

УДК 621.316.1

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ КОНЦЕПЦИИ УМНЫХ СЕТЕЙ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

С.С. Рахматуллин, Ю.А. Аверьянова

Предложен последовательный многоуровневый расчет размещения устройств компенсирующего характера в системах распределения электрической энергии на примере электросетевой организации АО «СибПСК». Расчеты выполнялись с использованием моделирования: эффективность алгоритма проверялась разработкой метода, в котором реальная сеть распределения электроэнергии заменяется моделью в компьютерно-программной среде MATLAB. Алгоритм расчета базируется на методе множителей Лагранжа. В рамках алгоритма полагается оценка нормированного и экономически обоснованного коэффициента реактивной мощности для электросети 35 кВ (60 кВ) в схеме с устройствами компенсирующего типа на распределительном устройстве и центральном распределительном пункте. В результате оптимизации размещения данных устройств, потери электроэнергии в организации могут быть уменьшены до 17 %. Рассматриваемая концепция умных сетей как вариант пересмотра электросетевых активов и актуальности проведения исследований по интеллектуализации топливно-энергетического комплекса.

Ключевые слова: повышение энергоэффективности; распределительные сети; реактивная мощность; уменьшение потерь; интеллектуализация электроснабжения.

АКЫЛДУУ ЭЛЕКТР МЕНЕН КАМСЫЗДОО ТАРМАКТАРЫНЫН КОНЦЕПЦИЯСЫНЫН НЕГИЗИНДЕ ЭЛЕКТР ЭНЕРГИЯСЫН БӨЛҮШТҮРҮҮНҮН НАТЫЙЖАЛУУЛУГУН ЖОГОРУЛАТУУ ЫКМАЛАРЫН ИШТЕП ЧЫГУУ

С.С. Рахматуллин, Ю.А. Аверьянова

«СибПСК» Акционердик коомунун электр тармактарын уюштуруунун мисалында электр энергиясын бөлүштүрүүчү системаларда компенсациялоочу түзүлүштөрдү жайгаштыруунун ырааттуу көп деңгээлдүү эсеби сунушталат. Эсептөөлөр моделдөөнү колдонуу менен жүргүзүлдү: алгоритмдин натыйжалуулугу MATLAB компьютердик программалык камсыздоо чөйрөсүндөгү реалдуу электр энергиясын бөлүштүрүү тармагы моделге алмаштырылган ыкманы иштеп чыгуу менен текшерилди. Эсептөө алгоритми Лагранждын көбөйтүндүлөр ыкмасына негизделген. Алгоритмдин алкагында 35 кВ (60 кВ) электр тармактары үчүн бөлүштүрүүчү түзүлүштө жана борбордук бөлүштүрүү түйүндөрүндө компенсациялык түзүлүштөр бар схемада нормалдаштырылган жана экономикалык жактан негизделген реактивдүү кубаттуулук коэффициентине баа берүүнү болжолдойт. Бул түзүлүштөрдү жайгаштырууну оптималдаштыруунун натыйжасында уюмдагы энергияны жоготуулар 17% га чейин кыскарышы мүмкүн. Электр тармактарынын активдерин кайра карап чыгуунун варианты катары акылдуу тармактардын концепциясы жана отун-энергетикалык комплексти интеллектуалдаштыруу боюнча изилдөөлөрдүн актуалдуулугу каралган.

Түйүндүү сөздөр: энергиянын натыйжалуулугун жогорулатуу; бөлүштүрүү тармактары; реактивдүү күч; жоготууларды азайтуу; электр менен жабдууну интеллектуалдаштыруу.

DEVELOPING METHODS TO IMPROVE THE EFFICIENCY OF ELECTRICITY DISTRIBUTION BASED ON THE CONCEPT OF SMART GRIDS

S.S. Rakhmatullin, Yu.A. Averyanova

A sequential multilevel calculation of the placement of compensating devices in electric energy distribution systems is proposed using the example of the electric grid organization of JSC SibPSC. The calculations were performed using simulation: the effectiveness of the algorithm was tested by developing a method in which the real electricity distribution network is replaced by a model in the MATLAB computer software environment. The calculation algorithm is based on the Lagrange multiplier method. Within the framework of the algorithm, an estimate of the normalized and economically justified reactive power coefficient for the 35 kV (60 kV) power grid is based in a scheme with compensating type devices at a switchgear and a central distribution point. As a result of optimizing the placement of these devices, electricity losses in the organization can be reduced by up to 17%. The concept of smart grids is considered as a variant of the revision of electric grid assets and the relevance of conducting research on the intellectualization of the fuel and energy complex.

Keywords: increasing energy efficiency; distribution networks; reactive power; loss reduction; intelligent power supply.

Введение. Сегодня в Российской Федерации насчитывается свыше трех тысяч сетевых компаний. Большая часть этих организаций озадачены относительно низкой энергетической эффективностью, связанной с потерями электроэнергии (ПЭ) в системах ее распределения, а также повышенным износом оборудования, которое используется для достижения целей и задач электросетевого комплекса [1].

Вообще говоря, технологические потери электроэнергии (ТПЭ) можно разбить на следующие виды: технические потери в различных составляющих электросети, которые происходят во время передачи электроэнергии; потери при тратах электроэнергии на собственные нужды подстанций; потери за счет погрешностей при учете электричества [2].

Анализируя ТПЭ в регионе выбранной электросетевой организации, можно прийти к выводу, что значительная их часть обусловлена избытком реактивной мощности (РМ) в сети: потери нагрузки от протекания РМ через сеть и потери холостого хода трансформаторов. Потери при передаче активной мощности, другие условно-постоянные потери (в силовых трансформаторах, трансформаторах дугогасящих реакторов и напряжения, в устройствах компенсирующего типа (УКТ), ограничителях перенапряжения, изоляции кабельных линий и в счетчиках непосредственного включения), а также потери нагрузки от перетока активной мощности в совокупности составляют около трети от всех ТПЭ. Меньшие, но все же значительные потери вызваны погрешностями системы учета электроэнергии – около 20 % [3].

Динамика изменения потерь в сетях распределения электрической энергии компаний электросетевого комплекса России представлена на рисунке 1 [4]. С 2015 по 2019 г. увеличение потерь наблюдалось со 105 до 107 млрд кВт·ч. Предоставление данных электропотерь за 2020 г. нецелесообразно из-за пандемической ситуации этого периода, однако тенденция к дальнейшему повышению ПЭ наблюдается и сегодня [5].

Что касается износа электросетевого оборудования, то он негативно влияет на энергетическую эффективность систем распределения энергии, составляя на сегодняшний день в общей сложности семидесятипроцентные показатели. Доля же распределительных сетей (РС), которые отработали свой нормативный срок – 50 %, причем 7 % последних отработали два таких срока. В дополнение стоит отметить проблему нерациональной конфигурации сетей распределения электроэнергии [6].

Таким образом, вопрос уменьшения потерь электроэнергии, в частности, снижение передаваемой по РС РМ, является достаточно актуальным, а его рассмотрение и разрешение – необходимым с точки зрения экономико-технической стороны всей отрасли электроэнергетики.

Объекты и методы. Среди множества методов повышения энергетической эффективности в РС наиболее апробированным с программной стороны, а также алгоритмически разработанным является метод стохастического градиента [7].

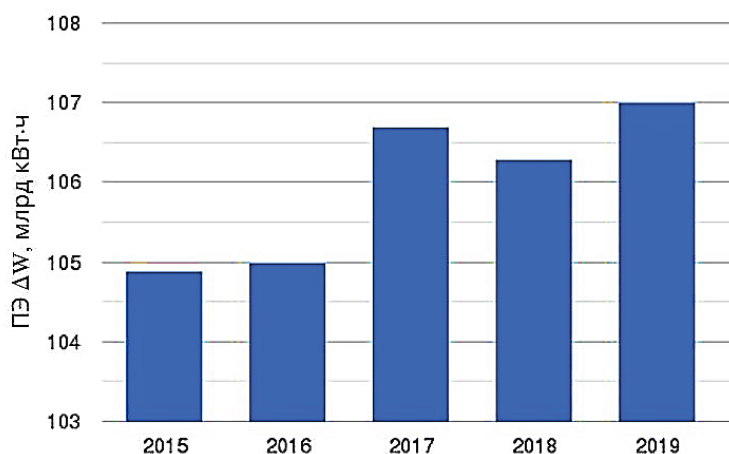


Рисунок 1 – Динамика изменения потерь электроэнергии в сетях ее распределения электросетевых компаний РФ, млрд кВт·ч

Сегодня большое значение в регулировании параметров процессов технологического характера, в том числе потоков РМ, имеет активно-адаптивная разновидность управления при изменении определенных показателей РС, например, структуры. Для РМ данными показателями служат нагрузка и напряжение.

Новое технологическое оборудование и современные методы взаимодействия с ним являются частью пути цифровизации экономики РФ, в том числе и ее энергетической отрасли, что в общем случае ведет к росту потенциала для увеличения эффективности (в случае с энергосетевым комплексом – энергоэффективности).

Увеличение энергоэффективности, помимо улучшения качества взаимодействия с потребителями электричества за счет цифровых технологий, – это еще и результат оптимального регулирования процессов генерации, передачи и распределения электроэнергии, что сегодня и предлагает сеть на базе активно-адаптивных систем управления и элементов РС [8].

В современной мировой электроэнергетической отрасли широкий диапазон применения закрепила за собой технология “Умные сети электроснабжения”. За рубежом данная интеллектуальная концепция сетей именуется Smart Grid [9]. В июне 2020 г. В РФ утверждена Энергетическая стратегия до 2035 г., в которой для достижения ускоренного перехода к эффективной, гибкой и устойчивой энергетике уделяется внимание цифровой трансформации и интеллектуализации отраслей топливно-энергетического комплекса [10].

Исследования мировых масштабов в области электросетей интеллектуального типа ведутся с 70-х годов прошлого столетия и затрагивают активно-адаптивные сети, которые в нынешнее время включают в себя системы интеллектуального мониторинга и контроля ключевых параметров в режиме реального времени, используя информационно-компьютерные технологии и силовую электронику нового поколения [11].

Физическое устаревание электрических сетей России затрудняет внедрение их интеллектуальной концепции, поскольку помимо вопроса переоснащения комплекса электросетей, параллельно ставится проблема его трансформации к цифровым реалиям. Современные научно-технические предпосылки повышают потенциал разрешения данного проблемного обстоятельства, предлагая различные разработки и способы реализации упомянутой концепции [12].

К факторам, которые стимулируют введение концепции сетей интеллектуального типа, можно отнести: оптимальное управление спросом на электроэнергию и, соответственно, снижение ее потерь; мониторинг потребления и распределения электроэнергии, и, следовательно, возможность регулирования

режимов данных процессов; повышение пропускной способности сети; адаптивное управление энергосистемой и ее элементами; уменьшение площади объектов электросетевой отрасли [13].

РС с применением умного электроснабжения представляют собой систему многоуровневого типа, состоящую из устройств и механизмов управления нагрузкой, напряжением, включают в себя средства автоматизации и совокупность элементов системы для измерений, которые применяются для построения прогнозов потребления энергии определенной временной протяженности. Активно-адаптивный тип управления позволяет осуществлять коммутационные операции и регулировать внедрение дополнительных источников РМ.

Оптимизация, а также формирование свойств и задание критериев для каждой РС имеет индивидуальный характер и свои показатели энергоэффективности \mathcal{E} , которые связаны следующим выражением:

$$\mathcal{E} = b - a, \quad (1)$$

где b – значение критериев, при которых режим компенсации РМ оптимален; a – значение критериев, при состоянии сети в исходном положении.

Основываясь на (1) можно постулировать, что для задач управления РМ требуется оптимизационное решение, то есть поиск таких УКТ, их расположения и режимов работы, которые после внедрения и применения дадут в результате оптимальные, энергетически и экономически эффективные показатели системы электрических сетей, не пренебрегая при этом всеми техническими условиями и условиями безопасности.

Модели описания системы для каждой из целей проводимого исследования различны и зависят от ряда параметров. В данном исследовании используется многоуровневый подход, который отличается итерационным методом решения подзадач, то есть поиском таких параметров задач, что они становятся более отчетливыми по сравнению с предыдущими, при этом подсистемы всех уровней находятся в строгой взаимосвязи между собой. Контролируя друг друга, последние являются частью цепочки принятия решений.

УКТ могут быть оптимально размещены совершенно по-разному. Большинство методов поиска оптимального размещения базируются на произведении вычислений итерационным способом, сравнивая функции неограниченно, то есть на прямых методах решения задач. Однако, чтобы найти наилучшее решение, которое удовлетворяет необходимым заданным условиям задачи, следует искать экстремум функции, когда ее переменные ограничены, то есть требуется поиск экстремума относительного типа. Осуществить данную процедуру гораздо сложнее, чем найти экстремум абсолютного типа. Тогда возможен переход к косвенным методам решения, при которых также происходит ограничение, но на этот раз тех переменных функций оптимизации, которые независимы.

Довольно распространенный косвенный метод решения оптимизационных задач – это метод неопределенных множителей Лагранжа. Он отвечает условиям и требованиям задачи, рассматриваемой в рамках данного исследования, а единственный недостаток – увеличение порядка системы уравнений, решение которой необходимо для поиска экстремумов рассматриваемых критериев. Данное обстоятельство обусловлено введением комплементарных переменных и распространяется лишь на число ограничений [14].

Таким образом, принятие решений подчиняется системе многоуровневого вида, которая включает в себя:

- нахождение подходящего решения через определение множителей Лагранжа по оптимизационным критериям;
- поиск необходимой размерности;
- оценку предоставляемых на интервале значений;
- способы планирования и разработки РС.

Результаты и обсуждение. Результатом исследований, проведенных в рамках данной работы, является разработка базирующегося на теории систем многоуровневого типа с применением метода Лагранжа неопределенных множителей алгоритма оптимального размещения УКТ в РС на примере электросетевой организации АО «СибПСК». Алгоритм с УКТ позволяет достичь таких значений РМ в РС, при которых будет достигаться оптимальное управление и уменьшение ПЭ, учитывая также нагрузки установленных электросетевыми организациями трансформаторов (рисунок 2) [3, 15].

В рамках этого алгоритма полагается оценка коэффициента РМ в РС $tg\varphi$ к значению, которое обосновано экономически, считается нормированным и равным 0,4 для сети напряжением 35 кВ (60 кВ). Тогда при $tg\varphi \leq 0,4$ РМ в РС оптимальна, а при $tg\varphi > 0,4$ увеличено потребление РМ и, соответственно, ПЭ, а следовательно, нужны меры по уменьшению их показателей, то есть значений РМ [16].

Для РС электросетевых организаций загрузочный коэффициент силовых трансформаторов β выводится из формулы РМ, потребляемой ими:

$$Q_{\delta\delta} = Q_{\delta} + Q_0 = S_{i11} \left(\frac{u_{\delta\delta}}{100} \beta^2 + \frac{I_{\delta}}{100} \right),$$

где S_{i11} – мощность номинальная, кВА.

В ходе исследования выяснено, что для выбранной электросетевой организации при $\beta \leq 0,2$ необходима замена установленных трансформаторов, и деятельность по компенсации РМ с учетом экономической целесообразности всех мероприятий, после которых следует повторно оценить β , поскольку значение 0,2 является критическим для трансформаторов, характеризующихся наличием усовершенствованной стали, в отличие от распространенного случая $\beta = 0,45$ [17].

В случае, когда коэффициент β нормирован, и выполняется неравенство $tg\varphi \leq 0,4$, следует компенсировать РМ с помощью оптимального размещения УКТ методом множителей Лагранжа. Данное мероприятие следует начать с выбора режима сети и формирования функции, которая будет являться целевой, продолжить поиском оптимизационных критериев и определением ограничений, а закончить составлением Лагранжиана, приравняв его частные производные к нулю. Тогда из решения уравнений следует решение поставленной задачи при стремлении активных мощностных потерь в сети к минимуму:

$$\Delta P = \sum_{i=1}^n (Q_i - Q_{\delta i})^2 R_i / U^2 \rightarrow \min, \quad (2)$$

где Q_i – нагрузка реактивная потребителя i , кВАр; $Q_{\delta i}$ – мощность УКТ i , кВАр.

При отклонении следует уточнять ограничения и саму функцию до выполнения (2), а далее снова сверять достижение условия $tg\varphi \leq 0,4$, повторяя полный цикл мероприятий по оптимальному размещению УКТ, пока РМ в РС не достигнет экономической эффективности (рисунок 3).

Открытые РС постоянно развиваются, а, следовательно, обновляется и информация по всему электросетевому комплексу, что обуславливает безостановочный и многоэтапный процесс распределения УКТ. В таких условиях целесообразно опираться на цикл решений, которые по своей сути близки к наилучшим по выбранным критериям. Системе данного цикла необходимо соответствовать экономико-техническим целям, а, следовательно, выбор решений, в том числе по управлению РМ, должен иметь адаптивный характер в зависимости от входных данных по непрерывно меняющимся параметрам и условиям эволюции РС.

Для реализации адаптивного управления РМ в РС организаций электросетевого комплекса особый интерес представляет концепция “Умные сети электроснабжения”. После ее внедрения упомянутый алгоритм будет представлять программно-аппаратную систему, состоящую из ряда подсистем.

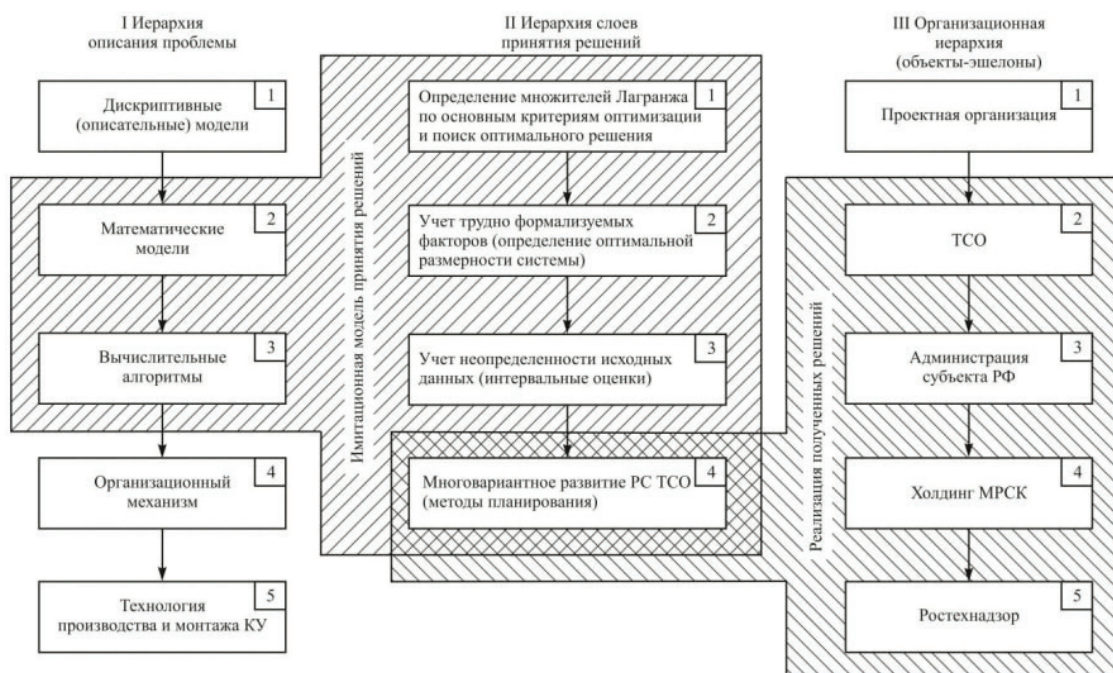


Рисунок 2 – Установка УКТ на основе теории систем многоуровневого типа

Ключевыми подсистемами данной технологии являются “интеллектуальные измерительные системы” и “системы управления спросом на электроэнергию”. Первые характеризуются способностью точно и в режиме реального времени учитывать потребление электрической энергии, а также передавать эту информацию второй системе, которая, автоматически регулируя нагрузку, управляет УКТ, а также режимами РС в целом. Уменьшение ПЭ осуществляется оптимальным регулированием мощностных потоков и увеличением напряжений [18].

Эффективность упомянутого алгоритма проверяется разработкой метода исследования, при котором система реальной РС электросетевой компании заменяется моделью, которая описывает ее с достаточной точностью в компьютерно-программной среде MATLAB Simulink. Мощность УКТ в модели оптимизируются с помощью метода Лагранжа неопределенных множителей, ориентируясь на (2) в соответствии с ограничениями, и $tg\varphi = 0,4$.

Эту процедуру можно описать следующим образом: в блоках компьютерной среды строится оптимизационная модель объективной функции, а с помощью встроенного инструмента Simulink Design Optimization осуществляется поиск изменяющихся в этом процессе переменных.

В ходе исследования $\beta = 0,14$. Процесс итераций осуществил поиск нужных мощностей УКТ в узлах РС. Изменение β привело к тому, что данный коэффициент возрос, и одновременно был сделан перерасчет оптимальных мощностей упомянутых устройств. Осуществленный оптимизационный процесс уменьшил $tg\varphi$ до значения 0,4. В таблице 1 можно видеть, что в результате оптимизации ПЭ уменьшились почти на 16 %.

В РС малого напряжения установка УКТ рекомендована. Для РС 0,38 кВ данное размещение оптимизируется аналогичным методом при тех же условиях, что уменьшает $tg\varphi$ до 0,4 и ПЭ по отношению к схеме без компенсации РМ с $\beta = 0,14$ практически до 17 % (таблица 2).

Эффективность в экономическом плане рассчитывалась сначала доказательством допущения о том, что приведенные затраты на установку УКТ G_g прямо пропорциональны их мощности Q_e (эта зависимость для 0,4 кВ – $y = 71,345x + 895,23$ с $R^2 = 0,9885$; для 6 (10) кВ – $y = 29,649x + 10191$ с $R^2 =$

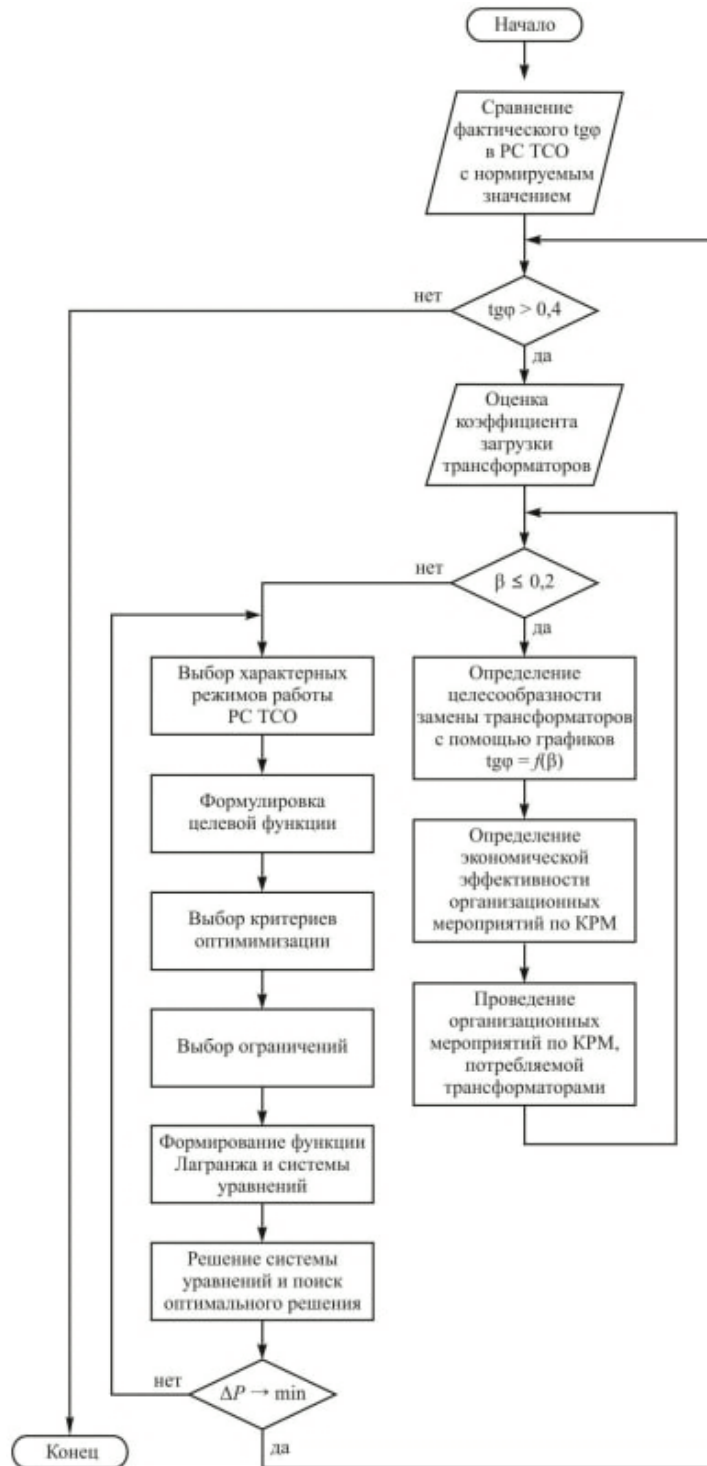


Рисунок 3 – Алгоритм оптимизационной установки УКТ в РС электросетевой компании

Таблица 1 – Показатели РС 6 кВ до и после оптимизационной установки УКТ

Параметр	Схема без компенсации РМ	Схема с УКТ на распределительном устройстве и центральном распределительном пункте
	$\beta = 0,14$	
$tg\varphi$	0,702	0,4
ΔP , кВт	392,1	330,5
ПЭ ΔW , тыс. кВт·ч	1554,3	1310,1

Таблица 2 – Показатели РС 0,38 кВ до и после оптимизационной установки УКТ

Параметр	Схема без компенсации РМ	Схема с УКТ на распределительном устройстве и центральном распределительном пункте
	$\beta = 0,14$	
$tg\varphi$	0,702	0,4
ΔP , кВт	392,1	326,6
ПЭ ΔW , тыс. кВт·ч	1554,3	1294,6

Таблица 3 – Результаты экономических показателей

Характеристика	Схема без компенсации РМ	Схема с УКТ на распределительном устройстве и центральном распределительном пункте	Схема с УКТ (0,4 кВ)
Затраты на ПЭ, руб.	6188,7	5355,3	5156,6
Затраты на УКТ, руб.	-	151,7	385,1
Эффект экономический, руб.	-	833,4	1032,1
Срок окупаемости, лет	-	0,15	0,375

0,9992) [19], а затем определением срока окупаемости их установки (таблица 3), рассчитывающейся как отношение произведения удельных C_e на $Q_{e\sigma}$ к годовой экономии от проведения данного мероприятия, которое равно произведению изменения потерь мощности активной до и после размещения УКТ на стоимость электрической энергии (4 руб/кВт·ч) и ежегодное количество часов максимальных потерь (четыре тысячи).

Предлагаемая модель представляет эффективность установки УКТ в плане снижения ПЭ, а также наилучшего перераспределения РМ в сети и ее управления в зависимости от β . Данные преимущества позволяют достичь оптимального и необходимого в экономико-техническом плане режима электросети, а также могут являться причиной пересмотра электросетевых активов в сторону интеллектуализации распределительных сетей электроэнергии в случае успешного внедрения предложенной модели, и достижения ею результативных показателей на практике [20].

Заключение. Сегодня концепция “Умные сети электроснабжения” – эффективный инструмент увеличения энергетической эффективности, что подтверждается ее широкой распространенностью. Активное внедрение данной технологии в электросети РФ подкреплено рядом факторов:

- уменьшение надежности снабжения электроэнергией;
- рост современных технологий;
- повышение тарифов на электричество;
- нуждаемость в увеличении энергоэффективности и эффективности экологических показателей;
- цифровизация энергосетевого комплекса.

Таким образом, реализованный в работе последовательный расчет размещения УКТ в РС электрической энергии, базирующийся на методе множителей Лагранжа, является эффективным в плане сокращения ПЭ и повышения технических, экономических показателей электросети. В данном

контексте современная концепция “Умные сети электроснабжения” и элементы активно-адаптивного управления позволяют осуществлять поиск ключевых направлений апгрейда электросетевых активов, а также анализировать необходимость исследований по интеллектуализации отраслей энергетического комплекса в целом.

Литература

1. Москвичев Е.А. Стратегический вектор развития российских распределительных электрических сетей / Е.А. Москвичев // Вестник Волгоград. госуд. ун-та. 2013. № 2. С. 100–107.
2. Клименко Ю.А. Об оценке потерь электроэнергии в распределительных сетях 10/0,4 кВ / Ю.А. Клименко, А.П. Преображенский // Актуальные вопросы энергетики. 2019. № 1. С. 6–15.
3. Беляевский Р.В. Повышение энергоэффективности территориальных сетевых организаций при оптимизации потребления реактивной мощности: дис... канд. техн. наук. / Р.В. Беляевский. Кемерово, 2015. 132 с.
4. Российский статистический ежегодник 2020. URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/12994> (дата обращения: 01.06.2021).
5. Азизов А.А. Основные проблемы развития энергетического сектора России и их влияние на экономический рост / А.А. Азизов, Е.М. Душевина // Вопросы российской юстиции. 2021. №. 11. С. 9–16.
6. Распоряжение Правительства РФ от 3 апреля 2013 г. № 511-р. Департамент делопроизводства и архива Правительства Российской Федерации. М.: Правительство Российской Федерации, 2013. 35 с.
7. Герасименко А.А. Оптимальная компенсация реактивных нагрузок в системах распределения электрической энергии / А.А. Герасименко, В.Б. Нешатаев, И.В. Шульгин // Изв. вузов. Проблемы энергетики. 2008. № 11. С. 81–88.
8. Щеников А.Г. Современные технологии в управлении системами энергоснабжения / А.Г. Щеников // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры: мат. Всерос. науч.-метод. конф. Оренбург: Оренбургский госуд. ун-т, 2018. С. 3049–3054.
9. Пинчук Т.В. Умные сети электроснабжения. Преимущества и возможности применения / Т.В. Пинчук // Актуальные проблемы энергетики: мат. студ. науч.-техн. конф. Минск: БНТУ, 2019. С. 67–68.
10. Распоряжение от 9 июня 2020 года №1523-р / Департамент делопроизводства и архива Правительства Российской Федерации. М.: Правительство Российской Федерации, 2020. 93 с.
11. Наумова Т.А. Текущее состояние внедрения инновационных технологий Smart Grid в энергетический комплекс РФ / Т.А. Наумова, И.М. Осипова // Вестник Иркутского госуд. техн. ун-та. 2013. №. 1. С. 170–174.
12. Colak I. The Effects of the Smart Grid System on the National Grids / I. Colak, R. Bayindir, S. Sagioglu // 8th International Conference on Smart Grid. Paris, 2020. № 1. Pp. 122–126.
13. Балакин А.П. Инструменты повышения экономической эффективности инноваций в электросетевом комплексе на основе применения активно-адаптивных элементов сетей: автореф. дис... канд. экон. наук / А.П. Балакин. Смоленск, 2015. 167 с.
14. Еранцев И.А. Метод множителей Лагранжа в задачах электроэнергетики / И.А. Еранцев, Т.В. Картузова, А.В. Картузов // Молодежь и системная модернизация страны: Тез. докл. междунар. науч. конф. Курск: Юго-Западный госуд. ун-т, 2019. С. 34–37.
15. Ковалев И.Н. Выбор компенсирующих устройств при проектировании электрических сетей / И.Н. Ковалев. М.: Энергоатомиздат, 1990. 200 с.
16. Приказ Министерства энергетики РФ от 23 июня 2015 г. N 380 «О Порядке расчета значений соотношения потребления активной и реактивной мощности для отдельных энергопринимающих устройств (групп энергопринимающих устройств) потребителей электрической энергии» / Министерство юстиции Российской Федерации. М.: Минэнерго РФ, 2015. 8 с.
17. Оптимизация нагрузки на трансформатор. URL: <https://elis-group.ru/optimizacziya-nagruzki-na-transformator.html> (дата обращения: 06.06.2021).
18. Розанов Ю.К. Управление потоками электроэнергии и повышение эффективности электроэнергетических систем / Ю.К. Розанов, А.П. Бурман, Ю.Г. Шакарян. М.: МЭИ, 2012. 336 с.
19. Ефременко В.М. Стоимостные показатели комплектных конденсаторных установок / В.М. Ефременко // Вестник КГТУ. 2010. № 1. С. 104–107.
20. Софьин В.В. Направления развития интеллектуальных сетей в России / В.В. Софьин // Электроэнергия. Передача и распределение. 2014. № 2. С. 28–30.