

Лоскутов А. Б., д-р техн. наук, проф.,  
Соснина Е. Н., канд. техн. наук, доц.,  
Шалухо А. В., аспирант,  
Зырин Д. В., аспирант

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

## ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В ГЕКСАГОНАЛЬНЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ\*

Shaluh.Andrey@mail.ru

*Повысить возможности управления и резервирования электрических сетей возможно путем перехода к новой технологии распределения электрической энергии – гексагональной (сотовой) структуре построения сетей. Изложена методика расчета токов установившегося трехфазного короткого замыкания в гексагональной распределительной электрической сети. Методика может быть использована для выбора оборудования и проверки возможности функционирования данных сетей.*

**Ключевые слова:** гексагональные электрические сети, ток короткого замыкания, методика.

Разработка интеллектуальных систем передачи и распределения электроэнергии, позволяющих осуществлять автоматическое управление электросетями и объединяющих в едином канале по силовым цепям энергетические, информационные и финансовые потоки, является одним из ключевых направлений развития электроэнергетики России.

Реализовать концепцию интеллектуальных распределительных сетей позволяет гексагональная (сотовая) топология равномерно-распределенной сети [1].

Находящиеся в эксплуатации электрические сети 6-10 кВ слабоуправляемы и не удовлетворяют необходимому уровню надежности. Недостатки существующей магистрально-радиальной топологии электрических сетей заключаются в усугублении последствий каскадных аварий, отсутствии достаточной связности между узлами сети, что приводит к невозможности обеспечения электроэнергией отключенных потребителей.

Гексагональная сеть имеет топологию в виде правильных шестиугольников (сотовая конфигурация электрической сети) и представляет собой совокупность территориально равномерно-распределенных узлов нагрузки, соединенных проводниками одинакового сечения. Сотовая структура позволит полностью автоматизировать распределительные сети, управлять распределением и потреблением электроэнергии, что существенно повысит надежность и экономичность функционирования и развития сетей, а также улучшит качество поставляемой потребителям электрической энергии при ее удешевлении [1, 2].

Создание гексагональных распределительных сетей потребует глубокой автоматизации генерирующих источников и потребителей и, как следствие, увеличение числа применяемых коммутационных аппаратов, устройств защиты и автоматики, информационно-технологических и управляющих систем.

Решения задач выбора оборудования и проверки возможности функционирования гексагональных сетей при заданных условиях основаны на информации об уровнях токов короткого замыкания (ТКЗ).

Сложная конфигурация гексагональной сети и наличие параллельной работы питающих источников не позволяют применять методики расчета токов короткого замыкания, адаптированные для радиальных распределительных сетей. В связи с этим возникает необходимость в разработке оценочных методов расчета токов короткого замыкания в гексагональных электрических сетях.

В сетях сложной конфигурации расчет ТКЗ возможно осуществлять с помощью различных программных продуктов на основе одного из матричных методов (рис. 1).

Суть метода узловых потенциалов заключается в решении системы линейных алгебраических уравнений, неизвестными в которой являются потенциалы в узлах цепи. Кроме потенциалов во всех узлах цепи метод позволяет определить токи во всех ветвях [3].

При расчете методом контурных токов за неизвестные величины принимаются токи в контурах, образованных путем условного деления электрической цепи.



Рис. 1. Методы расчета ТКЗ в сетях сложной конфигурации

Метод сингулярных ветвей (МСВ) предложен специалистами Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеяева. Сущность метода заключается в разделении всех ветвей электрической цепи на две группы – сингулярные и обычные, и выражении токов сингулярных ветвей через взвешенные суммы токов в обычных ветвях. Сингулярными называются ветви, если протекающий по ним ток не зависит от параметров данной ветви. Обычные ветви содержат ненулевое сопротивление (в общем случае комплексное), независимый или управляемый источник тока и не содержат элементов других типов. МСВ предполагает составление и решение системы линейных уравнений относительно неизвестных потенциалов в узлах сети составленной на основании 1-го закона Кирхгофа (методом аналогичным методу узловых потенциалов) и вычисления токов в ветвях на основании полученных потенциалов.

Каждый из трех рассмотренных методов расчета ТКЗ имеет свои достоинства и недостатки (таблица 1).

Данные методы и их модификации удобно применять при научных исследованиях, интегрируя их в различные программные обеспечения. Однако для гексагональных сетей требуется создание упрощенной инженерной методики расчета ТКЗ.

Разработка методики расчета ТКЗ в гексагональной распределительной электрической сети предполагает анализ величин токов короткого замыкания в зависимости от различных режимов работы сетей электросетевого района. Для решения этой задачи в программе Simulink [4] созданы имитационные модели гексагональных распределительных сетей напряжением 10 и 20 кВ. Для всех узлов схем имитационных моделей выполнены расчеты токов установившегося трехфазного короткого замыкания. Результаты расчетов для имитационной модели 20 кВ приведены на рис. 2.

Таблица 1

#### Достоинства и недостатки методов расчета ТКЗ в сетях сложной конфигурации

| Метод | Достоинства   | Недостатки   | Сфера применения   |
|-------|---|--|--|
| МУП   | Простота алгоритма  | Сложность расчета цепей при наличии индуктивно связанных элементов | Схемы с большим количеством параллельных ветвей между узлами |
| МКТ   | Возможность расчета любой линейной электрической цепи   | Трудоемкость построения матрицы главных контуров                   | Расчет уставок релейной защиты                               |
| МСВ   | Возможность расчета цепей, содержащих взаимные индуктивности и идеальные источники напряжений | Требует интегрирования в программное обеспечение                   | Научные исследования   |

Из рисунка 2 следует, что ТКЗ в узлах, расположенных на одинаковых кратчайших расстояниях от ближайших источников питания, име-

ют близкие значения. На рис. 3 показано распределение токов в ветвях гексагональной сети, в случае короткого замыкания в одном из узлов.

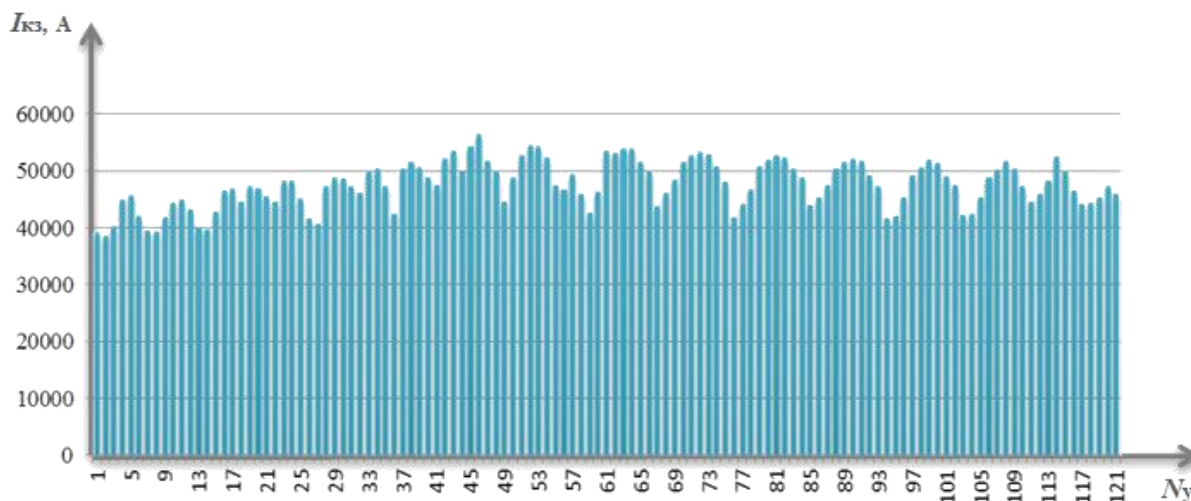


Рис. 2. Значения ТКЗ в модели гексагональной сети 20 кВ

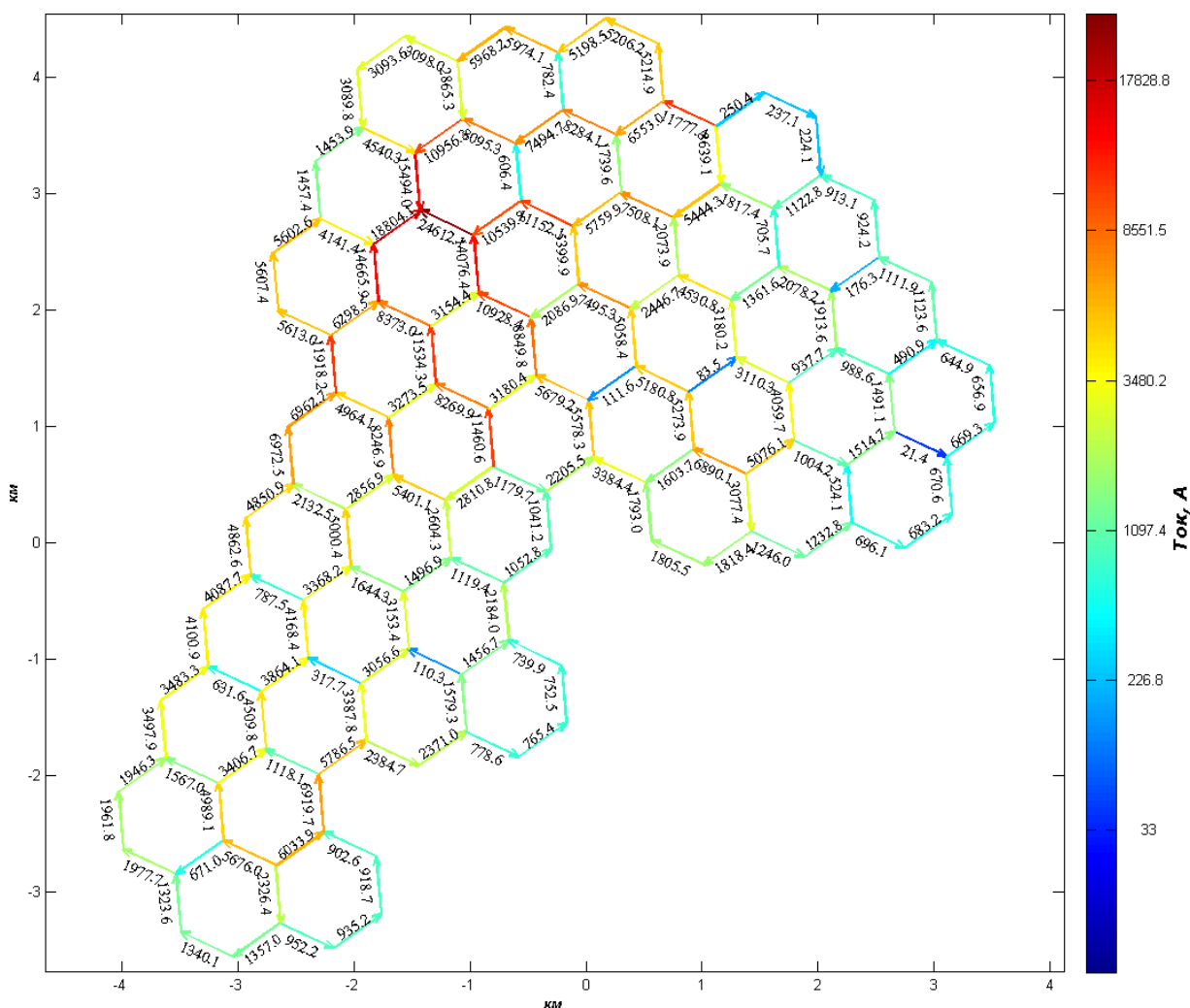


Рис. 3. Распределение токов в ветвях модели гексагональной сети 20 кВ при коротком замыкании в одном из узлов

Исходя из полученных результатов выдвинуто предположение: основной ток короткого замыкания будет протекать по кратчайшему пути от питающих источников к месту повреждения (соответствующий меньшему сопротивле-

нию). С учетом этого построены графы и эквивалентные схемы замещения для расчета короткого замыкания в узлах рассматриваемой схемы (рис. 4).

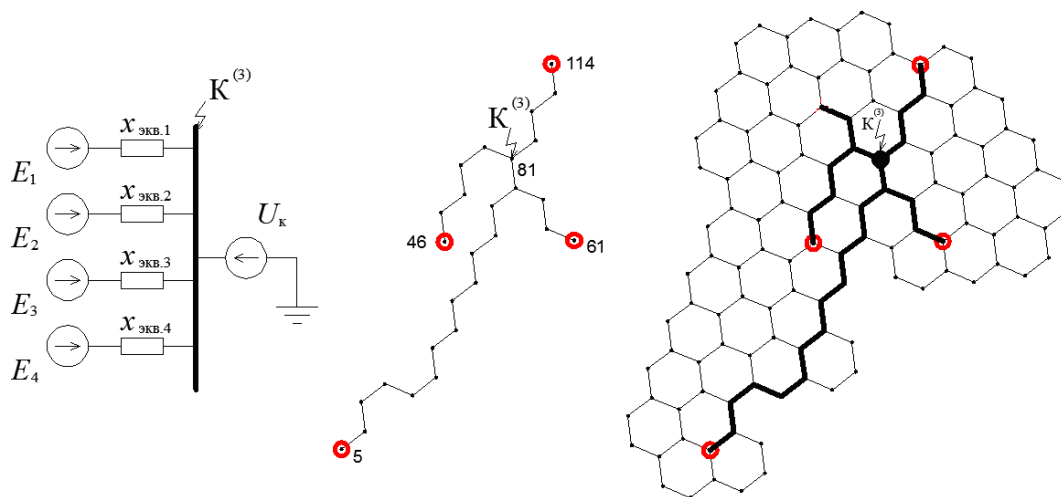


Рис. 4. Эквивалентная схема замещения и ее граф, выделенный из основного графа сети 20 кВ

Для построения эквивалентной схемы замещения от каждого питающего узла определено минимальное расстояние до точки короткого замыкания, то есть рассчитано число линий единичной длины (равных шагу сети). Источники энергии и обобщенные нагрузки узлов введены в схему в виде ЭДС [5].

На основании полученных схем выполнен расчет ТКЗ (по аналогии с радиальными схемами, содержащими несколько источников и работающими параллельно) путем сворачивания эквивалентной схемы и приведению ее к виду, представленному на рис. 5.



$$I_{КЗ} = \frac{E_{\text{экв}}}{x_{\text{экв}}}, \tag{1}$$

где  $E_{\text{экв}}$  – результирующая эквивалентная ЭДС относительно расчетной точки КЗ, кВ;

$x_{\text{экв}}$  – результирующее эквивалентное сопротивление относительно расчетной точки КЗ, Ом.

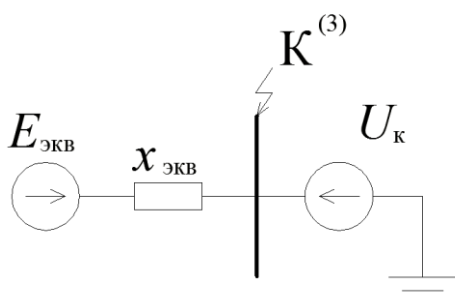


Рис. 5. Свернутая схема для расчета тока короткого замыкания

Токи короткого замыкания, рассчитанные при имитационном моделировании (приняты за фактические) отличаются от токов, рассчитанных по эквивалентной схеме (ожидаемые токи). Причем последние при замыкании в узлах, находящихся на расстоянии одного шага сети, отличаются от реальных токов на некий коэффициент  $k'$ . Находящихся на расстоянии в два шага сети, отличаются от реальных токов на некий коэффициент  $k''$  и т.д. Коэффициент подобран таким образом, чтобы разница между реальными и ожидаемыми токами КЗ не превышала погрешность 5%.

Таким образом, для инженерных оценочных расчетов тока короткого замыкания в гексагональной распределительной сети возможно использовать формулу:

$$I_{КЗ} = \frac{E_{\text{эВ}}}{k_{\text{КЗ}} \cdot x_{\text{эВ}}} \tag{2}$$

где  $E_{\text{экв}}$  – результирующая эквивалентная ЭДС относительно расчетной точки КЗ, кВ;  $X_{\text{экв}}$  – результирующее эквивалентное сопротивление относительно расчетной точки КЗ, Ом;  $k_{\text{ветв}}$  – эмпирический коэффициент ветвления, учитывающий удаленность точки короткого замыкания от ближайшего питающего узла.

Установлено, что на величину коэффициента ветвления большое влияние оказывает расположение точки короткого замыкания по отношению к питающим источникам. Погрешность расчета тока короткого замыкания оценочной методикой в точке, равноудаленной от питающих узлов, больше, чем в других точках. Так для сети 20 кВ величина коэффициента ветвления лежит в диапазоне 1,0-1,37.

Разработанная методика расчета токов короткого замыкания в гексагональной распределительной электрической сети, позволяет определять уровни токов установившегося трехфазного металлического симметричного короткого замыкания и таким образом, может быть использована для выбора аппаратов, проводов, шин и кабелей в указанной сети.

*\*Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (госконтракт № 14.516.11.0104 от 14.10.2013 г.).*

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лоскутов, А.Б. Новый подход к построению электрических распределительных сетей России / А.Б. Лоскутов, Е.Н. Соснина, А.А. Лоскутов // Вестник БГТУ им. В.Г.Шухова. 2011. № 3. -С. 148-152.
2. Соснина, Е.Н. Топология городских распределительных интеллектуальных электрических сетей 20 кВ / Е.Н. Соснина, А.Б. Лоскутов, А.А. Лоскутов // Промышленная энергетика. 2012. -№ 5. -С. 11-17.
3. ГОСТ Р 52735-2007 «Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ» (принят 12 июля 2007 года Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии).
4. «MATLAB. Exponenta» – URL: <http://matlab.exponenta.ru>. Дата обращения 11.10.2013 г.
5. РД 153-34.0-20.527-98 Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования.-М.: НЦ ЭНАС, 2002.