

УДК 622.311

**МЕТОД ВЫБОРА КОНФИГУРАЦИИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ
0,4 кВ С МУЛЬТИКОНТАКТНОЙ КОММУТАЦИОННОЙ СИСТЕМОЙ
НА ОСНОВЕ ГРАФОВОЙ МОДЕЛИ**

Авдеев Я.В., студент группы ЭПм-241, Паскарь И.Н., ст. преподаватель кафедры ЭГПП КузГТУ

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева
г. Кемерово

В последнее время все чаще обсуждается развитие распределительных электрических сетей 0,4 кВ в сторону повышения их гибкости и надежности. Одним из направлений является применение новых коммутационных решений, позволяющих изменять конфигурацию сети в зависимости от текущих показателей потребителей, источников питания и окружающей среды. [3] Внедрение новых систем неизбежно влечет за собой новые проблемы. Если в традиционной сети количество возможных конфигураций ограничено и довольно мало, то при использовании таких решений, как мультиконтактная коммутационная система (МКС) их число резко возрастает. Фактически, каждое переключение конкретного коммутационного аппарата формирует новую комбинацию, и, как следствие, новую топологию сети. При этом некоторая часть таких конфигураций является недопустимой из-за топологических, электрических или же логических ограничений.

Таким образом, возникает задача формального описания состояний сети с МКС и разработки метода (алгоритма) выбора наиболее предпочтительной конфигурации сети при возникновении аварийной ситуации. Для решения поставленной задачи в данной работе предлагается рассматривать распределительную сеть в виде графовой модели, в которой состояние коммутационных аппаратов задает конкретную топологию сети. Это позволит перейти от описательного подхода к формализованной задаче выбора конфигурации сети.

Научная новизна работы заключается в переходе от описательного представления состояний мультиконтактных коммутационных систем к их формализации в виде пространства подграфов распределительной сети, а также в разработке метода выбора допустимой конфигурации на основе анализа связности и оптимизации по заданному критерию.

Вопросы повышения гибкости и надежности распределительных электрических сетей активно рассматриваются в рамках концепции интеллектуальных сетей. В существующих работах основное внимание уделяется автоматизации управления, интеграции распределенной генерации и алгоритмам восстановления электроснабжения, при этом реконфигурация сети обычно рассматривается с использованием традиционных коммутационных аппаратов. Отдельное направление связано с применением мультиконтактных

коммутационных систем. В работах [1, 2] предложены подходы к построению сетей с МКС и методы кодирования различных состояний, позволяющие описывать различные конфигурации сети. Вместе с тем существующие подходы ориентированы преимущественно на представление состояний и не обеспечивает их формализованного анализа и выбора предпочтительной конфигурации.

Для формального описания возможных конфигураций распределительных сетей последние будут рассмотрены в виде графа $G(V, E)$, где множество вершин V соответствует узлам сети, а множество ребер E – электрическим связям между ними. (Рис. 1)

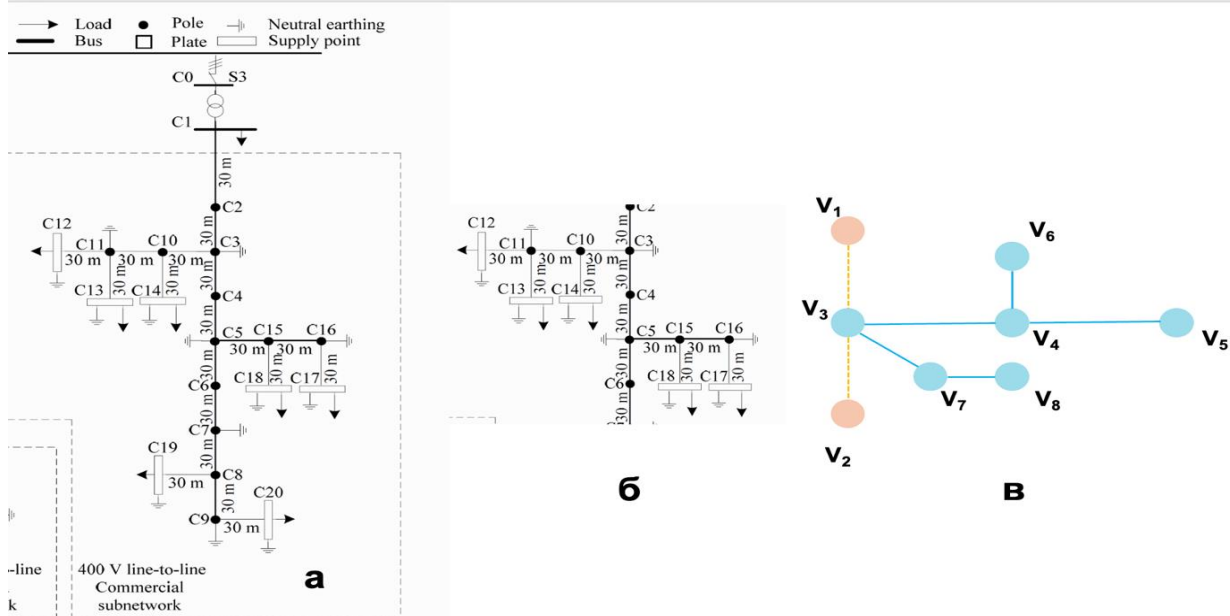


Рисунок 1. Построение графа распределительной сети с МКС на основе схемы питания потребителей 0,4 кВ от CIGRE (а – общий вид участка сети; б – выделенный участок сети для построения графа; в – граф на основе участка сети) [4]

В качестве вершин графа (V) рассматриваются источники питания, узлы распределения и группы потребителей. Ребра графа (E) соответствуют линиям электропередачи и коммутационным связям между элементами сети. Особенностью данной структуры является наличие мультиконтактных коммутационных систем (узел V_3), которые позволяют изменять топологию сети, и, как следствие, создавать множество подграфов.

Для каждого конкретного состояния коммутационных аппаратов можно определить соответствующий подграф $G(s)$, включающий только те ребра, которые находятся во «включенном» состоянии. Именно этот подграф определяет фактическую схему электроснабжения в данный момент времени.

Формализация состояния сети

Состояние распределительной сети определяется положением контактных групп МКС. Для его описания необходимо ввести вектор состояния:

$$S = (S_1, S_2, \dots, S_n), \text{ где } S_i \in \{0, 1\},$$

Каждая переменная S_i соответствует состоянию отдельной контактной группы: значение 1 означает замкнутое состояние, 0 – разомкнутое. На рисунке 1 зададим положения контактов и присвоим переменным:

Таблица 1

Соответствие линий и переменных S

Переменная	Соединение / линия
S_1	Соединение V1-V3
S_2	Соединение V2-V3
S_3	Линия V3-V4
S_4	Линия V4-V5
S_5	Линия V4-V6
S_6	Линия V3-V7
S_7	Линия V7-V8

Таким образом, каждому вектору состояния S соответствует определенная конфигурация сети. С учетом введенного ранее представления, данному состоянию можно сопоставить подграф $G(s)$, содержащий только активные ребра. Множество всех возможных состояний обозначим через S . Его мощность определяется числом управляемых контактных групп и в общем случае составляет 2^n . При увеличении числа коммутационных элементов размер пространства состояний растет экспоненциально, что существенно усложняет анализ и выбор конфигурации сети. При этом не каждое состояние из множества S является допустимым. Часть комбинаций приводит к недопустимым режимам работы сети, таким как образование замкнутых контуров или параллельная работа независимых источников. В связи с этим вводится подмножество допустимых состояний $S_d \subset S$, включающее только те состояния, которые удовлетворяют заданным ограничениям.

Критерии допустимости состояния

Часть комбинаций состояния контактных групп приводит к недопустимым топологиям или режимам, что, в свою очередь, требует введения в алгоритм множества допустимых состояний $S_d \subset S$. [7]

Формирование такого множества осуществляется на основе системы ограничений, которые можно разделить на 4 группы [6]:

1. Топологические ограничения – связаны со структурой подграфа $G(s)$, соответствующего состоянию сети. В большинстве распределительных сетей 0,4 кВ требуется обеспечение радиальной структуры. Это означает, что допустимое состояние должно удовлетворять условию ацикличности подграфа $G(s)$. Кроме того, для каждого потребителя должен существовать только один путь питания от источника.

2. Логические ограничения – определяются конструкцией МКС и особенностями их работы. К таким ограничениям могут относиться:

- невозможность одновременного включения некоторых контактных групп;
- фиксированные зависимости между положениями контактов;
- ограничения на последовательность переключений.

3. Функциональные ограничения – связаны с обеспечением корректной работоспособности сети. Необходимо следить за соблюдением связности с источником питания для каждого потребителя;

4. Ограничения, связанные с источниками питания – при наличии нескольких источников питания необходимо исключить их параллельную работу. В графовой модели это означает, что в подграфе $G(s)$ не должно существовать путей, соединяющих различные источники между собой через замкнутую структуру.

С учетом всех вышеперечисленных ограничений и условий можно сделать вывод о том, что множество допустимых состояний определяется как подмножество всех возможных состояний, для которых соответствующий подграф $G(s)$ удовлетворяет всем введенным ограничениям.

Метод поиска допустимых состояний

После формирования множества всех возможных состояний S и определения условий допустимости возникает задача практического выделения подмножества допустимых состояний S_d и выбора предпочтительной конфигурации сети. Полный перебор всех состояний s , которые принадлежат множеству S является неэффективным вследствие экспоненциального роста мощности множества S , поэтому поиск ограничивается окрестностью текущего состояния сети.

Пусть текущее состояние сети задано вектором S_0 . Вектор состояния S представляет собой набор бинарных переменных $(S_1, S_2, \dots, S_n)$, где каждая переменная соответствует состоянию отдельной контактной группы: значение 1 означает замкнутый контакт, значение 0 – разомкнутый.

Для ограничения области поиска рассматриваются только те состояния, которые отличаются от текущего не более чем на k переключений. Формально множество таких состояний задается следующим неравенством:

$$S_{\text{канд}} = \{s \in S : d(s, s_0) \leq k\},$$

где $d(s, s_0)$ – расстояние Хэмминга, то есть количество позиций, в которых векторы s и s_0 различаются. По сути, это число переключений контактных групп, необходимых для перехода из состояния s_0 в состояние s .

Предлагаемый метод включает последовательность следующих шагов:

Шаг 1. Формирование множества кандидатных состояний.

Формируется множество $S_{\text{канд}}$, включающее состояния, отличающиеся от текущего состояния не более чем на k переключений (формула была описана выше).

Шаг 2. Построение графа состояния.

Для каждого состояния $s \in S_{\text{канд}}$, строится подграф $G(s) = (V, E(s))$, где V - множество узлов сети, $E(s)$ - множество активных рёбер, определяемых вектором состояния s .

Шаг 3. Проверка ограничений на источники питания.

Исключаются состояния, в которых существует путь между различными источниками питания. Формально:

$$\forall u1, u2 \in \text{Узл. Пит.}, u1 \neq u2 \Rightarrow \text{путь}(u1, u2) = \emptyset$$

Здесь путь (u_1, u_2) означает наличие пути между узлами u_1 и u_2 , то есть последовательности рёбер, соединяющих эти вершины. Отсутствие такого пути гарантирует, что источники не соединены между собой через сеть.

Шаг 4. Проверка обеспечения питания потребителей.

Проверяется наличие связи каждого потребителя с источником питания:

Обозначим через «Узл.Потр» множество узлов, соответствующих потребителям. Тогда для каждого потребителя $v \in \text{«Узл.Потр»}$ должно выполняться условие: существует хотя бы один источник u из множества «Узл.Пит», для которого в графе $G(s)$ существует путь от U к V . Это означает, что каждый потребитель должен быть связан с источником питания хотя бы по одному маршруту.

$\forall V \in \text{Узл. Потр}, \exists U \in \text{Узл. Пит} : \text{путь}(U, V)$

Шаг 5. (При необходимости) Проверка радиальности структуры.

Дополнительно может проверяться отсутствие циклов в графе $G(s)$, что соответствует радиальной структуре сети.

Шаг 6. Формирование множества допустимых состояний.

Состояния, удовлетворяющие всем ограничениям, включаются в множество:

$S_d = \{s \in S_{\text{канд}} : \text{состояние } s \text{ удовлетворяет всем ограничениям}\}$

Шаг 7. Вычисление функции качества.

Для каждого состояния $s \in S_d$ вычисляется функция качества. В простейшем случае:

$$F(s) = N_{\text{откл}}(s)$$

где $N_{\text{откл}}(s)$ - число узлов из множества Узл.Потр, для которых в графе $G(s)$ отсутствует путь к источникам питания.

В общем случае используется взвешенная функция:

$$F(s) = w_1 \cdot N_{\text{откл}}(s) + w_2 \cdot N_{\text{п}}(s)$$

где $N_{\text{п}}(s)$ - число переключений (то есть значение расстояния Хэмминга $d(s, s_0)$); w_1 и w_2 – весовые коэффициенты, задающие приоритет между минимизацией числа отключенных потребителей и количества переключений (расчет данных весовых коэффициентов тема для отдельной будущей статьи из данного цикла).

Шаг 8. Выбор предпочтительного состояния.

Искомое состояние определяется как:

$$s^* = \operatorname{argmin} F(s), \text{ при } s \in S_d.$$

В таком случае задача выбора состояния формулируется так: необходимо найти такое состояние s^* , при котором функция $F(s)$ принимает минимальное значение среди всех допустимых состояний:

Таким образом, метод включает формирование множества допустимых состояний в окрестности текущего состояния и выбор из них наилучшей конфигурации на основе заданного критерия. Вышеизложенный метод показан в виде блок-схемы на рисунке 2:

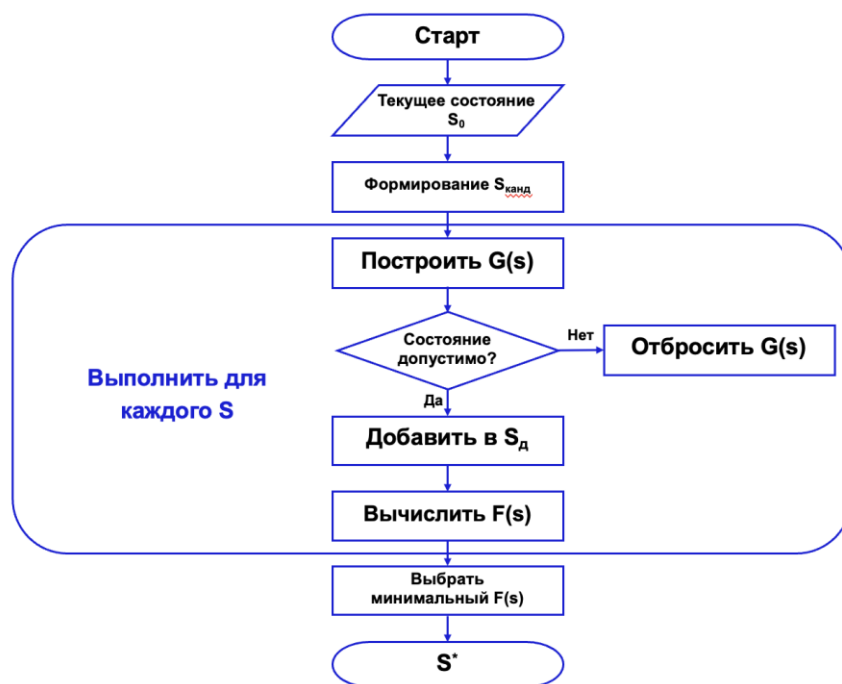


Рисунок 2. Блок-схема представленного алгоритма

Пример применения метода

Для демонстрации работы предложенного метода рассмотрена тестовая схема распределительной сети CIGRE, включающая два источника питания, мультиконтактную коммутационную систему и группу потребителей. (Рис. 1)

В таблице приведены результаты анализа нескольких состояний сети, включая допустимые и недопустимые конфигурации. Для каждого состояния определены факт допустимости, количество отключённых потребителей $N_{\text{откл}}$, число переключений $N_{\text{п}}$ и значение функции качества $F(s)$.

Таблица 2.

Результаты анализа состояний тестовой сети

№	Состояние S	Описание конфигурации	Допустимость	$N_{\text{откл}}(s)$	$N_{\text{п}}(s)$	$F(s)$
1	{1,0,1,1,1,1,1}	Питание от источника V1	Да	0	0	0
2	{0,1,1,1,1,1,1}	Питание от источника V2	Да	0	1	w_2
3	{1,1,1,1,1,1,1}	Источники соединены	Нет	—	—	—
4	{1,0,1,1,0,1,1}	Отключен узел V6	Да	1	1	$w_1 + w_2$
5	{1,0,1,0,0,1,1}	Отключены V5 и V6	Да	2	2	$2w_1 + 2w_2$
6	{0,1,1,1,1,0,0}	Частичное питание от V2	Да	2	2	$2w_1 + 2w_2$

В таблице представлены результаты анализа нескольких состояний тестовой сети. Показано, что часть состояний не удовлетворяет условиям допустимости, в частности состояние №3 приводит к параллельной работе источников и исключается из рассмотрения.

Среди допустимых состояний наблюдается различие по числу отключённых потребителей и количеству необходимых переключений. Минимальное значение функции качества достигается для состояния №1, соответствующего исходной конфигурации сети, а также для состояния №2, обеспечивающего питание от резервного источника.

Выводы

В работе предложена графовая модель представления состояний распределительной сети 0,4 кВ с мультиконтактными коммутационными системами. Сформулированы условия допустимости конфигураций, исключающие недопустимые режимы работы сети.

Разработан метод поиска допустимых состояний в ограниченной окрестности текущего состояния и предложен критерий выбора предпочтительной конфигурации. Полученные результаты могут служить основой для будущей разработки алгоритмов автоматической реконфигурации распределительных сетей.

Список литературы

1. Виноградов Александр Владимирович ТИПЫ МУЛЬТИКОНТАКТНЫХ КОММУТАЦИОННЫХ СИСТЕМ // Агротехника и энергообеспечение. 2019. №2 (23). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tipy-multikontaktnyh-kommutatsionnyh-sistem> (дата обращения: 31.03.2026).
2. Виноградов Александр Владимирович, Васильев Алексей Николаевич, Седых Иван Александрович, Виноградова Алина Васильевна ВАРИАНТЫ ПРИМЕНЕНИЯ МУЛЬТИКОНТАКТНЫХ КОММУТАЦИОННЫХ СИСТЕМ ТИПА МКСМ-4 В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 0,4 КВ // Агротехника и энергообеспечение. 2020. №2 (27). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/varianty-primeneniya-multikontaktnyh-kommutatsionnyh-sistem-tipa-mksm-4-v-elektricheskikh-setyah-0-4-kv> (дата обращения: 31.03.2026).
3. Авдеев Я. В. Предпосылки для создания «умных сетей» на 0,4 кВ // V Всероссийская молодежная научно-практическая конференция «Энергостарт». Кемерово, 2022. С. 201-1–201-7.
4. CIGRE Task Force C6.04.02. Benchmark Systems for Network Integration of Renewable and Distributed Energy Resources. Paris: CIGRE, 2014.
5. Шалыгин А. С., Кудрин Б. И. Электроснабжение промышленных предприятий. М.: Энергоатомиздат, 2006. 672 с.
6. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014.
7. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации. М.: Энергоатомиздат, 2003.