

УДК 911.3

А.М. Фаддеев¹

ОЦЕНКА УЯЗВИМОСТИ ЭНЕРГОСИСТЕМ РОССИИ, СТРАН БЛИЖНЕГО ЗАРУБЕЖЬЯ И ЕВРОПЫ К КАСКАДНЫМ АВАРИЯМ

Представлены результаты расчета структурной уязвимости энергосистем стран ближнего зарубежья, европейских стран и объединенных энергосистем России к каскадным авариям. Сделан обзор традиционных и современных методов топологического анализа структуры транспортных сетей. На основе исследований комплексных сетей разработана методика оценки уязвимости графа электросетей к случайному удалению вершин. С использованием этой методики рассчитана структурная уязвимость рассмотренных энергосистем. Оценено влияние ряда факторов (топологических, политических, экономико-географических и исторических) на территориальное распределение структурной уязвимости энергосистем. Продемонстрирована связь структурной уязвимости энергосистем с базовыми топологическими параметрами графов магистральных электросетей и уровнем экономического развития территории. Выявлены две стратегии обеспечения устойчивости энергосистем, выбор которых обусловлен географическими и политическими факторами.

Ключевые слова: электроэнергетика, передача электроэнергии, транспортные сети, комплексные сети.

Введение. Магистральные электросети представляют собой один из ключевых компонентов электроэнергетической инфраструктуры – они позволяют повысить уровень использования мощности электростанций и тем самым ограничить конечную цену электроэнергии. Несмотря на постоянное строительство электросетевых объектов, энергосистемы продолжают испытывать серьезные каскадные аварии [Crucitti et al., 2004, p. 92] – нарушения, при которых выход из строя одних элементов сети влечет за собой отключение ряда других из-за перегрузки. В качестве примеров крупнейших нарушений, повлекших отключение потребителей суммарной мощностью несколько гигаватт в последние 15 лет, можно упомянуть аварии в 2003 г. на северо-востоке США и в Канаде, в 2005 г. в Центральной России, в 2006 г. в Германии, в 2012 г. в Индии. Серьезный ущерб, причиняемый подобными авариями, делает актуальной задачу определения уязвимости энергосистем к ним.

Кроме того, в последние годы в России резко возросла сетевая составляющая цены электроэнергии, что вынудило регулирующие органы сократить инвестиционные программы сетевых компаний. Оценка уязвимости энергосистем к каскадным авариям может послужить критерием для определения адекватности территориального распределения капитальных вложений в электросетевую инфраструктуру.

Наконец, интерес представляет сравнение уязвимости энергосистем, возведенных в условиях рыночной экономики (в странах Западной Европы) и построенных под прямым государственным контролем (в бывших социалистических странах).

Цель работы – определение факторов, обуславливающих уязвимость энергосистем России, стран

ближнего зарубежья и Европы к каскадным авариям с использованием методов топологического анализа.

Существенная проблема заключается в том, что данные о нарушениях работы электросетей в разных странах формируются по разным методикам. Так, в России сетевые компании агрегируют данные обо всех авариях, а сообщество европейских операторов магистральных электросетей ENTSO-E – только о наиболее серьезных нарушениях.

В связи с этим были поставлены две задачи: 1) разработать методику оценки уязвимости энергосистем; 2) определить факторы (топологические, политические, экономико-географические и исторические), обуславливающие различия в уязвимости энергосистем по странам и регионам.

Материалы и методы исследований. Во второй половине XX в. в географии транспорта для описания структуры сетей стали широко применять номотетические модели, основанные на теории графов [Тархов, 2005, с. 30]. Подобный подход был применен и автором. Энергосистема рассматривается в качестве графа, состоящего из ребер, соответствующих линиям электропередач (ЛЭП), и вершин, соответствующих подстанциям и электростанциям. Рассмотрены исключительно топологические свойства энергосистем. Отказ от учета распределения реальных потоков электроэнергии ведет к некоторому снижению точности расчета уязвимости энергосистемы к авариям [Hines et al., 2010, p. 5], но это неизбежно, поскольку национальные операторы магистральных электросетей не раскрывают информацию о потоках, чтобы избежать манипулирования на энергорынках. Таким образом, уязвимость энергосистем к авариям автор рассматривает

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра экономической и социальной географии России, аспирант; e-mail: faddeev@list.ru

ет исключительно в структурном (топологическом) аспекте.

Традиционно используемые в географии транспорта базовые индексы, отражающие топологическую структуру сети, – показатели β (отношение числа ребер в графе к числу вершин), π (отношение совокупной длины ребер в графе к длине его диаметра) и другие, разработанные К. Канским [Kansky, 1963], – недостаточно адекватны поставленной задаче по двум причинам.

Во-первых, электросети отличаются от других транспортных сетей выраженной иерархичностью – большинство подстанций обладает малым числом инцидентных (смежных) ребер, но некоторые подстанции наиболее высоких классов напряжения характеризуются большим числом инцидентных ребер (иногда их, по аналогии с авиационным транспортом, называют «хабами» [Pagani, Aiello, 2013, p. 2694]).

Иерархичность существенно влияет на структурную уязвимость сети [Rosas-Casals et al., 2007, p. 2473; Albert et al., 2004, p. 3]. Графы с разной иерархичностью при одинаковой обеспеченности ребрами ($\beta = 0,9$) по-разному реагируют на удаление вершин. Высокоиерархичный граф (граф в форме звезды) отличается низкой уязвимостью при удалении одной случайно выбранной вершины: вероятность его распада на несколько компонентов составляет 0,2. Эта же вероятность для низкоиерархичного графа (граф в форме кольца) составляет 0,8. В то же время высокоиерархичный граф отличается высокой уязвимостью к удалению «хабов».

Во-вторых, даже более сложные топологические индексы не учитывают того, что вершины электросетевого графа разделяются на два типа: электростанции (источники электроэнергии) и подстанции (обеспечивают передачу электроэнергии потребителям²). Энергосистемы, характеризующиеся малым числом электростанций, отличаются высокой уязвимостью, что не фиксируется при использовании традиционных показателей.

В связи с этим для оценки уязвимости выполнено моделирование каскадных аварий, разработанное на основе исследований в сфере анализа комплексных сетей («complex network analysis»). Это научное направление занимается изучением реальных эволюционирующих графов высокой сложности, характеризующихся нетривиальными топологическими свойствами [Voccaletti et al., 2006, p. 177]. Теоретической основой послужила модель случайного графа, разработанная венгерскими математиками П. Эрдемем и А. Реньи [Erdős, Rényi, 1959]. В конце 1990-х гг. были составлены такие модели графов, как «тесный мир» («small-world») [Watts, Strogatz, 1998] и масштабно-инвариантная сеть

(«scale-free») [Barabasi, Albert, 1999]. Вскоре выяснилось, что эти модели применимы к электрическим сетям [Albert et al., 2004], и появилось большее число работ, оценивающих уязвимость электрических сетей с точки зрения топологической структуры, например [Pagani, Aiello, 2013, p. 2689–2690].

Определение факторов, которые обуславливают различия в уязвимости по странам и регионам, проводилось с помощью корреляционного анализа.

Объектом исследования послужили энергосистемы, под которыми понимаются магистральные электросети (линии электропередач (ЛЭП) и подстанции с рабочим напряжением 220 кВ и выше) и крупные электростанции (с установленной мощностью 500 МВт и более). Территория исследования охватывала Единую энергосистему (ЕЭС) России и других стран бывшего СССР, энергосистемы стран континентальной Европы, а также Великобритании и Ирландии. Территория исследования разделена на 26 ячеек (энергосистем), каждая из которых включает от 50 до 577 вершин. Большинство ячеек соответствует государственным границам, но некоторые из них включают несколько стран с малым размером энергосистем (страны Бенилюкс, Средней Азии, Восточной Европы, Скандинавии и т.д.). ЕЭС России из-за большого размера разделена на 7 компонентов, соответствующих объединенным энергосистемам (ОЭС), разделена и энергосистема Германии, восточная и западная части которой в течение продолжительного периода времени развивались независимо. Кроме того, в некоторых местах границы энергосистем не соответствуют государственным границам (например, Калининградская область рассматривается в составе энергосистемы Белоруссии и стран Прибалтики).

Данные о состоянии энергосистем России и стран ближнего зарубежья приводятся по состоянию на начало 2015 г. по данным ОАО «Системный оператор ЕЭС» [Схема..., 2015] и других электроэнергетических компаний. Данные о состоянии энергосистем остальных европейских стран приводятся по состоянию на начало 2013 г. по данным ENTSO-E [2013 ENTSO-E..., 2015].

Результаты исследований и их обсуждение.
Методика оценки уязвимости. В большинстве работ, посвященных оценке уязвимости энергосистем к каскадным авариям, моделируются атаки на наиболее важные узлы сети. Однако вероятность осуществления координированных атак на ряд подстанций гораздо ниже, чем вероятность череды случайных аварий. В связи с этим моделирование было основано на удалении случайно выбранных узлов – в применении этого метода для оценки уязвимости ряда энергосистем состоит научная новизна работы.

² Подстанции выполняют двоякую роль в энергосистемах. С одной стороны, они передают электроэнергию от электростанций к потребителям (или в распределительные сети более низкого класса напряжения). С другой стороны, подстанции могут заниматься исключительно передачей электроэнергии от одной подстанции к другой. Однако число подстанций, на которых не происходит передача электроэнергии потребителям (или в распределительные сети), относительно невелико. Автор считает, что все подстанции являются узлами потребления электроэнергии.

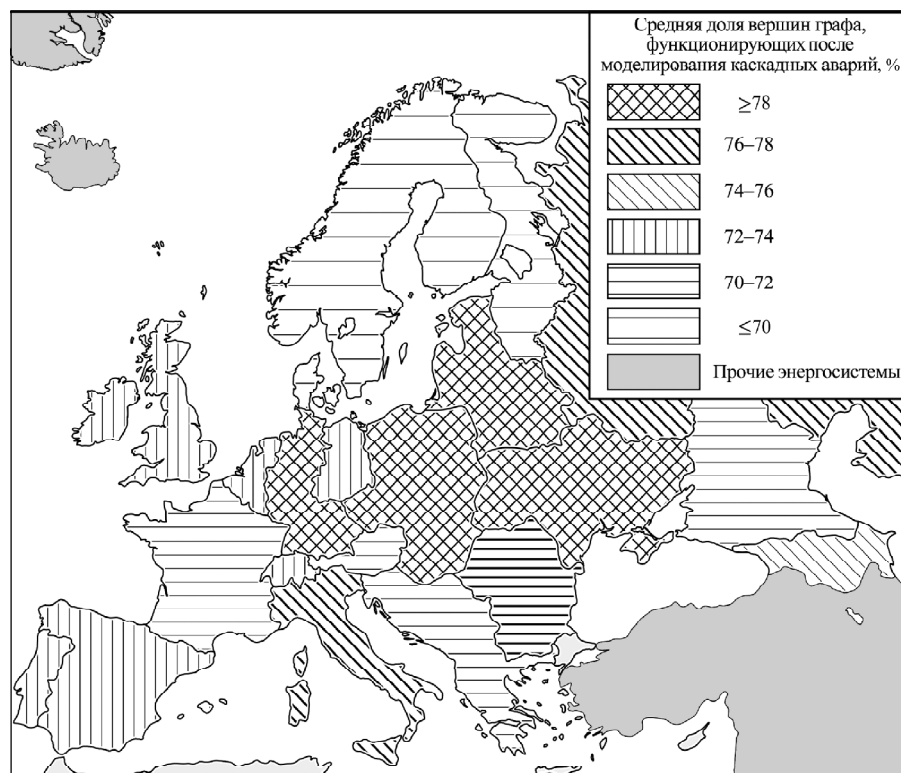


Рис. 1. Схема устойчивости энергосистем европейских стран к каскадным авариям. Составлена автором

Fig. 1. Vulnerability of transmission systems of European countries to cascade faults. Compiled by the author

Алгоритм моделирования разработан на базе методики, предложенной А. Моттером и И.-Ч. Лаи [Motter, Lai, 2002]. Алгоритм предусматривает проведение определенного числа симуляций с удалением заданного числа случайно выбранных вершин. В начале каждой симуляции проводятся следующие процедуры:

1) расчет кратчайших путей от всех подстанций до ближайших электростанций;

2) расчет приходящейся на все подстанции нагрузки (здесь под нагрузкой понимается число проходящих через подстанцию кратчайших путей, рассчитанных на предыдущем шаге).

Затем последовательно удаляются случайно выбранные подстанции. После удаления очередной случайно выбранной подстанции кратчайшие пути и нагрузки пересчитываются. Если текущее значение нагрузки на определенной подстанции более чем в 2 раза превышает изначальное значение, то она удаляется, таким образом имитируется перегрузка подстанции. Вершины, из которых нельзя добраться до электростанций, также подвергаются удалению.

Затем удаляется последующая случайно выбранная подстанция, этот цикл повторяется до тех пор, пока не будет удалено заранее заданное число подстанций.

В исследовании удалялись 5, 10, 15, 20 и 25% вершин графа, в рамках каждого из которых проводилось по 100 симуляций. В качестве критерия устойчивости энергосистемы (параметр, обратный уязвимости) было принято отношение оставшегося после моделирования аварии числа вершин графа к их изначальному числу, причем полученное значение подвергалось усреднению по 500 симуляциям.

Модель не учитывает ряд условий, существующих в реальных энергосистемах, в частности, не учитывается, что ЛЭП более высокого напряжения и двухцепные ЛЭП (две параллельные ЛЭП, соединяющие одну подстанцию) обладают более высокой пропускной способностью, а крупные подстанции и электростанции характеризуются разной мощностью и т.д.

Моделирование проводилось с помощью программы, составленной на языке программирования Python с использованием свободно распространяемой библиотеки «NetworkX» [NetworkX]. Результаты моделирования представлены на рис. 1 и 2 и в таблице.

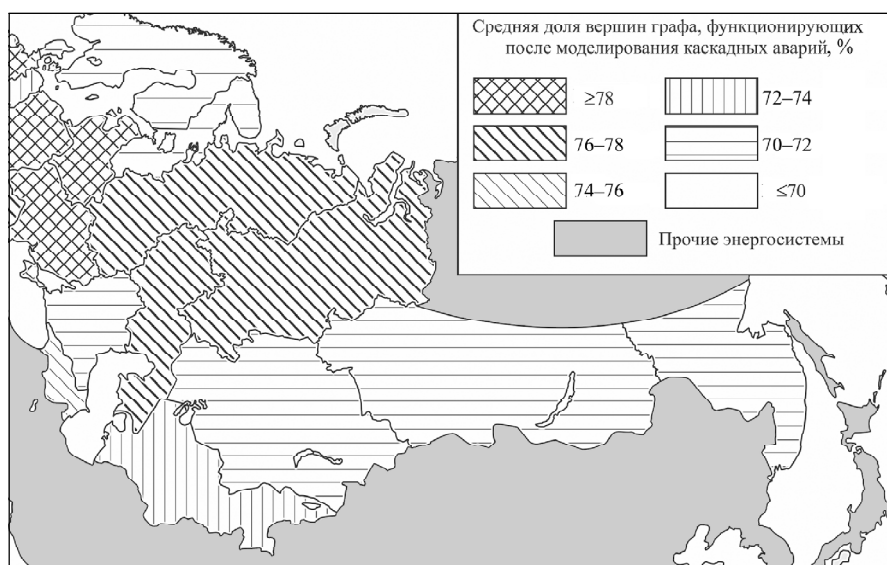


Рис. 2. Схема устойчивости энергосистем России и стран ближнего зарубежья к каскадным авариям. Составлена автором

Fig. 2. Vulnerability of transmission systems of Russia and former Soviet Union countries to cascade faults. Compiled by the author

Сравнение полученных результатов с отчетными данными о среднем масштабе технологических нарушений в магистральных электросетях ОЭС России показывает достаточную адекватность модели: в трех ОЭС с низкой уязвимостью (Центр, Средняя Волга и Урал) средний недоотпуск электроэнергии, вызванный каждой аварией в магистральных сетях за 2011–2014 гг., составляет ~450 кВт/ч, а в четырех ОЭС с высокой уязвимостью – > 700 кВт/ч [Сводные..., 2015].

Рассчитанная устойчивость энергосистем не зависит от размера рассматриваемого графа (коэффициент линейной корреляции между показателями составляет –0,09). Зависимость устойчивости от конфигурации энергосистем также оказалось довольно низкой: коэффициент корреляции между рассчитанным показателем и видоизмененным индексом π К. Канского [Kansky, 1963, p. 22] (отношение суммарной длины ребер графа к его диаметру) составил 0,1.

Факторы, обуславливающие различия в уязвимости энергосистем по странам и регионам. Результаты расчетов показывают, что принципиальные различия в уязвимости ОЭС России от энергосистем других стран бывшего СССР и Европы отсутствуют.

Наблюдается довольно низкая, но статистически значимая корреляция между рассчитанным показателем устойчивости энергосистем и их базовыми топологическими характеристиками – показателем β (коэффициент корреляции 0,36) и долей электростанций среди вершин графа (0,47).

Значимость последнего показателя в значительной мере объясняет высокую уязвимость энергосистемы Франции, выделяющуюся на фоне других крупных европейских стран. Причина заключается в том, что генерирующие мощности Франции представлены по большей части атомными электростанциями (АЭС), для которых в наибольшей мере характерна заводская концентрация. Средняя мощность электростанций в диапазоне от 500 МВт во Франции составляет 2,4 ГВт при среднем значении на рассматриваемой территории 1,4 ГВт. Это означает, что в энергосистеме Франции относительно низка плотность крупных электростанций, чем и обусловлена ее относительно низкая устойчивость к авариям.

Для ОЭС России наблюдается, с одной стороны, выраженная связь между их уязвимостью, а с другой – с уровнем экономического развития (рассматривался среднедушевой уровень ВРП по ОЭС), а также с плотностью населения соответствующих территорий. Так, минимальная уязвимость характерна для ОЭС Центра, средней Волги и Урала, в которых средневзвешенный уровень ВРП на душу населения составляет 400 тыс. руб./человека (по данным за 2012 г.). В оставшихся 4 ОЭС (Северо-Запад, Юг, Сибирь и Восток) значение этого показателя составляет 260 тыс. руб./человека. Для плотности населения средневзвешенные значения по 2 группам ОЭС составляют ~22 человека/км² и ~7 человек/км²

Средняя доля вершин графа, функционирующая после моделирования каскадных аварий

Энергосистема	Значение, %
ОЭС Центра (включая энергосистему Европейского Севера)	78,0
ОЭС Северо-Запада	69,3
ОЭС средней Волги (включая энергосистему Западного Казахстана)	76,1
ОЭС Юга	71,0
ОЭС Урала	77,5
ОЭС Сибири	70,6
ОЭС Дальнего Востока	71,1
Белоруссия и Прибалтика (включая энергосистему Калининградской области)	78,3
Украина и Молдавия	78,3
Закавказье	74,6
Казахстан	71,3
Средняя Азия	73,9
Германия (восточные земли)	73,0
Германия (западные земли)	78,4
Польша, Чехия, Словакия, Венгрия	78,9
Румыния, Болгария	77,7
Страны бывшей Югославии, Албания, Греция	71,5
Фенноскандия (Норвегия, Швеция, Финляндия, Дания)	63,7
Франция	70,2
Италия	76,1
Великобритания и Ирландия	73,2
Страны Бенилюкс	73,5
Испания	73,1
Португалия	73,5
Австрия	71,7
Швейцария	72,2

соответственно. Вероятно, это означает, что энергосистемы на более плотно освоенных территориях, с более высоким уровнем экономического развития достигают более высокого уровня развития, но при этом снижается их структурная уязвимость.

Прослеживается связь с возрастом энергосистем бывшего СССР: 3 ОЭС с низкой уязвимостью (Центр, средняя Волга, Урал) были объединены в единую энергосистему в 1956–1958 гг., еще четыре ОЭС в европейской части СССР (Северо-Запад России, Юг России, Прибалтика и Белоруссия, Украина) подключены к ней в 1962–1966 гг. В 1970–1972 гг. последовала очередь более уязвимых ОЭС Закавказья, Казахстана и Средней Азии, а ОЭС Сибири и Востока были присоединены еще позднее. Таким образом, на территории бывшего СССР наблюдается выраженное центр-периферийное, исторически обусловленное распределение уязвимости ОЭС.

Однако описанные связи уязвимости энергосистем с базовыми экономико-географическими показателями на первый взгляд не просматриваются в европейских странах. Подобное искажение связано с тем, что в ряде стран устойчивость энергосистем обеспечивается не за счет развития магистральных электросетей и крупных электростанций (как это было реализовано в СССР, Великобритании и Франции), а за счет развития сети 132 кВ и ниже. К подобным странам и регионам относятся Австрия, Швейцария, Скандинавские страны и восточные земли Германии (а среди российских ОЭС к ним наиболее близка ОЭС Северо-Запада). В этих странах и регионах особое развитие получили гидроэлектростанции (ГЭС) и электростанции, использующие возобновляемые источники энергии. Для этих типов электростанций заводская концентрация характерна в меньшей степени, чем для тепловых электростанций (ТЭС) и АЭС, а потому их мощность выдается преимущественно (в среднем более чем на 2/3) по распределительным ЛЭП (небольшое число крупных электростанций в этих регионах видно на рис. 3 и 4).

Если исключить из рассмотрения указанные 4 энергосистемы, обнаруживается корреляция между рассчитанным показателем устойчивости энергосистем и конфигурацией территории, выраженной отношением среднего топологического расстояния между парами вершин к диаметру графа (коэффициент корреляции 0,43).

Выводы:

- подтверждена связь между уязвимостью энергосистем и их базовыми топологическими характеристиками – конфигурацией, а также обеспеченностью ЛЭП и электростанциями;
- не обнаружены принципиальные различия в уязвимости к каскадным авариям объединенных энергосистем России от энергосистем других стран бывшего СССР и Европы;
- выявлены две стратегии обеспечения устойчивости энергосистем. Первая стратегия предполагает развитие магистральных ЛЭП, выдающих мощность крупных ТЭС и АЭС. Вторая стратегия предполагает развитие распределительных ЛЭП, выдающих мощность малых и средних электростанций, использую-

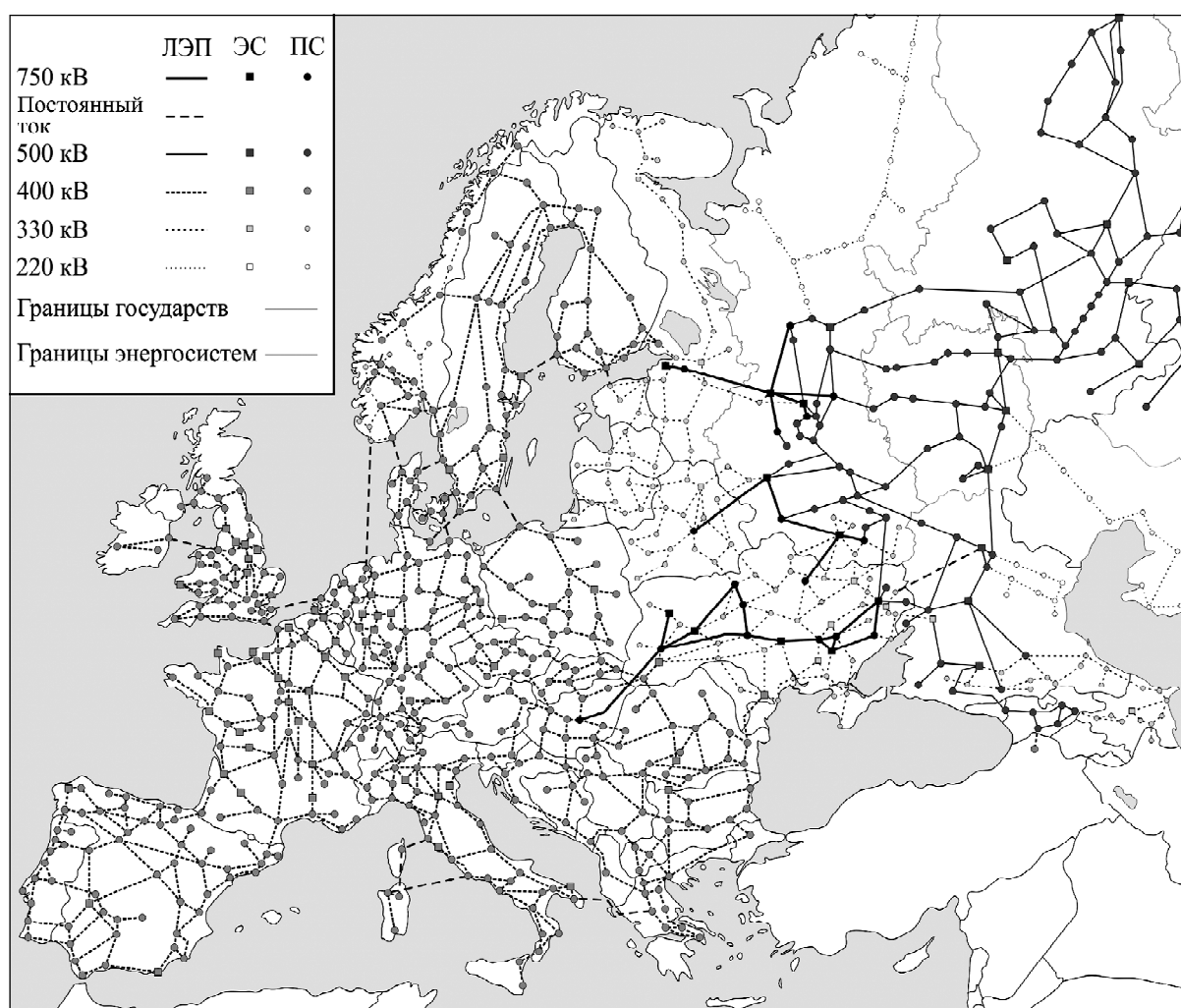


Рис. 3. Схема магистральных электрических сетей европейских стран: ЛЭП – линия электропередач, ПС – подстанция, ЭС – электростанция. Показаны электростанции мощностью ≥ 2 ГВт. Составлена автором по данным [Схема..., 2015; 2013 ENTSO-E..., 2015]

Fig. 3. Transmission lines of European countries: ЛЭП – transmission line, ПС – substation, ЭС – power station (above 2 GW). Compiled by the author basing on [Skhema..., 2015; 2013 ENTSO-E..., 2015]

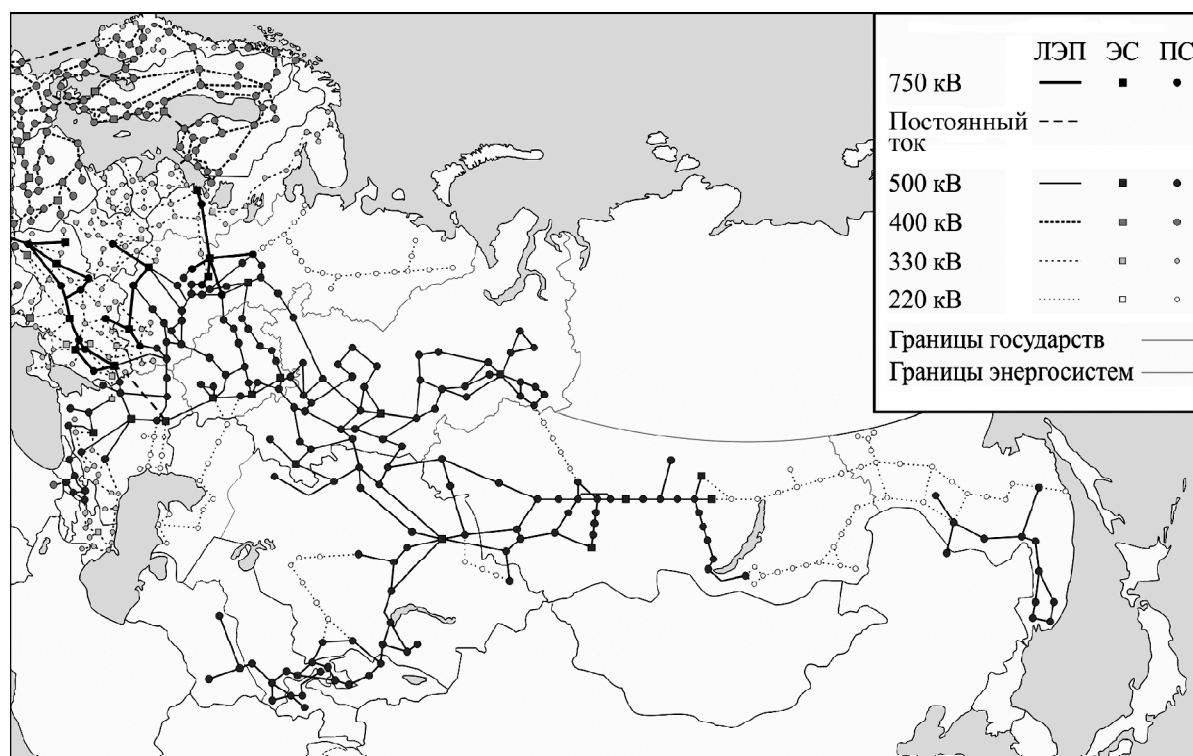


Рис. 4. Схема магистральных электрических сетей России и стран ближнего зарубежья: ЛЭП – линия электропередач, ПС – подстанция, ЭС – электростанция. На карте показаны электростанции мощностью ≥ 2 ГВт. Составлена автором по данным [Схема..., 2015; 2013 ENTSO-E..., 2015]

Fig. 4. Transmission lines of Russia and former Soviet Union countries: ЛЭП – transmission line, ПС – substation, ЭС – power station (above 2 GW). Compiled by the author basing on [Skhema..., 2015; 2013 ENTSO-E..., 2015]

щих возобновляемые источники энергии (в том числе ГЭС). Вторая стратегия применяется в регионах с низкой доступностью угля и природного газа, но с существенными возможностями для развития ГЭС малой и средней мощности (Альпы и Фенноскандия), а также в регионах с опережающим ростом использования возобновляемых источников энергии (восточные земли Германии);

– среди энергосистем, развивающихся по стратегии развития магистральных электросетей и круп-

ных электростанций, наблюдается выраженная связь между уязвимостью и уровнем экономического развития, оцененного по среднему душевому уровню ВВП и ВРП;

– наиболее ярко центр-периферийные различия энергосистем по уязвимости наблюдаются на территории бывшего СССР. Минимальной уязвимостью отличаются ОЭС Центра, средней Волги, Урала и Украины, объединенные в единую энергосистему к началу 1960-х гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Сводные данные об аварийных отключениях [Электр. ресурс]. ОАО «Федеральная сетевая компания ЕЭС». URL: http://www.fsk-ees.ru/consumers/disclosures_in_accordance_with_government_decree_of_21_01_2004_24/technical_condition_of_the_networks/svodnye_dannye_ob_aviyinykh_otklyucheniakh/ (дата обращения: 01.06.2015).

Схема и программа развития Единой энергетической системы России на 2014–2020 годы [Электр. ресурс]. ОАО «Системный оператор ЕЭС». URL: http://so-ops.ru/fileadmin/files/orders/sipr_ups/sipr_ups_14-20.pdf (дата обращения: 01.06.2015).

Тархов С.А. Эволюционная морфология транспортных сетей. М.: Смоленск: Универсум, 2005. 384 с.

2013 ENTSO-E Interconnected network system grid map [Электр. ресурс]. ENTSO-E. URL: <https://www.entsoe.eu/publications/order-maps-and-publications/electronic-grid-maps/Pages/default.aspx> (дата обращения: 01.01.2015).

Albert R., Albert I., Nakarado G.L. Structural vulnerability of the North American power grid // Phys. Rev. E. 2004. N 69. 025103. 4 p.

Barabasi A-L., Albert R. Emergence of scaling in random networks // Science. 1999. Vol. 286. P. 509–512.

Boccaletti S., Latora V., Moreno Y. et al. Complex networks: structure and dynamics // Phys. Rep. 2006. Vol. 424. P. 175–308.

Crucitti P., Latora V., Marchiori M. A topological analysis of the Italian electric power grid // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. 2004. Vol. 338. P. 92–97.

Erdős P., Rényi A. On random graphs // Publ. Mathematicae. 1959. N 6. P. 290–297.

Hines P., Cotilla-Sanchez E., Blumsack S. Do topological models provide good information about electricity infrastructure vulnerability? // Chaos: An Interdisciplinary J. Nonlinear Sc. 2010. N 20, 033122. 6 p.

Kansky K.J. Structure of transportation networks: relationships between network geometry and regional characteristics // The University of Chicago, Department of Geography, Res. Pap. N 84. Chicago: The University of Chicago, 1963. 158 p.

Motter A.E., Lai Y.-C. Cascade-based attacks on complex networks // *Phys. Rev. E*. 2002. N 66 (6), 065102. 4 p.

NetworkX. High-productivity software for complex networks [Электр. ресурс]. GitHub. URL: <http://networkx.github.io/> (дата обращения: 01.06.2015).

Pagani G.A., Aiello M. The power grid as a complex network: a survey // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2013. Vol. 392, N 11. P. 2688–2700.

Rosas-Casals M., Valverde S., Solé R.V. Topological vulnerability of the European power grid under errors and attacks // *Intern. J. Bifurcation and Chaos in Applied Sc. and Engineering*. 2007. Vol. 17, N 7. P. 2465–2475.

Watts D.J., Strogatz S.H. Collective dynamics of ‘small-world’ networks // *Nature*. 1998. Vol. 393. P. 440–442.

Поступила в редакцию 25.06.2015

Принята к публикации 11.12.2015

A.M. Faddeyev¹

VULNERABILITY OF TRANSMISSION SYSTEMS OF RUSSIA, OTHER POST-SOVIET STATES AND EUROPEAN COUNTRIES TO THE CASCADE FAULTS

The article deals with the results of the evaluation of structural vulnerability of power systems of Russia, other post-Soviet states and European countries to the cascade faults. Traditional and up-to-date methods of the topological analysis of the structure of transportation networks are reviewed. A procedure allowing for the evaluation of structural vulnerability of the transmission network graph in case of the random removal of points was developed basing on the complex network analysis. The structural vulnerability of transmission systems under study has been evaluated according to this procedure. Influence of several factors, i.e. topological, political, geographical and historical, on the spatial distribution of transmission systems’ vulnerability was estimated. The structural vulnerability of transmission systems is definitely related to the basic topological and economic criteria. Two different strategies making it possible to maintain the stability of transmission systems were revealed. The choice between these two strategies is determined by geographical and political factors.

Key words: electric power industry, power transmission, transport networks, complex networks.

REFERENCES

2013 ENTSO-E Interconnected network system grid map. URL: <https://www.entsoe.eu/publications/order-maps-and-publications/electronic-grid-maps/Pages/default.aspx> (Accessed: 01.01.2015).

Albert R., Albert I., Nakarado G.L. Structural vulnerability of the North American power grid // *Phys. Rev. E*. 2004. N 69. 025103. 4 p.

Barabasi A.-L., Albert R. Emergence of scaling in random networks // *Science*. 1999. Vol. 286. P. 509–512.

Boccaletti S., Latora V., Moreno Y. et al. Complex networks: structure and dynamics // *Phys. Rep.* 2006. Vol. 424. P. 175–308.

Crucitti P., Latora V., Marchiori M. A topological analysis of the Italian electric power grid // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2004. Vol. 338. P. 92–97.

Erdős P., Rényi A. On random graphs // *Publ. Mathematicae*. 1959. N 6. P. 290–297.

Hines P., Cotilla-Sanchez E., Blumsack S. Do topological models provide good information about electricity infrastructure vulnerability? // *Chaos: An Interdisciplinary J. Nonlinear Sc.* 2010. N 20. 033122. 6 p.

Kansky K.J. Structure of transportation networks: relationships between network geometry and regional characteristics // *The University of Chicago, Department of Geography, Res. pap.* N 84. Chicago: The University of Chicago, 1963. 158 p.

Motter A.E., Lai Y.-C. Cascade-based attacks on complex networks // *Phys. Rev. E*. 2002. N 66 (6). 065102. 4 p.

NetworkX. High-productivity software for complex networks. URL: <http://networkx.github.io/> (Accessed: 01.06.2015).

Pagani G.A., Aiello M. The power grid as a complex network: a survey // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2013. Vol. 392, N 11. P. 2688–2700.

Rosas-Casals M., Valverde S., Solé R.V. Topological vulnerability of the European power grid under errors and attacks // *Intern. J. Bifurcation and Chaos in Applied Sc. and Engineering*. 2007. Vol. 17, N 7. P. 2465–2475.

Skhema i programma razvitiya Yedinoy energeticheskoy sistemy Rossii na 2014–2020 gody. URL: http://so-ups.ru/fileadmin/files/laws/orders/sipr_ups/sipr_ups_14-20.pdf (Accessed: 01.06.2015) (in Russian).

Svodnyye dannyye ob avariynykh otklyucheniyakh. URL: http://www.fsk-ees.ru/consumers/disclosures_in_accordance_with_government_decree_of_21_01_2004_24/technical_condition_of_the_networks/svodnye_dannye_ob_aviariynykh_otklyucheniyakh/ (Accessed: 01.06.2015) (in Russian).

Tarkhov S.A. Evolyutsionnaya morfologiya transportnykh setey. Moscow; Smolensk: Universum, 2005. 384 p. (in Russian).

Watts D.J., Strogatz S.H. Collective dynamics of ‘small-world’ networks // *Nature*. 1998. Vol. 393. P. 440–442.

Received 25.06.2015

Accepted 11.12.2015

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Economic and Social Geography of Russia, post-graduate student; e-mail: faddeev@list.ru