

УДК

М.А. Липовецкая, А.М. Карпачевский, lipoveckayama@my.msu.ru
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ МАГИСТРАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ РОССИИ В ПЕРИОД 1933 – 2020 ГГ.

В статье разрабатывается методика оценки пространственной структуры магистральных электрических сетей и её изменений во времени на примере электросетей, расположенных на территории современной России в период 1933 – 2020 гг. Оценка производится на основании расчётов трёх показателей структуры сетей для региональных энергосистем на каждый год рассматриваемого периода. Полученные данные объединяются в одну пространственную характеристику структуры электросетей. Анализ и картографирование результатов производится по четырём реперным точкам развития.

Ключевые слова: электросеть, развитие сети, пространственная структура сети, геоинформационное моделирование

М. Lipovetskaya, A. Karpachevskiy, lipoveckayama@my.msu.ru
Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

GEOINFORMATION MODELING OF CHANGES IN THE SPATIAL STRUCTURE OF THE MAIN POWER GRIDS OF RUSSIA IN THE PERIOD 1933-2020

The article develops a methodology for assessing the spatial structure of main power grids and its changes over time using the example of power grids located in modern Russia in the period 1933-2020. The assessment is made on the basis of calculations of three indicators of the structure of networks for regional power systems for each year of the period under consideration. The obtained data are combined into one spatial characterization of the power grid structure. The results are analyzed and mapped by four developmental reference points.

Keywords: power grid, network development, spatial structure of the grid, geoinformation modeling

Стабильность функционирования энергосистемы во многом зависит от стабильности функционирования электросетей. Магистральные электрические сети России, чьё напряжение составляет 220 кВ и выше, являются наиболее стратегически важными объектами. Работа сетей предопределяется их пространственной структурой, то есть взаимным пространственным расположением электрических станций (далее ЭС), подстанций (далее ПС) и линий электропередачи (далее ЛЭП), а также их характеристиками.

Современное состояние магистральных электросетей формировалось в течение длительного времени путём преобразования их пространственной структуры, начиная с 1933 г., когда была проложена первая ЛЭП напряжения 220 кВ. Комплексное изучение сетей от начала их развития позволяет выявить основные тренды изменения их пространственной структуры, что особенно актуально для прогнозирования дальнейшего развития. Актуальность также заключается в отсутствии исследований изменений сетей и универсальных подходов к картографированию.

Моделирование изменений пространственной структуры сетей производилось на основе базы данных «Пространственно-временное развитие магистральных электрических сетей России в период 1933-2020 гг.», которая содержит пространственно-временные данные о магистральных электросетях России, ЭС и ПС, объекты отпаяк, распределительные и

переходные пункты. Каждый объект БД содержит атрибутивную информацию о периоде эксплуатации с точностью до года, а также напряжение ЛЭП и ПС.

Стабильное функционирование энергосистемы напрямую зависит от устойчивости электросетей, что в свою очередь связано со структурной уязвимостью. Следовательно, пространственно-временное развитие энергосистемы должно быть направлено на понижение уязвимости её электросети, что обуславливает необходимость анализа таких показателей пространственной структуры, по которым можно судить об изменении свойства уязвимости на разных этапах их развития. Первым таким показателем является взвешенная эффективность сети [1]:

$$E(G) = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i,j \in N, i \neq j} \frac{1}{d_{ij}^w}, \quad (1)$$

где G – электросеть, представляемая в виде графа, i и j – узлы графа, d_{ij}^w – взвешенное кратчайшее расстояние между этими узлами. Чем больше значение эффективности, тем меньше взвешенные кратчайшие расстояния между узлами, следовательно, элементы на этих путях являются менее уязвимыми, как и вся сеть.

Второй показатель, информационная центральность, характеризует однородность сети:

$$I = \frac{E(G) - E'(G)}{E(G)} = 1 - \frac{E'(G)}{E(G)}, \quad (2)$$

где $E(G)$ – исходная взвешенная эффективность сети, $E'(G)$ – взвешенная эффективность сети, рассчитанная без случайного узла и инцидентных рёбер. Показатель тем больше, чем меньше отношение эффективностей, которое в свою очередь тем меньше, чем меньше значение эффективности без одного узла, что обуславливается возрастанием кратчайших путей из-за отсутствия резервных способов снабжения. Следовательно, высокие значения информационной центральности говорят о неоднородности сети и её уязвимости.

В данном исследовании предлагается исключать из сети не случайный узел, а наиболее уязвимую подстанцию, которая определяется на основе расчёта индексов уязвимости SVI подстанций [2]:

$$SVI = \frac{P_{gj}}{P_{li}(Z_{ij})}, \quad (3)$$

где P_{li} – напряжение подстанции i , P_{gj} – напряжение электростанции j , Z_{ij} – кратчайшее расстояние между ними. Чем меньше значение индекса SVI подстанции, тем более она уязвима и наоборот.

Для всех рассмотренных показателей предлагается модификация расстояния между элементами сети в виде синтезированного показателя из трёх параметров ЛЭП: пропускной способности (максимальной силы тока), возраста и протяженности. Для параметров были определены их весовые коэффициенты на основе метода анализа, которые перемножаются на значения соответствующих параметров, далее значения суммируются и формируется вес линии. В исследовании магистральные электросети разбиваются на 69 региональных энергосистем, существующих на момент 2020 г., так как это позволяет учитывать региональные особенности сетей.

Моделирование изменений пространственной структуры производится в программном коде с использованием библиотеки *NetworkX*. В коде организуется цикл прохода по годам с 1933 по 2020, внутри которого в цикле по каждой из региональных энергосистем обрезаются импортированные линейные и точечные элементы сети на соответствующий год. Для электросетей каждой энергосистемы на каждый год рассчитываются индексы уязвимости подстанций, усредняемые далее для комплексной характеристики уязвимости энергосистемы, далее выявляется наиболее уязвимый узел, после чего рассчитывается общая эффективность сети и эффективность без этого узла и инцидентных рёбер, определяется информационная центральность.

Далее в исследовании определяются этапы развития магистральных электросетей (1933 – 1950, 1950 – 1969, 1969 – 1990, 1990 – 2009, 2009 – 2020 гг.), верхние границы которых являются реперными точками анализа данных об изменениях пространственной структуры.

Для комплексной оценки изменений структуры сетей необходимо объединить рассчитанные показатели в одну пространственную характеристику. Для этого была разработана матрица, в которой пересечение интервалов однородности и уязвимости отображает уровень развития пространственной структуры. Пересечение самых высоких значений индекса уязвимости и самых низких значений информационной центральности свидетельствует о наилучшем уровне развития пространственной структуры.

По результатам анализа реперных точек развития энергосистем (рис. 1) было выявлено, что их низкая эффективность, характерная для начального этапа развития в 1969 г., сильно возросла к 1990 г. Аналогичный рост характерен для показателя однородности электросетей. Развитие сетей к 1990 г. заключается в расширении покрытия ЛЭП, что выражается в отсутствии существенного изменения эффективности при выходе из строя уязвимой подстанции, т.е. длины кратчайших путей между узлами изменяются не существенно. Высокая уязвимость региональных энергосистем в 1969 г. сильно снижается по мере расширения электросетей к 1990 г., так как вводимые в эксплуатацию ЛЭП позволяют передавать электроэнергию поэтапно между подстанциями. Так, в 1969 г. электросети обладают низким уровнем развития их пространственной структуры, так как сети неоднородны. По мере модернизации энергосистем к 1990 г. возрастает уровень развития их пространственной структуры. Стоит отметить, что к 2009 г. значения рассматриваемых показателей практически не изменяются, к 2020 г. несущественно снижается уязвимость и возрастает однородность сетей, однако, в целом, большая часть территорий России по-прежнему находится в условиях топологической предрасположенности к авариям и обладает средним уровнем развития пространственной структуры электросетей.

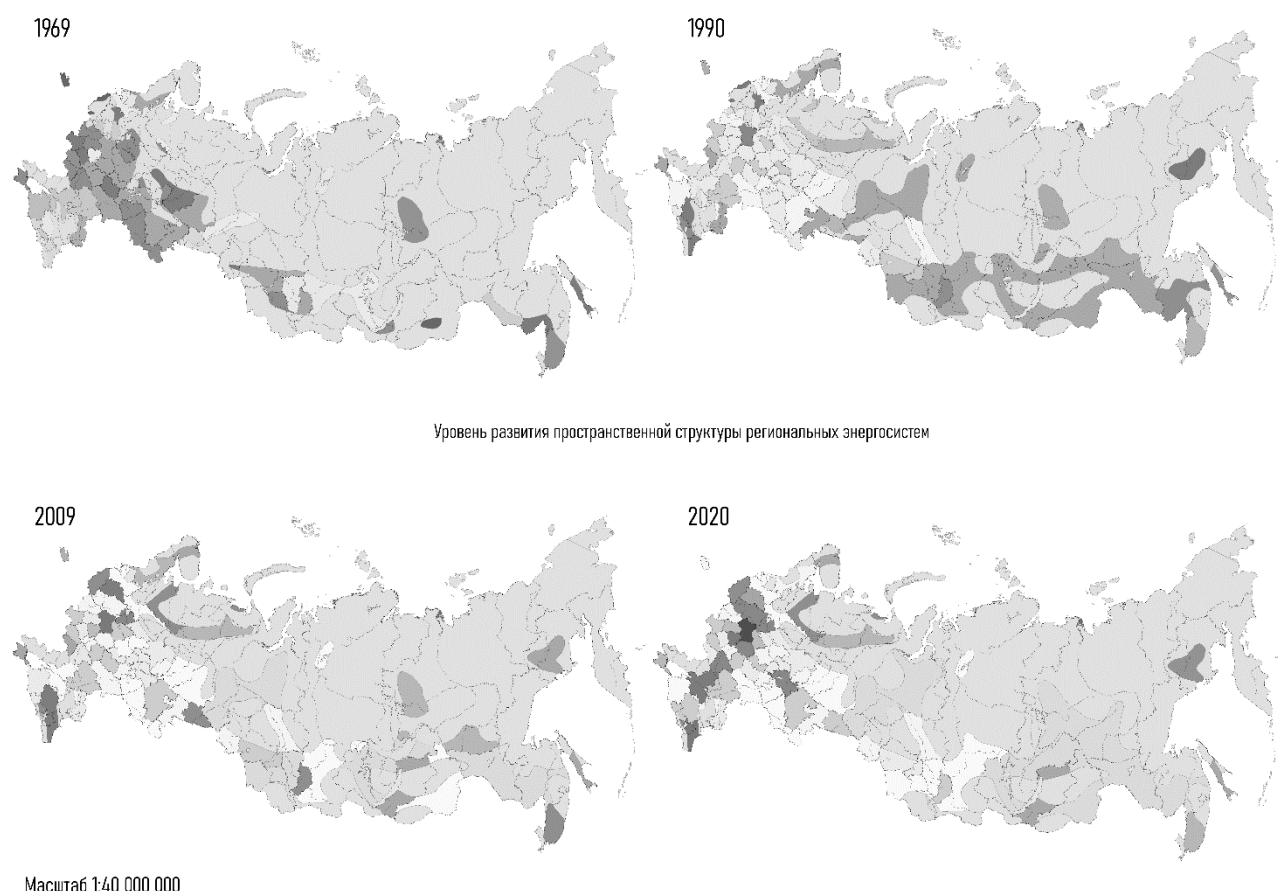


Рис. 1. Синтетическая карта уровня развития пространственной структуры региональных энергосистем России на разных этапах

Разработанная в данном исследовании методика позволяет оценить изменения эффективности, однородности и уязвимости энергосистем России за 1933 – 2020 гг., а разработанный способ картографирования позволяет проанализировать реперные точки пространственно-временного развития электросетей. Созданная в ходе исследования синтетическая карта изменений структуры показала положительную динамику развития региональных магистральных электросетей в целом и неоднородный уровень их развития по стране, что говорит о необходимости их модернизации.

Работа выполнена в рамках проекта «Развитие методов и технологий картографии, геоинформатики и аэрокосмического зондирования в исследованиях природы и общества (ГЗ)», номер ЦИТИС 121051400061-9.

Библиографический список

1. Buzna L., Issacharoff L., Helbing D. The evolution of the topology of high-voltage electricity networks // Int. J. Crit. Infrastruct. 2009. Т. 5. № 1/2. С. 72.
2. Liu C., Xu Q., Chen Z., Bak C. Vulnerability evaluation of power system integrated with large-scale distributed generation based on complex network theory // 2012 47th International Universities Power Engineering Conference (UPEC). Uxbridge, Middlesex, United Kingdom: IEEE, 2012. С. 1–5.