

УДК 519.17 + 621.3.05 + 519.67  
ББК 22.1

## **АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ МАГИСТРАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОСЕТЕЙ РОССИИ: ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ МОДЕЛИ ТЕСНОГО МИРА**

**Макрушин С. В.<sup>1</sup>**

*(ФГБОУ ВО «Финансовый университет  
при Правительстве Российской Федерации», Москва)*

*С помощью методов теории сложных сетей проведен анализ топологии и пространственной структуры магистральных электросетей России. В частности, рассмотрен новый подход к анализу принадлежности сети к классу сетей тесного мира. Данный вопрос для магистральных электросетей является дискуссионным и при этом критически важен для проведения анализа их надежности (в частности, устойчивости к каскадным отключениям). Для анализа магистральных электросетей была впервые применена процедура латтисизации и разработана ее модификация – процедура геолаттисизации, позволившая по результатам компьютерного моделирования сделать надежный вывод о принадлежности магистральных электросетей России к сетям тесного мира. Разработанные методы актуальны для анализа любых инфраструктурных сетей, имеющих пространственную привязку.*

Ключевые слова: теория сложных сетей, топология сети, тесный мир, электросети, ЕНЭС.

### **1. Введение**

Сети объектов транспортной, энергетической и телекоммуникационной инфраструктуры являются пространственным

---

<sup>1</sup> Сергей Вячеславович Макрушин, кандидат экономических наук (s-makrushin@yandex.ru, SVMakrushin@fa.ru).

скелетом современной экономики, критически влияющим на ее эффективность. При этом для всех инфраструктурных сетей актуальна задача поиска оптимального баланса между затратами на развитие и содержание сети и обеспечением доступности, надежности и качества предоставляемых сервисов. Полноценное решение этой проблемы невозможно без создания моделей пространственной структуры и топологии сети, позволяющих определить взаимосвязь между структурой сети, ее интегральными характеристиками, определяющими затраты на создание и обслуживание, и пропускной способностью и надежностью сети.

Объектом данного исследования является одна из ключевых инфраструктурных сетей России – Единая национальная электрическая сеть (ЕНЭС) – комплекс магистральных электрических сетей Российской Федерации, основная часть которого управляется ОАО «ФСК ЕЭС»; предметом исследования является топологическая и пространственная структура ЕНЭС. Целью исследования является анализ ключевых топологических свойств сети, в частности, оценка применимости для качественного описания топологии сети модели тесного мира (small world) [23].

Для проведения исследования используются методы теории сложных сетей (ТСС) [2]: при помощи анализа компьютерной модели сети ЕНЭС определяются характеристики сети, анализируется применимость модели тесного мира для описания сети ЕНЭС. За рубежом методы ТСС активно применяются для исследования различных инфраструктурных сетей национального масштаба, в том числе магистральных электросетей. В частности, только в работе [18] рассмотрено 34 научных статьи по анализу магистральных электросетей 26 стран мира методами ТСС. Несмотря на это, научные исследования ЕНЭС с помощью методов теории сложных сетей еще не получили распространения.

Теория сложных сетей (complex network theory или network theory) изучает сложные взаимодействующие системы, которые могут быть представлены в виде сети (графа). Данное направление исследований начало формироваться в конце 1990х годов с целью изучения свойств больших сетевых структур, обладаю-

щих свойствами сложных систем. Математический аппарат теории основывается на теории графов, теории вероятности, математической статистике и некоторых разделах статистической физики. Теория сложных сетей имеет приложения в самых различных областях: биологии, социологии, лингвистике, телекоммуникациях, транспорте, урбанистике, экономике, инфраструктурных сетях. Несмотря на то, что ряд базовых работ по теории сложных сетей (сети Эрдеша–Реньи [8] и пр.) был выполнен в третьей четверти XX века, данное направление как активно развивающийся комплекс взаимосвязанных исследований появилось лишь на рубеже XX и XXI веков. Его развитию послужило появление большого количества доступных для компьютерного анализа массивов данных о сложных сетях и развитие компьютерных инструментов их анализа.

В теории сложных сетей принята терминология, отличная от теории графов: граф принято называть сетью, вершину – узлом, ребро – связью, степенью узла в ТСС называется количество связей, имеющееся у данного узла, а коэффициентом кластеризации узла – количество связей между соседями данного узла (инцидентными узлами), отнесенное к максимально возможному количеству связей, возможному между данными узлами.

## **2. Модель ЕНЭС**

Для анализа ЕНЭС методами теории сложных сетей магистральные электросети рассматриваются в виде сети, в которой электрические подстанции и электростанции представляются узлами сети, а линии электропередач – связями сети.

Данные для формирования модели сети собраны из официальных документов [3] и интерактивной карты ЕНЭС, представленной на сайте ОАО «ФСК ЕЭС» [4]. Формат исходных данных (PDF и интерактивная карта в браузере) позволял использовать только ручную обработку и внесение данных для создания пригодной для проведения исследования компьютерной модели сети ЕНЭС. Так как модель сети ЕНЭС имеет географическую привязку, то для внесения данных была использо-

вана геоинформационная система (ГИС) и глобальная геоинформационная база данных.

В качестве глобальной геоинформационной базы данных был выбран проект OpenStreetMap [17], так как предоставляемые им данные обладают необходимым качеством и являются полностью открытыми. Формат базы OpenStreetMap позволяет полноценно работать с объектами электроэнергетической инфраструктуры, а сама база даже частично содержит необходимую информацию об электростанциях и магистральных электросетях. В качестве ГИС был использован редактор карт проекта OpenStreetMap JOSM. Для удобства при редактировании использовались данные OpenStreetMap, предварительно подготовленные (разделенные по регионам) сообществом GIS-Lab.ru и выложенные в виде файлов в формате OSM [1].

Однако полный набор геоданных по крупным российским регионам оказывался слишком объемным для комфортной работы с ними в редакторе JOSM. Например, размер файла геоданных в формате OSM для Московской области составляет более 200 Мбайт, что значительно превышает возможности JOSM по обработке данных на типичной рабочей станции. Для решения этой проблемы данные, излишние при нанесении объектов электроэнергетической инфраструктуры, были удалены из файла при помощи инструмента osmfilter, что уменьшило объем файлов приблизительно в 10 раз и позволило комфортно работать с геоданными любых регионов Российской Федерации.

В редакторе JOSM на картах регионов были нанесены узлы сети ЕНЭС с указанием названия объекта, его типа (электростанция или подстанция), максимального уровня напряжения, с которым работает узел, его загрузки (на основе данных из [4]), для связей в сети (линий электропередач); был указан их номинальный уровень напряжения. Далее региональные фрагменты ЕНЭС были «склеены» с использованием инструмента osmconvert, в результате чего было получено картографическое представление ЕНЭС, хранящееся в файле формата OSM.

Формат файла OSM является специфичным для геоинформационных систем и не поддерживается библиотеками и инструментами, предназначенными для анализа сложных сетей (в частности, использованной в исследовании библиотекой net-

workx [16] и средой Gephi [11]). Для конвертации данных был использован следующий подход: на языке Python автором был написан конвертор собранных данных из формата OSM в формат CSV (были сформированы два отдельных файла для узлов и связей), полученные данные о ЕНЭС были загружены в инструмент для анализа и визуализации сложных сетей Gephi, после чего были сохранены в формат gexf, который хорошо поддерживается инструментами анализа сложных сетей. В данном формате компьютерная модель ЕНЭС использовалась как набор исходных данных для дальнейших исследований.

В рамках исследования была собрана информация о 514 узлах и 614 связях сети ЕНЭС, включающая координаты узлов, их привязку к регионам, классы напряжения на объектах и другие характеристики. Модель сети построена для основных регионов присутствия ЕНЭС за исключением объектов объединенной энергосистемы Сибири, Востока и Урала (частично). Ее визуализация, выполненная с учетом географической привязки узлов, приведена на рис. 6.а.

На основании модели для сети ЕНЭС рассчитаны базовые интегральные характеристики сети, такие как: диаметр сети (36 переходов), средняя степень узлов (2,49 связи на узел), среднее межузловое расстояние (11,9 переходов), средний коэффициент кластеризации (0,0807). Распределение степеней узлов построенной модели ЕНЭС показано на рис. 1.

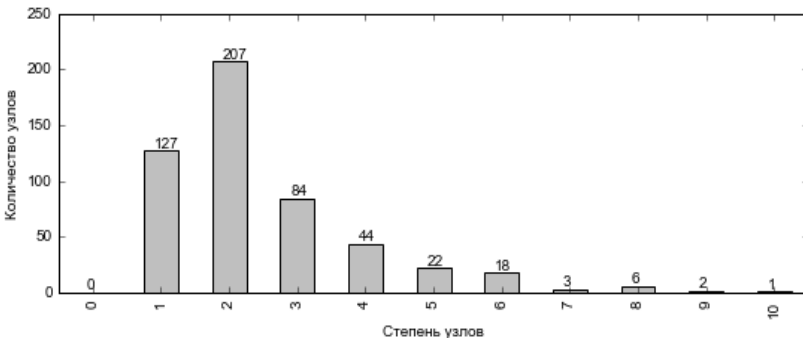


Рис. 1. Распределение степеней узлов сети ЕНЭС

Сравнивая среднюю степень узлов сети ЕНЭС (2,49 связей на узел) с аналогичным показателем, рассчитанным по данным, полученным в 32 зарубежных исследованиях магистральных электрических сетей [18] (медианное значение 2,73 связи на узел), можно отметить, что сеть ЕНЭС является более разреженной по сравнению с большинством европейских и американских аналогов. К сожалению, провести сравнительный анализ других интегральных показателей ЕНЭС и зарубежных магистральных электросетей затруднительно ввиду отсутствия необходимой информации в метаисследовании [18].

### **3. Модель сетей тесного мира**

В большинстве работ, посвященных анализу инфраструктурных сетей и, в частности, магистральных электросетей, методами теории сложных сетей рассматривается вопрос принадлежности исследуемой сети к классу сетей тесного мира. Такое внимание к данному вопросу связано с тем, что модель сетей тесного мира является одной из ключевых в типологии сетей, существующих в ТСС. Для электросетей этот вопрос является особенно важным, так как одним из ключевых свойств сетей тесного мира является способность быстрого распространения (диффузии) информации в сети [19], что в случае электросетей означает возможность быстрого распространения каскадных эффектов, таких как каскадные отключения.

Сети тесного мира являются широко распространенным и хорошо исследованным классом сетей. Феномен сетей тесного мира заключается в том, что эти сети обладают компактностью (небольшой длиной кратчайших путей между всеми парами узлов сети), характерной для случайных сетей (сетей Эрдеша–Реньи) [8], и высоким уровнем кластеризации (средним значением коэффициента кластеризации всех узлов сети), характерным для регулярных сетей («решеток»).

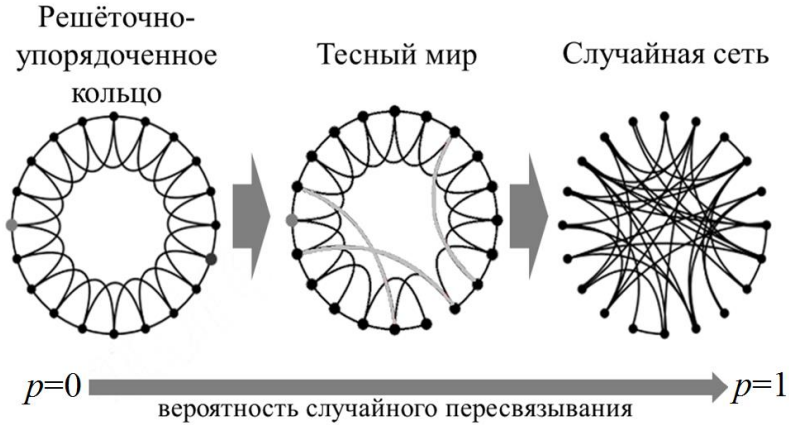


Рис. 2. Иллюстрация из пионерской работы Ваттса и Строгатца [23], демонстрирующая принцип построения сети, обладающей свойствами тесного мира ( $p$  – вероятность осуществления пересвязывания связей в сети)

Д. Ваттсом и С. Строгатцом в работе [23] был предложен алгоритм генерации сетей со свойствами тесного мира, который заключается в случайном изменении связей (пересвязывании) в сети, представляющей собой одномерную решетку, этот процесс иллюстрирован на рис. 2. Пересвязывание (relinkage) даже небольшой доли связей регулярной сети (вероятность пересвязывания для каждой связи определяется параметром модели  $p$ ) приводит к сильному сокращению средней длины кратчайших путей в сети, при этом средний коэффициент кластеризации, присущий исходной решетке, снижается незначительно. Этот феномен продемонстрирован на графике на рис. 3.

Связи в сетях тесного мира, отвечающие за сильное сокращение длины кратчайших путей в сети, принято называть длинными связями (long link или shortcut). Нужно отметить, что это понятие напрямую не связано с длиной связи, более того, во многих сетях понятие длины для связей может быть вообще не определено, что не мешает выявлять в них «длинные связи», связывающие отдаленные в топологическом смысле узлы сети. В модели Ваттса–Строгатца связи, образующиеся в результате

пересвязывания узлов, чаще всего становятся длинными связями (на рис. 2 они отмечены серым цветом).

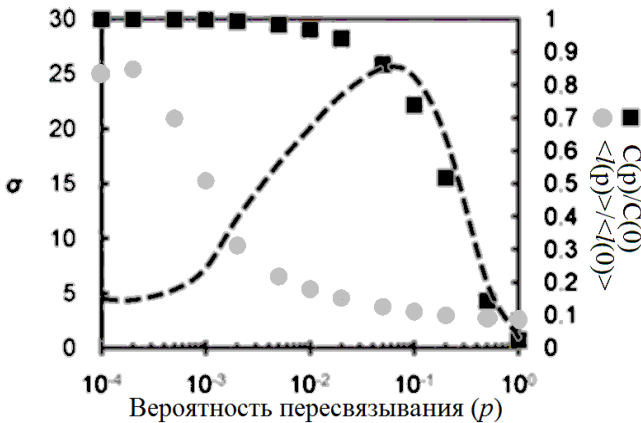


Рис. 3. Изменение основных свойств сети (среднего коэффициента кластеризации  $C$  и средней длины путей в сети  $\langle l \rangle$ ) при разных значениях параметра  $p$  по отношению к их значениям для решеточно-упорядоченного кольца (правая шкала) и меры принадлежности к сетям тесного мира  $\sigma$  (левая шкала) (рисунок из работы [21])

Для электросетей длинные связи в сети представляют особый интерес, так как исследования каскадных аварий в электросетях показали, что «длинные связи» в сетях тесного мира являются ключевым элементом процесса возникновения каскадных отключений [14]. В целом же в указанном исследовании показано, что триггером начала каскадной аварии является выход из строя ряда элементов сети, приводящий к потере электросетью качеств сети тесного мира.

Несмотря на большое количество исследований магистральных электросетей методами ТСС, на данный момент отсутствует консенсус об их принадлежности к сетям тесного мира. Хотя в пионерских исследованиях [22] давался положительный ответ на этот вопрос, впоследствии относительно ряда



магистральных электросетей сделан вывод о том, что они не относятся к сетям тесного мира [12, 18].

Проведение данного анализа осложняется отсутствием точного критерия принадлежности сети к классу сетей тесного мира. При этом среди исследователей получил распространение подход к типизации сети, имеющий ряд существенных изъянов. В данной работе рассматривается более адекватный метод определения принадлежности сети к сетям тесного мира, не применявшийся ранее для анализа магистральных электросетей, а также его авторская адаптация к задаче анализа сетей, имеющих географическую привязку вершин.

#### **4. Определение принадлежности к сетям тесного мира**

Обычно для анализа принадлежности сети к сетям тесного мира выполняется сравнение коэффициента кластеризации и среднего кратчайшего пути у исследуемой сети и случайной сети с аналогичным распределением степеней вершин (долями вершин сети, имеющих данную степень). Распространение получила числовая мера принадлежности к тесному миру, впервые предложенная в [13]:

$$(1) \quad \sigma = \frac{C / C_{rnd}}{\langle l \rangle / \langle l_{rnd} \rangle},$$

где  $C$  и  $C_{rnd}$  – уровень кластеризации в исследуемой сети и в случайной сети-аналоге, а  $\langle l \rangle$  и  $\langle l_{rnd} \rangle$  – средняя длина кратчайших путей в этих сетях. Чем больше значение величины  $\sigma$ , тем ближе сеть к состоянию тесного мира, а для сети тесного мира характерно значение  $\sigma \gg 1$ .

Однако анализ меры  $\sigma$ , проведенный в [21], показывает, что ее применение для построения критерия принадлежности к тесному миру некорректно. В работе [21] показано, что сети, однотипные с точки зрения модели тесного мира, могут иметь значение  $\sigma$ , отличающееся на порядок только из-за различия в размере сети. Таким образом, выбор любого определенного порогового уровня  $\sigma$  в качестве критического значения принадлежности к тесному миру будет некорректен, так как для сетей

разного размера данный уровень будет означать существенно различающуюся структуру сети с точки зрения принадлежности к тесному миру. Кроме того, мера  $\sigma$  не может использоваться для сравнения сетей различного размера.

Кроме того, анализ меры  $\sigma$ , проведенный в [21], показывает, что ее применение для определения принадлежности к тесному миру приводит к неоднозначным результатам: для сетей, находящихся в качественно разных состояниях, с точки зрения обладания свойствами тесного мира могут наблюдаться одинаковые значения  $\sigma$ . Это хорошо проиллюстрировано на рис. 3: на графике зависимости  $\sigma$  от вероятности пересвязывания в модели Ваттса–Строгатца (зависимость изображена пунктирной линией) хорошо продемонстрирована ее немонотонность. Таким образом, одно значение  $\sigma$  может иметь две совершенно различные интерпретации с точки зрения модели тесного мира.

Например, значение  $\sigma$ , рассчитанное нами для ЕНЭС, равно 14,1, что при помощи графика с рис. 3 может быть интерпретировано двояко: либо структура ЕНЭС близка к случайным сетям (значение 14,1 на нисходящей части графика  $\sigma$ ), либо к регулярным сетям (значение 14,1 на восходящей части графика  $\sigma$ ). И, несмотря на то, что значение  $\sigma$  для ЕНЭС много больше 1, данное значение не может однозначно говорить о принадлежности сети к сетям тесного мира и не может использоваться для сравнения структур сетей с различным количеством узлов. Это вызвано тем, что для интерпретации значения  $\sigma$  для каждой конкретной сети требуется построение индивидуального графика зависимости  $\sigma$  от вероятности пересвязывания в модели Ваттса–Строгатца, так как, как было отмечено выше, поведение  $\sigma$  существенно зависит от размера сети.

Основной причиной недостатков меры принадлежности к тесному миру  $\sigma$  является то, что в ней характеристики сети сравниваются только с аналогичными показателями у случайной сети-аналога и не проводится сравнение с регулярной сетью-аналогом. Иначе говоря, дважды проводится сравнение сети с одним крайним случаем модели Ваттса–Строгатца – случайной сетью с малым диаметром, и ни разу – с другим крайним случаем – регулярной сетью с высокой кластеризацией. Причиной распространения такого подхода является отсутствие простого и

широко известного алгоритма построения регулярной сети-аналога при относительной простоте построения случайной сети-аналога.

Для получения случайной сети с распределением степеней вершин, аналогичным заданной сети (рандомизации сети), достаточно провести большое количество (по сравнению с количеством узлов и связей в сети) случайных пересвязываний, сохраняющих степень узлов сети. Алгоритм случайного пересвязывания заключается в случайном выборе двух пар связанных узлов, разрыве существующих связей внутри пар и создании двух новых связей между узлами, относившимися к разным парам (каждый узел участвует только в одной новой связи). Если вновь образованные связи дублируют уже существовавшие в сети связи, эта попытка пересвязывания отменяется. В результате процедуры степень всех четырех узлов не меняется, количество связей в сети сохраняется, а порядок связей случайным образом изменяется.

Данная процедура была проведена для исследуемой компьютерной модели сети ЕНЭС. Было реализовано 50 повторений процесса рандомизации, по итогам которых были получены средние значения характеристик рандомизированной сети, приведенные в столбце 2 таблицы 1. Средний кратчайший путь в модели ЕНЭС оказался на 4 перехода длиннее, чем в случайной сети-аналоге, а отношение  $\langle l \rangle / \langle l_{rnd} \rangle$  имеет значение 1,50, что очень существенно для сетей с одинаковым количеством вершин.

Отношение средней кластеризации в сети ЕНЭС и случайной сети-аналоге  $C/C_{rnd}$  равно 21,1, и качественное изменение значения показателя здесь очевидно. Однако кластеризация для ЕНЭС на порядок меньше теоретического максимума, таким образом, значение для ЕНЭС может на порядок отличаться не только от аналогичного значения в рандомизированной сети, но и от аналогичного значения в регуляризованном аналоге. В данном случае, как и говорилось выше, только сравнение с адекватной сетью-аналогом с высокой кластеризацией (регуляризованным аналогом сети) может корректно показать близость сети ЕНЭС к состоянию тесного мира.

## 5. Мера принадлежности к тесному миру на основе процедуры латтисизации

Преодоление недостатков принятой меры принадлежности сети к тесному миру требует построения регуляризованной сети-аналога с высокой кластеризацией. Построение такой сети представляет большую сложность, чем создание случайного аналога, и пока не получило широкого распространения при анализе сложных сетей на принадлежность к сетям тесного мира. Эта сложность вызвана тем, что для движения в направлении к упорядоченному виду сети требуется информация об исходной структуре решетки и специальная процедура повышения упорядоченности сети. В модели Ваттса–Строгатца вид одномерной решетки изначально задан, однако, в отличие от модельного случая, для реальных сетей информация об их исходной упорядоченной структуре в явном виде отсутствует.

В работе К. Телесфорда и др. [21] было предложено использовать для этих целей алгоритм латтисизации (latticization – приведения к виду решетки), описанный в [20]. Рассмотрение прошедшей латтисизацию сети-аналога позволило Телесфорду с коллегами сформулировать более качественную меру близости сети к тесному миру, имеющую вид

$$(2) \quad \omega = \frac{\langle l_{rnd} \rangle}{\langle l \rangle} - \frac{C}{C_{latt}},$$

где  $C_{latt}$  – уровень кластеризации в латтисизированной сети-аналоге. Для сетей тесного мира значение  $\omega$  должно быть близко к 0, а для всех сетей, полученных в рамках алгоритма Ваттса–Строгатца, значение  $\omega \in [-1, 1]$ , где значение, близкое к 1, соответствует случайной сети-аналогу, а значение, близкое к  $-1$ , – сети-аналогу с регулярной структурой. В работе [21] показано, что  $\omega$  слабо чувствительна к размеру анализируемой сети и не демонстрирует одинаковых значений для сетей, находящихся в качественно разных состояниях с точки зрения модели тесного мира Ваттса–Строгатца.

Суть алгоритма латтисизации заключается в многократном проведении процедуры пересвязывания, похожей на шаг процедуры рандомизации сети, но с существенными отличиями:

выполняются только случайные пересвязывания, приводящие к уменьшению суммарной длины связей в сети, при этом степени всех узлов сети и связность сети сохраняются.

Принципиальная схема алгоритма латтисизации приведена в виде псевдокода на рис. 4. На каждой итерации внешнего цикла алгоритма латтисизации (строки 1–19) проводится попытка случайного пересвязывания. Для того чтобы пересвязывание не приводило к изменению степеней узлов, оно выполняется по следующей схеме: случайно выбираются две пары узлов (пара  $nodeA$ ,  $nodeB$  и пара  $nodeC$ ,  $nodeD$ ), связанных между собой. Связи внутри пар разрываются и образуются новые перекрестные связи между узлами ( $nodeA$ ,  $nodeD$  и  $nodeB$ ,  $nodeC$  соответственно). Во внутреннем цикле алгоритма (строки 4–13) для пары узлов  $nodeA$ ,  $nodeB$  подбирается подходящая пара узлов  $nodeC$ ,  $nodeD$ : вторая пара узлов не должна иметь совпадений и связей с узлами первой пары и, главное, длина новых перекрестных связей должна быть меньше, чем длина существующих связей внутри пар. Длина связи в алгоритме принимается равной расстоянию между узлами, определяемому функцией *Distance*, принимающей в виде входных переменных два узла сети.

В алгоритме латтисизации, описанном в [20], расстояние между любыми двумя узлами в сети определяется кольцевой последовательностью узлов по аналогии со структурой, в которой находятся узлы в одномерной решетке (кольце) в алгоритме Ваттса–Строгатца (см. рис. 2). Так как, в отличие от модели Ваттса–Строгатца, при анализе реальной сети информации об исходной кольцевой решетке нет, то кольцевая последовательность узлов определяется случайным образом перед началом процедуры латтисизации. Расстояние между узлами задается равным наименьшему расстоянию между узлами, измеряемому в количестве шагов по кольцевой последовательности между ними. В частности, расстояние между соседними узлами в кольцевой последовательности минимально и равно единице, а расстояние между самыми удаленными узлами, расположенными на противоположных сторонах кольца, равно  $[N/2]$ , где  $N$  – количество узлов в сети.

После успешного выбора двух пар узлов, удовлетворяющих всем требованиям алгоритма, производится пересвязывание узлов (строка 15 на рис. 4), т.е. разрыв двух связей внутри пар узлов и образование двух более коротких перекрестных связей. После пересвязывания проверяется, что сеть сохранила связность, и если это условие нарушается, то операции пересвязывания откатываются и начинается новая итерация поиска двух пар связанных узлов. При этом каждое успешное пересвязывание приводит к повышению локальности связей: связи в сети становятся короче и все больше обуславливаются положением узлов в заданной для определения расстояния кольцевой последовательности.

```

function Latticization(network, rewireTryQty, findCDTryQty)
  /* функция возвращает пересвязанную сеть, network
  должна быть связной */
  1 for i ← 1 to rewireTryQty do /* попытки пересвязывания */
  2   nodeA, nodeB ← RandomChooseLinkedNodes(network) ;
  3   startRewire ← False ;
  4   for j ← 1 to findCDTryQty do /* подбр nodeC и nodeD для
  корректного перекрестного пересвязывания */
  5     nodeC, nodeD = ChooseLinkedNodes(network, nodeA,
  nodeB) ;
  6     if nodeA = nodeC or nodeA = nodeD or nodeB = nodeC or
  nodeB = nodeD or HasLink(network, nodeA, nodeD) or
  HasLink(network, nodeB, nodeC) then
  7       continue ; /* условия не выполнены, начинаем
  новую попытку */
  8     end
  9     if Distance(nodeA, nodeB) + Distance(nodeC, nodeD)
  > Distance(nodeA, nodeD) + Distance(nodeB,
  nodeC) then
  10      startRewire ← True ;
  11      break ; /* подходящие узлы найдены */
  12     end
  13   end
  14   if startRewire then
  /* перекрестное пересвязывание nodeA-nodeB,
  nodeC-nodeD=>nodeA-nodeD, nodeB-nodeC: */
  15   Rewire(network, nodeA, nodeB, nodeC, nodeD) ;
  16   if NumberOfConnectedComponents(network) > 1 then
  /* пересвязывание откатывается т.к. оно
  нарушило связность сети: */
  17   Rewire(network, nodeA, nodeD, nodeB, nodeC) ;
  18   end
  19   end
  20 end
  21 return network
end

```

Рис. 4. Описание алгоритма латтисизации в виде псевдокода

Данный алгоритм не претендует на высокую вычислительную эффективность и достижение глобального минимума длин связей. Применение случайного выбора связанных узлов в нем является просто удобным методом получения субоптимальных решений для вычислительно трудной задачи и за счет большого количества повторений шага алгоритма роль случайности в результате оказывается мало существенной. При этом алгоритм прост в реализации и решает задачу построения сети-аналога с регулярной структурой, высокой локальностью связей и, как следствие, высоким значением среднего коэффициента кластеризации.

Для уменьшения влияния произвола в выборе последовательности узлов в кольцевой последовательности процедура многократно повторяется с различными случайными кольцевыми последовательностями, в итоге выбирается результат, для которого получена наименьшая суммарная длина связей.

Таблица 1. Характеристики рассматриваемых сетей

	1	2	3	4
	ЕНЭС	Случайная сеть-аналог	Латтисизированная (одномерная) сеть-аналог	Геолаттисизированная (двумерная) сеть-аналог
$L$ - вредный кратчайший путь (переходов)	11,9	7,9	62,8	19,1
$C$ - средняя кластеризация в сети (в диапазоне [0, 1])	0,0807	0,0038	0,2010	0,1696

Для анализа магистральных электросетей метод латтисизации ранее не применялся. Для решения этой задачи авторами была разработана собственная реализация алгоритма латтисизации на языке программирования Python, разработанная на основе описания алгоритма латтисизации, предложенного в [20], и

анализа его реализации в библиотеке алгоритмов brain connectivity toolbox [7].

В рамках анализа сети ЕНЭС процедура латтисизации была применена к компьютерной модели сети ЕНЭС, характеристики полученной сети-аналога приведены в столбце 3 таблицы 1. Отношение средних кластеризаций в латтисизированной и исходной сети ЕНЭС  $C_{latt}/C$  составило 2,5, однако это заметное различие существенно меньше более чем двадцатикратного различия в отношении  $C/C_{md}$ . Средняя длина пути в латтисизированной сети равна 62,8 при 11,9 в исходной модели и 7,9 в рандомизированной, из чего видно, что по длине путей сеть ЕНЭС существенно ближе к рандомизированному аналогу, нежели к регуляризованному при помощи алгоритма латтисизации аналогу. Таким образом, сеть ЕНЭС можно считать близкой к случайной сети-аналогу по средней длине пути и близкой к регулярной сети по уровню средней кластеризации. Значение меры  $\omega$ , рассчитанное для сети ЕНЭС, составляет 0,26 (расчет значения см. в таблице 2), что говорит о близости сети ЕНЭС к состоянию тесного мира. Положительное значение  $\omega$  показывает, что по своей структуре сеть ЕНЭС существенно ближе к случайной сети, чем к одномерной решетке.

Таблица 2. Меры принадлежности к тесному миру

Мера	Расчетдлежности	Значениеежнос
$\sigma_{ЕНЭС}$	$\frac{0,0807/0,0038}{11,9/7,9}$	14,1
$\omega_{ЕНЭС ЛАТ}$	$\frac{7,9}{11,9} - \frac{0,0807}{0,2010}$	0,26
$\omega_{ЕНЭС ГЕОЛАТ}$	$\frac{7,9}{11,9} - \frac{0,0807}{0,1696}$	0,19

## 6. Процедура геолаттисизации

Так как объектом данного исследования является магистральная электросеть, для которой известна географическая привязка узлов сети, то использование одномерной замкнутой



решетки в качестве сети-аналога представляется не совсем корректным, тем более что в литературе широко известны модификации модели Ваттса–Строгатца, в которых для построения сетей тесного мира используются двухмерные решетки [15].

Для построения двухмерной регулярной сети-аналога в рамках работы по анализу сети ЕНЭС была разработана авторская модификация алгоритма латтисизации. В ней расстояние, приписываемое связям в сети, определяется на основе данных о координатах узлов, соединяемых этой связью, при помощи расчета длины (в километрах), соответствующей геодезической линии на поверхности земли. В модифицированном алгоритме это расстояние возвращается при вызове функции Distance. Напомним, что в работе алгоритма латтисизации эта функция используется для проверки сокращения суммарной длины связей при пересвязывании (строка 9 на рис. 4).

Таким образом, каждое успешное пересвязывание в модифицированном алгоритме геопространственной латтисизации (геолаттисизации) приводит к сокращению длины линий уже в географическом понимании и повышению локальности связей не на случайно заданной кольцевой последовательности, а в географическом смысле.

Для анализа применимости предлагаемого подхода геолаттисизации для сетей с пространственной привязкой узлов был рассмотрен модельный пример: сеть, построенная на основе двухмерной решетки с пространственной привязкой узлов и связями, обусловленными пространственной близостью узлов. Анализ применимости проведен по следующей схеме. На модельной сети выполнено случайное пересвязывание небольшой доли связей, т.е. на ее основе получена сеть, обладающая свойствами тесного мира. К этой сети применены процедуры латтисизации и геолаттисизации, по результатам которых проведен анализ точности восстановления исходных характеристик модельной сети и сделан вывод о качестве работы данных процедур для сетей, имеющих пространственно обусловленную структуру связей.

Для построения модельной сети рассмотрен прямоугольник на плоскости размером 10 на 20. В точках прямоугольника, имеющих целочисленные координаты, расположены 200 узлов

(см. рис. 5а). Каждый из узлов соединен с ближайшими соседями по горизонтали и вертикали. В решетке с квадратными ячейками коэффициент кластеризации всех узлов будет равен 0, что не позволит провести на такой модели анализ поведения коэффициента кластеризации, поэтому в каждую вторую ячейку модельной сети были добавлены дополнительные диагональные связи. Направление связей во всех ячейках выбрано одинаковым, а положение ячеек с диагональными связями у соседних рядов ячеек чередуется (см. рис 5а). В итоге модельная сеть, изображенная на рис. 5а, имеет 200 узлов, 456 связей, основные свойства модельной сети приведены в столбце 1 таблицы 3.

Таблица 3. Характеристики модельных сетей

	1	2	3	4
	Исходная сеть	Сеть после случайного пересвязывания	Пересвязанная сеть после латтисизации	Пересвязанная сеть после геолаттисизации
Диаметр сети	28	12	38	23
$\langle l \rangle$ - средний кратчайший путь (переходов)	8,73	5,72	18,83	8,22
$C$ - средняя кластеризация в сети (в диапазоне [0, 1])	0,32	0,30	0,56	0,33

После случайного пересвязывания 14 связей (3% от общего количества связей) модельной сети она приобрела вид, показанный на рис. 5б, при этом диаметр сети уменьшился более чем в 2 раза, а коэффициент средней кластеризации изменился только на 7,6% (абсолютные значения коэффициентов приведены в столбце 2 таблицы 3). Таким образом, пересвязанная модельная сеть приобрела свойства сети тесного мира.

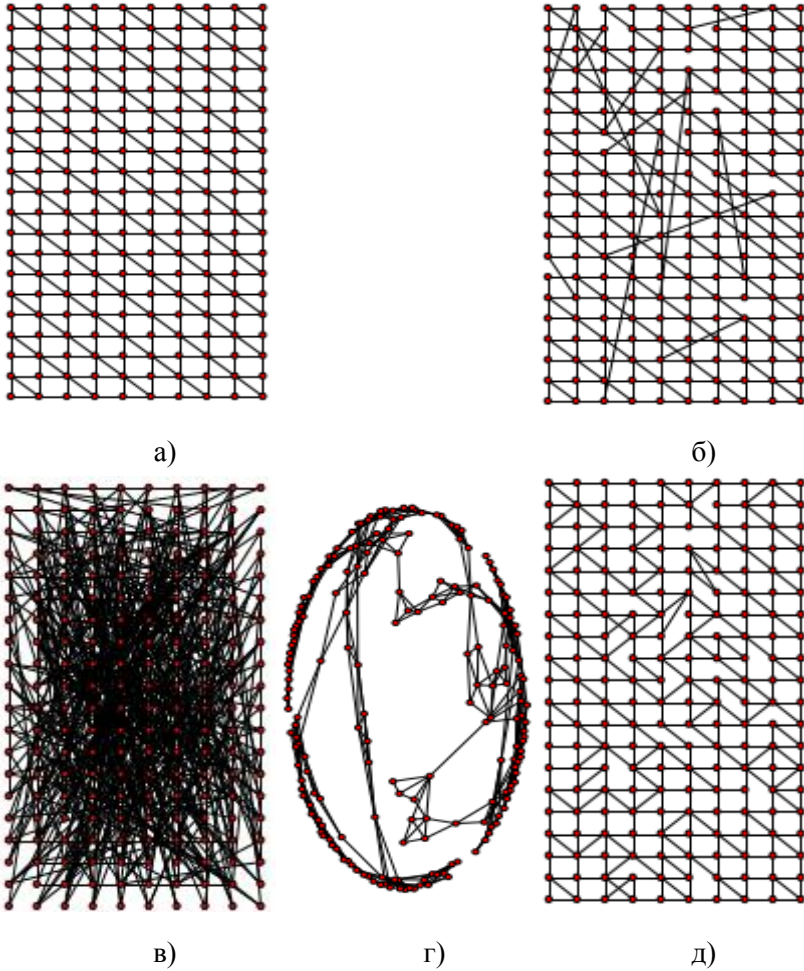


Рис. 5. Визуализация результата работы алгоритма геолаттисизации на сети ЕНЭС: а) исходная модельная сеть; б) модельная сеть после случайного пересвязывания (сеть тесного мира); в) пересвязанная сеть после латтисизации (положение узлов сохранено); г) пересвязанная сеть после латтисизации (положение узлов определено алгоритмом Фрюхтермана–Рэйнгольда); д) пересвязанная сеть после геолаттисизации

К полученной сети тесного мира была применена процедура латтисизации. Для данного примера алгоритмом латтисизации было проведено 1606 пересвязываний из 4000 попыток выполнения пересвязывания. Так как при проведении процедуры латтисизации структура связей подстраивается под кольцевую последовательность узлов, определенную случайным образом, то вид связей для латтисизированной модельной сети на исходной сетке будет казаться случайным (см. рис. 5в). Однако применив алгоритм визуализации графов Фрюхтермана–Рэйнгольда [9] (см. рис. 5г), в котором положение узлов определяется структурой связей в сети, мы можем увидеть, что структура связей, полученная в результате латтисизации, действительно подчинена (естественно, не идеально) некоторой кольцевой последовательности узлов. Значения коэффициентов латтисизированной сети приведены в столбце 3 таблицы 3. Как видно, в результате латтисизации исходные характеристики модельной сети восстановлены очень неточно: значение средней длины кратчайших путей завышено более чем в два раза, средний коэффициент кластеризации завышен более чем на 70%.

Поскольку для упрощения модельного примера узлы в нем имеют привязку на плоскости вместо геопространственной привязки, то для проведения геолаттисизации в модельном примере в качестве меры длины связи использовано евклидово расстояние между узлами вместо определения длины геодезической линии на поверхности земли.

Результат геолаттисизации модельной сети тесного мира, изображенной на рис. 5б, показан на рис. 5д. Даже из визуального анализа рисунка хорошо видна близость структуры геолаттисизированной сети к исходной сети, показанной на рис. 5а. В данном случае алгоритмом геолаттисизации было проведено 69 пересвязываний из 4000 попыток выполнения пересвязывания. Относительно небольшое по сравнению с процедурой латтисизации количество пересвязываний объясняется тем, что в данном случае не происходит преобразования двумерной решетки к кольцевой последовательности и все пересвязывания производятся только для укорачивания длинных связей, которых в рассматриваемой модельной сети всего 14 штук.

Процедура геолаттисизации не способна точно воссоздать исходную конфигурацию связей в модельной сети, однако в результате ее работы сохранилось только 2 связи между узлами, не являющимися ближайшими соседями. Значения коэффициентов геолаттисизированной сети приведены в столбце 4 таблицы 3. Как видно, в результате геолаттисизации исходные характеристики модельной сети восстановлены весьма точно: значения средней длины кратчайших путей отличаются от исходных всего на 6%, а средний коэффициент кластеризации – на 3%. Таким образом, анализ модельного примера показал, что геолаттисизация позволяет намного более точно определить свойства регуляризованного аналога сети в случае, если регулярная структура сети обусловлена пространственным расположением ее узлов.

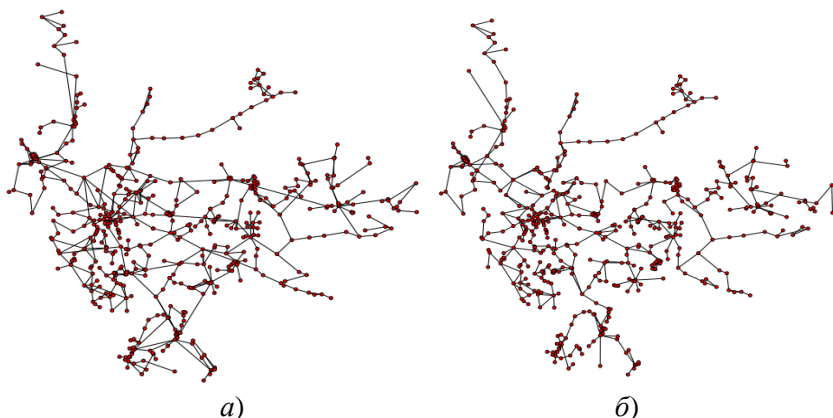
## 7. Геолаттисизация сети ЕНЭС

Для повышения производительности алгоритм геолаттисизации был модифицирован. Была изменена работа функции `ChooseLinkedNodes` (строка 5 на рис. 4): вместо случайного выбора связанных узлов `nodeC`, `nodeD` функция стала возвращать связанные узлы, один из которых находится среди  $m$  ближайших узлов `nodeA`.

За счет гарантированного появления одной короткой (в географическом смысле) связи среди новых связей вероятность успешного пересвязывания существенно возросла. Для решения задачи поиска  $m$  ближайших узлов применена одна из реализаций алгоритма геохеширования [10]. В результате скорость построения географически латтисизированной сети существенно возросла и стала удовлетворительной для проведения исследования сети ЕНЭС.

На рис. 6 изображен результат применения процедуры геолаттисизации к модели ЕНЭС. Как видно на рис. 6б, при возможности длинные связи в сети заменены алгоритмом на связи с более близкими узлами сети, при этом степени всех вершин сохранены. Так как процесс геолаттисизации, так же как и латтисизации, основывается на случайном пересвязывании, то его результат недетерминирован, и приведенное на рис. 6б

изображение является только одним из возможных исходов применения алгоритма.



*Рис. 6. Визуализация результата работы алгоритма геолаттисизации на сети ЕНЭС: а) исходная модель ЕНЭС с изображением узлов в соответствии с их географическими координатами; б) модель ЕНЭС, прошедшая геолаттисизацию: длинные связи по возможности заменены на более короткие, степень (количество связей) всех узлов сети сохранена*

Нужно отметить, что в процедуре латтисизации и пространственная структура узлов (кольцевая последовательность), и процесс пересвязывания имеют случайный характер. В процедуре геолаттисизации пространственная структура узлов имеет объективный характер и определяется географическим местоположением узлов. Таким образом, произвол получения регуляризованного аналога при помощи геолаттисизации существенно меньше и определяется только процедурой пересвязывания узлов, что снижает требования к количеству повторений процедуры для получения репрезентативных результатов.

В результате замены длинных связей на более короткие, локальные, суммарная длина связей между узлами сети снизилась с 48 107 км до 40 579 км, или на 16%. Нужно отметить, что в данном случае речь идет о длине связей, определенной как

длина кратчайшей линии, соединяющей узлы с определенными координатами (геодезической линии), а не о длине ЛЭП. Информация о фактической длине ЛЭП нам недоступна, и ясно лишь, что она больше, чем длина рассматриваемой нами геодезической линии.

Несмотря на то, что геолаттисизация сократила суммарную длину связей, измеряемую в километрах, всего на 16%, в топологическом смысле удаленные связи действительно были очень важны для связывания сети. После геолаттисизации топологические характеристики сети изменились очень существенно: диаметр сети (максимальная величина кратчайшего пути между всеми парами узлов) увеличился с 36 до 55 переходов (вырос на 52%), средняя длина путей увеличилась с 11,9 переходов до 19,1 (выросла на 61%). Таким образом, некоторые из удаленных связей были длинными не только с точки зрения географической метрики, но и являлись «длинными связями» в понимании модели Ваттса–Строгатца, т.е. они обеспечивали «стягивание» сети в компактную структуру.

Важные для расчета меры  $\omega$  результаты расчета характеристик сети ЕНЭС, прошедшей геолаттисизацию, приведены в столбце 4 таблицы 1. Двумерная модель сети продемонстрировала существенно меньшую среднюю длину путей по сравнению с одномерной – 19,1 вместо 62,8. Это изменение было ожидаемо, так как двумерная решетка с тем же количеством узлов и связей, что и в одномерной решетке, обеспечивает существенно более короткие кратчайшие пути между узлами. Несмотря на такое изменение, данный показатель исходной сети ЕНЭС все равно существенно ближе к случайной сети-аналогу (разница в 33%), чем к регуляризованному геопространственному аналогу (разница в 60%).

Также ожидаемо у геолаттисизированной сети-аналога относительно одномерного регуляризованного аналога снизилась средняя кластеризация: с 0,20 до 0,17. Это объясняется тем, что географическая (двухмерная) мера близости по сравнению с мерой близости на одномерной решетке определяет более широкий круг ближайших соседей. Так как количество связей в сети фиксировано, то связи между узлами, входящими в круг ближайших соседей в двухмерной решетке менее вероятны, что

и объясняет снижение коэффициента кластеризации узлов и, как следствие, средней кластеризации всей сети. В результате значение меры близости к тесному миру  $\omega$ , рассчитанное для сети ЕНЭС с  $C_{lat}$ , определенным по сети, прошедшей геолаттисизацию, составляет 0,19 (расчет значения см. в таблице 2), что существенно ближе к 0, чем величина меры  $\omega$ , полученная на основе латтисизации.

Таким образом, более адекватная методика построения регуляризованного аналога исследуемой сети указывает на еще большую близость структуры ЕНЭС к сетям тесного мира. При этом качественная оценка большей близости ЕНЭС к случайным сетям, нежели к регулярным, сохраняется. В результате проведенного анализа мы можем считать, что модель тесного мира применима к ЕНЭС. Как следствие, для ЕНЭС является актуальной задача проведения анализа уязвимости ЕНЭС к каскадным отключениям с учетом ее топологии, в первую очередь, ее принадлежности к сетям тесного мира.

## **8. Выявление критических узлов и связей в сети ЕНЭС**

Эмпирический анализ крупномасштабных каскадных отключений в электросетях показал [14], что в электрических сетях за распространение каскадных эффектов отвечают длинные связи. Идентифицировав длинные связи в ЕНЭС, мы можем определить узлы и связи сети, требующие особого внимания при анализе надежности сети к каскадным отключениям.

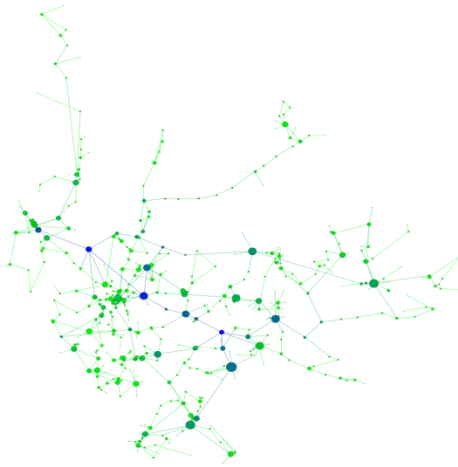
Из анализа модели тесного мира известно [5, 6], что узлы сетей тесного мира, связанные с длинными связями, обладают высокой центральностью по посредничеству (betweenness centrality). Центральность по посредничеству определяется как доля кратчайших путей, проходящих через данный узел, среди кратчайших путей, построенных для всех узлов сети:

$$(3) \quad g(u) = \sum_{s \neq t \neq u} \frac{\sigma_{st}(u)}{\sigma_{st}},$$

где  $\sigma_{st}(u)$  – количество кратчайших путей между узлами  $s$  и  $t$ , проходящих через узел  $u$ , а  $\sigma_{st}$  – количество всех кратчайших



путей между узлами  $s$  и  $t$ . Центральность по посредничеству характеризует важность узла как посредника на пути между другими узлами. В частности, удаление узла с высокой важностью по посредничеству может привести к увеличению расстояний между многими узлами и, как следствие, увеличению среднего межзвучного расстояния и даже увеличению диаметра всей сети.



*Рис. 7. Визуализация компьютерной модели сети ЕНЭС. Размер узлов определяется количеством связей (степенью) узла, цвет связей определяется центральностью по посредничеству (синие узлы – наиболее центральные)*

В рамках данного исследования на основе компьютерной модели ЕНЭС была рассчитана центральность по посредничеству узлов сети ЕНЭС, результаты расчетов визуализированы на сети на рис. 7 и представлены в виде гистограммы на рис. 8. Из рисунков видно, что в сети ЕНЭС есть несколько узлов, имеющих очень высокую центральность по посредничеству и образующих цепь, проходящую через всю центральную часть ЕНЭС. Перечислим состав этой цепи (в скобках приведена центральность узлов по посредничеству): ПС 750 кВ Ленинградская (0,23) – АЭС Калининская (0,32) – ПС 750 кВ Владимирская

(0,30) – ПС 500 кВ Радуга (0,19) – ПС 500 кВ Арзамасская (0,21) – ПС 500 кВ Осиновка (0,19) – ПС 500 кВ Вешкайма (0,35). Особый статус этих узлов с точки зрения центральности по посредничеству подчеркивает анализ распределения всех узлов по этому показателю: среднее значение центральности по посредничеству среди всех узлов сети составляет 0,0213, медиана 0,0038, значение 90-го, 95-го и 98-го перцентилей, соответственно: 0,0667, 0,1121 и 0,1880. Из анализа распределения величины центральности по посредничеству видно, что все перечисленные узлы относятся к 2% узлов с самой высокой центральностью по посредничеству и имеют значение этого показателя на порядок выше среднего значения по всей сети и на два порядка выше медианного значения по всей сети.

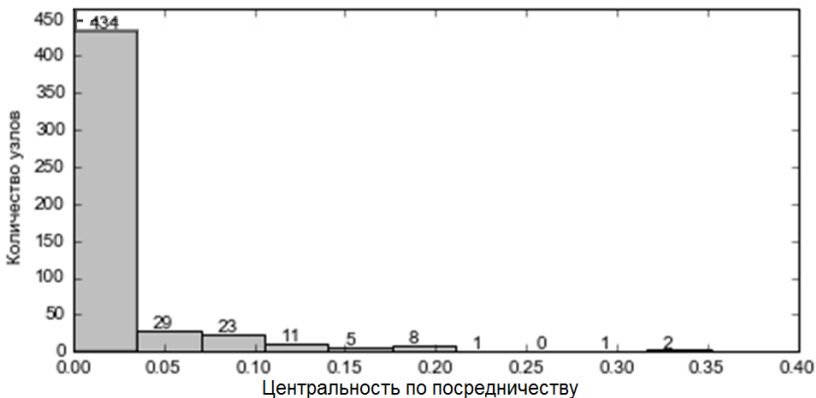


Рис. 8. Гистограмма распределения узлов сети ЕНЭС по уровню центральности по посредничеству

Визуальный анализ позволяет объяснить особую роль этих узлов: они обеспечивают очень короткий (в топологическом смысле) путь через центральную часть сети. Обеспечивается это за счет очень большой протяженности ЛЭП на некоторых участках этой цепочки, что особенно важно ввиду прохождения линий по территории с высокой плотностью узлов, для которой характерны относительно короткие (в географическом смысле) связи между узлами. Большая протяженность ЛЭП в этой це-

почке определяется тем, что они работают с использованием сверхвысокого напряжения (500–750 кВ), а применение данного уровня напряжения рационально только для передачи электроэнергии на большие расстояния.

Таким образом, проведенный анализ центральности по посредничеству позволил идентифицировать узлы и связи ЕНЭС, формирующие структуру тесного мира и требующие особого внимания при анализе надежности сети, в особенности при рассмотрении сценариев каскадных отключений.

## **9. Выводы**

В результате данного исследования разработан новый метод анализа топологической структуры сетей, имеющих пространственную привязку узлов. Данный метод применим для различных инфраструктурных сетей, имеющих географическую привязку узлов и позволяет корректно определить степень близости их структуры к структуре сетей тесного мира. Для решения этой задачи разработана процедура геолаттисизации – новый метод построения регуляризованного аналога для сетей с географической привязкой узлов. На основе характеристик рассматриваемой сети и характеристик ее рандомизированного и регуляризованного аналогов рассчитывается значение числовой меры близости сети к структуре сети тесного мира.

Предложенная мера близости позволяет более корректно идентифицировать структуру сети, проводить более точный сравнительный анализ реальных инфраструктурных сетей с точки зрения их близости к сетям тесного мира. Кроме того, предложенные методы позволяют для проведения сравнительного анализа генерировать искусственные сети-аналоги, обладающие идентичными характеристиками в смысле обладания свойствами тесного мира. Сравнение с этими аналогами позволяет выявлять индивидуальные свойства сети на фоне свойств всего класса сетей с аналогичными топологическими свойствами, что позволяет вывести анализ характеристик сети на качественно новый уровень.

Разработанная мера близости к сетям тесного мира и ее базовый вариант ранее не использовались для анализа структуры

магистральных электросетей. Кроме того, методы теории сложных сетей еще не получили распространения при анализе одной из крупнейших мировых магистральных электросетей – Единой национальной (общероссийской) электрической сети. В данной работе новые методы были применены для исследования свойств ЕНЭС, в результате чего был сделан надежный вывод о принадлежности ЕНЭС к сетям тесного мира. Данный вывод позволяет использовать модель сетей тесного мира для ключевых задач исследования ЕНЭС, таких как анализ вопросов надежности (в частности, устойчивости к каскадным отключениям) и эффективности сети. Так как предыдущие исследования показали ключевую роль «длинных связей» (ключевых структур модели тесного мира) в процессе каскадных отключений, то данной работой, по сути, обоснована необходимость проведения анализа уязвимости ЕНЭС к каскадным отключениям с учетом специфики ее топологии (принадлежности к сетям тесного мира). В данном исследовании не только определены общие характеристики сети, но и идентифицированы «длинные связи» ЕНЭС, формирующие структуру тесного мира и требующие особого внимания при анализе надежности сети.

Необходимо отметить, что принадлежность ЕНЭС к сетям тесного мира определяет не только специфические риски для надежности сети, но и делает сеть более компактной, что положительно сказывается на эффективности передачи электроэнергии на дальние расстояния. Таким образом, принадлежность ЕНЭС к сетям тесного мира является не недостатком ЕНЭС, а ее особенностью, имеющей положительные и отрицательные стороны. Развитие результатов, представленных в данной работе, может позволить корректно учесть специфику ЕНЭС и создать аналитические модели и методы управления, позволяющие минимизировать отрицательные аспекты, присущие топологической структуре ЕНЭС и другим инфраструктурным сетям с аналогичными свойствами.

## Литература

1. Данные *OpenStreetMap* в форматах *XML* и *PBF*. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://gis-lab.info/projects/osm\\_dump/](http://gis-lab.info/projects/osm_dump/).
2. ЕВИН И.А. *Введение с теорию сложных сетей* // Компьютерные исследования и моделирование. – 2010. – Т. 2, №2. – С. 121–41
3. *Схема и программа развития ЕНЭС на 2013–2019 годы*. – Приказ Минэнерго России №309 от 19.06.2013.
4. *Услуги по технологическому присоединению: центры титания*. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://portaltp.fsk-ees.ru/sections/Map/map.jsp>.
5. BARRAT A., BARTHELEMY M., VESPIGNANI A. *The effects of spatial constraints on the evolution of weighted complex networks* // J. Stat. Mech. – 2005. - P. 503
6. BARTHELEMY M. *Spatial Networks* // Condensed Matter, Statistical Mechanics – 2011. - arXiv:1010.0302, Physics Reports №499 - P. 1–101.
7. *Brain Connectivity Toolbox*. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.brain-connectivity-toolbox.net>.
8. ERDŐS P., RÉNYI A. *On Random Graphs I* // Publ. Math. Debrecen. - 1959. – Vol. 6, - P. 290–297.
9. FRUCHTERMAN T., REINGOLD E. *Graph drawing by force-directed placement* // Software – Practice and Experience. – 1991. – Vol. 21(11) – P. 1129–1164.
10. *Geohash is a Python module that provides functions for decoding and encoding Geohashes to and from latitude and longitude coordinates*. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://github.com/vinsci/geohash/>.
11. *Gephi: The Open Graph Viz Platform*. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://gephi.org/>.
12. HAN P., DING M. *Analysis of Cascading Failures in Small-world Power Grid* // Int. J. of Energy Science. – 2011 - Vol. 1, No. 2 - P. 99-104.
13. HUMPHRIES M.D., GURNEY K. *Network 'small-world-ness': a quantitative method for determining canonical network equivalence* // PLoS One 3:e0002051 – 2008.

14. KIM C.J., OBAH O.B. *Vulnerability Assessment of Power Grid Using Graph Topological Indices* // Int. J. of Emerging Electric Power Systems. – 2007. – Vol. 8, Issue 6, Article 4.
15. KLEINBERG J.M. *Navigation in a small world* // Nature. – 2000. – No. 406 – P. 845
16. *NetworkX: Python language software package for the creation, manipulation, and study of the structure, dynamics, and functions of complex networks*. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://networkx.github.io/>.
17. *OpenStreetMap*. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.openstreetmap.org/>.
18. PAGANI G.A., AIELLO M. *The Power Grid as a Complex Network: a Survey* // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. – 2011. - №392(11). – P. 2688–2700.
19. PANDIT S.A., AMRITKAR R.E. *Random spread on the family of small-world networks* // Phys. Rev. E. – 2001. - No. 63. – Article ID: 041104.
20. RUBINOV M., SPORNS O. *Complex network measures of brain connectivity: uses and interpretations* // Neuroimage. – 2010. – No. 52 – P. 1059–1069.
21. TELESFORD Q.K., JOYCE K.E., HAYASAKA S., BURDETTE J.H., LAURIENTI P.J. *The Ubiquity of Small-World Networks* // Brain Connect. – 2011. - No. 1(5). – P. 367–75
22. WATTS D.J. *Small Worlds: The Dynamics of Networks between Order and Randomness*. - Princeton, NJ, USA: Princeton University Press, 2003.
23. WATTS D.J., STROGATZ S. *Collective dynamics of 'small-world' networks* // Nature. – 1998. – No. 393 – P. 440–442.

## ANALYSIS OF STRUCTURE OF THE POWER TRANSMISSION GRID IN RUSSIA: EVALUATION OF THE SMALL WORLD MODEL APPLICABILITY

**Sergey Makrushin**, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Cand.Sc., assistant professor (s-makrushin@yandex.ru, SVMakrushin@fa.ru).

*Abstract: In the paper complex network theory are used for analysis of spatial and topology structure of the United national energy system (UNES). The research is mainly focused on the applicability of the small-world network model to UNES. Small world networks are fragile to cascade failure effects and it implies the importance of this model for power grids network analysis. Although much research on applicability of the small world model to national level transmission grids has been done, there is no consolidated opinion on the subject. In the paper the latticization algorithm and small world criterion based on it have been used for transmission grid analysis for the first time. Geo-lattisization algorithm has been developed for more precise analysis of infrastructure networks with geographic binding of nodes. A reliable conclusion that the small world model is applicable to the UNES has been made using this methods. New methods could be used for others infrastructure networks analysis.*

Keywords: complex network theory, network topology, small world, power transmission grid, UNES.

*Статья представлена к публикации членом редакционной коллегии В.В. Мазаловым.*

*Поступила в редакцию 09.06.2016.  
Опубликована 31.01.2017.*