напряжения и автоматизированных тиристорных конденсаторных установок, способных к динамической компенсации реактивной мощности.

#### Литература

1. Федеральный закон РФ от 26.03.03 г. N 35-ФЗ «Об электроэнергетике» // «РГ» – Федеральный выпуск №60 от 1 апреля 2003 г.
2. Федеральный закон РФ от 23.03.09 г. N 261-ФЗ "Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации" // "РГ" - Федеральный выпуск №5050 от 27 ноября 2009 г.
3. Кобец Б.Б., Волкова И.О. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции SMART GRID - М.: ИАЦ Энергия, 2010. -121 с.
4. Крысанов В.Н., Зайцев А.И. Энергосберегающие технологии в распределенных электроэнергетических сетях. – Воронеж: ВГТУ, 2016. – 223 с.

5. Пауле В.К. Качество управления – залог процветания любой компании. – Газета «Энергия России», издание РАО «ЕЭС России», № 07(250), апрель, 2007.
6. Кочкин В.Н., Фокин В.К. Опыт и эффективность применения современных регулируемых статических компенсирующих устройств в электрических сетях 110-750 кВ ЕЭС России. – Современные методы и средства расчета, нормирования и снижения технических и коммерческих потерь электроэнергии в электрических сетях: материалы междунар. науч.-техн. семинара. М.: ВНИИЭ, 2000. С.16.
7. Галяев, А. Н., Шевченко И.В. Проблемы повышения энергоэффективности в электроэнергетике. – Финансы и кредит. - 2010. - №11. - С. 8-13.
8. В. Н. Костин. Оптимизационные задачи электроэнергетики: Учеб. пособие. - СПб.: СЗТУ, 2003 - 120 с.
9. Гуревич Ю.Е., Либова Л.Е. Применение математических моделей электрической нагрузки в расчетах устойчивости энергосистем и надежности электроснабжения промышленных потребителей. – М.: ЭЛЕКС-КМ, 2008
10. Крысанов В.Н. Компенсация реактивной мощности линий электропередач высокого напряжения регулятором напряжения. – Научно-технический журнал «Электротехнические комплексы и системы управления», 2008, №3 (11). – Воронеж, ВИТЦ, 2008. – С. 24–27.
11. Шакарян, Ю.Г., Новиков Н.Л. Технологическая платформа (основные средства) Smart grid. – Энергоэксперт. – 2009. – № 4. – С. 30-37.
12. Крысанов, В.Н. Программно-аппаратное обеспечение систем управления ЭЭС на базе технологии FACTS. – Воронеж: ФГБОУ ВО ВГТУ, 2016. – 232 с.
13. Гвоздев Д.Б., Дементьев Ю.А., Дьяков Ф.А., Кочкин В.И., Черезов А.В. Новые технологии в электроэнергетике. Разработка, изготовление и внедрение. – Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2010. № 4. С. 25–27.
14. Папков Б.В. Возможности управления электропотреблением и оценка ущерба от нарушений электроснабжения в структурно сложных технических системах – Известия академии инженерных наук им. А.М. Прохорова. Том 15, 2006. С. 206-215.
15. В.А. Баринов Автоматизация диспетчерского управления в электроэнергетике. - Москва, Московский энергетический институт, 2000.-647 с.
16. K.R. Padiyar, Facts controllers in power transmission and distribution. – New Delhi, New age international, 2007
17. Крысанов, В.Н. Аппаратно-программное управление режимами узлов нагрузки региональных сетей электроснабжения с помощью статических устройств. – Воронеж: ВГТУ, 2017. – 244 с.
18. Крысанов В.Н. Эффективность использования тиристорных конденсаторных установок в промышленных системах электроснабжения. Энергобезопасность и энергосбережение – 2017. – № 3. – С. 15-20.
19. Булатов О.Г., Царенко А.И. Тиристорно-конденсаторные преобразователи. - М.: Энергоиздат, 1982. 216 с.

## **ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ВИБРОПРЕССОВАННЫХ БЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ**

*Ямских Анастасия Анатольевна  
ООО «Красивый город» инженер-технолог  
Ендриевская Ирина Геннадьевна  
Сибирский Федеральный Университет  
Руководитель ИЛ СМиХАВ,  
Заведующая кафедрой «Строительные материалы и  
технологии строительства СФУ»*

## **ACTORS AFFECTING THE DURABILITY OF VIBROPRESSED CONCRETE PRODUCTS**

*Yamskikh Anastasia Anatolievna  
LLC "Beautiful city" Process engineer  
Endrievskaya Irina Gennad'evna  
Siberian federal University  
The head IL Smichov,  
Head of the Department "Construction materials and  
SibFU construction technologies»*

DOI: [10.31618/nas.2413-5291.2020.1.57.262](https://doi.org/10.31618/nas.2413-5291.2020.1.57.262)

### **АНОТАЦИЯ**

При организации современной, комфортной городской среды, актуальным становится изготовление и применение плит бетонных тротуарных, плит тактильных для инвалидов по зрению, камней бетонных бортовых и элементов ландшафтного дизайна. Основными требованиями к таким элементам являются: