

УДК 004.72

С.А. Анисимов<sup>1</sup>, А.Б. Лоскутов<sup>1</sup>, И.В. Полозов<sup>1</sup>, А.И. Смирнов<sup>2</sup>, Е.Н. Соснина<sup>1</sup>

## РАЗРАБОТКА ПРОТОКОЛА МАРШРУТИЗАЦИИ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ГРИДАХ СЛЕДУЮЩЕГО ПОКОЛЕНИЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>1</sup>,  
Общество с ограниченной ответственностью «Теком»<sup>2</sup>, г. Н. Новгород

**Цель работы:** Исследование и разработка протокола маршрутизации системы управления электрическими сетями, состоящими из распределительных узлов, содержащих интегрированные модули системы управления электрическими сетями и обеспечивающих одновременную возможность автономной работы каждого узла и централизованное управление всей совокупностью элементов энергосети.

**Научный подход:** Исследование проведено с использованием графовой модели электрических сетей и с использованием графа коммутационной схемы для модели электрических схем.

**Результат:** Разработана общая концепция, архитектура и протокол маршрутизации сети, состоящей из узлов – интегрированных модулей системы управления электрическими сетями (ИСУЭС) и узлов распределённой системы мониторинга (РСМ).

**Новизна:** Результаты исследования новы и могут иметь практическое приложение для хозяйственных задач электроэнергетики, связанных с процессами генерации, распределения и учёта электроэнергии и инвентаризации оборудования узлов. Работа выполнена при финансовой поддержке министерства образования и науки РФ (ГК № 16.516.11.6063 от 28.04.2011).

*Ключевые слова:* протокол маршрутизации, интегрированная система управления электрическими сетями, топология, граф.

В настоящее время под развитием электроэнергетики нередко понимают только рост генерирующих мощностей, не принимая во внимание, что увеличение лишь мощности нагрузки узла в существующих распределительных сетях с радиальной топологией приводит к усугублению последствий каскадных аварий, в результате которых без электричества остаются миллионы человек. Одним из примеров может служить авария, в которой многие города США и Канады 14 августа 2003 г. остались без электроэнергии в результате мощнейшего сбоя в работе энергосистем. Другим показательным примером является авария в энергосистеме Москвы 25 мая 2005 г. В случае использования связанной топологии сетей отказ одной части сети не приведет к потере поставки электроэнергии потребителям.

Опыт эксплуатации распределительных сетей 6-10 кВ, а также последствия известных аварий показывают, что существующая конфигурация сети 6-10 кВ не может удовлетворять необходимому уровню надежности [1]. С точки зрения надежности и равномерности распределения нагрузок наиболее рациональными являются «равномерно-распределенные сети». Распределенная электрическая сеть представляет собой совокупность равномерно-распределенных узлов потребления электрической энергии соединенных между собой равномерно-загруженными линиями одинакового сечения.

В работе [2] предложена концепция построения распределенной электрической сети, как совокупности равномерно-распределенных узлов нагрузки, организованных таким образом, чтобы территория города была покрыта равномерно-распределенной сетью, которая показана на рис. 1.

Узлы нагрузки представляют собой распределительные пункты с трехлучевой архитектурой. Первый луч – питающий, второй луч – транзитный, третий луч – резервный (находится в горячем резерве). Причем для любого узла соблюдается принцип инвариантности. Узел показан на рис. 2.

Данная сеть состоит из трех связанных уровней. В распределительной сети первого уровня, показанной на рис. 1, узлы нагрузки представляют собой распределительные пункты

20 кВ, в сети второго уровня – 220 кВ, а третьего уровня – свыше 500 кВ. Компланарное представление детально описано в [2] и представлено на рис. 3.

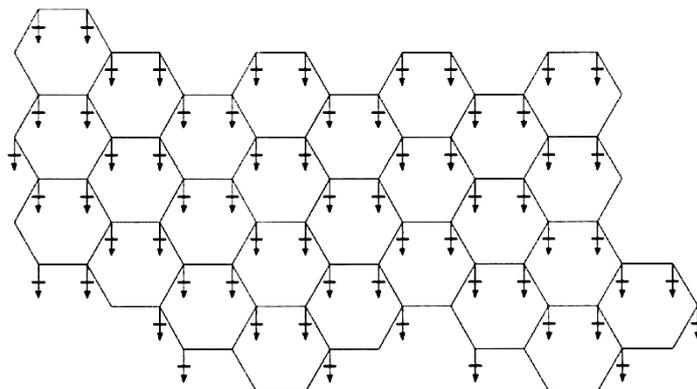


Рис. 1. Равномерно-распределенная сеть [2]

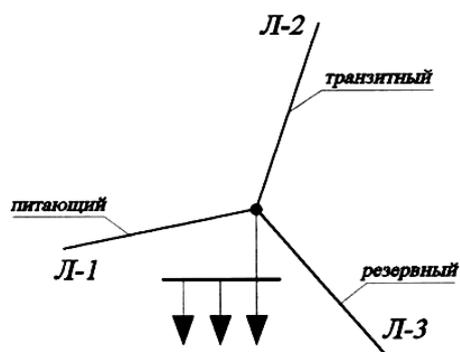


Рис. 2. Узел нагрузки [2]

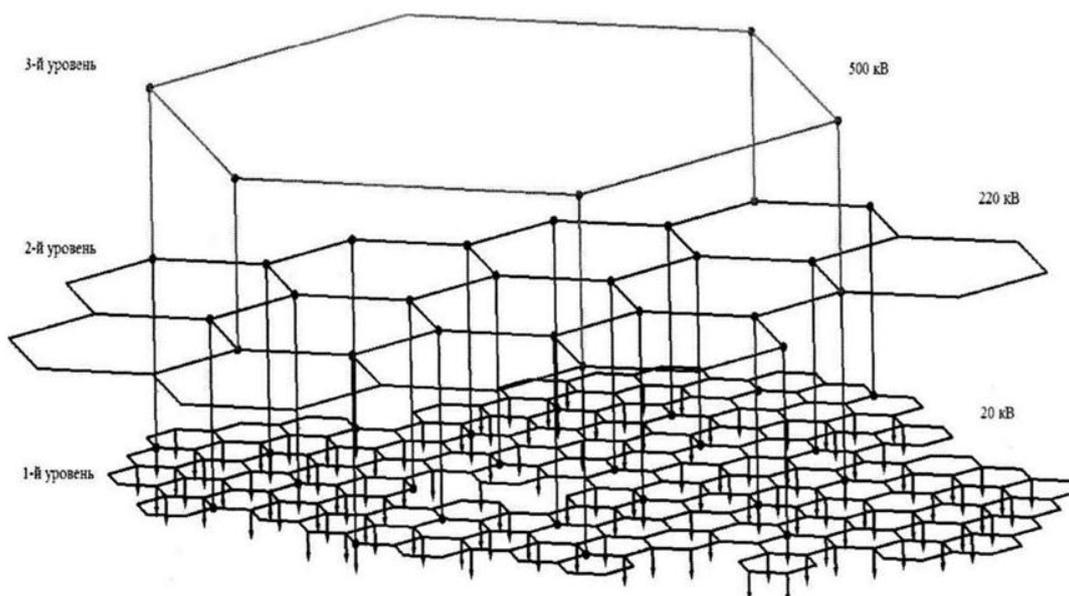


Рис. 3. Компланарное представление распределительных сетей

Основная проблема данной концепции заключается в отсутствии интеллектуальной системы управления. Предлагается для каждого узла, изображенного на рис. 3, использовать

интеллектуальный модуль. Таким образом, будет построена параллельная энергетической компьютерная сеть, которая будет осуществлять активное управление первой. Топология компьютерной сети совпадает с электрической сетью и показана на рис. 3. В работе [3] были предложены алгоритмы управления отказами первого уровня энергетического грида. Однако в настоящее время отсутствуют алгоритмы поиска ресурсов и протокол маршрутизации. В работах [4-6] показано решение аналогичных задач для децентрализованных компьютерных гридов следующего поколения.

Цель настоящей работы – разработка протокола маршрутизации между интегрированными модулями системы управления электрическими сетями (ИСУЭС), а также между ИСУЭС и распределенными системами мониторинга (РСМ) в энергетических гридах следующего поколения.

### Протокол маршрутизации

Модуль ИСУЭС осуществляет диагностику, защиту, измерение, контроль, учет, оперативное хранение гетерогенной информации. Кроме этого, данный модуль передает информацию на вышестоящий уровень иерархии сети (рис. 3). Данный модуль должен обеспечивать автономную работу при нарушении связи с другими устройствами. РСМ осуществляет сбор, хранение, визуализацию и агрегацию получаемой информации.

Сеть передачи данных ИСУЭС-РСМ может в общем виде быть представлена как ненаправленный граф, в узлах которого находятся ИСУЭС, а связи между узлами представлены линиями электропередачи. К некоторым узлам графа также подключены узлы РСМ. Данные от РСМ к ИСУЭС и между ИСУЭС разных уровней иерархии передаются так же, как и между двумя ИСУЭС. Логически вся сеть разбита на области – зоны ответственности разных РСМ. Каждая такая зона ответственности управляется одной РСМ. Также в каждой зоне сети существует вторая РСМ, находящаяся в состоянии холодного резерва. Топология сети представлена на рис. 4.

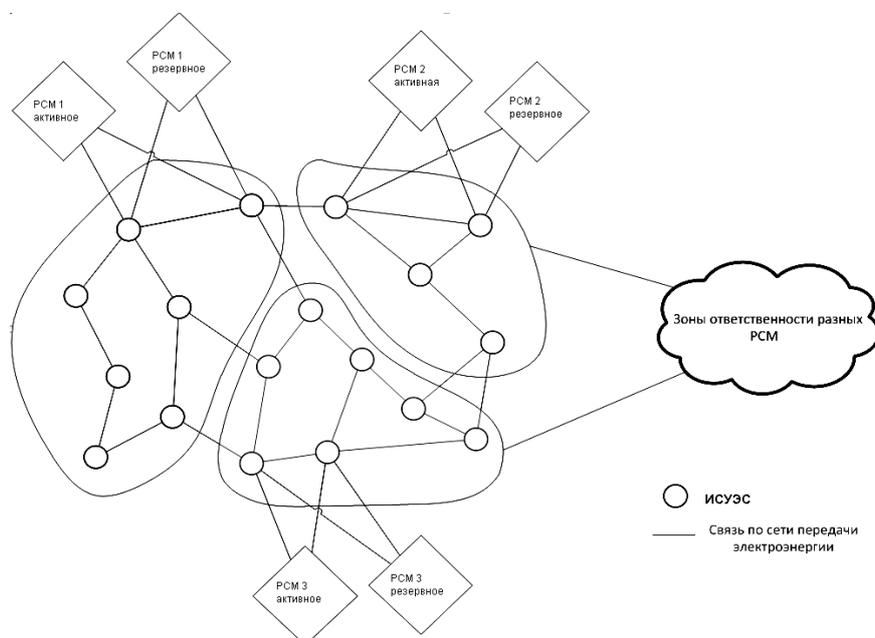


Рис. 4. Топология сети

Необходимо заметить, что данный протокол поддерживает также степень вершины графа больше трех. Данное допущение позволяет добиться универсальной работы протокола при изменении базовой модели. При построении протокола маршрутизации были приняты следующие допущения:

- 1) каждой ИСУЭС присвоен уникальный числовой идентификатор;
- 2) в каждой ИСУЭС содержится список родительских РСМ. Требуется обеспечить маршрутизацию сообщений от ИСУЭС до любой РСМ из этого списка;
- 3) идентификаторы всех РСМ хранятся в конфигурации ИСУЭС;
- 4) РСМ имеет информацию о топологии всей сети и своевременно получает информацию о ее изменении;
- 5) разрыв соединения – редкое событие (пуассоновский поток) по сравнению со скоростью передачи сообщений от ИСУЭС до РСМ.

Общие положения данного протокола показаны далее.

1. Каждая ИСУЭС содержит таблицу маршрутизации сообщений ко всем родительским РСМ. Для каждой РСМ таблица маршрутизации содержит идентификатор соседней ИСУЭС, которой надо переслать сообщение и число хопов – транзитных ИСУЭС, через которые сообщение будет проходить до РСМ.

2. Число хопов не может превышать 256 (параметр выбирается при конфигурации всего протокола).

3. Каждое сообщение содержит идентификатор отправителя, идентификатор получателя и порядковый номер, определяемый отправителем (уникальный для пары отправитель-получатель).

4. Каждое сообщение от РСМ к ИСУЭС содержит полный маршрут (список идентификаторов ИСУЭС), через которые оно будет доставлено получателю.

5. Для каждого сообщения от ИСУЭС к РСМ все транзитные ИСУЭС добавляют свой идентификатор в поле маршрута сообщения.

6. При получении любого сообщения от РСМ все ИСУЭС (не только получатель, но и транзитные ИСУЭС) анализируют длину маршрута. Если эта длина меньше числа хопов до данной РСМ, то таблица маршрутизации обновляется. Сохраняется только кратчайший маршрут. Информация об изменении таблицы маршрутизации отсылается всем соседним узлам [4].

7. При получении сообщения типов 1,2,3,6,7 получатель высылает специальное сообщение, подтверждающую доставку «АСК» (acknowledge).

8. При отсутствии «АСК» уведомления в течение 10 секунд (конфигурируемый параметр) отправитель повторно пересылает сообщение с тем же порядковым номером.

9. Получатель сохраняет сообщение в течение 2 минут. Если в этот промежуток времени получатель получает сообщение повторно, происходит повторная посылка «АСК» сообщения.

10. Если транзитный ИСУЭС не может переслать сообщение в связи с повреждением маршрута, происходит пересылка отправителю специального «ERR» сообщения. Для передачи настоящего сообщения используется инвертированный маршрут из исходного сообщения.

11. При получении «ERR» сообщения отправитель-ИСУЭС считает соединение до РСМ разорванным и действует в соответствии с пунктом 13 данного протокола.

12. При получении «ERR» сообщения отправитель-РСМ:

- a) сохраняет сообщение;
- b) помечает как недоступные все ИСУЭС, маршруты до которых идут через соединение между транзитным ИСУЭС, пославшим «ERR», и следующим ИСУЭС в маршруте исходного сообщения;
- c) отсылает широковещательное сообщение.

13. При обнаружении разрыва соединения («ERR» пакет или превышение количества попыток посылки пакета) ИСУЭС:

- a) удаляет из таблицы маршрутизации маршрут до РСМ, соединение с которым было потеряно;
  - b) отправляет всем своим соседним узлам информацию о том, что маршрут через данную ИСУЭС больше не действует (сообщение типа 10);
  - c) ждет ответа от соседних узлов (сообщение типа 10), в случае таймаута канал до соседнего узла помечается как недействующий;
  - d) Если у соседней ИСУЭС какой-либо из маршрутов проходил через удаленный маршрут, последняя удаляет данный маршрут в соответствии с пунктами 13.a-13.e;
  - e) Если у соседней ИСУЭС один из удаленных маршрутов проходит через другой путь, то она пересылает по этому маршруту специальное сообщение к РСМ «PING» с целью проверки доступности маршрута. При получении от РСМ «АСК» уведомления на «PING» сообщение маршрут признается действительным и передается обратно к проблемной ИСУЭС, которая перестроит таблицу маршрутизации. При получении «ERR» сообщения или при отсутствии «АСК» сообщения от РСМ маршрут считается недействительным и ИСУЭС переходит к шагу 14.a.
14. Сообщение «PING» – есть сообщение с пустым телом, требующее ответа в виде сообщений «АСК» или «ERR».
15. При подключении новой РСМ происходит рассылка ширококвещательного сообщения о своей доступности. Каждое ИСУЭС, получившее данное сообщение, отправляет «АСК» уведомление.
16. Широковещательное сообщение передается от ИСУЭС всем соседним узлам, за исключением отправителя.
17. Все идентификаторы ширококвещательных сообщений хранятся на ИСУЭС в течение 2 минут. Если в течение этого времени было получено сообщение от той же РСМ с тем же идентификатором, оно игнорируется.
18. При получении (первом или повторном) ширококвещательного сообщения ИСУЭС обновляет свою таблицу маршрутизации (в соответствии с п.6).
19. Каждая ИСУЭС хранит список родительских РСМ. Если ИСУЭС получает транзитное сообщение с отправителем или получателем РСМ не из настоящего списка, то сообщение игнорируется и при необходимости (в зависимости от типа сообщения) высылается сообщение «ERR».
20. Обнаружение восстановления разорванной связи с соседним узлом происходит в режиме опроса каждые 30 секунд (конфигурируемый параметр): по каналу связи с соседним узлом отправляется сообщение «DISCOVERY» (тип 9).
21. При получении сообщения «DISCOVERY» РСМ и ИСУЭС отправляют по тому же каналу ответ: сообщение типа 10.
22. При обнаружении восстановленного соединения (получение сообщения типа 10):
- a. ИСУЭС обновляет свою таблицу маршрутизации на основании информации в сообщении;
  - b. В случае, если таблица маршрутизации была обновлена, обновленная таблица рассылается всем соседним узлам.
23. Алгоритм восстановления соединения п. 22 выполняется для каждой ИСУЭС на конце восстановленного соединения независимо друг от друга.

#### **Формат и виды сообщений в протоколе маршрутизации**

Формат передаваемых сообщений представлен на рис. 5.

Формат сообщения в протоколе канального уровня



Рис. 5. Формат сообщений в протоколе маршрутизации

Краткое описание типов сообщений приведено в табл. 1.

Таблица 1

Тип сообщения 1	Назначение 2	Параметры 3
1. Обычное сообщение. Отправитель ИСУЭС, получатель РСМ 6. Ответ для РСМ на сообщение 2 типа	Сообщение о состоянии, аварийных сообщений и пр.	1. ID ИСУЭС-отправителя 2. ID РСМ-получателя 3. message ID - идентификатор сообщения 4. Тело сообщения
2. Обычное сообщение. Отправитель РСМ, получатель ИСУЭС 7. Ответ для ИСУЭС на сообщение 1 типа	Посылка управляющих команд	1. ID РСМ-отправителя 2. ID ИСУЭС-получателя 3. message ID - идентификатор сообщения 4. Полный путь до ИСУЭС-получателя (список ID транзитных ИСУЭС) 5. Тело сообщения
3. Сообщение «PING»	Пустое сообщение типа 1 (отправитель ИСУЭС, получатель РСМ)	1. ID ИСУЭС-отправителя 2. ID РСМ-получателя 3. message ID - идентификатор сообщения
4. Сообщение «ACK»	Уведомление о получении сообщения типа 1-3,6-7	1. ID отправителя 2. ID получателя 3. message ID - идентификатор сообщения, совпадает с идентификатором оригинального сообщения 4. Полный путь до получателя (список ID транзитных ИСУЭС, взятый из принятого сообщения)
5. Сообщение «ERR»	Уведомление об отсутствии пути к получателю по заданному маршруту (для сообщений типа 1-3,6-7)	1. ID отправителя - транзитная ИСУЭС 2. ID получателя (отправитель не доставленного сообщения) 3. message ID - идентификатор сообщения, совпадает с идентификатором оригинального сообщения 4. Полный путь до получателя (список ID транзитных ИСУЭС, взятый из принятого сообщения)
8. Сообщение «BROADCAST»	Широковещательное сообщение, рассылаемое РСМ 1. при включении; 2. по запросу оператора; 3. с определенной периодичностью	1. ID отправителя - РСМ 2. ID получателя (всегда 0) 3. message ID - идентификатор сообщения

Окончание табл. 1

1	2	3
9. Сообщение «DISCOVERY»	Запрос информации о соседе. Не пересылается другим устройствам. Получатель отвечает на запрос сообщение «ROUTE_UPDATE»	1. ID отправителя - ИСУЭС 2. ID получателя - всегда 0. 3. message ID - идентификатор сообщения
10. Сообщение «ROUTE_UPDATE»	Ответ на запрос информации о соседе и обновление таблицы маршрутизации. Не пересылается другим устройствам.	1. ID отправителя - ИСУЭС или РСМ. 2. ID получателя - всегда 0. 3. message ID - идентификатор сообщения. 4. для РСМ - пустое сообщение 5. для ИСУЭС - набор из 4-байтных big-endian слов. 5.1. keep-alive (ответ на информацию о потере соединения) - одно слово: 0 5.2 route removed (информация о потере соединения) - три слова: 0; ID РСМ, с которым потеряна связь; -1 (все единицы) 5.3 route update (информация о маршрутах, в ответ на «DISCOVERY» или при обновлении таблицы) - $2*n+1$ слов: ID активного РСМ; ID устройства первого маршрута; число транзитных ИСУЭС в первом маршруте; ID устройства второго маршрута и тд.
11. Сообщение «ISUES_TO_ISUES»	Сообщение от одного ИСУЭС другому	1. ID отправителя 2. ID получателя 3. message ID - идентификатор сообщения 4. Полный путь до получателя

Разработан гибкий универсальный протокол маршрутизации между ИСУЭС и РСМ в энергетических сетях следующего поколения. Определен формат сообщений и исчерпывающий их список. Работа представляет большой практический интерес при развертывании энергетических сетей следующего поколения

#### Библиографический список

1. **Воропай, Н.И.** / Об основных положениях Концепции обеспечения надежности в электроэнергетике / Н.И. Воропай, Г.Ф. Ковалев // Энергетическая политика, 2010. №3. С. 7–10.
2. **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. 147–151.
3. **Анисимов, С.А.** / Алгоритмы управления отказами в энергетических сетях следующего поколения / С.А. Анисимов, М.Н. Ушакова // Технические науки XVII Нижегородская сессия молодых ученых: материалы научно-технической конференции. – Нижний Новгород: НИУ РАНХиГС, 2012. С. 112–114.
4. **Анисимов, С.А.** / Протокол поиска ресурсов в децентрализованных сетях, обладающих свойствами тесного мира / С.А. Анисимов, В.А. Зыбин, В.В. Крылов // Труды НГТУ, 2009. Т. 80. №1. С. 13–19.
5. **Анисимов, С.А.** Распределение нагрузки в децентрализованных сетях, обладающих свойствами тесного мира // Вестник ННГУ, 2011. №3. С. 173–179.

6. **Анисимов, С.А.** Управление отказами в децентрализованных гридах обладающих свойствами тесного мира // Вестник ННГУ, 2011. №6. С. 214–218.

*Дата поступления  
в редакцию 24.07.2012*

**S.A. Anisimov<sup>1</sup>, A.B. Loskutov<sup>1</sup>, I.V. Polozov<sup>1</sup>, A.I. Smirnov<sup>2</sup>, E.N. Sosnina<sup>1</sup>**

**ROUTING PROTOCOL DEVELOPMENT IN THE DISTRIBUTED NEXT GENERATION  
ELECTRICAL POWER GRID**

**Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R.Y. Alexeev<sup>1</sup>,  
Tecom LLC<sup>2</sup>**

**Purpose:** Research and development of the routing protocol for the electrical network control system, which contains distribution centers. They support integrated module for the electrical network control system, and provide the opportunity of the off-line working of each node and centralized direction of the whole grid.

**Design/methodology/approach:** Research is conducted using graph model of the electrical power grid and circuit diagram for the electrical circuit model.

**Findings:** The main concept, architecture and routing network protocol have been developed. Network contains nodes: integrated modules for the electrical network control system and distributed monitoring system.

**Originality/value:** Findings of this work can be used in the area of commercial electrical power distribution, generation and metering, as well as power distribution equipment inventory. This work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, as part of government contract from April 28 2011, № 16.516.11.6063.

*Key words:* Routing Protocol, integrated modules for the electrical network control system, topology, graph.