

# Навигатор диспетчера. Адаптивная динамическая оптимизация потерь электроэнергии в разомкнутой распределительной электрической сети

**Основные потери электроэнергии в электросетевом комплексе РФ приходится на распределительные электрические сети, причем большая их часть — на разомкнутые сети 0,4–10 кВ. Потери электроэнергии в этих сетях в темпе процесса могут быть снижены в результате изменения топологии сети путем проведения переключений, обеспечиваемых дистанционно с помощью систем телемеханики и/или оперативными выездными бригадами.**

**Потапенко С.П.**, к.т.н., ведущий инженер-программист ООО «Систел»

**Рыкованов С.Н.**, к.т.н., генеральный директор ООО «Систел»

**Хозяинов М.А.**, заместитель генерального директора по развитию ООО «Систел»

**П**рограммный комплекс «Навигатор диспетчера» [1] для распределительных электрических сетей предназначен для мониторинга сети, анализа режима и автоматической выдачи рекомендаций диспетчеру с целью обеспечения адаптивного оптимального управления режимом по мере изменения топологии сети, нагрузки, генерации, внешних условий. «Навигатор диспетчера» автоматически в темпе процесса предоставляет диспетчеру рекомендации по ведению адаптивного оптимального режима сети. Рекомендации представляют собой последовательности переключений для изменения топологии сети.

В нормальном режиме «Навигатор диспетчера» контролирует любые отклонения от плана работы сети, непрерывно следит

за оптимальностью потерь электроэнергии и в случае нахождения оптимального режима рекомендует диспетчеру выполнить конкретные действия — переключения в сети, которые приведут к снижению потерь электроэнергии.

В статье рассматривается именно эта часть «Навигатора диспетчера» распределительной электрической сети. Указывается место разработанных нами алгоритмов и методов среди уже существующих решений задачи снижения потерь электроэнергии изменением топологии сети. Описывается постановка задачи, применяемые методы, алгоритмы, приведены примеры решения задачи непрерывной оптимизации потерь электроэнергии на небольшом фрагменте разомкнутой распределительной сети.

## МЕСТО РАЗРАБОТАННЫХ МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ ИССЛЕДОВАНИЯ И РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ ПОТЕРЬ В МИРОВОЙ ПРАКТИКЕ

Для радиальных распределительных сетей разработано множество различных методов и алгоритмов снижения потерь электроэнергии изменением топологии сети. Только для упоминания работ, выполненных в данной области, понадобится несколько страниц. Поэтому из большого разнообразия разработок в этой области нами сделана репрезентативная выборка.

Один из самых ранних методов [2] использует комбинацию оптимизационных и эвристических подходов. Метод использует ряд упрощений, например, учитывает только действительную составляющую токов, а углы напряжения принимаются нулевыми.

В работе [3] предлагается эвристический метод, дающий локальный минимум, но требующий больших вычислительных затрат, а в работе [4] эвристический метод, применяющий свои правила генерации переключений для снижения потерь, используется в качестве препроцессора. После чего для сгенерированных топологий используется алгоритм исключения переключений, не удовлетворяющим требуемым критериям и ограничениям.

Ряд авторов использует генетический алгоритм для оптимизации потерь [5–7]. В работе [5] генетическая цепочка топологий модифицируется, выполняется аппроксимация

пригодности. Это приводит к неустойчивой работе метода. В работе [6] используется паттерн оптимального потокораспределения, а также табу-поиск. Для получения новых решений задачи применяются генетические операторы скрещивания и мутаций. В работе [7] предложен нечетко мутируемый генетический алгоритм, что, по мнению авторов, преодолевает комбинаторную природу проблемы реконфигурации сети. Используется свойство радиальности сети, а для управления мутациями с помощью нечеткой логики используются специальные параметры сходимости.

Другие авторы используют нейронные сети. Например, согласно работе [8] вообще не выполняются переводы нагрузок и расчеты установившегося режима. Для обучения искусственной нейронной сети используется набор оптимальных топологий, соответствующих различным графикам нагрузок.

Пример экспертной системы представлен в работе [9], где алгоритм балансирования нагрузок распределительной сети, использует окрашенные сети Петри на основе правил.

Пример современных эвристических методов решения проблемы реконфигурации распределительной сети для снижения потерь электроэнергии в нормальном режиме представлен в [10]. Эвристический алгоритм с табу-поиском дает оптимальное решение комбинаторной оптимизационной проблемы.

Также для оптимизации потерь электроэнергии в распределительных сетях используется алгоритм колонии пчел. Например, в работе [11] такой алгоритм генерирует последовательность операций переключений для поиска пути прохождения мощности с использованием растущего дерева поиска. Новые ветви графа дерева определяются по значениям целевой функции с учетом ограничений, в качестве которых выступают профили напряжений и радиальность сети. Для контроля ограничений производится расчет установившегося режима сети.

Выборка из обзора методов оптимизации потерь показывает тенденцию развития методов и сложность задачи, которую авторы статей решают различными способами. Можно условно разделить методы снижения потерь на традиционные (например, численные), нетрадиционные (экспертные системы, эвристические алгоритмы, искусственный интеллект) и смешанные, когда традиционные и нетрадиционные методы дополняют друг друга.

Предлагаемый нами подход к решению задачи снижения потерь электроэнергии в радиальных распределительных сетях ближе к традиционным численным методам, нежели к использованию эвристики, экспертных систем, искусственного интеллекта. Это обусловлено многими причинами, назовем основные.

Предлагаемые Навигатором рекомендации должны обеспечивать доверие к ним со стороны диспетчеров и специалистов по режимам. Если выданные Навигатором рекомендации будут ме-

нее оптимальны, нежели рекомендации, предложенные диспетчером или специалистом по режимам, то к Навигатору они будут относиться критически. И наоборот, когда в числе рекомендаций Навигатора присутствуют не только известные диспетчерам, но и другие, неизвестные им более оптимальные переключения, тогда к Навигатору появляется настоящий рабочий интерес. Выражаясь игровыми терминами, Навигатор всегда должен «побеждать» диспетчеров и специалистов по режимам в соревновании на генерацию лучшей рекомендации. Как следствие, задача оптимизации для Навигатора ставится как поиск глобального экстремума целевой функции, а не как поиск локального оптимума.

Также при постановке задачи учитываются все возможные технологические нарушения, например, запреты на переключения по параметрам режима, ток короткого замыкания и т.п. Одним из самых важных ограничений в части топологий и соответствующих им режимов является обеспечение надежности питания потребителей. Оно имеет более высокий приоритет для потребителей и сети, нежели оптимизация потерь электроэнергии.

Как для любой сложной комбинаторной задачи для оптимизации потерь изменением топологий сети, мы предлагаем выполнять декомпозицию. При этом один уровень декомпозиции использует естественное для РСК распределение оперативных диспетчерских групп (ОДГ) по своим зонам ответственности, например, РЭС или участку сетей. Второй уровень декомпозиции базируется на разделении «электрического» графа распределительной сети на микрографы петель этой сети. Физически фидеры, составляющие петлю, живут своей самостоятельной «электрической» жизнью. При их попарном объединении в петлю с помощью мест деления сети, задача оптимизации решается только для микросетей — петель (на микрографах). Тем самым распределительная сеть на разных этапах поиска решения сужается до РЭС, участка, петли.

При этом мы предлагаем формализовать и моделировать реальные технологические действия ОДГ в пределах их операционной зоны — участка сетей, РЭС. То есть при генерации вариантов переключений все действия в распределительной сети соответствуют технологическим операциям, производимым ОДГ, например:

1. Во многих случаях разомкнутая распределительная сеть временно на минуты, редко на часы, замыкается — выполняется так называемый «транзит» электроэнергии. Транзитные операции обязательны там, где нельзя прерывать питание потребителей (первой категории, чаще в городах). Поэтому в Навигаторе используются методы расчетов установившихся режимов не только для разомкнутых сетей, но и для замкнутых сетей.
2. Для оптимизации исполнения рекомендаций, включающих операции, выполняемые бригадами, используется точный расчет времени дви-

жения бригад между объектами на основе текущих и прогнозных данных дорожного трафика, а также расчет времени производства переключений на объекте.

В Навигаторе используются традиционные численные методы целочисленной оптимизации, которые легко настраиваются на любую сеть, любые режимы, любые технологические и другие ограничения.

При этом в темпе процесса целевая функция практически достигает глобального экстремума, алгоритмы устойчивы, их можно применять для расчета разомкнутых радиальных сетей любой сложности и размера. Упомянутые в выборочном обзоре методы такого эффекта не дают.

Все действия, предлагаемые Навигатором для их выполнения оперативной дежурной бригадой, включая переезды между объектами, понятны диспетчерам, которые могут не только убедиться в верности предлагаемых рекомендаций, проверить все последовательности переключений, но и разобраться, как именно и почему именно такие рекомендации предлагаются Навигатором. Это важно для формирования доверия к Навигатору. Пока методы искусственного интеллекта (ИИ) последнее обеспечивают не в полной мере и для промышленного применения эти методы должны достичь фазы развития объяснимого искусственного интеллекта — XAI (Explainable Artificial Intelligence), как отмечено в обзоре [16]. Речь идет о прозрачности принятия технических решений ИИ, что необходимо для достижения доверия диспетчеров и специалистов к решениям, принимаемым ИИ. Другие аспекты XAI, например, этические, а также неинженерные/нетехнические, для данной задачи не существенны.

Надо отметить, что ИИ, как правило, проходит стадию обучения, для реальной электрической сети это обучение может длиться довольно долго и часто из-за огромного многообразия комбинаций различных топологий, режимов, размеров сети, схем сети (однолучевая/многолучевая, резервированная/нерезервированная и т.п.), типов первичного и вторичного оборудования, зон управления, способов управления оборудованием и т.п. Постоянное, практически ежедневное развитие распределительной сети порождает необходимость такой же постоянной тренировки ИИ. То же касается экспертных систем и эвристических методов, которые не в состоянии покрыть многообразие возможных решений и тоже должны непрерывно обучаться. Соответственно решение, полученное экспертными системами и эвристическими методами, как правило, имеет локальный оптимум, что порождает недоверие опытных диспетчеров и специалистов к их программной реализации.

Предложенные авторами методы и алгоритмы лишены этих недостатков и могут быть широко применены в программных комплексах для распределительных сетевых компаний.

## ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЗАДАЧ

Математический граф, описывающий топологию распределительной разомкнутой сети, питающейся от центра питания (ЦП), представляет собой набор деревьев, связанных корнем — секцией шин центра питания. Деревья графа сети одного или нескольких ЦП могут соединяться в местах деления (МД) или разрыва сети, реализуемых на базе коммутационного аппарата (выключателя, реклоузера, разъединителя и т.п.). Если коммутационный аппарат в месте деления сети включить, то образуется петля или кольцо замыкания между центрами питания или секциями шин одного ЦП или его выключателями на разных фидерах. Если в нормальной схеме представлены места нормального деления сети, то в оптимальной — места оптимального деления по потерям.

Практическое решение задачи минимизации потерь электроэнергии заключается в переносе мест делений сети таким образом, чтобы суммарные потери электроэнергии в сети были минимальны. При этом часть потребителей, ранее запитанных от одного ЦП или секции шин одного ЦП, может стать запитанной от другого центра питания или другой секции шин «старого» центра питания. При переносе мест делений надежность питания потребителей не должна быть снижена. Повышение надежности питания потребителей переносом мест деления сети выполняется другим программным приложением, которое в данной статье не рассматривается.

Задача минимизации потерь электроэнергии решается посредством минимизации потерь активной мощности, выполняемой интегрально для суток. При этом оптимизация потерь внутри суток выполняется на множестве отдельных интервалов времени. Отсчет интервала времени начинается после завершения переноса одного или группы мест деления сети для достижения текущего минимума потерь.

Для планирования режима сети и топологии на сутки вперед в Навигаторе используется прогноз нагрузки и генерации, планы по ремонтам.

Рекомендации по минимизации потерь электроэнергии представляются диспетчеру на схеме сети, с указанием оптимальных маршрутов движения оперативных выездных бригад (ОВБ), выполняющих переключения, а также детализируются в диалогах и таблицах. Обычно формируется много рекомендаций, но, как правило, выводится не более 3-х рекомендаций, при этом первой выводится наиболее оптимальная рекомендация. В случае необходимости, по желанию диспетчера Навигатором могут выводиться и другие формируемые рекомендации.

## ГРАНИЦЫ ЗАДАЧИ

Границы задачи минимизации потерь электроэнергии для радиальной сети — это сеть 6–10–20 кВ распределительной сетевой компании (РСК) или района электрической сети (РЭС) РСК. В последнем случае, если РЭС рассматривается изолировано, то реко-

мендации по минимизации потерь не будут касаться переключений, которые могли бы быть произведены в сети соседних районов.

Изменение мест деления сети реализуется путем включения и отключения коммутационных аппаратов на ЦП, РП, ТП дистанционно (с диспетчерского пункта) и/или локально оперативными выездными бригадами.

## КРИТЕРИИ И ОГРАНИЧЕНИЯ ОПТИМИЗАЦИИ

Целевая функция имеет основной критерий — минимум потерь электроэнергии на суточном интервале. В качестве других критериев целевой функции или в качестве ограничений оптимизации могут вводиться:

- расход ресурса коммутационного оборудования;
- расход топлива и ресурса автомобилей выездных бригад;
- время выполнения переключений.

Оптимизация времени движения ОВБ до РП (ТП), времени выполнения переключений, оптимизация расхода топлива и ресурса автомобилей выполняются после формирования рекомендаций Навигатора по оптимизации потерь. При ранжировании рекомендаций предпочтение отдается рекомендациям, которые предполагают:

- проведение переключений на подстанциях, коммутационные аппараты которых управляются дистанционно;
- суммарно более короткий путь для ОВБ;
- задействование при переключениях коммутационных аппаратов РП (ТП) с большим ресурсом.

Рекомендации должны учитывать ограничения по надежности, параметрам режима сети, токам короткого замыкания:

- по надежности конечное и каждое промежуточное топологическое состояние сети во исполнение рекомендаций должно соответствовать требованию ПУЭ к надежности питания потребителей по категориям;
- величины токов в линиях электропередачи и трансформаторах должны оставаться в пределах допустимых значений, которые определяются динамически (непрерывно) в соответствии с ПУЭ, стандартами сетевых компаний и другой НТД;
- величина напряжения на шинах 0,4–10 кВ должна соответствовать ГОСТ Р 54149-2010;
- величины токов короткого замыкания не должны превышать допустимых значений для коммутационного, линейного и трансформаторного оборудования.

## ОПТИМИЗАЦИЯ ЗАПЛАНИРОВАННАЯ И ТЕКУЩАЯ

Расчеты и оптимизация потерь электроэнергии выполняются на основе прогноза потребления/генерации на сутки вперед для всех планируемых режимов в течение этих суток при изменении:

- напряжения на центрах питания;
- нагрузок на ТП и РТП;

- генерации;
- топологии сети.

В темпе процесса, при изменении режимов сети и ограничений параметров режимов (потребления/генерации, погодных условий и т.п.), топологии сети и ограничений по топологии (изменения в программах переключений, программах ремонтов), отличных от запланированных (по прошлому прогнозу на текущие сутки), производится дополнительный анализ режима сети и минимизация потерь на оставшемся отрезке времени до окончания суток по новому оперативному и откорректированному краткосрочному прогнозу нагрузок/генерации и плану изменения топологии, наличию ОВБ. В случае возникновения технологических нарушений, инцидентов, аварий Навигатор определяет новый вид режима сети (вынужденный или после/аварийный) и запускает соответствующие расчетные цепочки для устранения технологических нарушений, восстановления сети или питания потребителей. При этом расчетные цепочки, выполняемые Навигатором при нормальном режиме сети, в том числе для оптимизации потерь электроэнергии, приостанавливают свою работу до возвращения сети в нормальный режим.

## ВОЗМОЖНЫЕ УПРОЩЕНИЯ

Потери в трансформаторах 0,4/6–10 кВ при переносе МД в сети 6–10 кВ практически не меняются, за исключением очень малых изменений, обусловленных незначительным изменением напряжения питания на шинах ТП и соответствующим изменением активной и реактивной нагрузок по статическим характеристикам. Поэтому при поиске новых МД сети изменением потерь электроэнергии в трансформаторах 0,4/6–10 кВ можно пренебречь.

## СХЕМА ОПТИМИЗАЦИИ

Схема оптимизации потерь электроэнергии исходит непосредственно из постановки задачи. Сначала планируется оптимизация для следующих суток, а по наступлению новых суток, при изменении условий по отношению к плановым, производится корректировка плана.

Установившиеся режимы просчитываются для прогнозируемых суток на интервалах от 0 до 24 часов при изменении нагрузок и генерации в соответствии с их прогнозом, топологией сети и составом оборудования сети по плану ремонтов, а также по наличию ОВБ. Дискретность расчетов выбирается в пределах нескольких (Y) минут. Если потери в сети для режима на X часов + Y минут не будут отличаться от потерь в сети с топологией и режимом на X часов (в пределах погрешности/зоны нечувствительности), то предварительная динамическая оптимальная схема не меняется.

Если же потери в пределах дискретности расчетов будут отличаться, то они минимизируются изменением мест деления, если это практически осуществимо. В результате получаем предварительную динамическую оптимальную схему на X часов + Y минут.

Следующий режим считается на момент  $X$  часов +  $2 \cdot Y$  минут. Если потери в сети для режима на  $X$  часов +  $2 \cdot Y$  минут в пределах погрешности/зоны нечувствительности соответствуют потерям на  $X$  часов +  $Y$  минут, то предварительная динамическая оптимальная схема не изменяется. В противном случае определяются новые МД сети, если это практически осуществимо, и формируется новая предварительная динамическая оптимальная схема сети на  $X$  часов +  $2Y$  минут. Далее оцениваются потери на следующие  $Y$  минут и так продолжается до достижения 24 часов. В результате формируется предварительный план оптимизации потерь на сутки вперед.

В темпе процесса предварительный план оптимизации потерь корректируется, если нагрузки, генерация, ограничения параметров режима и топология сети будут отличаться от плановых. Также и план оптимизации потерь на оставшееся время текущих суток формируется в темпе процесса.

### ПРИМЕНЯЕМЫЙ МЕТОД

Авторами используется один из методов дискретной оптимизации — метод ветвей и границ, применяемый для оптимальной комбинаторики топологических состояний электрической сети [12], в нашем случае — распределительной сети.

### ДЕКОМПОЗИЦИЯ ЗАДАЧИ

Для декомпозиции задачи используется топологическая особенность распределительной сети — ее разомкнутое состояние, что позволяет на каждом шаге оптимизации использовать микро модель сети — одну петлю графа, образованную местом деления сети и двумя смежными деревьями, инцидентными месту деления.

Другая особенность распределительной сети на текущий момент — это ограничение сети и протяженности дорог до РП (ТП) зоной ответственности ОВБ и зоной ответственности диспетчера. Как правило, границей зоны ответственности является РЭС или его участок. Поэтому оптимизация потерь электроэнергии в темпе процесса может выполняться для РЭС или участка РЭС с захватом части соседней сети. При этом оптимизация потерь электроэнергии в РСК в темпе процесса может выполняться параллельно для всех РЭС.

Отмеченные выше особенности топологии сети и зон ответственности учитываются Навигатором при выдаче рекомендаций по оптимизации потерь электроэнергии в режиме реального времени.

### СТРУКТУРА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОПТИМИЗАЦИИ

Алгоритм оптимизации реализуется в виде двух функциональных блоков.

Первый блок обеспечивает направленный перебор петель графа по минимуму потерь активной мощности во всей сети. В общем случае крона ветвления дерева вариантов включает несколько десятков ветвей, что позволяет найти практически глобальный оптимум. В частном случае, когда кроной ветвления является только одна ветвь, получаем локальный минимум.

Второй блок обеспечивает нахождение оптимального места деления в петле графа по тому же минимуму потерь активной мощности.

### АЛГОРИТМ ОПТИМИЗАЦИИ МЕСТА ДЕЛЕНИЯ ПЕТЛИ (второй функциональный блок)

Второй функциональный блок выполняет построение петли из места деления и инцидентных ему деревьев до шин ЦП. Для этого производится перебор (всех) МД в петле и определяется МД, при разрыве которого с помощью коммутационного аппарата в петле будет наблюдаться минимум суммарных потерь.

Построение петли в программе выполняется путем поиска путей на графе: сначала находятся два пути до питающего центра от каждого из двух полюсов исходно разомкнутого коммутационного аппарата, являющихся исходным МД, как показано на рисунке 1. При поиске пути в каждый узел графа заносится номер предшествующего узла. Поэтому, чтобы получить список коммутационных аппаратов дуги, нужно проходить по найденным путям в обратном направлении — от питающего центра до исходного коммутационного аппарата. В этот список

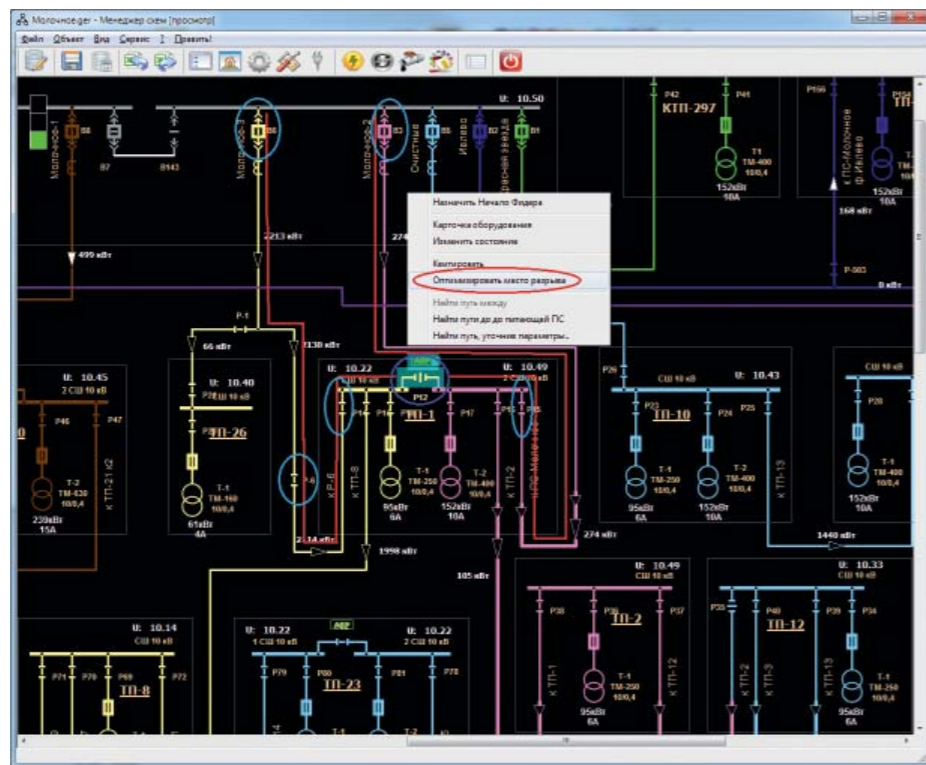


Рис. 1. Построение петли и нахождение ее коммутационных аппаратов

не включаются коммутационные аппараты, которыми запрещено управлять по технологическим или иным причинам. На рисунке 1 кружками выделены следующие найденные коммутационные аппараты петли — В-6, Р-6, Р-14, Р-12, Р-15, В-3, которые являются кандидатами на оптимальное место деления сети.

После составления списка новых возможных мест деления петли, рассчитывается режим петли для каждого из этих МД и выбирается место деления с минимумом потерь электроэнергии в петле. Расчет может выполняться несколькими способами.

При первом способе (математическом) направление перемещения места деления от его исходного положения в обе стороны определяется следующим образом:

- если первое перемещение МД в одну сторону снижает потери в петле, то выбор направления считается правильным и МД далее перемещается в выбранном направлении. Если же снижения потерь в петле нет, то направление перемещения МД меняется на противоположное;
- если перемещение МД в другую сторону снижает потери в петле, то выбор направления считается правильным и МД далее перемещается в выбранном направлении;
- если перемещение МД в обе стороны не приводит к снижению потерь, то исходное МД считается оптимальным по потерям и на этом поиск нового места деления заканчивается.

Пошаговое перемещение МД по петле первым способом осуществляется следующим образом: МД перемещается на один коммутационный аппарат в выбранном направлении в случае, если это приводит к снижению потерь в петле, и так продолжается до тех пор, пока потери не начнут расти. В этом случае предыдущее место деления будет считаться оптимальным по потерям в петле.

При втором способе (физическом) поиска мест деления сети сначала выполняется расчет режима петли, после чего МД определяется по точке потокораздела, которая дает минимум потерь активной мощности [13]. Так как перенос МД двух деревьев практически не влияет на режим оставшихся деревьев, то для ускорения процесса оптимизации потерь расчет режима для оставшихся деревьев можно не производить. Это проиллюстрировано для фрагмента распределительной сети на рисунке 2.

При оптимизации потерь проверка оборудования по токам короткого замыкания выполняется для каждого МД одновременно с расчетом режима сети.

Для ускорения проверки надежности питания потребителей при поиске мест деления петли расчеты выполняются с применением логики: проверка надежности не производится для узлов, которые не «задеты» перемещением МД при условии, что МД перемещается по петле направленно.

Структурная схема алгоритма поиска места деления петли без ускорения расчета представлена на рисунке 3.

Проверка на сохранение надежности питания потребителей при поиске МД петли выполняется следующим образом:

- если среди потребителей, питающихся от петли, есть потребители первой категории, то у них проверяется наличие резервного питания через АВР; если его нет, то производится переход на следующее МД сети;
- если среди потребителей, питающихся от петли, есть потребители второй категории, то у них проверяется наличие резервного питания через дистанционно управляемый коммутационный аппарат или через коммутационный аппарат, которым может управлять локально ОВБ после подъезда к подстанции в течение регламентированного времени, например в течение 2-х часов, как принято в ПАО «МОЭСК»; если ни то, ни другое не обеспечивается, то производится переход на следующее МД в петле;
- иначе считается, что проверка на обеспечение надежности питания потребителей петли успешно пройдена.

Поиск пути в графе осуществляется методом Дейкстры [14] — последовательной расстановкой меток узлов от исходной точки. Меткой служит номер узла, из которого сделан переход в текущий узел.

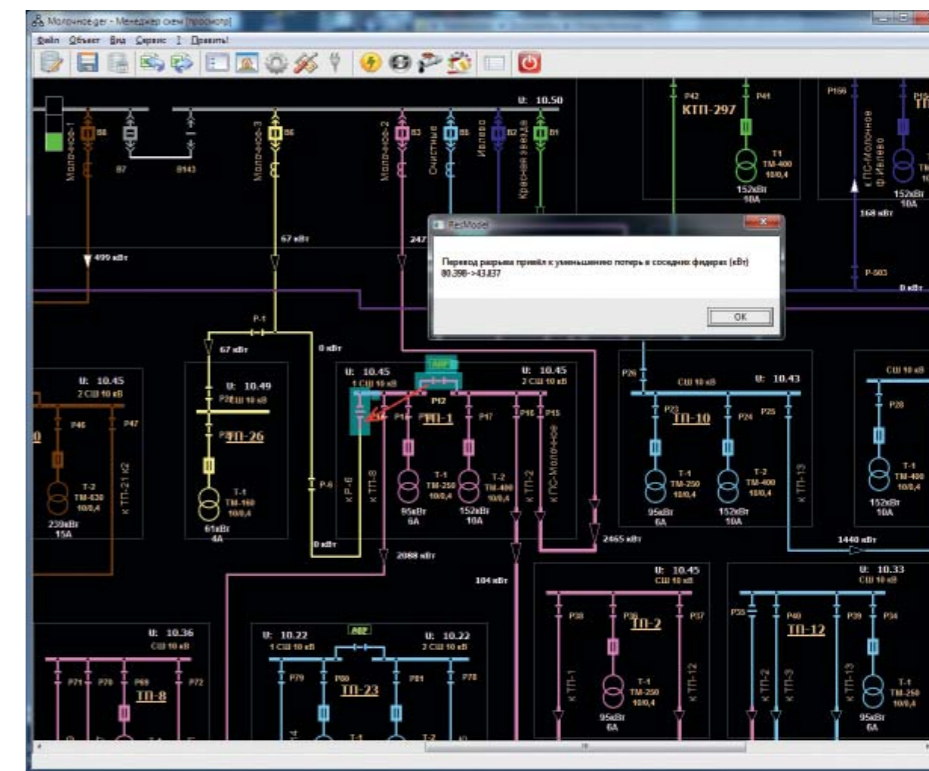


Рис. 2. Перенос места деления петли графа

## АЛГОРИТМ ОПТИМИЗАЦИИ СЕТИ (первый функциональный блок)

Оптимизация всей сети района производится направленной оптимизацией заранее определенных или динамически определяемых МД петель. Описание определения МД одной петли приведено разделом выше, алгоритм работы второго функционального блока представлен на рисунке 3.

В первом функциональном блоке рассматриваются все петли и места их деления. Существует множество вариантов направленного поиска топологии сети, в данном случае МД сети. Например, локальный минимум можно найти методом «скорейшего спуска» по аналогии с методом по координатного спуска, применяемого для оптимизации функции многих переменных [15]. В качестве координат по аналогии с оптимизацией функции многих переменных берутся петли, а «спуск» осуществляется перемещением МД по ним. При этом на каждом шаге определяется ведущая петля («координата»), дающая своими МД максимум снижения потерь среди всех петель. Если в ведущей петле сразу брать максимальное снижение потерь, то метод оптимизации по той же аналогии похож на метод Коши [15]. Пример результата работы такого алгоритма для фрагмента распределительной сети представлен на рисунке 4.

Мы рекомендуем использовать метод ветвей и границ или аналогичные методы целочисленной оптимизации, дающие практически глобальный минимум потерь. При отсутствии необходимости получения глобального минимума возможно применение методов по аналогии с методами скорейшего спуска.

## ОПТИМИЗАЦИЯ МАРШРУТОВ ДВИЖЕНИЯ ОПЕРАТИВНЫХ ВЫЕЗДНЫХ БРИГАД

Рекомендации по минимизации потерь электроэнергии представляются на схеме сети с указанием оптимальных маршрутов движения ОВБ для производства требуемых переключений. Пример представления оптимального маршрута движения ОВБ для фрагмента распределительной сети показан на рисунке 5.

## ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ ВОПРОСЫ

«Навигатор диспетчера» позволяет непрерывно оптимизировать потери электроэнергии в распределительной электрической сети, в определенные моменты времени выдавая рекомендации ОВБ на перемещение места деления сети, изменения тем самым ее топологии. То есть, несколько раз в сутки могут появляться отклонения от нормальной схемы и от так называемой режимной схемы, и эти отклонения время от времени изменяются. Возможно, при внедрении «Навигатора диспетчера» понадобится ввести понятие текущая «оптимальная схема» наряду с существующими понятиями «нормальная схема» и «режимная схема». При этом «оптимальная схема» адаптивно, динамически может меняться несколько раз в течение суток для обеспечения минимума потерь электроэнергии.

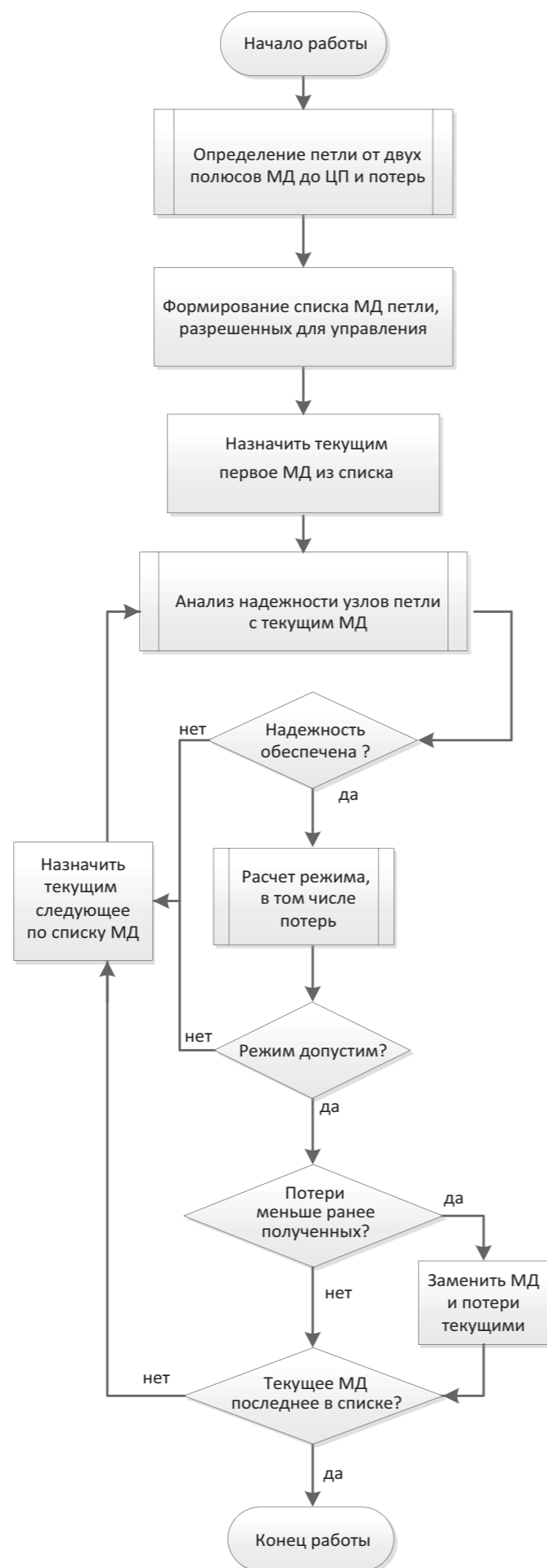


Рис. 3. Структурная схема алгоритма поиска МД без ускорения расчета

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны методы, алгоритмы и программное обеспечение адаптивной динамической оптимизации потерь электроэнергии разомкнутой распределительной сети. Программное приложение включено в программный комплекс «Навигатор диспетчера распределительной электрической сети», предлагающий рекомендации диспетчеру по оптимизации потерь электроэнергии, находящейся в нормальном режиме, в темпе процесса для сети любого размера и сложности. [P]

ООО «Систел»  
г. Москва, Каширское ш.,  
д. 22, корп. 3,  
Тел.: (495) 727-39-65  
sale@system.ru  
www.system.ru

## ЛИТЕРАТУРА

1. Рыкованов С.Н., Хозяинов М.А. Концепция навигатора диспетчера для адаптивного оптимального управления режимами распределительной электрической сети // Автоматизация & ИТ в энергетике, 2018, № 12. С. 30–34.
2. Merlin A., Back H. Search for a minimal-loss operating spanning tree configuration in an urban power distribution system, in Proc. 5th System Computation Conf. (PSCC), Cambridge, U.K., 1975, pp.1-18.
3. Baran M.E., Wu F.F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing, IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, vol. 4, no. 2, pp. 1401-1407.
4. Safri R.J., Salama M.M.A., Chickani A.Y. Distribution system reconfiguration for loss reduction: a new algorithm based on a set of quantified heuristic rules, Proceedings of Electrical and Computer Engineering, Canada, 1994, vol. 1, pp. 125-130.
5. Zhu J.Z. Optimal reconfiguration of electrical distribution network using the refined GA, Electric Power System Research, 2002, vol. 62, pp. 37-84.
6. Lin W.M., Cheng F.S., Tsay M.T. Distribution feeder reconfiguration with refined GA, IEEE Proc-Gener. Transmission Distribution, 2000, vol. 147, no. 6, pp. 1484-1491.
7. Prasad K., Ranjan R., Sahoo N.C., Chaturvedi A. Optimal reconfiguration of radial distribution systems using a fuzzy mutated GA, IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, vol. 20, no. 2, pp. 1211-1213.
8. Kim H. ANN based feeder reconfiguration for loss reduction in distribution system, IEEE Transaction on Power Delivery, 1993, vol. 8, no. 3, pp. 1356-1366.
9. Lin C.-H. Distribution network reconfiguration for load balancing with a colonial Petri net algorithm, IEEE Proc-Gener. Transm. Dist., 2003, vol. 150, no. 3, pp. 317-324.
10. Li K.K., Chung T.S., Chen G.J., Tang G.Q. A tabu search approach to distribution network reconfiguration for loss reduc-

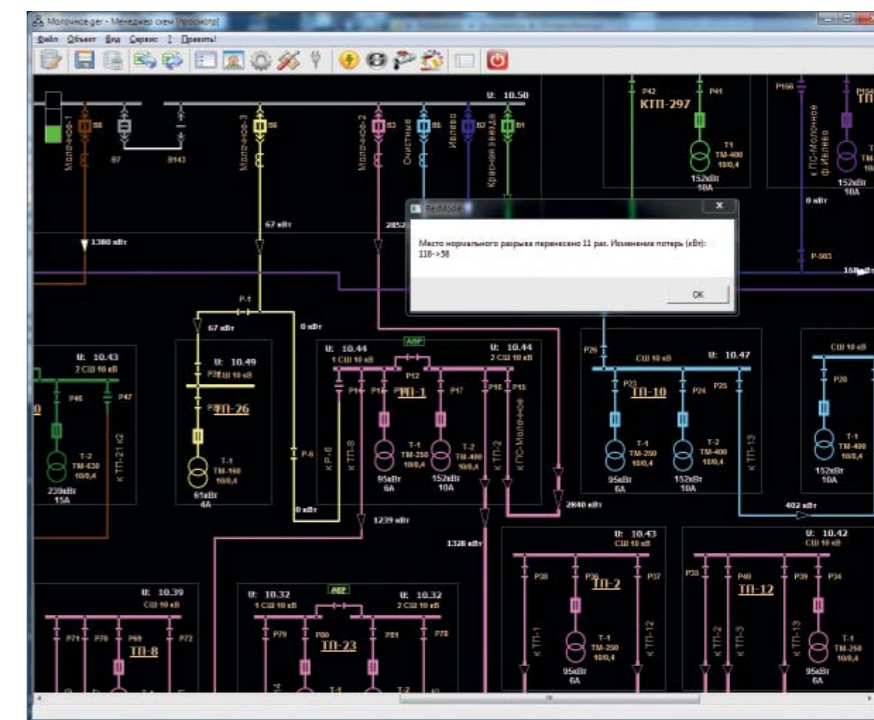


Рис. 4. Пример оптимизации потерь электроэнергии во всей сети

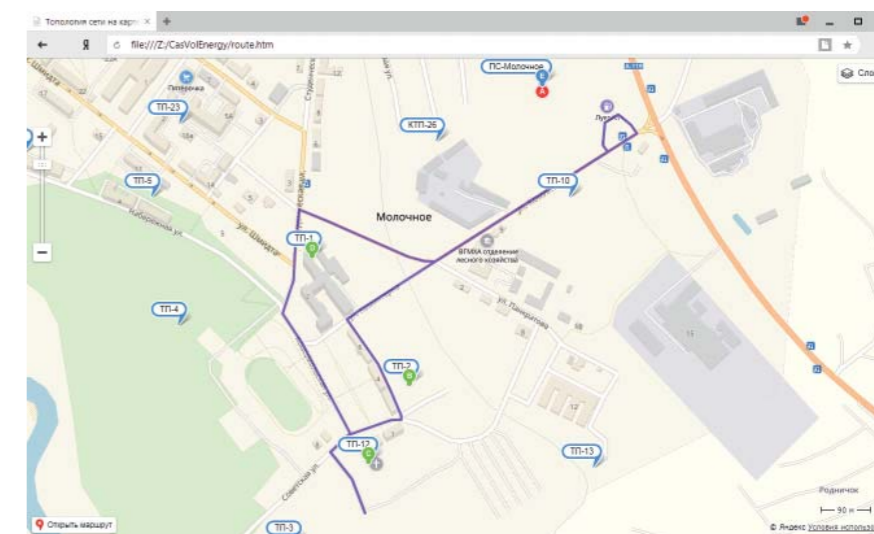


Рис. 5. Пример представления оптимального маршрута движения ОВБ

11. Ganesh S. Network Reconfiguration of Distribution System Using Artificial Bee Colony Algorithm, World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Electrical and Computer Engineering, 2014, vol. 8, no. 2, pp. 396-402.
12. Фокин Ю. А., Хозяинов М. А. Ввод режима электроэнергетических систем в допустимую область путем коррекции их схемы // Электричество, 1990, № 12. С. 14–19.
13. Лыкин А.В. Электрические системы и сети. Учебное пособие. М.: Университетская книга; Логос, 2008. 254 с.
14. Левитин А.В. Алгоритмы: введение в разработку и анализ. М.: Издательский дом Вильямс, 2006. С. 189–195.
15. Загребав А.М., Крицына Н.А., Кулябичев Ю.П., Шумилов Ю.Ю. Методы математического программирования в задачах оптимизации сложных технических систем. Учебное пособие. М.: МИФИ, 2007. 332 с.
16. Dositovic F.K., Bcic M. Explainable Artificial Intelligence: Survey. Conference Paper, May 2018. URL: <https://www.researchgate.net/publications/325398586>.