

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт

Электрические станции и электроэнергетические системы
кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой


подпись

И.В. Коваленко
инициалы, фамилия

« 7 » 06 20 17 г.

АВТОРЕФЕРАТ
магистерской диссертации

Инновационное направление реконструкции и развития
систем распределения электрической энергии
тема

13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»
код и наименование направления

13.04.02.02 «Электроэнергетические системы, сети, линии электропередачи,
их режимы, устойчивость и надёжность»
код и наименование магистерской программы


Научный руководитель


5.06.2017 г.

профессор,
канд.техн.наук.
должность, ученая степень

А.А. Герасименко

Выпускник


5.06.2017 г.
подпись, дата

Н.П. Пасечник

Красноярск 2017

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Воздушные и кабельные линии напряжением 6–35 кВ составляют основу распределительных сетей. К настоящему времени около 30 % воздушных линий и трансформаторных подстанций отработали свой нормативный срок, не справляются с возросшей нагрузкой как в городах, так и в сельской местности и во многих случаях физически изношены. В распределительных сетях имеет место рост абсолютных и относительных потерь электрической энергии.

Современные мировые направления в развитии электрических сетей говорят о стремлении развитых стран к введению более высоких классов напряжения, например 20 кВ, это позволит уменьшить потери электрической энергии и увеличить дальность её передачи. Возникает задача повышения эффективности электропередачи. Какое напряжение лучше использовать в качестве среднего распределительного напряжения электрических сетей, чтобы самым рациональным способом передавать электрическую энергию для характерных групп потребителей? Необходимо рассмотреть вопрос выбора оптимального варианта развития распределительных сетей 6–10 кВ, отработавших свой нормативный срок.

Вопросам выбора рационального напряжения систем электроснабжения посвящены работы Фёдорова А.А., Каменевой В.В., Будзко И.А., Канакина Н.С. и др. Неоднократно в своих трудах Черепанов В. В., Суворова И. А., Асташев Д.С., Цыганенко Б. В., Руденко И.И. высказывались о необходимости применения напряжения 20 кВ в распределительных сетях. Разработкой математических моделей и методов развития электрических сетей напряжением 6 – 35 кВ занимались Арзамасцев Д. А., Веников В.А., Мызин А.Л., Липес А.В., Ананичева С. С. и др. Они рассматривали эту задачу как оптимизационную, при этом в качестве целевой функции использовались приведенные затраты.

Цель работы. Обоснование реконструкции и развития существующей системы распределения электрической энергии.

В диссертационной работе решаются следующие **задачи**:

1. Анализ существующих систем распределения электрической энергии 6–35 кВ.
2. Исследование применения сетей напряжением 20 кВ в России и за рубежом, их преимущества и особенности.
3. Формирование математической модели затрат для определения оптимального плана развития энергосистемы.
4. Техничко-экономическое обоснование оптимального выбора при проектировании реконструкции и развития распределительной сети.

Объект исследования – распределительные электрические сети напряжением 6–35 кВ.

Предмет исследования – экономико-математические методы определения наилучшего решения в задаче краткосрочного развития ЭЭС.

Методы исследования. Базовые положения методов математического моделирования и технико-экономического анализа задач проектирования развития электрических сетей. При выполнении численных исследований применялись современные методы компьютерного моделирования, представляющие собой программный комплекс RastrWin, предназначенный для решения задач по расчёту, анализу и оптимизации режимов электрических сетей и систем.

Основная идея диссертации – использование статического метода решения многоэтапной динамической задачи с учётом адаптивного подхода.

Положения, выносимые на защиту: методика решения динамической задачи проектирования развития систем распределения электрической энергии на основе статического подхода.

Научная новизна диссертационной работы: подтверждена необходимость реконструкции системы распределения электроэнергии на этапе краткосрочного развития на основе применения системы напряжений 110/20/0,38 кВ.

Значение для теории. Теоретическая значимость диссертации заключается в том, что результаты, полученные автором в результате исследования, подтверждают и дополняют имеющиеся теоретические представления по проектированию развития распределительных электрических сетей.

Практическая ценность. Предложенные решения показывают обоснованность реконструкции электрических сетей и переход на распределительное напряжение 20 кВ. Практическая значимость диссертации заключается в возможности использования результатов, полученных в ходе исследования, в качестве рекомендации проектным институтам и эксплуатационным организациям для возможности реконструкции подобных сетей.

Личный вклад автора. В диссертации обобщены результаты ряда исследований, полученные лично автором. Личный вклад автора состоял в получении и обработке теоретических данных, анализе и обобщении результатов работы по решению задачи выбора оптимального плана развития существующей распределительной сети. Обсуждение и интерпретация полученных результатов проводилась совместно с научным руководителем. Разработка, реализация основных положений и общей научной идеи диссертации выполнены при участии научного руководителя.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

- Международная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Перспектив Свободный–2016», посвящённая Году образования в Содружестве Независимых Государств. г. Красноярск;
- IV Международная научно-практическая конференция «Актуальные вопросы науки и техники», г. Самара;
- Международная конференция "Перспектив Свободный - 2017", посвящённая Году экологии в Российской Федерации. г. Красноярск

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы из 38 наименований и 6 приложений. Объём диссертации составляет 111 страниц, включая 99 страниц основного текста, содержащего 22 рисунка и 22 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении даётся общая характеристика диссертационного исследования: обосновывается актуальность и научная новизна выбранной темы, определяются объект и предмет исследования, формулируются цели и задачи, определяются методическая и теоретическая база исследования, материал и основные методы анализа, обосновывается теоретическая и практическая значимость работы, излагаются положения, выносимые на защиту, сообщается об апробации результатов работы и её структуре.

В первой главе производится анализ состояния действующих распределительных сетей 6 – 35 кВ, рассмотрена история их развития. Анализирована область применения напряжения 20 кВ в распределительных электрических сетях России и в зарубежных странах. Сформулированы основные преимущества использования напряжения 20 кВ в качестве среднего распределительного напряжения электрических сетей.

Одна из функций системы передачи электроэнергии (ЭЭ) заключается в доставке энергии к центрам питания (районам) распределительных сетей. Назначение распределительных сетей — распределение электрической энергии, получаемой от центров питания, по территории электроснабжаемого района и непосредственная её подача к приемникам и потребителям.

Воздушные и кабельные линии напряжением 6–35 кВ составляют основу распределительных сетей. К настоящему времени около 30 % воздушных линий и трансформаторных подстанций отработали свой нормативный срок. В распределительных сетях имеет место рост абсолютных и относительных потерь электрической энергии. В распределительных сетях в связи с развитием электрификации и электропотребления происходит закономерное изменение (в сторону увеличения) напряжения распределительных сетей. Использование напряжения 20 кВ позволяет не только уменьшить потери в линиях, но и увеличить радиус действия распределительных сетей, кроме того оно ведет к сокращению числа трансформаций. Например, вместо системы напряжений 110/35/10/0,38 использовать систему 110/20/0,38 кВ.

В настоящее время в мире уже во многих странах (США, КНР, Франция, Германия, Италия, Финляндия, Латвия и др.) успешно эксплуатируются более полувека распределительные сети с номинальным напряжением 20 кВ, в том числе и сети городского и сельского электроснабжения. Номинальное напряжение 20 кВ в отечественной электроэнергетике введено в стандарт (решением Комитета стандартов СССР) ещё в начале 60-х годов. Первым положительным опытом внедрения напряжения 20 кВ в России является

проектирование жилищно-коммунального хозяйства г. Москвы и строительство распределительных сетей 20 кВ в Ханты-Мансийском автономном округе.

Основными преимуществами использования технологий передачи электрической энергии на номинальном напряжении 20 кВ по сравнению с электропередачами 6 – 10 кВ являются большая пропускная способность электропередач при тех же сечениях проводов, снижение технологических затрат электроэнергии на ее передачу, переход от трехступенчатой системы передачи и распределения электрической энергии 110/35/10/0,38 кВ к двухступенчатой 110/20/0,38 кВ, использование нового оборудования в габаритах старого, сохранение охранных зон воздушных линий электропередачи. Преимущества проявляются в наибольшей мере при переходе от ВЛ традиционного исполнения к линиям нового исполнения с самонесущими изолированными проводами (ВЛИ). Приводятся принципиальные выражения и соотношения, иллюстрирующие данное положение.

Во второй главе рассмотрена задача построения моделей энергосистем, предназначенных для технико-экономического анализа. Выделены критерии оптимальности, описаны этапы формирования модели энергосистемы для решения задачи развития.

В задачах энергетики оптимизация — это стремление математически выразить и сформулировать наилучшие по тем или иным соображениям условия работы системы, представив их в виде некоторой целевой функции, для которой математическими приёмами можно найти экстремум. Экономическое планирование оптимального развития ЭЭС заключается в отыскании такого плана использования ресурсов и производства продукции, который бы наилучшим образом удовлетворял критерию оптимальности. Критерий — это показатель, с помощью которого можно установить, соответствует ли полученное решение (план) заранее поставленной цели. Математическое выражение критерия называют целевой функцией. Для решения задач экономической оптимизации в качестве целевой функции используют минимум приведенных затрат.

Для решения задачи выбора схем развития электрических сетей и их номинальных напряжений производятся электрические и технико-экономические расчёты, обосновывающие номинальное напряжение сети и её участков, выбор её конфигурации и размещение в ней подстанций. При одноцелевой оптимизации целевой функцией является функция приведенных затрат — экономический критерий для статической системы,

$$Z = E \cdot K + I \rightarrow \min, \quad (1)$$

где K , I — соответственно капиталовложения и годовые издержки варианта исполнения статического объекта, E — коэффициент сравнительной эффективности капиталовложений, принимаемый по данным Центробанка. Под E понимают норму наименьшей эффективности капиталовложений..

Задача оптимизации развития ЭЭС является динамической многоэтапной задачей, т. е. она не решается для какого-то определённого момента времени (года), а решается в развитии, с учётом его движения (динамики). Для каждой отдельно взятой (локальной) системы оптимизационная задача развития формулируется как отыскание минимума некоторой функции капиталовложений и издержек производства при их оптимальном сочетании. При проектировании выявляются два противоречивых обстоятельства. С одной стороны, желательно задаваться большим расчётным сроком, чтобы учесть возможные отдаленные результаты развития. С другой стороны, чем больше T , тем ниже точность прогноза для более отдалённых лет срока T , и это ухудшает точность решения. Поэтому планирование идёт по пути компромисса между этими обстоятельствами с помощью метода скользящего или адаптивного планирования.

Сущность адаптивного метода сводится к многократному повторению плановых расчётов со сдвигами на небольшие сроки (год, два, пять). При этом расчёты выполняются для довольно большого срока T , а решение по выбору тех или иных параметров принимается лишь для его сравнительно короткой начальной части $T_{дост}$ — срока достаточно достоверного прогноза. Внутри задачи, сформулированной как задача перспективного планирования, выполняется одновременно уточнённое решение для начального срока $T = 5$ лет, т. е. решается задача конкретного планирования развития. Таким образом, деление задач в аспекте времени оказывается «размытым», не имеющим чёткой границы.

Учитывая сложность решения проектной задачи, в данной работе предлагается замена динамического критерия приведенных затрат статическим с учётом адаптивного подхода (уточнение решения по мере появления дополнительной информации о развитии РЭС). Такой подход к решению сохраняет свойства динамической задачи. Скользящее планирование требует частого пересмотра и уточнения данных о нагрузках системы, параметров элементов сети. Адаптивное планирование проектирования развития энергетической системы представляет собой непрерывный процесс, предполагает обязательный учёт факторов неопределенности, непрерывную корректировку, исправление и уточнение планов, способность менять свою направленность в связи с возникновением непредвиденных изменений внутреннего и внешнего характера.

Многие объекты строятся в течение одного года. К таким объектам и относится районные электрические сети. При этом после ввода в эксплуатацию, т. е. со второго года после начала строительства ежегодные издержки не остаются постоянными, т. к. изменяется стоимость потерь электроэнергии. Применительно к таким условиям, целевая функция в виде формулы приведенных затрат может быть представлена в виде:

$$Z = K + \sum_{t=2}^T \frac{I_t}{(1+E)^{t-1}} \rightarrow \min, \quad (2)$$

где K_i – капитальные затраты в первый год; I_t – издержки в год t с учётом амортизационных отчислений; E – коэффициент эффективности капитальных затрат; T – расчётный срок.

Ряд критериев (качество ЭЭ, величина потерь ЭЭ, влияние на окружающую среду и др.) могут быть учтены ограничиваемыми условиями, что является распространённой тенденцией получения практического решения, не отягчающей очевидную главную задачу. В качестве ограничений в виде равенств могут использоваться, уравнения установившихся режимов, условия баланса активных и реактивных мощностей в сетях; в виде неравенств – коэффициенты трансформации, допустимые нагрузки линий и др.

В главе определены важные экономические показатели, такие как капиталовложения и годовые эксплуатационные расходы.

В третьей главе использован статический метод решения динамической задачи с учётом адаптивного подхода для решения задачи проектирования развития распределительной электрической сети.

Особенностью сельских электрических сетей является большая протяженность при малой передаваемой мощности. Питание электроэнергией потребителей осуществляется на напряжении 10 – 35 кВ. При использовании напряжения 10 кВ возникают большие потери мощности и напряжения. Недостатком использования 35 кВ являются большие затраты на оборудование. Для оценки целесообразности использования напряжения 20 кВ произведён технико-экономический анализ на примере фрагмента сельских электрических сетей Красноярского края. Исследуемая сеть 110/35/10/0,38 кВ включает в себя 26 нагрузочных узлов, в узлах подключены трансформаторы мощностью от 63 до 1000 кВА, длина участка линий от 0,18 до 13,2 км. Питание участка сельской сети осуществляется по кольцевой схеме от трансформаторной подстанции 110/35 кВ.

Расчёт режима данной сети показал, что значения напряжений у потребителей ниже номинального в среднем на -5,0 %, наибольшее отклонение напряжения составляет -9,4 %. Потеря напряжения ΔU до наиболее удалённого узла составила 21,4%, что свидетельствует о заниженном номинальном напряжении. Существующая система передачи и распределения электрической энергии эксплуатируется при значительных её потерях как в линиях, так и в трансформаторах. Пропускная способность данной распределительной сети 110/35/10/0,38 кВ в ближайшие годы может достигнуть своего технически возможного предела и не сможет обеспечить качественного электроснабжения сельских потребителей.

Произведенные расчёты показали, что необходимо произвести реконструкцию существующей электрической сети с целью снижения потерь электроэнергии и обеспечения требуемого уровня напряжения в узлах сети. Рассмотрен вариант перехода от существующей системы напряжений 110/35/10/0,38 кВ к системе 110/20/0,38 кВ. Практическая реализация варианта развития ЭЭС не требует коренной перестройки существующей распределительной сети 10 кВ и потребительских трансформаторных пунктов

10/0,38 кВ, позволяет использовать их основные строительные конструкции в последующей эксплуатации после перевода сети на напряжение 20 кВ. Реконструкция подразумевает изменение параметров электросети, при сохранении частично строительной части объектов. К реконструкции относятся работы по замене сталеалюминиевых проводов воздушных линий на самонесущие изолированные провода с изоляцией из сшитого полиэтилена СИП-3 20 кВ, перевод сетей на другое номинальное напряжение, замена трансформаторов, выключателей и др. аппаратуры, ликвидация подстанций 35/10 кВ. С учетом изношенности существующих ВЛ 10 кВ замена линий будет способствовать повышению надежности электроснабжения.

Таблица 1. Сопоставление потерь мощности в сети при напряжениях 10 и 20 кВ

U, кВ	P _{нагр} , кВт	Q _{нагр} , кВар	P _Г , кВт	Q _Г , кВар	ΔP _Σ =664,3 кВт			ΔQ _Σ =1 614 кВар		
					ΔP _{ЛЭП} , кВт	ΔP _Т , кВт	ΔP _{хх} , кВт	ΔQ _{ЛЭП} , кВар	ΔQ _Т , кВар	ΔQ _{хх} , кВар
10	4 564	2 212	5 229	3 827	443,3	125,2	95,74	301,2	698,6	614,8
20			5 015	3 136	334,8	48,38	67,57	159,0	293,7	470,6
Δ, %			-4,09	-18,1	-24,5	-61,4	-29,4	-47,2	-57,9	-23,4

В случае если переход на более высокое напряжение по техническим условиям необходим, выбор оптимального варианта производится по критерию минимума приведенных затрат по формуле (2).

Таблица 2. Результаты технико-экономических расчётов

U _{ном} , кВ	ΔW _Л , МВт·ч	ΔW _Т , МВт·ч	ΔW, МВт·ч	K _Л , тыс.руб.	K _{ПС} , тыс.руб.	K _Σ , тыс.руб.	З, тыс.руб.
10	1066,1	1138,9	2205,0	12198	111751	123949	251900
20	805,7	708,6	1514,3	13394	78019	91413	181900
Δ, %	24,42	37,78	31,32	-9,80	30,18	26,25	27,79

Наиболее эффективным как по приведенным затратам, так и по единовременным капиталовложениям является вариант переход от существующей системы 110/35/10/0,38 кВ к системе 110/20/0,38 кВ с учётом роста тарифов на электроэнергию и снижении стоимости оборудования на 20 кВ при его серийном производстве. Разница приведенных затрат в 27,79% значительна, вариант с минимальными приведенными затратами считается оптимальным и, следовательно, наиболее экономичным. Следует отметить, что для варианта 20 кВ потери электроэнергии как в воздушных линиях, так и в трансформаторах меньше на 31,32%. Таким образом, по линиям можно передать больше мощности потребителю. Также возможно увеличение зоны обслуживания потребителей за счёт большей допустимой длины линии 20 кВ.

В четвёртой главе рассмотрена методика определения оптимальной точки размыкания замкнутой сети. Оптимизация потокораспределения в замкнутых сетях состоит в приведении «естественного» потокораспределения к «экономическому», которому соответствует минимум потерь активной мощности. Естественное распределение активных и реактивных мощностей

определяется по полной схеме замещения в соответствии с правилом моментов для мощностей. Искомые потоки мощности головного участка путём математического преобразования выражаются из потоков мощности по ветвям (выраженным по балансовым соотношениям второго закона Кирхгофа) и известных мощностей нагрузок. Целью оптимизации мест размыкания распределительной электрической сети является снижение потерь энергии в электрической сети.

Задача решена следующим образом. Определено естественное распределение потоков мощности в сети 110/20/0,38 кВ и соответствующая точка раздела мощности данной замкнутой сети. При размыкании сети в данной точке рассчитаны суммарные потери активной мощности. Для определения экономического потокораспределения рассчитан режим замкнутой схемы, в которой сопротивления ветвей представлены только активными сопротивлениями. Определена соответствующая оптимальная точка размыкания замкнутой сети.

Если контур электрической сети разомкнуть в точке потокораздела экономического потокораспределения, то на участках сети, работающих в разомкнутом режиме, сохранятся те же потоки мощности, что и в замкнутом режиме работы сети.

Таблица 3. Суммарные потери активной мощности при естественном и экономическом потокораспределении мощности

	Суммарные потери активной мощности
ΔP_{Σ} при размыкании схемы в точке потокораздела естественного потокораспределения – узел №66	$\Delta P_{\Sigma}=487,3$ кВт
ΔP_{Σ} при размыкании схемы в точке потокораздела экономического потокораспределения – узел №29	$\Delta P_{\Sigma}=459,5$ кВт
ΔP_{Σ} в замкнутой сети	$\Delta P_{\Sigma}=459,0$ кВт

Таким образом, размыкание сети в точке экономического раздела мощности позволяет эксплуатировать распределительную сеть в разомкнутом режиме при наименьших потерях активной мощности в ней (потери мощности уменьшились на 5,70 %). При этом данное мероприятие не требует никаких капитальных вложений в сеть и является организационным.

Для улучшения режимных показатели сети 110/20/0,38 кВ рассчитано значение оптимальной мощности устройств компенсации реактивной мощности в сети, с целью снижения потерь активной мощности и ограничения значения перетоков мощности по линиям. Компенсирующие устройства позволяют снизить потери активной мощности и электроэнергии за счёт разгрузки элементов сети от реактивной мощности.

Рассчитана величина оптимальной мощности компенсирующих устройств по трём критериям:

1. Критерий минимума потерь активной мощности (эксплуатационная задача).

Целевой функцией является минимум суммарных потерь активной мощности в сети,

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_w + \Delta P_T + \partial P_{\kappa} = \frac{P^2 + (Q - Q_k)^2}{U^2} \cdot R_w + \frac{P^2 + (Q - Q_k)^2}{U^2} \cdot R_T + q_{\kappa} \cdot Q_k \rightarrow \min. \quad (3)$$

Для определения оптимальной величины компенсирующих устройств необходимо выполнить условие экстремума данной функции,

$$\frac{\partial \Delta P_{\Sigma}}{\partial Q_k} = -2(Q - Q_k) \cdot \frac{R_w + R_T}{U^2} + q_{\kappa} = 0 \quad (4)$$

Откуда получаем оптимальное значение мощности компенсирующих устройств Q_k .

2. Критерий минимума потерь электроэнергии (эксплуатационная задача).

Сформулирована целевая функция потерь электроэнергии при передаче по сети реактивной мощности нагрузки,

$$\begin{aligned} \Delta \mathcal{E}_{\Sigma} &= \Delta \mathcal{E}_w + \Delta \mathcal{E}_T + \Delta \mathcal{E}_{KV} = 3IR_{нб}^2 (R_w + R_T) \tau + q_{\kappa} Q_k T = \\ &= \frac{P_{нб}^2 + (Q - Q_k)^2}{U^2} (R_w + R_T) \tau + q_{\kappa} Q_k T \rightarrow \min. \end{aligned} \quad (5)$$

Расчёт оптимальной величины компенсирующих устройств выполнен из условия экстремума данной функции: $\frac{\partial \Delta \mathcal{E}}{\partial Q_k} = 0$, откуда получено значение Q_k .

3. Критерий минимума приведенных затрат (проектная задача).

В качестве критерия экономического эффекта при решении задачи используется минимум суммарных приведенных затрат. Целевая функция включает в себя затраты на потери мощности и на компенсирующие устройства,

$$Z = E \cdot K + I_{\text{экспл}} + I_{\Delta \mathcal{E}} \rightarrow \min, \quad (6)$$

$$Z = \left(E + \frac{\alpha_{\Sigma}}{100} \right) z_{\kappa} \cdot Q_k + \frac{P_{нб}^2 + (Q - Q_k)^2}{U^2} \cdot R_{\Sigma} \cdot \tau \cdot C_0 + q_{\kappa} \cdot Q_k \cdot T \cdot C_0, \quad (7)$$

где E – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений; α_{Σ} – норма амортизационных отчислений на ремонт и обслуживание; z_{κ} – удельные приведенные затраты на конденсаторные установки, руб/кВар в год; C_0 – стоимость электроэнергии, руб/кВт·ч.

Первое слагаемое в уравнении (7) описывает инвестиционную составляющую. Второе слагаемое учитывает нагрузочные потери в сети после компенсации. Третье слагаемое учитывает стоимость электроэнергии, потребляемой конденсаторной батареей.

Целью оптимизационной задачи является определение такого значения мощности компенсирующих устройств Q_k , которое даёт минимум целевой функции. Оптимальное значение мощности компенсирующих устройств

определяется из условия $\frac{\partial Z}{\partial Q_k} = 0$.

Рассчитан и проанализирован режим сети 110/20/0,38 кВ с учётом компенсации реактивной мощности. Установка компенсирующих устройств в распределительной сети оказывает влияние на баланс активной и реактивной мощности и соответственно на потери мощности в питающей сети.

Таблица 4. Потери мощности в сети 110/20 кВ до установки компенсирующих устройств

$P_{отп}$, кВт	$Q_{отп}$, кВар	$P_{нагр}$, кВт	$Q_{нагр}$, кВар	$\Delta P_{\Sigma}=459,1$ кВт			$\Delta Q_{\Sigma}=933,9$ кВар		
				$\Delta P_{ЛЭП}$, кВт	ΔP_T , кВт	$\Delta P_{хх}$, кВт	$\Delta Q_{ЛЭП}$, кВар	ΔQ_T , кВар	$\Delta Q_{хх}$, кВар
5 074	3 172	4 615	2 238	342,9	48,70	67,57	162,9	300,7	470,6

Таблица 5. Потери мощности в сети 110/20 кВ после установки компенсирующих устройств

$P_{отп}$, кВт	$Q_{отп}$, кВар	$P_{нагр}$, кВт	$Q_{нагр}$, кВар	$\Delta P_{\Sigma}=391,0$ кВт			$\Delta Q_{\Sigma}=870,9$ кВар		
				$\Delta P_{ЛЭП}$, кВт	ΔP_T , кВт	$\Delta P_{хх}$, кВт	$\Delta Q_{ЛЭП}$, кВар	ΔQ_T , кВар	$\Delta Q_{хх}$, кВар
4955	3083	4615	2212	276,5	46,51	68,03	130,5	266,5	473,8

Рассмотрена эффективность применения компенсирующих устройств. При установке компенсирующих устройств уменьшились потери активной мощности в сети на 14,8 % (в линиях на 19,4 %). Теперь суммарные потери активной мощности составляют 7,89 %, до компенсации – 9,05 % от отпущенной активной мощности.

Потери реактивной мощности уменьшились на 6,75 % и составляют 28,25 % от отпущенной реактивной мощности в сеть, причём до компенсации их величина равнялась 29,4 %. Потери реактивной мощности в линиях уменьшились на 19,9 %, в трансформаторах – на 11,4 %. По-прежнему высокое значение имеют потери реактивной мощности на холостой ход трансформаторов и составляют 54,4 % от суммарных потерь реактивной мощности в сеть.

Таким образом, компенсация реактивной мощности приводит к существенному росту эффективности электропередачи 110/20/0,38 кВ.

В заключении подводятся итоги проведённого исследования, формулируются вытекающие из него основные выводы.

В ходе выполнения работы получены следующие результаты:

1. Произведён анализ состояния действующих распределительных сетей напряжения 6–35 кВ, выявлены основные проблемы при их эксплуатации.

2. Изучен вопрос использования класса напряжения 20 кВ в качестве среднего распределительного напряжения в России и за рубежом.

3. Выявлены основные преимущества использования технологий передачи электрической энергии на номинальном напряжении 20 кВ по сравнению с электропередачами 6 – 10 кВ. Преимущества проявляются в наибольшей мере при переходе от ВЛ традиционного исполнения к линиям нового исполнения с самонесущими изолированными проводами (ВИ).

4. Выполнен анализ технико-экономических показателей экономической эффективности развития систем распределения электрической энергии. Для решения проектной задачи в данной работе рассмотрена замена динамического критерия приведенных затрат статическим с учётом адаптивного подхода (уточнение решения по мере появления дополнительной информации о развитии системы распределения электроэнергии).

5. Рассмотрены мероприятия по энергосбережению в спроектированной распределительной сети 110/20/0,38 кВ. Определена оптимальная точка размыкания замкнутой сети. Произведён выбор оптимальной мощности устройств компенсации реактивной мощности в сети 110/20/0,38 кВ по трём оптимизационным критериям: критерию минимума потерь активной мощности и минимума потерь электроэнергии (эксплуатационная задача), по критерию минимума приведенных затрат (проектная задача). Отмечены преимущества применения компенсирующих устройств.

6. На основе технико-экономического сопоставления вариантов развития сельской распределительной сети 110/35/10/0,38 кВ Красноярского края и анализа экономических и технологических показателей обоснована целесообразность ввода в эксплуатацию линий электропередач 20 кВ нового исполнения, переход к распределению электроэнергии в системе напряжений 110/20/0,38 кВ, который в целом является экономически состоятельным и исторически назревшим.

Приложения содержат материал, необходимый для иллюстрации основных положений диссертации.

Основные положения исследования отражены в следующих публикациях:

1. Пасечник Н.П. Практическое освоение напряжения 20 кВ – инновационное решение// Электронный сборник материалов международной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Перспектив Свободный–2016», посвящённой Году образования в Содружестве Независимых Государств. - Красноярск, 2016, С.90–93.

2. Пасечник Н.П. Инновационное направление реконструкции и развития систем распределения электрической энергии// Актуальные вопросы науки и техники: сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции. № 4. г. Самара, ИЦРОН, 2017, С.15–17.

3. Пасечник Н.П. Целесообразность применения напряжения 20 кВ в сельской распределительной сети Красноярского края// Электронный сборник материалов международной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Перспектив Свободный-2017», посвящённой Году экологии в Российской Федерации. г. Красноярск, 2017.