

УДК 519.865.7+65.012.26

## **УПРАВЛЕНИЕ РИСКАМИ И ФАКТОРЫ УЯЗВИМОСТИ КРИТИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ**

**Н.П. Комендантова**

*Международный институт анализа прикладных систем;*

*Швейцарская высшая техническая школа Цюриха*

e-mail: [komendan@iiasa.ac.at](mailto:komendan@iiasa.ac.at)

### ***Аннотация***

Рассмотрены подходы к управлению рисками для таких сложных систем критической инфраструктуры, как система энергетики, и факторы, влияющие на уязвимость критической энергетической инфраструктуры в странах Европейского Союза.

**Ключевые слова:** факторы уязвимости, управление рисками, оценка рисков, каскадные эффекты, местный, национальный и межрегиональный уровни управления, линии передачи и распределения электроэнергии, тотальное отключение электричества

### **ВВЕДЕНИЕ**

Термин «критическая инфраструктура» часто используется для определения инфраструктуры, жизненно необходимой для функционирования общества. К такой инфраструктуре относится энергетика, включая выработку, транспортировку и переработку энергии. Также термин «критическая инфраструктура» используется для масштабных технических систем, таких, как системы коммуникаций, транспорта или водоснабжения [1]. Действительно, область энергетики является жизненно необходимой для функционирования общества, и любые сбои в передаче энергии могут негативно повлиять на все сферы человеческой деятельности, особенно в настоящее время, когда различные системы становятся все более взаимозависимыми и все большее количество таких услуг, как отопление, освещение, транспорт, производство, телекоммуникации и т. д., предоставляется на основе электричества.

События последних лет показали, что перебои с поставками электричества в одной стране могли повлечь за собой каскадные эффекты и тотальное отключение электричества, когда пострадали бы миллионы жителей в разных странах. Под тотальным отключением электричества понимается ситуация, когда более одного миллиона людей остались без электричества или когда отключение электричества продолжалось более миллиона минут. К примеру, в августе 2003 года более 50 миллионов жителей США и Канады остались без электричества. В этом же году 4 миллиона жителей Швеции и Дании остались без электричества, а тотальное отключение электричества, которое началось в Швейцарии в 2003 году, также затронуло 55 миллионов жителей Италии [2].

Последствия тотального отключения электричества в странах с экономикой переходного периода были еще более значительными. В 2012 году в Индии остались без электричества 670 миллионов людей, в 2005 году в Индонезии – 100 миллионов, в 1999 году в Бразилии – 97 миллионов и в 2009 году в Бразилии и Парагвае – 87 миллионов жителей [3].

Оценка и управление рисками такой сложной системы, как система электроснабжения, требуют комплексной оценки и должны включать всех участников процесса как на местном уровне управления, так и на национальном и межрегиональном уровнях. Защита линий электропередач предполагает обеспечение продолжительного функционирования и взаимозависимости всех систем, связанных с электроснабжением, для определения, преодоления и нейтрализации рисков. Управление рисками должно затрагивать все три подсистемы энергетической системы – подсистем выработки, транспортировки и перераспределения энергии. Все эти подсистемы, включающие также высоковольтные и низковольтные линии электропередач, взаимозависимы и взаимосвязаны между собой.

Линии электропередач подвержены различным рискам, таким, например, как природные катастрофы, террористические риски или кибератаки, а также системные риски, связанные с введением в эксплуатацию новых объектов инфраструктуры или таких видов энергии, как возобновляемые источники энергии.

## **ФАКТОРЫ УЯЗВИМОСТИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСЕТЕЙ В ЕВРОПЕ**

Архитектура линий электропередач в странах Евросоюза была построена более 50 лет назад для удовлетворения нужд потребления энергии, когда центры выработки энергии и потребления находились в географической близости друг от друга. Сейчас такие центры находятся в разных странах. К примеру, энергия ветра вырабатывается в Германии, а потребляется в Австрии. Энергия солнца вырабатывается в Испании, а потребляется в Германии. Атомная энергия вырабатывается в Бельгии, а потребляется также и за пределами этой страны. Такая архитектура электросетей требует строительства новых сетей протяженностью многие километры [4].

На состояние линий электропередач в Европе также существенно влияет процесс старения инфраструктуры: существующие в настоящее время линии электропередач были построены более 30–40 лет назад, существенная часть этих линий устарела и не соответствует современным техническим стандартам. Финансовый и экономический кризис последнего десятилетия в Европе привел к отсутствию финансирования и ремонта распределительных линий электропередач. Часто именно в этом участке системы энергоснабжения возникают перебои с подачей электроэнергии, которые потом распространяются на всю систему электропередач [5].

Процесс объединения рынка электроэнергии в Европе привел к объединению систем с различными стандартами, а также существованию высоковольтных и низковольтных линий электропередач, «умных сетей» и подземных кабелей. Особенно затруднительна ситуация в приграничных районах стран Евросоюза из-за отсутствия регулирования в области дальнейшего развития линий электропередач между этими странами. В настоящее время вопросы обеспечения поставок энергии входят в национальные законодательства стран – членов Евросоюза, но остается открытым вопрос ответственности и финансирования линий электропередач, соединяющих системы разных стран. Такой подход оставляет также открытым вопрос о координации действий по защите критической инфраструктуры, выходящей за пределы Евросоюза [6].

Стратегия Евросоюза по развитию энергетики на 2020 год определяет дальнейшее строительство линий электропередач и увеличение их пропускной способности как стратегически необходимые. Эта стратегия устанавливает также цели развития таких альтернативных источников энергии, как энергия солнца или ветра. Энергетическая стратегия до 2050 года предусматривает увеличение доли возобновляемых источников до 80% от всей вырабатываемой электроэнергии [7]. Такие цели требуют существенных изменений в структуре линий электропередач, дальнейшего строительства таких линий и увеличения их пропускной способности, а также введения «умных электросетей» для управления поставками электроэнергии из различных источников.

Страны Евросоюза подвержены многочисленным угрозам природных катастроф, таким, как землетрясения, наводнения, засухи, пожары и экстремальная жара [8]. Все эти угрозы оказывают негативное влияние на линии электропередач. Доминирующими являются гидрометеорологические угрозы, среди которых штормы (35%) и наводнения (31%) являются наиболее частыми [9]. Наступление названных угроз приводит к физическому разрушению линий электропередач, а также снижению их пропускной способности. Различные страны Евросоюза уязвимы в различной степени: в то время как одни страны более подвержены рискам наводнений или цунами, другие страдают от частых штормов и экстремальной жары [10]. К примеру, Южная Европа более подвержена сейсмическим рискам, где такие страны, как Греция, Румыния и Балканы, находятся в зоне самой высокой сейсмической активности. Страны Средиземноморья более подвержены рискам цунами. Страны Южной Европы более подвержены пожарам, самая высокая вероятность которых наблюдается в таких странах, как Португалия, Испания, Италия и Греция. Существует также высокая вероятность увеличения частоты и интенсивности названных угроз [11].

Увеличение доли возобновляемых источников энергии влечет за собой увеличение уязвимости линий электропередач от каскадных явлений. Сегодня вопрос о том, способна ли европейская система линий электропередач балансировать поставки электроэнергии из различных возобновляемых источников энергии, является основным вопросом энергетического перехода.

Возобновляемые источники формируют такие новые задачи, как необходимость баланса между потреблением и выработкой электроэнергии. Они усиливают комплексность европейской системы электропередач, так как ветряные мельницы или системы фотовольтаики могут вырабатывать электричество, только когда дует ветер или светит солнце. У операторов электросетей нет контроля таких природных факторов, поэтому им необходимо вырабатывать альтернативные решения в случае чрезмерных или недостаточных поставок электроэнергии. Такие задачи являются решаемыми до тех пор, пока доля энергии из возобновляемых источников невелика. Однако увеличение доли возобновляемых источников до 80% требует новых решений. Также внедрение «умных сетей» приводит к необходимости баланса потребления и поставок электричества, когда потребители становятся и производителями, а у частных домохозяйств появляется возможность производить электроэнергию из таких альтернативных источников, как панели фотовольтаики, расположенные на крыше домов [12].

Примеры тотального отключения электроэнергии в Италии, Германии или Турции показывают взаимозависимость факторов уязвимости, связанных также с протекающими в данных странах процессами энергетического перехода, основанного на внедрении возобновляемых источников энергии, а также сочетанием факторов уязвимости и каскадных эффектов.

Тотальное аварийное отключение электричества в Италии и Швейцарии в 2003 году привело к тому, что пострадали 56 миллионов человек (55 миллионов – в Италии и один миллион – в Швейцарии). Причиной тотального отключения стала перегрузка 380kV-линии между населенными пунктами Меттлен и Лаворго (Mettlen – Lavorgo), которая привела к повышению температуры и возгоранию деревьев, находящихся недалеко от линии электропередач, в результате чего произошел сбой в подаче электроэнергии. Сбой на линии Mettlen – Lavorgo повлек за собой повышение нагрузки на 380kV-линию между населенными пунктами Сильс и Соса (Sils – Sosa). Эффект домино и вывод всей системы электропередач в Италии из синхронизации с Союзом по сотрудничеству и передаче электроэнергии повлек за собой тотальное отключение электричества в Италии, которое продолжалось разное количество часов в разных регионах страны. К примеру, население Сицилии оставалось без электроэнергии в течение 16 часов [13].

В 2006 году произошло тотальное аварийное отключение электричества в Германии также из-за сочетания различных факторов уязвимости. Электрокомпания E.ON отключила высоковольтную линию передач для прохода корабля. Одновременно ветряные мельницы в Северном море выработали более 10,000 MW электроэнергии. Недостаточное сообщение между энергетическими компаниями и неточные расчеты выработки энергии ветра привели к перенагрузке линий электропередач. Отключение всей западной системы электропередач привело к тотальному аварийному отключению электроэнергии более чем на два часа [14].

В 2015 году произошло массовое аварийное отключение электричества в Турции, опять же по причине совпадения различных рисков, таких, как ремонт одной из линий электропередач, соединяющей восток и запад страны, и одновременно появление избытка электроэнергии, выработанной гидроэлектростанциями в Восточном Черном море, Южной и Восточной Анатолии, которые работали на полную мощность. В результате произошла избыточная нагрузка на 400kV линию электропередач, соединяющую восток и запад страны, что привело к тотальному отключению электроэнергии во всех провинциях Турции, когда миллионы людей остались без электроэнергии [15].

### **ОЦЕНКА РИСКОВ И УПРАВЛЕНИЕ ИМИ НА ОСНОВАНИИ УЧЕТА ФАКТОРОВ УЯЗВИМОСТИ**

Основные элементы оценки рисков включают оценки самих рисков, а также угроз и уязвимостей. Риск является взаимозависимостью вероятности соответствующего события и его негативных последствий. Угроза характеризуется вероятностью того, что определенный риск наступит в определенный период времени, а уязвимость является сочетанием физических, социальных, экономических и культурных факторов, которые усиливают последствия угроз для общества. Таким образом, риск является функцией угроз и уязвимостей и обычно определяется как вероятность потери жизни или разрушения инфраструктуры.

Комплексное управление рисками необходимо для предотвращения каскадных эффектов и отсутствия синхронизации в результате системных рисков. Оно также необходимо для внедрения принципа резервирования, когда в случаях

наступления критической ситуации существует возможность введения резервного оборудования. В таком случае электропитание в случае выхода из строя отдельного компонента системы не прерывается. В системе могут быть один или несколько резервных модулей или компонентов. Часто принцип резервирования означает, что число модулей электропитания превышает на единицу число модулей или компонентов, необходимое для электропитания. В случае аварии или отключения одного из модулей нагрузка перераспределяется между остальными модулями. Каждый из модулей выполняет одновременно функции и основного, и резервного модуля.

Для оценки риска функционирования энергосистемы принимается определение риска как произведения «вероятности события и ожидаемых потерь», которые могут быть выражены либо в финансовом эквиваленте, либо в потере потенциальной мощности. Количественная связь риска  $R_i$ , связанного с событием  $i$ , определяется по формуле  $R_i = P_i S_i$ ,  $S_i = G_i D_i$ , где  $P_i$  – вероятность свершения события  $i$ , вычисляемая за определенный промежуток времени,  $S_i$  – степень тяжести последствий этого события, выраженная в неэнергетических терминах (определяется как произведение глубины тяжести  $G_i$  на время восстановления  $D_i$ ).

Для обеспечения режимной надежности и реализации принципа *резервирования* должна быть обеспечена защита от каскадного отключения, коллапса напряжения и частоты, а также потери синхронизации. В соответствии с данным принципом при отказе одного элемента в системе должно быть обеспечено требуемое электропитание. Оценки режимной надежности включают вычисление доступной пропускной способности связей электросистемы, выявление узких мест системы до наступления непредвиденных ситуаций, а также оценку напряжения на шинах и определение пределов допустимых перетоков по линиям электропередач. Одной из основных проблем оценки статистической режимной надежности является оценка каскадного отключения.

Существуют списки угроз непредвиденных ситуаций, которые должны быть приняты во внимание при моделировании по критерию резервирования. Эти угрозы можно разделить на нормальные угрозы, то есть потерю одного элемента,

и особые угрозы – события, которые могут привести к каскадным авариям. Все эти угрозы могут повлиять на критические компоненты или совокупность компонент электроэнергетической системы либо непосредственно, либо косвенно, а воздействие может быть оказано либо на локальный участок системы, либо на всю систему. Также необходимо оценить вероятность каждой из угроз. Для оценки каскадных эффектов применяют методы теории цепей, при помощи которых определяют предварительные уязвимости по топологии и анализу динамики. Топологический анализ, основанный на классической теории графов, должен включать анализ соответствующих свойств структуры системы, а также оценку роли таких отдельных элементов системы, как узлы и соединительные дуги. Топологический анализ помогает в проведении предварительной оценки уязвимостей на основе моделирования таких отказов, как удаление узлов и дуг, с последующей переоценкой сетевых топологических свойств.

Другим показателем эффективного управления развитием и эксплуатацией электроэнергетических систем является показатель надежности. Надежность электросистемы характеризуется различными свойствами, такими, например, как безопасность, безотказность, устойчивость, управляемость и восстанавливаемость. Показатели надежности определяются следующим образом [16]: для заданных уровней и структуры электропотребления по централизованным узлам (подсистемам), конфигурации межсистемных связей, состава и параметров оборудования (генерирующих агрегатов и системообразующих ЛЭП), обеспеченности первичными энергоресурсами для отдельных узлов и системы определяют в целом показатели надежности за расчетный период (обычно год), а также для задаваемых интервалов этого периода.

В настоящий момент в Европе разработаны две модели, позволяющие оценить каскадные риски как мультириски. Одна модель разработана Политехнической школой Цюриха, Швейцария, вторая – Институтом Технологий в городе Карлсруэ, Германия.

Модель оценки каскадных рисков разработана Арно Миниан [17] и представляет собой алгоритм моделирования каскадных отключений, основанный на методе Монте-Карло. Преимущество этого метода состоит в возможности его ис-

пользования при работе с комплексными системами. Метод позволяет определить определенное количество ( $N_{sim}$ ) временных рядов, которые записываются на основании распределения Пуассона (для однородного или неоднородного процессов). Каждый временной ряд представляет собой сценарий рисков и анализ количества сценариев. Метод позволяет дать вероятностную оценку потерь, а также определить вероятности наступления того или иного риска (см. [17]).

Взаимодействия между угрозами представляют собой динамический процесс, который требует специальной стратегии анализа. Компоненты такого анализа включают:

- оценку угроз и их взаимозависимости, а также вычисление вероятностей проявления каскадных эффектов, которые определяются при помощи моделирования наступления угроз за временной период  $t$  и предполагают выполнение следующих шагов: построение случайных временных рядов: количество угроз за определенный период времени  $\Delta t=[t_0;t_{max}]$  определяется при помощи распределения Пуассона для каждого стохастического события  $i$ , которое характеризуется долговременным параметром  $\lambda_i$ ; для каждого события определяется свой временной период  $t$ ; запись временных рядов путем моделирования определяет набор  $S_0$ , который представляет нулевую гипотезу  $H_0$  по отсутствию угроз в системе; по результатам моделирования в соответствующем ряде под определенными порядковыми номерами записываются характеристики события  $j$ , которое может случиться за период  $t_j$ ; другие события  $k$  случаются после события  $j$  за определенный период времени  $(t_j;t_{max}]$  с условной вероятностью  $P(k|j)$ ;

- оценку множественных рисков на основании адаптации матриц моделирования угроз с потерями от них: для каждого ряда моделирования рассчитывают средние потери в результате наступления события  $j$ ; наступление последнего зависит от предыдущих угроз; для каждого временного ряда рассчитывают индекс потерь в случае наступления события  $j$ ; повторяют описанные шаги до тех пор, пока  $t_j \leq t_{max}$ .

А. Миниан создает корреляционную матрицу угроз, которая включает возможные взаимозависимости между различными угрозами (например, обозначим их А, В, С, D и E) [17].

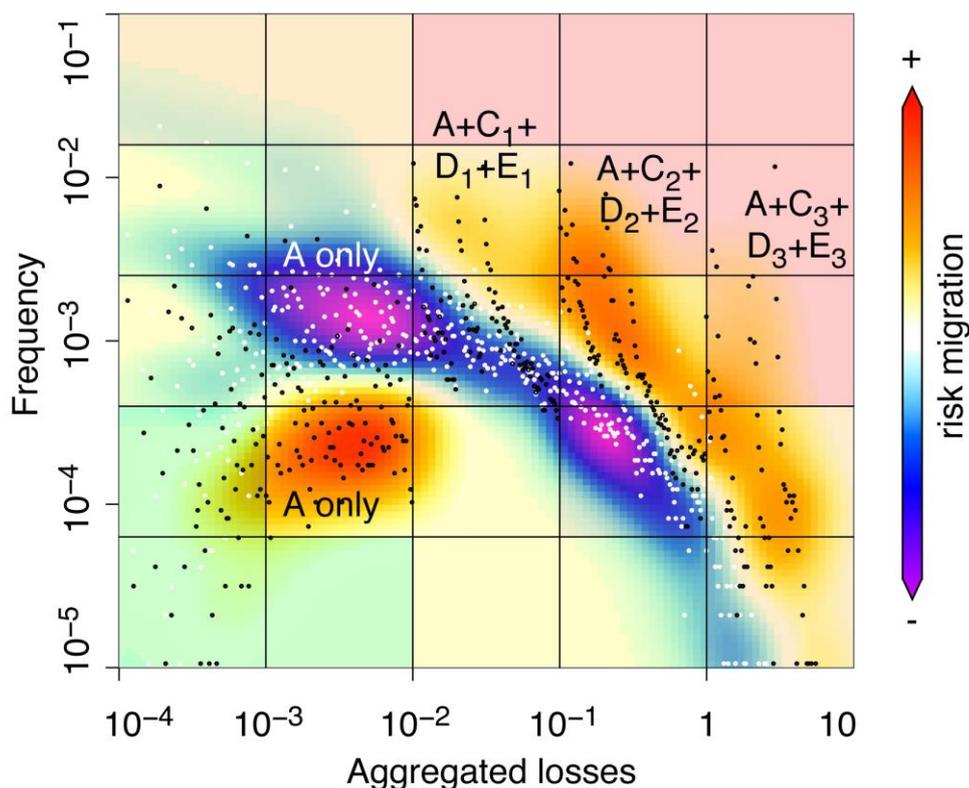


Рисунок 1. Пример матрицы рисков, когда учитываются каскадные эффекты; черные и белые точки обозначают различные сценарии рисков; увеличение риска показано красным цветом, снижение риска – белым цветом. Принятые обозначения: frequency – частота, aggregated losses – агрегированные потери, risk migration – изменение риска

Рис. 1 иллюстрирует матрицу рисков, созданную на основании метода, описанного выше. Данная матрица показывает, что наступление риска А влечет за собой наступление риска с соответствующей вероятностью. Риск С может повлечь за собой риск D, а риск D влечет за собой наступление риска Е. К примеру, А и С представляют собой риски землетрясений и цунами, в то время как риски D и Е представляют собой каскадные эффекты или эффекты домино для критической инфраструктуры. Рис. 1 показывает изменение вероятности происхождения риска в случае учета взаимозависимости между рисками.

Процесс принятия решений при наступлении определенного вида угроз может быть описан с помощью известных инструментов оценки принятия решений.

Значения оценки угроз для каждого сценария учитываются при разработке модели и подсчете количественных параметров либо на основании отдельных величин, либо на основании распределения вероятностей, когда числа являются своего рода представлением уровней, которые могут быть выражены в таких категориях, как «катастрофические» и т. д. В зависимости от каскадных последствий угрозы могут быть классифицированы как «катастрофические», «обширные», «средние», «малые» или «незначительные». Для разработки исходных данных используются модели оценки потерь, такие, например, как CAPRA<sup>1</sup> или HAZUS<sup>2</sup>.

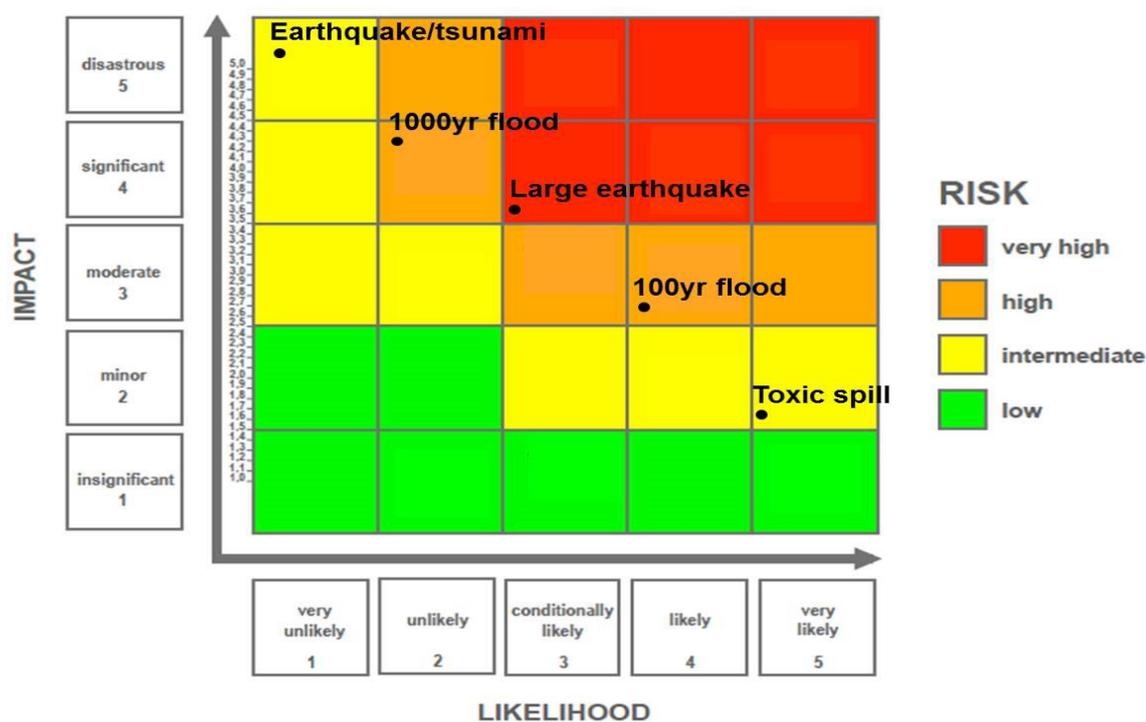
На основании модели оценки рисков также рассчитываются возможные каскадные последствия, такие, например, как политические. В данном случае риски закладываются не на основании статистических данных, а на основании экспертных оценок. В таком случае экспертное моделирование используется для определения номинального ранжирования различных угроз в зависимости от их последствий. Затем на основании ранжирования составляются сценарии последствий возможных угроз.

Временной горизонт угроз и их последствий (в настоящее время, в среднесрочной и долгосрочной перспективах) определяется на основании экспертных оценок. Так как экспертное моделирование может привести к различным результатам, в дерево принятия решений также закладываются вероятности наступления определенных рисков. Затем риски категорируются по фактору последствий как катастрофические, обширные, средние, малые и незначительные (рис. 2).

---

<sup>1</sup> [http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/WCEE2012\\_0726.pdf](http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/WCEE2012_0726.pdf)

<sup>2</sup> <https://www.fema.gov/pdf/plan/prevent/hazus/fema433.pdf>



Угроза	Вероятность (период)	Вероятность	Влияние				
			Люди	Экономика	Природа	Инфраструктура	Прочее
Землетрясение	1 в 475 лет	Возможно в зависимости от условий	значительное	среднее	незначительное	значительное	значительное
Землетрясение / цунами	1 в 10,000 лет	Малая вероятность	разрушительное	разрушительное	среднее	разрушительное	значительное
Редкое наводнение	1 в 1000 лет	Невозможно	значительное	значительное	разрушительное	значительное	значительное
Регулярное наводнение	1 в 100 лет	Возможно	малое	незначительное	среднее	среднее	Среднее
Чрезвычайно высокая температура	1 в 20 лет	Большая вероятность	незначительное	незначительное	значительное	незначительное	незначительное

Рисунок 2. Методология разработки сценариев с применением матрицы рисков. Источник: ВВК, 2010 [18]. Принятые обозначения: impact – влияние (insignificant – незначительное, minor – малое, moderate – среднее, significant – значительное, disastrous – разрушительное), likelihood – вероятность (very unlikely – очень малая вероятность, unlikely – малая вероятность, conditionally likely – возможно в зависимости от обстоятельств, likely – возможно, very likely – очень возможно), risk

– риск (very high – очень высокий, high – высокий, intermediate – средний, low – низкий), earthquake – землетрясения / tsunami – цунами, 1000yr flood – 1000-летнее наводнение, large earthquake – обширное землетрясение, 100yr flood – 100-летнее наводнение, toxic spill – токсический разлив.

Согласно данному подходу, последствия наступления угроз оцениваются согласно их каскадным влияниям, затем определяется индикатор потерь для каждого сценария (рис. 3). Оценка интенсивности последствий и потерь комбинируется в индикатор показателя потерь для каждого сценария.

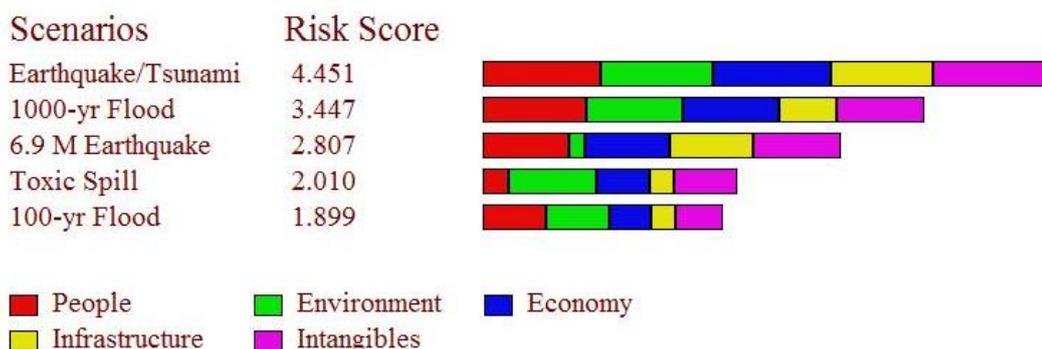


Рисунок 3. Общий риск и последствия каждого сценария. Источник: Венцель, 2012, [19]. Принятые обозначения: Scenarios – сценарии, earthquake – землетрясение / tsunami – цунами, 1000-yr flood – 1000-летнее наводнение, 6.9 M earthquake – землетрясение, toxic spill – токсический разлив, 100-yr flood – 100-летнее наводнение, risk score – оценка риска, people – люди, infrastructure – инфраструктура, environment – окружающая среда, intangibles – нематериальные потери, economy – экономика

Рис. 4 показывает чувствительность каждого сценария к взвешенным индикаторам, к примеру, влияние на людей. В частности, этот рисунок показывает, что подводное землетрясение вызывает цунами и определяется как более существенная угроза, чем токсический разлив. Общий риск для каждого сценария определяется методом агрегирования суммы каждого компонента от различных сценариев и зависит от веса, который придается отдельным показателям.

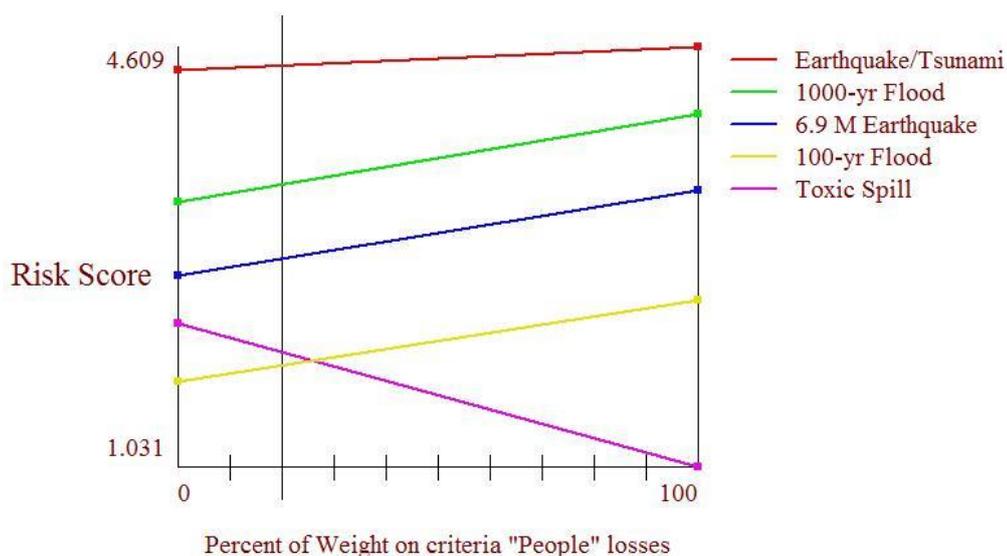


Рисунок 4. Анализ чувствительности сценария. Источник: Венцель, 2012 [19]. Принятые обозначения: Percent of Weight on criteria "People" losses – процент веса согласно критерию «люди», earthquake – землетрясение / tsunami – цунами, 1000-yr flood – 1000-летнее наводнение, 6.9 M earthquake – землетрясение, toxic spill – токсический разлив, 100-yr flood – 100-летнее наводнение

Далее разработанная методика используется при проведении групповых дискуссий по результатам наступления рисков, а также для ранжирования рисков. К примеру, анализ чувствительности может быть использован, чтобы показать эффекты ранжирования отдельных рисков и их взаимозависимости. Так, рис. 4 показывает, что чем больший вес придается значению таких отдельных показателей, как люди или экономика или влияние в среднесрочной или долгосрочной перспективах, тем меньше вес остальных рисков в матрице принятия решений. Это происходит потому, что сценарий токсического разлива, к примеру, не приводит к людским потерям, поэтому его значение для данного показателя будет незначительным. С другой стороны, важно, что ранжирование отдельных рисков остается прежним.

Вопросы управление рисками и защиты линий электропередач находятся в ответственности властей на национальном уровне. Согласно решениям Совета Европы, защита критической инфраструктуры является задачей властей каждой от-

дельной страны, а также операторов инфраструктуры, находящейся на территории данной страны. Однако в случае отключения линий электропередач каскадные эффекты могут также повлиять на электросистемы других стран. Управление такими международными рисками требует специального механизма на межрегиональном уровне [20].

В 2009 году Еврокомиссия разработала специальную рамочную стратегию для предотвращения и минимизации последствий природных катастроф, включая такие формы защиты критической инфраструктуры, как предотвращение, подготовка, защита и восстановление линий электропередач. Еврокомиссия также осознает необходимость защиты линий электропередач от мульти-рисков. В частности, Совет Евросоюза подчеркивает необходимость развития подходов по управлению рисками, основанных на минимизации каскадных эффектов. Мульти-рисками называются риски, возникновение которых влечет за собой другие риски, так называемые каскадные явления, или увеличивает уязвимость территории к последствиям других рисков [11].

В настоящее время электросеть в странах Европейского союза состоит из 41 оператора на территории 34 стран. Операторы отвечают только за свой участок сетей, однако в процессе интеграции риски, возникающие в одном участке на территории одной страны, также затрагивают и другие участки на территории других стран. Отсутствие региональной интеграции в действиях операторов, а также требования увеличения объемов передачи электроэнергии и протяженности линий электропередач требуют строительства новой инфраструктуры протяженностью многие тысячи километров. Такая инфраструктура необходима для сглаживания пиков в спросе и предложении электроэнергии. Другими факторами уязвимости сети являются факторы энергетического перехода, связанные с введением и возрастанием доли возобновляемых источников энергии, а также процессом, когда все возрастающее число потребителей энергии становится также производителями энергии.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Risk assessment and mapping guidelines for disaster management. European Commission staff working paper, European Union, Brussels, 2011.
2. Komendantova N., Schweitzer D., Kroos D., Leroy C., Andreini E., Baltazar B., Boston T., Botbaev K., Cohen J., Eismann C., Hamm T., Garcia-Aristizabal, Keršnik M., König M., Lehmann M., Lemmens H., Moeltner K., Mumovic M., Reichl J., Sansavini G., Schmidthaler M., Steven A., Tomik L., Zobel C., Wenzel F. Protecting Electricity Networks from Natural Hazards. Organization for Security and Cooperation in Europe (OSCE). 2016.
3. US-Canada Power System Outage Task Force: Final Report on the Implementation of the Task Force Recommendations. Natural Resources Canada and U.S. Department of Energy. September 2006.
4. Study on the comparative merits of overhead electricity transmission lines versus underground cables. Ecofys Study for the Department of Communications, Energy and Natural Resources, Ireland, May 2008.
5. Ten-year network development plan 2010–2020. European Network of Transmission System Operators for Electricity (ENTSO-E), Brussels, 2010.
6. Large Scale integration of wind energy in the European power supply: analysis, issues and recommendations. European Wind Energy Association (EWEA) Brussels, 2010.
7. European Commission, (2010). Europe 2020: A strategy for smart, sustainable and inclusive growth. COM (2010) 2020 final.
8. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field C.B., Barros V.R., Dokken D.J., Mach K.J., Mastrandrea M.D., Bilir T.E., Chatterjee M., Ebi K.L., Estrada Y.O., Genova R.C., Girma B., Kissel E.S., Levy A.N., MacCracken S., Mastrandrea P.R., and White L.L. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. P. 1–32. IPCC, 2014.
9. Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction. United Nation Office for Disaster Risk Reduction, Geneva, 2013.

10. Risk assessment and mapping guidelines for disaster management. European Commission staff working paper, European Union, Brussels, 2011.

11. A Community approach on the prevention of natural and man-made disasters. 2010. Risk Assessment and Mapping Guideline for Disaster Management. European Commission Staff Working Paper 1626, Brussels, 2010.

12. Battaglini A., Lilliestam J., Haas A., Patt A. Development of SuperSmart Grids for a more efficient utilization of electricity from renewable sources// J. of Cleaner Production. Vol. 17, No 10. P. 911–918.

13. Swiss Federal Office of Energy (2003). Report on the blackout in Italy on 28 September 2003. Bern, Switzerland

14. European Regulators Group for Electricity and Gas (2007). The lessons to be learned from the large disturbance in the European power system on the 4<sup>th</sup> of November 2006. Brussels, 2007.

15. ENTSO-E (2015). Report on Blackout in Turkey on 31<sup>st</sup> March 2015. Brussels, 2015.

16. Ковалев Г.Ф., Крупнев Д.С. Оценка системной надежности электроэнергетических систем и выявление вклада сетевого и генерирующего звеньев в показатели системной надежности// Защита электрических сетей от природных рисков. Организация по безопасности и сотрудничеству в Европе. 2017.

17. Mignan A. D7.2 MATRIX-CITY User Manual, New methodologies for multi-hazard and multi-risk assessment methods for Europe, Deliverable 7.2, 2013. 78 p.

18. BBK (2010). Methode für die Risikoanalyse im Bevölkerungsschutz. Tech. rep., Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe. [http://www.bbk.bund.de/cln\\_027/nn\\_402322/SharedDocs/Publikationen/Broschueren\\_\\_Flyer/Methode\\_\\_Risikoanalyse-BS,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/Methode\\_Risikoanalyse-BS.pdf](http://www.bbk.bund.de/cln_027/nn_402322/SharedDocs/Publikationen/Broschueren__Flyer/Methode__Risikoanalyse-BS,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/Methode_Risikoanalyse-BS.pdf).

19. Wenzel F. D6.1 – Decision-analytic frameworks for multi-hazard mitigation and adaptation, New methodologies for multi-hazard and multi-risk assessment methods for Europe, Deliverable 6.1, 2012. 34 p. <http://matrix.gpi.kit.edu/downloads/MATRIX-D6.1.pdf>.

20. Hyogo Framework for Action 2005–1015: Building the Resilience of Nations and Communities to Disasters. United Nations International Strategy for Disaster Reduction, 2005.

## **RISK GOVERNANCE AND VULNERABILITY FACTORS OF CRITICAL INFRASTRUCTURE**

**Nadejda P. KOMENDANTOVA**

International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), Austria and ETH Zurich, Switzerland

e-mail: komendan@iiasa.ac.at

### ***Abstract***

On example of recent multi-risk disasters and their impacts on electricity transmission grids this paper shows the need of multi-risk assessment and governance. It discusses factors of vulnerability of electricity transmission infrastructure in Europe in lights of changing for architecture of electricity grids requirements, growing volumes of renewable energy sources and probabilities for cascading effects. The paper also brings examples of multi-risk assessment and shows algorithm of calculation for multi-risk disasters.

**Key words:** methods of multi-risk assessment, cascading impacts, electricity transmission infrastructure, vulnerability of the European electricity transmission system

### **REFERENCES**

1. Risk assessment and mapping guidelines for disaster management. European Commission staff working paper, European Union, Brussels, 2011.
2. Komendantova N., Schweitzer D., Kroos D., Leroy C., Andreini E., Baltazar B., Boston T., Botbaev K., Cohen J., Eismann C., Hamm T., Garcia-Aristizabal, Keršnik M., König M., Lehmann M., Lemmens H., Moeltner K., Mumovic M., Reichl J., Sansavini G., Schmidthaler M., Steven A., Tomik L., Zobel C., Wenzel F. Protecting Electricity Networks from Natural Hazards. Organization for Security and Cooperation in Europe (OSCE). 2016.

3. US-Canada Power System Outage Task Force: Final Report on the Implementation of the Task Force Recommendations. Natural Resources Canada and U.S. Department of Energy. September 2006.

4. Study on the comparative merits of overhead electricity transmission lines versus underground cables. Ecofys Study for the Department of Communications, Energy and Natural Resources, Ireland, May 2008.

5. Ten-year network development plan 2010–2020. European Network of Transmission System Operators for Electricity (ENTSO-E), Brussels, 2010.

6. Large Scale integration of wind energy in the European power supply: analysis, issues and recommendations. European Wind Energy Association (EWEA) Brussels, 2010.

7. European Commission, (2010). Europe 2020: A strategy for smart, sustainable and inclusive growth. COM (2010) 2020 final.

8. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field C.B., Barros V.R., Dokken D.J., Mach K.J., Mastrandrea M.D., Bilir T.E., Chatterjee M., Ebi K.L., Estrada Y.O., Genova R.C., Girma B., Kissel E.S., Levy A.N., MacCracken S., Mastrandrea P.R., and White L.L. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. P. 1–32. IPCC, 2014.

9. Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction. United Nation Office for Disaster Risk Reduction, Geneva, 2013.

10. Risk assessment and mapping guidelines for disaster management. European Commission staff working paper, European Union, Brussels, 2011.

11. A Community approach on the prevention of natural and man-made disasters. 2010. Risk Assessment and Mapping Guideline for Disaster Management. European Commission Staff Working Paper 1626, Brussels, 2010.

12. Battaglini A., Lilliestam J., Haas A., Patt A. Development of SuperSmart Grids for a more efficient utilization of electricity from renewable sources// J. of Cleaner Production. Vol. 17, No 10. P. 911–918.

13. Swiss Federal Office of Energy (2003). Report on the blackout in Italy on 28 September 2003. Bern, Switzerland

14. European Regulators Group for Electricity and Gas (2007). The lessons to be learned from the large disturbance in the European power system on the 4<sup>th</sup> of November 2006. Brussels, 2007.

15. ENTSO-E (2015). Report on Blackout in Turkey on 31<sup>st</sup> March 2015. Brussels, 2015.

16. Ковалев Г.Ф., Крупнев Д.С. Оценка системной надежности электроэнергетических систем и выявление вклада сетевого и генерирующего звеньев в показатели системной надежности// Защита электрических сетей от природных рисков. Организация по безопасности и сотрудничеству в Европе. 2017.

17. Mignan A. D7.2 MATRIX-CITY User Manual, New methodologies for multi-hazard and multi-risk assessment methods for Europe, Deliverable 7.2, 2013. 78 p.

18. BBK (2010). Methode für die Risikoanalyse im Bevölkerungsschutz. Tech. rep., Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe. [http://www.bbk.bund.de/cln\\_027/nn\\_402322/SharedDocs/Publikationen/Broschueren\\_\\_Flyer/Methode\\_\\_Risikoanalyse-BS,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/Methode\\_Risikoanalyse-BS.pdf](http://www.bbk.bund.de/cln_027/nn_402322/SharedDocs/Publikationen/Broschueren__Flyer/Methode__Risikoanalyse-BS,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/Methode_Risikoanalyse-BS.pdf).

19. Wenzel F. D6.1 – Decision-analytic frameworks for multi-hazard mitigation and adaptation, New methodologies for multi-hazard and multi-risk assessment methods for Europe, Deliverable 6.1, 2012. 34 p. <http://matrix.gpi.kit.edu/downloads/MATRIX-D6.1.pdf>.

20. Hyogo Framework for Action 2005–1015: Building the Resilience of Nations and Communities to Disasters. United Nations International Strategy for Disaster Reduction, 2005.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ



**КОМЕНДАНТОВА Надежда Павловна** – доктор экономических наук, старший научный сотрудник и руководитель рабочей группы по управлению рисками в Международном Институте Анализа Прикладных Систем, а также старший научный сотрудник и руководитель проектов в Швейцарской Политехнической Школе города Цюрих.

**Nadejda P. KOMENDANTOVA** is a senior research scholar at the ETH Zurich, Switzerland and the leader of governance in transition group at the International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA) in Austria.

email: [komendan@iiasa.ac.at](mailto:komendan@iiasa.ac.at)

*Материал поступил в редакцию 19 февраля 2017 года*