

УДК 621.3

А.Б. Лоскутов, Е.Н. Соснина, А.А. Лоскутов, Д.В. Зырин

**ГОРОДСКИЕ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫЕ СЕТИ 10-20 кВ  
С ГЕКСАГОНАЛЬНОЙ КОНФИГУРАЦИЕЙ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрен вопрос построения новой конфигурации распределительных сетей 20 кВ. Предложены принципы формирования гексагональных сетей с активно-адаптивной системой управления узлами нагрузки. Приведены результаты Matlab моделирования сетей на примере распределительных сетей Нижнего Новгорода.

*Ключевые слова:* гексагональная конфигурация распределительных сетей, активно-адаптивная система управления, равномерно-распределенная сеть 20 кВ, PLC модем, интерфейс, интеллектуальные сети.

В современных городах-миллионниках часто имеют место проблемы электроснабжения, связанные с постоянным увеличением нагрузок, отставанием сетевой инфраструктуры от потребности в электрической энергии и мощности, значительными потерями электроэнергии в распределительных сетях (до 16%), физическим и моральным износом электрооборудования. В существующих распределительных сетях 6-10 кВ невозможно реализовать автоматическое управление распределением и потреблением электроэнергии на всех уровнях напряжения. Все это приводит к техническому пределу использования систем питания и распределения и, как следствие, к снижению надежности электроснабжения потребителей и авариям. Таким образом, переход на сети 20 кВ с радиально-магистральной конфигурацией (подобно сетям 6 – 10 кВ) не даст ожидаемых результатов. Новое направление развития электрических сетей – интеллектуальные сети (Smart Grid), направлено на модернизацию всей отрасли электроэнергетики.

Концепция «Smart Grid» предусматривает следующие основные задачи:

- обеспечение и повышение надежности распределительной сети;
- автоматическое управление элементами сети по адаптивным алгоритмам;
- управление режимами сети и локализация повреждений.

Единая технологическая и информационная платформа позволяет перейти от жесткой радиально-магистральной архитектуры сети к более гибкой равномерно распределенной сети, которая является адаптивной, при этом каждый узел сети является активным элементом, позволяющим производить переконфигурацию сети в соответствии с оптимальным режимом работы. Примером такой сети является гексагональная распределительная сеть, описанная в [1, 2, 3] и приведенная на рис. 1

Равномерно-распределенная электрическая сеть гексагонального типа позволяет реализовать концепцию гибких распределительных сетей.

Гексагональная сеть – это совокупность территориально равномерно-распределенных узлов нагрузки, соединенных между собой проводниками одинакового сечения и имеющая топологию в виде правильных шестиугольников (сотовая конфигурация электрической сети).

Одним из вопросов построения равномерно-распределенной сети сотовой конфигурации является шаг сети (длина линий между узлами).

Выбор шага сети между подстанциями на основании плотности нагрузки, делает возможным связать количество и мощность трансформаторов на РП с площадью рассматриваемой территории города. Исходя из этого, шаг сети (рис. 2) рассчитывается по следующей формуле:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot \Theta_{\text{гор}}}{3\sqrt{3} \cdot n_{\text{рп}}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot \Theta_{\text{гор}} \cdot S_{\text{рп}}}{3\sqrt{3} \cdot S_{\text{расч}}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot \Theta_{\text{гор}} \cdot (S_{\text{т}} \cdot n_{\text{т,узла}})}{3\sqrt{3} \cdot S_{\text{расч}}}}, \quad (1)$$

где  $d$  – шаг сети, т.е. расстояние между узлами нагрузки (между РП), км;  $S_{\text{расч}}$  – расчетная мощность потребления электроэнергии рассматриваемого района, МВА;  $\Theta_{\text{гор}}$  – площадью рассматриваемой территории, км<sup>2</sup>;  $n_{\text{рп}}$  – число распределительных пунктов;  $S_{\text{рп}}$  – единичная мощность распределительного пункта, МВА;  $n_{\text{т,узла}}$  – число трансформаторов, питающихся от РП;  $S_{\text{т}}$  – единичная мощность трансформатора, питающегося от РП, МВА.

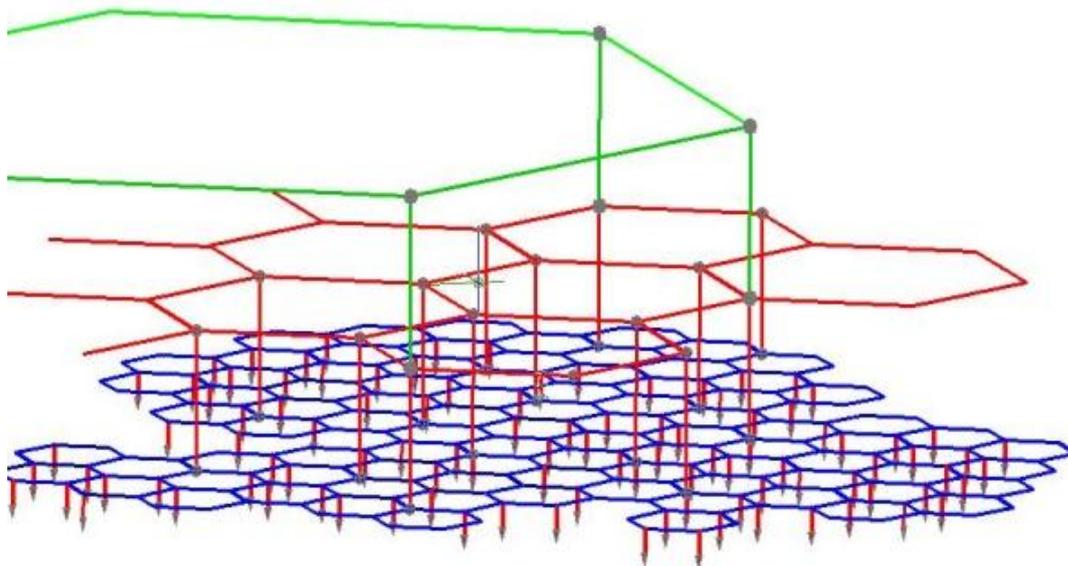


Рис. 1. Структура гексагональной распределительной сети различных уровней напряжения

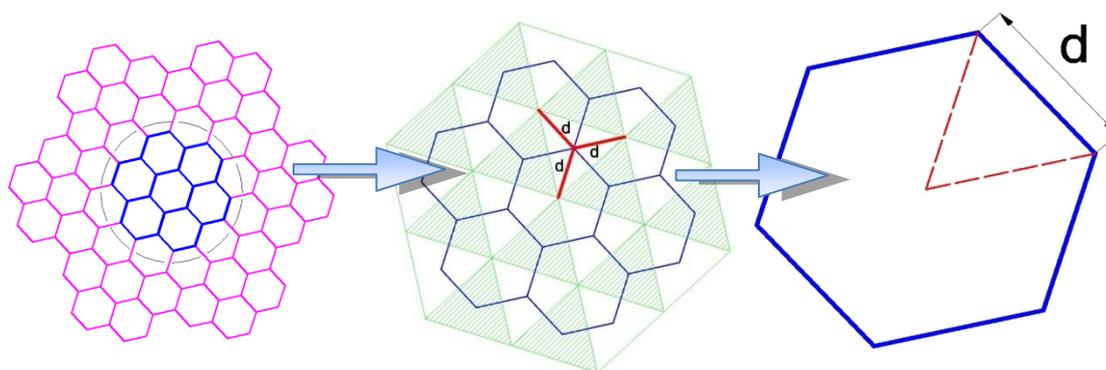
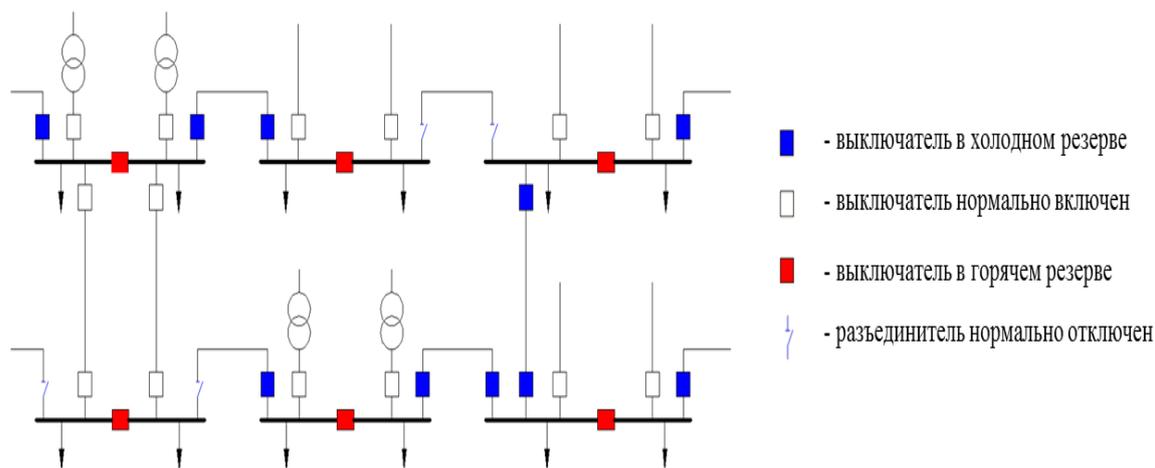


Рис. 2. Выбор шага сети

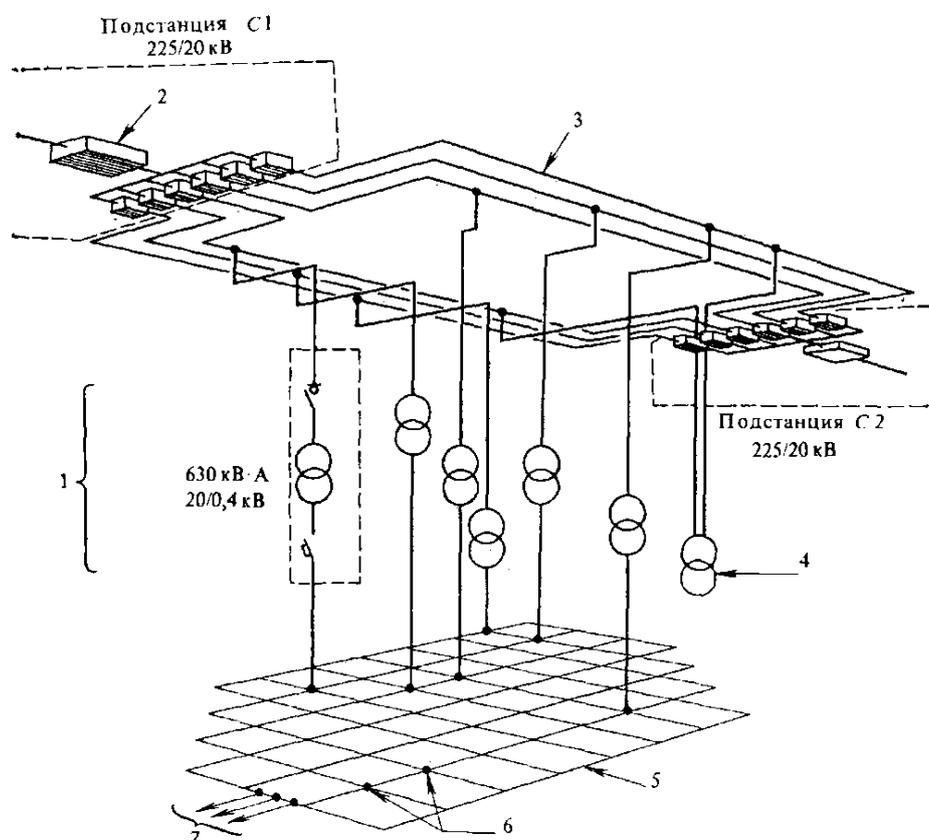
Если представить площадь, «покрываемую» узлом нагрузки (УН), в виде равностороннего треугольника, то расстояние от УН до потребителя будет всегда наименьшим в пределах данного треугольника.

Многokратно реконструируемые существующие в городские радиальные распределительные сети имеют большое количество резервных связей между распределительными пунктами 6-10 кВ (резервных перемычек), которые в нормальном режиме отключены (рис. 3). При авариях перемычки часто не справляются с обеспечением послеаварийного режима. В итоге низкая надежность сети.



**Рис. 3. Пример организации схем электроснабжения (питающие подстанции и распределительные пункты 6 – 10 кВ)**

Многочисленные дискуссии о переходе в распределительных сетях на напряжение 20 кВ не приходят к консенсусу. Какие конфигурации сетей брать за основу. Примером зарубежного опыта сооружения сетей 20 кВ может быть схема распределительной сети Парижа, приведенная на рис. 4, в которой использованы кольцевые перемычки для резервирования.

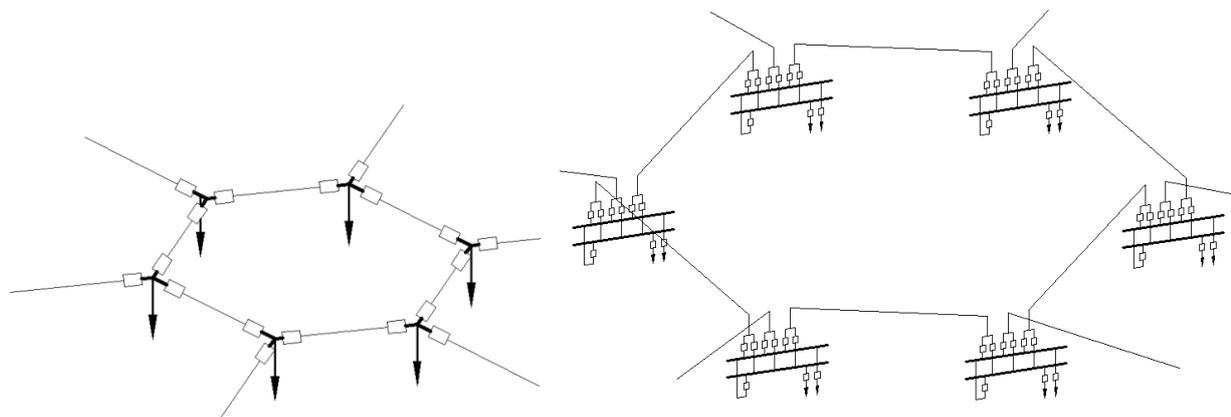


**Рис. 4. Распределительная сеть Парижа (разветвленная сеть НН питается от магистральной линии 20 кВ):**

1 – типовая подстанция СН/НН; 2 – линейный выключатель; 3 – половина магистральной линии СН; 4 – потребитель СН; 5 – разветвленная сеть НН; 6 – распределительные коробки сетей НН (на углах улиц); 7 – подключения сетей зданий

Поиск разнообразных схемных решений направлен на создание схем позволяющих автоматизировать процесс управления ими.

Наше предложение - **Гексагональные сети**, которые позволяют решить эти проблемы и перейти к четкой системной конфигурации сети, в которой все кабельные линии между РП находятся в работе, а сами РП питаются по трем линиям. Это позволяет сделать сеть более гибкой к ведению режима и увеличить надежность электроснабжения потребителей. Каждый узел в гексагональной сети является универсальным, а, следовательно, алгоритмы управления таких узлов универсальны.



**Рис. 5. Ячейка гексагональной сети с распределительным устройством в узлах нагрузки**

Переход к гексагональным сетям ведет к параллельной работе источников питания, что может привести к увеличению токов короткого замыкания в узлах нагрузки. Для некоторых устройств это недопустимо по динамической устойчивости.

Существующие методики расчета ТКЗ не применимы к гексагональным сетям. Действующий ГОСТ Р 52735-2007 регламентирует инженерный расчет ТКЗ в радиальных схемах. Для более сложных схем применяются методы контурных токов и узловых потенциалов [4,5]. Использование данных методик удобно в научных исследованиях, но не применимо к выбору гексагональных распределительных сетей. Поэтому была поставлена задача: выявить оптимальную методику инженерного расчета токов короткого замыкания в гексагональных распределительных сетях, а также определить оптимальную конфигурацию гексагональной распределительной сети.

Для исследования режимов работы гексагональных сетей были разработаны однолинейные Simulink-модели сети для района Нижнего Новгорода, имеющего среднюю плотность нагрузки 9 МВА/км<sup>2</sup>.

Параметры сети при различных режимах работы рассчитывались для двух рабочих линейных напряжений 10 и 20 кВ. Питающие узлы были заданы, исходя из возможной перспективы развития городской сети ВН. Предложена упрощенная методика инженерного расчета ТКЗ в гексагональных распределительных сетях.

Ток короткого замыкания  $i$ -го узла равен току, рассчитанному по эквивалентной схеме. Для построения эквивалентной схемы замещения, необходимо на графе от каждого питающего узла определить минимальное расстояние до точки КЗ, т.е. число линий  $N_i$  единичной длины (равных шагу сети). Величина коэффициента ветвления -  $k$  зависит от удаленности точки КЗ от источника питания:

$$I_{\text{кз}} = \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{k \cdot \left[ \sum_{i=1}^n \frac{1}{Z_{\text{сист}} + Z \cdot N_i} \right]^{-1}}, \quad (2)$$

где  $E$  – напряжение питающего узла, В;  $N_i$  – число единичных линий  $i$ -й эквивалентной ветви;  $k$  – коэффициент ветвления, учитывающий удаленность точки КЗ от ближайшего питающего узла (ИП);  $Z_{\text{сист}}$  – эквивалентное сопротивление системы, Ом;  $Z$  – сопротивление единичной линии, Ом.

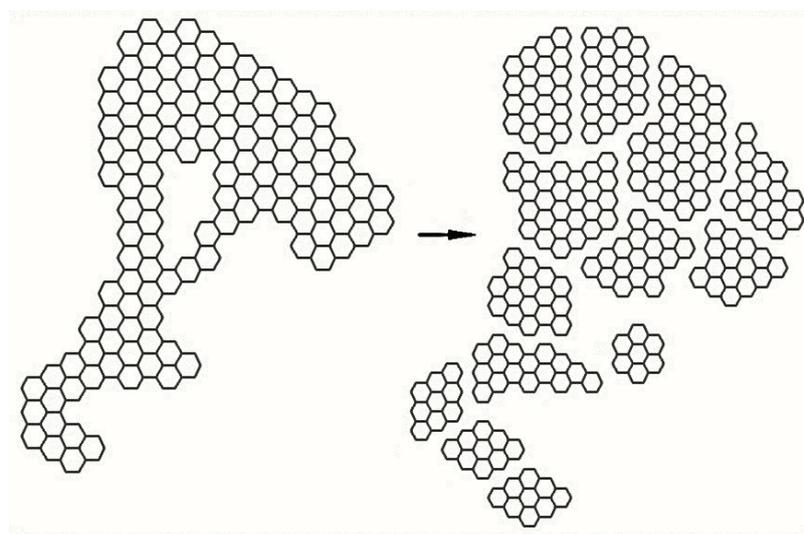
Расчет токов короткого замыкания в компьютерных моделях различными методами показал, что значения ТКЗ, полученные по упрощенной инженерной методике, лежат в пределах 5%-ной погрешности по отношению к результатам, полученным в имитационной модели и рассчитанными матричным методом сингулярных ветвей.

Было установлено, что значения ТКЗ при числе питающих узлов в сети более двух превышают коммутационную способность выключателей 10 (20) кВ и как следствие возникает необходимость установки токоограничивающих реакторов в цепи «Трансформатор 110/10 (20) кВ – Шины питающего узла 10 (20) кВ»

В ходе экспериментов были выявлены факторы, влияющие на величину ТКЗ в гексагональных сетях. ТКЗ зависит:

- 1) от конфигурации сети;
- 2) числа питающих источников, работающих параллельно;
- 3) единичной мощности питающего источника.

Ряд моделей гексагональной сети имеют прямую привязку к «форме» города, что негативно сказывается на топологии сети: появляются участки, имеющие слабые связи, причем с уменьшением шага сети таких элементов становится больше. Рациональнее использовать сети эллиптической формы, которой можно добиться, поделив единую сеть на зоны (рис. б), имеющие резервные связи (по кабельным линиям) в горячем резерве. Данные связи позволяют питать потребители от соседней зоны, при потере у первой источника питания.



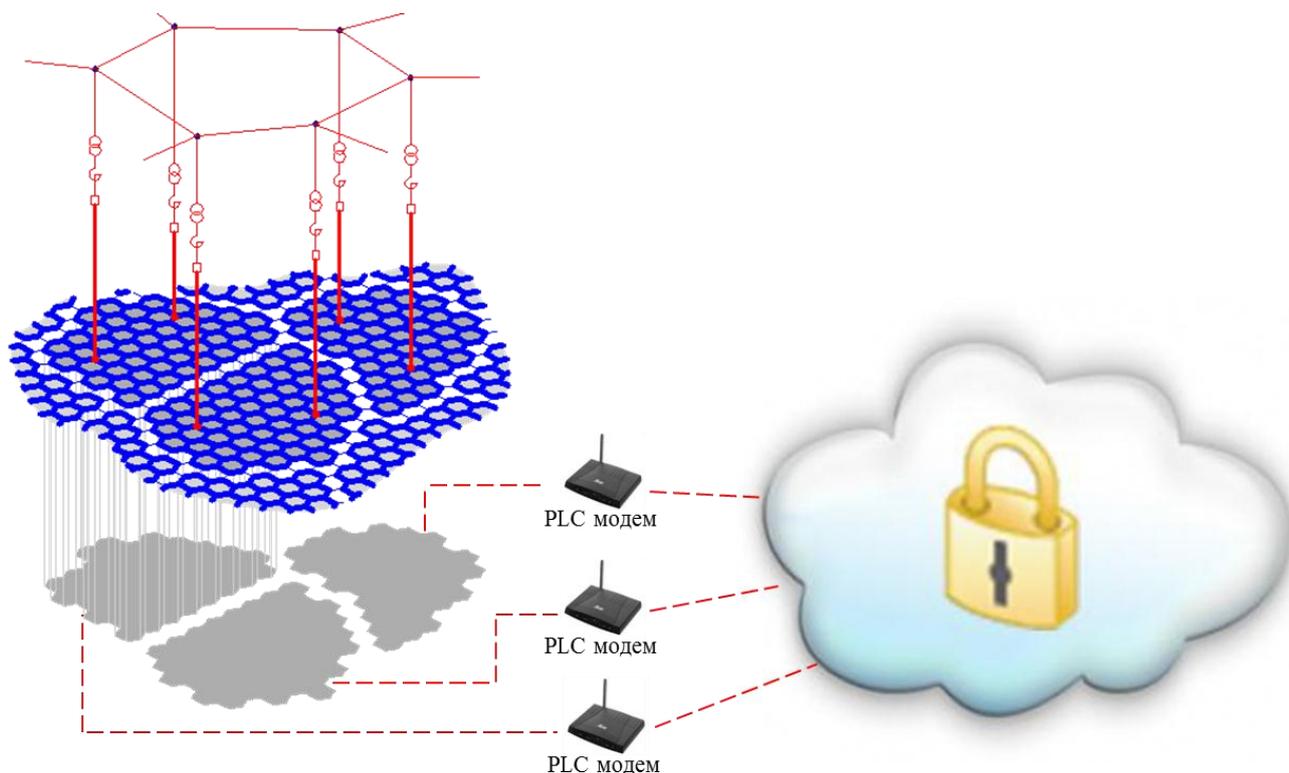
**Рис. 6. Представление единой сети, состоящей из отдельных зон**

Переход от единой сети к сети, состоящей из отдельных зон, позволяет снизить уровень токов короткого замыкания. Такой подход дает сеть гибкой и устойчивой в различных режимах работы, включая аварийные.

Уменьшение единичной мощности питающих узлов и использование одного понижающего трансформатора 110/10 (20) кВ уменьшает риск распространения аварий при повреждениях. Также в отдельных зонах можно более точно учитывать уровень загрузки района, а уменьшение шага сети повышает ее гибкость.

Гексагональная распределительная сеть, в узлах которой предполагаются интеллектуальные цифровые подстанции, имеет четкие алгоритмы управления, а общее корпоративное информационное пространство, которое используется электросетевой компанией для целей

управления, защит, мониторинга, позволит сделать сеть очень гибкой, значительно повысит качество и надежность электроснабжения потребителей (рис. 7).



**Рис. 7. Единое информационное корпоративное сетевое пространство гексагональной сети**

Гексагональные распределительные сети позволят реализовать автоматическое управление распределением и потреблением электроэнергии, сделать сеть гибкой, вывести энергетику распределительных сетей на новый уровень, соответствующий современным мировым стандартам и запросам потребителей. **Реализация гексагональных сетей возможна только с использованием оборудования узлов нагрузки с цифровым управлением.**

*В статье использованы материалы Государственного контракта от 11.10. 2011 г. № 16.526.12.6016 (11/692) с Министерством образования и науки РФ.*

#### Библиографический список

1. **Лоскутов, А.Б.** Новый подход к построению электрических распределительных сетей России / А.Б. Лоскутов, Е.Н. Соснина, А.А. Лоскутов // Научно-теоретический журнал «Вестник БГТУ им. В.Г.Шухова». Белгород. 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. Пат. №118133 Российская Федерация, МПК7 H02J 3/00 (2006 01). Система передачи электрической энергии / Лоскутов А. Б., Соснина Е.Н., Лоскутов А.А.: заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева». – № 2011154247; заявл. 28.12.2011; опубл. 10.07.2012, Бюл. № 19. – 3 с.
4. ГОСТ Р 52735-2007 Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ. – М., 2007.

5. РД 153-34.0-20.527-98 Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования

*Дата поступления  
в редакцию 10.12.2013*

**A.B. Loskutov, E.N. Sosnina, A.A. Loskutov, D.V. Zyrin,**

## **URBAN DISTRIBUTION ELECTRIC GRIDS 10-20 kV WITH HEXAGONAL CONFIGURATION**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. Alexeev

**Purpose:** Concept of new configuration of urban distribution electric grids of 20 kV was proposed.

**Design/methodology/approach:** Existing urban distribution electric grids are highly depreciation and have a large number of non-ordered reserve links. Hexagonal networks have precise system configuration and they are able to complete algorithmization control due to their configuration

**Findings:** Hexagonal grids which consist of universal three-prong nodes were developed. 20 kV power grids with a hexagonal configuration will be more flexible to changes in electric regime. The new grid topology will increase reliability of power supply.

**Research limitations/implications:** Hexagonal configuration of electrical networks achieves maximum efficiency when new distribution networks are formed from individual hexagonal zones. Hexagonal zones have reserve connection with each other. Universal control algorithms are needed for working hexagonal electric grids 20 kV.

**Originality/value:** Implementation of hexagonal electric grids of 20 kV is possible while using the equipment load nodes with digital control Digital electrical substations will be the main element of an active-adaptive uniformly distributed power grids in the future.

*Key words:* hexagonal configuration of the distribution electric grids, active-adaptive control system, uniformly distributed electric grid of 20 kV, PLC modem, interface, smart grid.