

УДК 621.311

DOI 10.46960/2658-6754_2021_3_57

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ПОВТОРЕНИЯ ТЕХАССКОГО СЦЕНАРИЯ В РОССИЙСКИХ ЭНЕРГОСИСТЕМАХ, СОДЕРЖАЩИХ ЗНАЧИТЕЛЬНУЮ ДОЛЮ ВИЭ

О.Н. Кузнецов

Национальный исследовательский университет «МЭИ»
Москва, Россия

ORCID: 0000-0002-6847-4718 e-mail: kuznetsovon@mpei.ru

Д.А. Аверьянов

Национальный исследовательский университет «МЭИ»
Москва, Россия

ORCID: 0000-0002-0836-3135 e-mail: averianov_98@mail.ru

Проведен анализ возможности повторения тexasского сценария системной аварии в российских энергосистемах, содержащих значительную долю ВИЭ. Рассмотрена российская энергосистема, которая по совокупности параметров наиболее приближена к тexasской по доле возобновляемых источников энергии, состава генерации и межсистемным связям. Выбранная энергосистема рассматривалась в двух вариантах: существующем и перспективном, последний из которых был определен путем изучения схемы и программы развития данной энергосистемы. На основании этой информации были созданы два вышеописанных варианта модели и изучена возможность повторения аварии по тexasскому сценарию. Сделано заключение о возможности возникновения аналогичной аварии и определены условия реализации данного сценария развития событий.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, межсистемные связи, системные аварии, устойчивость, энергообъединения.

Для цитирования: Кузнецов, О.Н. Анализ возможности повторения тexasского сценария в российских энергосистемах, содержащих значительную долю ВИЭ / О.Н. Кузнецов, Д.А. Аверьянов // Интеллектуальная Электротехника. 2021. № 3. С. 57-74. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_3_57

ANALYSIS OF POSSIBILITY OF REPEATING TEXAS SCENARIO IN RUSSIAN POWER SYSTEMS CONTAINING A SIGNIFICANT SHARE OF RENEWABLE ENERGY SOURCES

O.N. Kuznetsov

National Research University «Moscow Power Engineering Institute»
Moscow, Russia

ORCID: 0000-0002-6847-4718 e-mail: kuznetsovon@mpei.ru

D.A. Averyanov

National Research University «Moscow Power Engineering Institute»
Moscow, Russia

ORCID: 0000-0002-0836-3135 e-mail: averianov_98@mail.ru

Abstract. The article analyzes the possibility of repeating the Texas system accident in Russian power systems containing a significant share of renewable energy sources. Within the framework of the work, the Russian energy system was considered, which, according to the set of parameters, is the closest to the Texas one in terms of the number of renewable energy sources, the composition of generation and intersystem connections with other energy systems. The selected power system was considered in two versions: in its current state and in its future version, which was determined by studying the scheme and program of development of this power system. Based on this information, two variants of the model described above were created and the possibility of a repeat of the accident in the Texas scenario was studied. On the basis of the conducted research, a conclusion is made about the possibility of a similar accident and the conditions under which this scenario is possible are determined.

Keywords: interconnection line, power interconnections, renewable energy, stability, system crashes.

For citation: O.N. Kuznetsov and D.A. Averyanov, “Analysis of possibility of repeating Texas scenario in Russian energy systems containing a significant share of renewable energy sources”, *Smart Electrical Engineering*, no. 3, pp. 57-74, 2021.

DOI: 10.46960/2658-6754_2021_3_57

I. Введение

Тема устойчивой и надежной работы энергосистем со значительной долей ВИЭ на данный момент является актуальной в связи с темпами внедрения ВИЭ в энергосистемы [1], которая в целом достаточно хорошо освещена во множестве научных работ. Больше количество исследований затрагивает вопрос каскадного отключения ВИЭ, по сути акцентируя внимание на увеличении их доли в современных энергосистемах и оказании ими все более значительного влияния на безопасность энергосистемы. В [2] изучаются возможности снижения рисков каскадных сбоев в следствии увеличения доли ветроэлектростанций (ВЭС) в энергосистеме. В данной работе предложена каскадная модель отказа, которая учитывает характеристики ветроэнергетики: структура ВЭС, случайность мощности, которую выдает ВЭС, управление ветряной турбиной и реакция на ее отключение после короткого замыкания. Чтобы определить ключевые факторы отключения, используется дерево решений для анализа результатов, полученных из этой модели отключения. В [3] изучается влияние тепловых воздействий на риск отключения ВЭС в энергосистеме.

На основе анализа публикаций по теме исследования был сделан вывод о том, что исследования по данной тематике не проводились. Таким образом, исследование возможности повторения техасского сценария системной аварии в российских энергосистемах является актуальной задачей.

II. Постановка задачи

Одним из направлений развития современной электроэнергетики является увеличение доли ВИЭ в энергосистемах развитых стран, в том числе, в России [4]. Оно приводит к целому спектру проблем, связанных с ухудшением устойчивости и надежности электроснабжения потребителей. Ключевой особенностью ВИЭ в плане надежности является нестабильность и непредсказуемость характеристик энергоносителя в определенный период. По этой причине ВИЭ не могут гарантировать выработку определенного количества мощности в заданный момент времени. Стоит также отметить, что практика показывает фактическую незащитность ВИЭ перед природными катаклизмами, нарушающими их работу. Примером служит недавняя авария в Техасе 15 февраля 2021 г. Несмотря на то, что она произошла не только из-за нарушения работы ВИЭ, а по стечению целого ряда обстоятельств, данная авария достаточно показательна.

В данной статье изучена возможность возникновения аналогичных аварий в энергосистеме Крыма. Для изучения вопроса рассматривались режимы работы существующей и перспективной энергосистем Черноморского РДУ.

III. Описание аварии, произошедшей в энергосистеме Техаса

11 февраля 2021 г. США накрыл арктический шторм. Наиболее тяжелые последствия шторма наблюдались в Техасе [5]. Температура в этом штате зимой обычно держится около нуля. По этой причине падение температуры в некоторых местах до $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ стало настоящей катастрофой. Рис. 1 иллюстрирует отклонение температуры от нормы.



Рис. 1. График отклонения температуры от нормы в штате Техас

Fig. 1. Temperature deviation graph from the norm in the state of Texas

Инфраструктура штата оказалась неготовой к такому падению температуры, вследствие чего около 12 млн чел. столкнулись с проблемой нехватки питьевой воды, а около 3 млн домохозяйств остались без тепла и электричества.

Одной из основных причин стало то, что более 60 % домохозяйств Техаса отапливается за счет электричества, и только оставшиеся 40 % – за счет газа. Также немаловажным является факт, что в таком теплом регионе дома просто не рассчитаны на такие морозы. Это привело к тому, что потребление электроэнергии выросло до 70 ГВт, что более чем в полтора раза превышает средний уровень потребления в 40 ГВт. При этом, увеличиваясь и приближаясь к прогнозируемому максимуму потребления в 67 ГВт, пик спроса превысил этот показатель, составив более 76 ГВт. После преодоления спросом отметки в 67 ГВт последовало частичное отключение энергосистемы. В результате были выведены из строя около 45 ГВт установленных мощностей. Из этих 45 ГВт на ВЭС приходилось около 16 ГВт. Это чуть более половины всей установленной мощности ВЭС в штате. Остальные 28 ГВт пришлось на газовые, угольные и атомные электростанции. Доля солнечных электростанций (СЭС) не так значительна, как доля ветряных, однако стоит отметить, что вырабатываемая ими мощность также резко упала. Компенсация колебаний мощности ВИЭ осуществляется с помощью электростанций, работающих на газе, однако в

этот раз с ним возникли проблемы. Первая заключалась в неподготовленности нефтегазовой структуры штата к такому похолоданию. Результатом этого стало сокращение объемов добычи газа на 30-50 % из-за замерзания конденсата в трубах и остановках компрессоров, оставшихся без электроэнергии. Вторая проблема заключалась в отсутствии значительных запасов газа в хранилищах.

На фоне сложившейся ситуации губернатор Техаса ввел временный запрет на экспорт газа. Вместе с тем, поставки газа на нужды отопления обладали повышенным приоритетом, что также усугубило ситуацию для электростанций. Интересен и факт выхода из строя одного из блоков атомной электростанции (АЭС) вследствие ложного срабатывания автоматики. Причиной его оказалось перемерзание датчика давления питательной воды в турбине. Данный отказ произошел из-за того, что турбины АЭС располагаются на площадке под открытым небом, т.е. не имеют машинного зала. По экономическим соображениям, это приемлемо для региона, где средняя температура зимой держится около нуля, однако данное решение показало всю свою несостоятельность в условиях аномальных морозов.

Подводя итог, можно констатировать, что вследствие катаклизма энергосистема Техаса потеряла до 50 % мощностей ТЭС, до 50 % мощностей ВЭС и 25 % мощностей АЭС. Для более четкого понимания картины на рис. 2 приведена диаграмма, показывающая долю производства электроэнергии источниками разных типов энергоносителей.

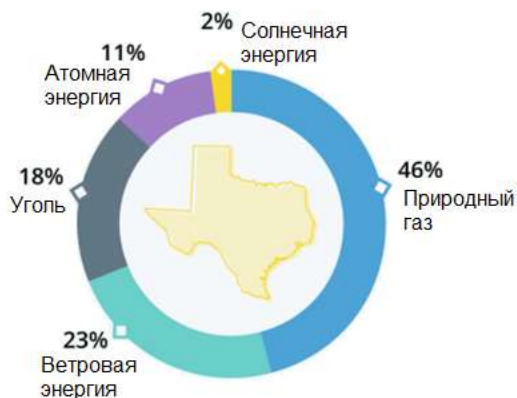


Рис. 2. Диаграмма производства электроэнергии электростанциями различных типов энергоносителя

Fig. 2. Diagram of electricity production by power plants of various types of energy carrier

Закончив обзор проблем, связанных с генерацией в энергосистеме Техаса, можно выделить и ряд других аспектов, повлиявших на ситуацию, например, системные проблемы. Главная из них – слабая связь энергосистемы Техаса с соседними Восточной, Западной и Мексиканской. В связи с этим, соседние энергосистемы не смогли принять на себя часть нагрузки Техаса. Также можно отметить достаточно свободное регулирование рынка энергетики этого штата, которое не обязывает поставщиков держать достаточное количество резервных мощностей. При этом резервные генераторы ориентированы на работу летом, когда имеет место максимальное потребление электроэнергии и по этой причине не защищены от холодов.

IV. Обоснование выбора рассматриваемой энергосистемы

Для исследования по ряду причин была выбрана энергосистема Крыма.

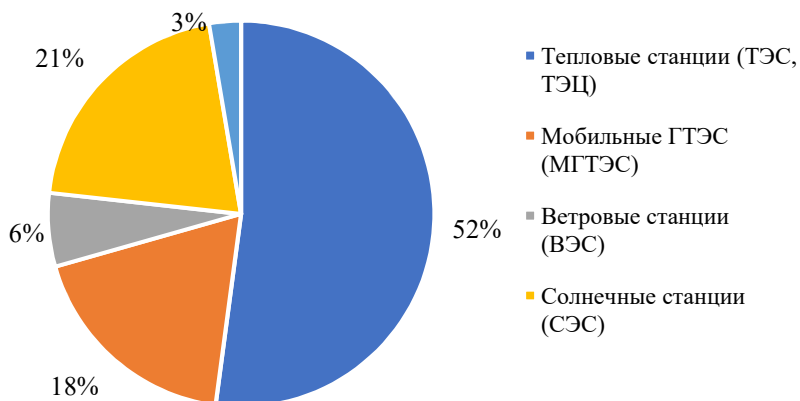


Рис. 3. Структура установленных мощностей электростанций энергосистемы Республики Крым

Fig. 3. Structure of installed capacities of power plants of the power system of the Republic of Crimea

Первым и самым важным аспектом является процент установленной мощности ВИЭ в энергосистеме Крыма как уникального региона России [6]. 5 % потребности в электроэнергии покрывается здесь благодаря ветряным и солнечным электростанциям. Первые из них, работающие на возобновляемых источниках энергии, построены в 2010-2012 гг.: СЭС Родниковое, СЭС Охотниково, СЭС Перово, СЭС Митяево, общей мощностью 227,3 МВт.

По состоянию на 2020 год в республике Крым 7 ВЭС и 4 СЭС. Их суммарная установленная мощность равна 385,554 МВт. По официальным данным, на 01.01.2020 установленная мощность ВИЭ в крымской энергосистеме составляла 27 % от общей установленной мощности всех крымских электростанций (рис. 3). Таким образом, возобновляемая энергетика получила значительное распространение в регионе. Также следует отметить наметившуюся положительную динамику в развитии ВИЭ в Крыму. В соответствии с [1], до 2023 г. возможно создание целого ряда новых ВЭС и СЭС. Введение данных электростанций позволит:

- вытеснить часть органического топлива, ослабив зависимость от внешних его поставок;
- понизить себестоимость производства электроэнергии;
- уменьшить объемы дотаций на энергоснабжение малых населенных пунктов;
- снизить негативное влияние на природную среду, связанное с выработкой электроэнергии.

В планах программы развития крымского региона предусмотрено создание шести ВЭС суммарной установленной мощностью 512 МВт и одной СЭС с установленной мощностью 110 МВт.

Из этого следует, что доля ВИЭ в Крыму среди всей генерации будет неуклонно расти, благодаря чему в настоящее время и в ближайшем будущем Крым станет ведущим регионом России по части использования ВИЭ.

Второй причиной является тот факт, что крымская энергосистема, как и энергосистема Техаса, значительно зависит от электростанций, работающих на природном газе. Из рис. 3 видно, что 73 % электрических станций – тепловые, большая часть которых – газо-мазутные или газовые. Исключением являются мобильные газотурбинные электростанции, которые работают на дизельном топливе. Также стоит отметить, что Крым и Техас, имея большую часть генерации, работающей на природном газе, полностью покрывают свое потребление газа с помощью предприятий по его добычи находящихся на территории региона. Оба региона самодостаточны в плане энергетических ресурсов. Еще одной причиной выбора крымской энергосистемы служит то, что Крым является южным регионом, как и Техас, однако стоит отметить, что зимы в Крыму более холодные.

V. Описание использованной расчетной модели

Крымская энергосистема имеет сложную структуру и разветвленную сеть линий электропередачи различных классов напряжений. С целью уменьшения трудоемкости в рамках данного исследования принимались во внимание линии 220 кВ и выше, нагрузки на шинах низшего напряжения (НН) ПС 220 и 330 кВ. Линии 110 кВ учитывались только в случае

осуществления по ним выдачи мощности электростанций. Данное допущение не повлияло на результаты расчета по причине того, что мощность, передаваемая по данным линиям, была учтена в нагрузках на НН шинхвостов ПС.

Энергосистема Крыма входит в модель целиком в соответствии с описанными ранее допущениями (рис. 4). Связи энергосистемы Крыма с энергосистемой Украины не учитывались, в связи с чем было принято, что линии, соединяющие энергосистему Республики Крым и Украины, разорваны, и переток мощности по ним отсутствует. Информация для моделирования отдельных элементов сети (ЛЭП, трансформаторов, генераторов, компенсирующих устройств и т. д.) была взята из [7-9], а также из карт-схем сетей Черноморского РДУ, находящихся в открытом доступе [7-10].

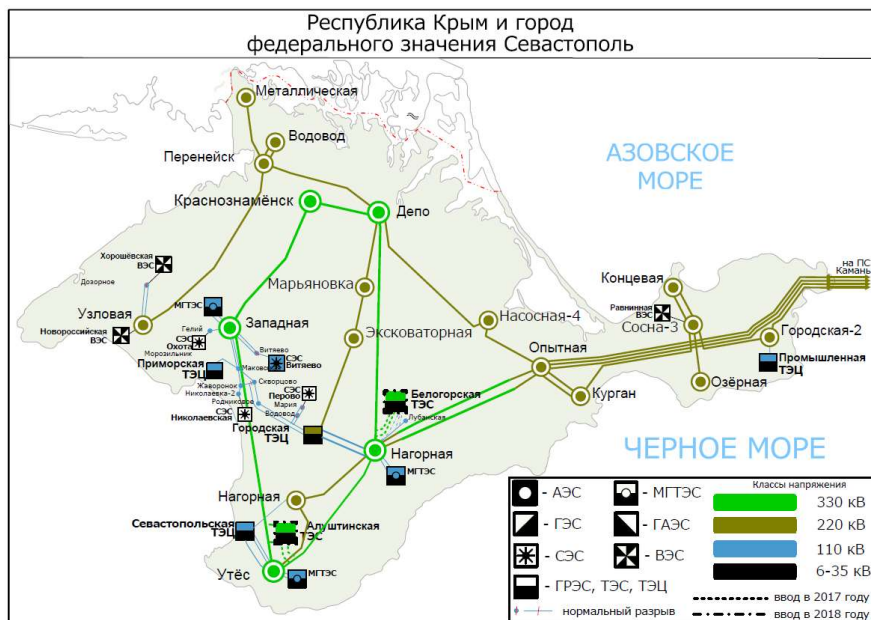


Рис. 4. Модель энергосистемы Республики Крым на 2020 год

Fig. 4. Model of the power system of the Republic of Crimea for 2020

Модель разрабатывалась в программно-вычислительном комплексе (ПВК) ЕТАР [11]. Схема разработанной в ПВК ЕТАР модели приведена на рис. 5. Данная модель использовалась для рассмотрения различных режимов работы энергосистемы и проверки их осуществимости.

Для проведения исследования было создано три модели с различным составом генерации и объемом нагрузки: схема крымской энергосистемы по состоянию на 2019 год, схема крымской энергосистемы по состоянию на 2024 год в соответствии с базовым прогнозом и схема крымской энергосистемы по состоянию на 2024 год в соответствии с умеренно-оптимистичным прогнозом. На рис. 6 приведена динамика максимумов для умеренно-оптимистического и базового вариантов прогноза максимума нагрузки энергосистемы Республики Крым.

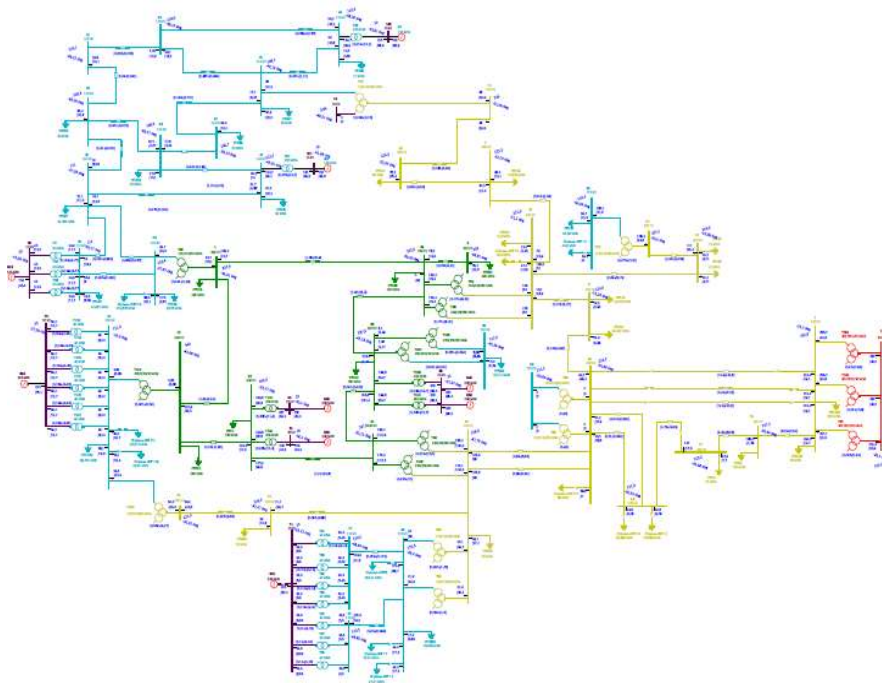


Рис. 5. Модель энергосистемы Республики Крым в ПВК ETAP

Fig. 5. Model of the power system of the Republic of Crimea in ETAP

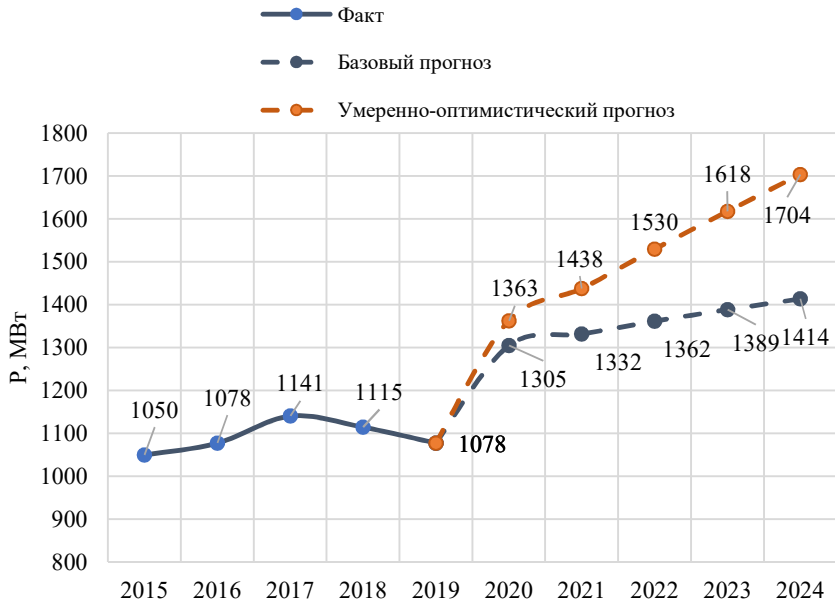


Рис. 6. Умеренно-оптимистический и базовый варианты прогноза максимума нагрузки энергосистемы Республики Крым

Fig. 6. Moderately optimistic and basic versions of the forecast of the maximum load of the power system of the Republic of Crimea

Также модели различаются составом генерации, который приведен в табл. 1.

VI. Описание режимов работы рассматриваемых энергосистем

В рамках исследования был рассмотрен один режим работы для всех трех вариантов энергосистемы.

Речь идет о режиме работы энергосистемы при аномально низких температурах окружающей среды в регионе. По факту рассматривался режим, который может протекать в крымской энергосистеме при падении температуры на 20° относительно нормы. В Техасе падение температура упала до нуля фаренгейтов (-18°), при нормальной температуре в 10° в это время года. Средняя температура в Крыму в январе (самый холодный месяц) равняется 1° тепла за последние 20 лет [12]. В связи с этим для данного режима примем, что температура в регионе опустится до -25°C .

Таблица 1.
Установленная мощность электростанций, входящих в состав генерации, энергосистемы Республики Крым и г. Севастополь для рассматриваемых вариантов сети

Table 1.
Installed capacity of power plants that are part of the generation, power system of the Republic of Crimea and the city of Sevastopol for the considered network options

№ п/п	Наименование показателей	2020 г.	Базовый прогноз 2024 г.	Умеренно-оптимистичский прогноз 2024 г.
1	2	3	4	5
	Установленная мощность электростанций энергосистемы Республики Крым	1442,77	1522,77	1838,27
1	Симферопольская ТЭЦ	86	86	122
2	Камыш-Бурунская ТЭЦ	30	0	0
3	Сакская ТЭЦ	145,317	145,317	145,317
4	Таврическая ТЭС	490,208	490,208	490,208
5	Симферопольская МГТЭС	135	135	135
6	Западно-Крымская МГТЭС	131,8	131,8	131,8
7	Сакская ВЭС	20,828	20,828	20,828
8	Тарханкутская ВЭС	22,453	22,453	22,453
9	Донузлавская ВЭС	6,77	6,77	6,77
10	Судакская ВЭС	3,76	3,76	3,76
11	Пресноводненская ВЭС	7,39	7,39	7,39
12	Останинская ВЭС	24,55	24,55	24,55
13	Степная ВЭС	0	0	180
14	Восточная ВЭС	0	0	75
15	Присивашская ВЭС	0	0	25
16	Восточно-Крымская (Акташская) ВЭС	2,813	2,813	2,813
17	Зольненская ВЭС	0	0	0
18	СЭС Николаевка	69,7	69,7	69,7
19	СЭС Перово (ПС 110 кВ Таврия)	105,578	105,578	105,578
20	СЭС Охотниково	82,653	82,653	82,653
21	СЭС Митяево (ПС 110 кВ Митяево)	31,55	31,55	31,55
22	СЭС Родниковое (ПС 110 кВ Родниковая)	7,5	7,5	7,5
23	СЭС Владиславовка	0	110	110

Продолжение табл. 1.
Table 1 (continued).

№ п/п	Наименование показателей	2020 г.	Базовый прогноз 2024 г.	Умеренно-оптимистичский прогноз 2024 г.
	Установленная мощность электростанций энергорайона г. Севастополь	663,639	663,639	663,639
24	ТЭЦ Крымский содовый завод	20,4	20,4	20,4
25	ТЭЦ Крымский Титан	18	18	18
26	Севастопольская ТЭЦ	34,5	34,5	34,5
27	Балаклавская ТЭС	496,799	496,799	496,799
28	Севастопольская МГТЭС	129,3	129,3	129,3
29	С. Энерджи – Севастополь	3,04	3,04	3,04
	Установленная мощность электростанций энергосистемы Республики Крым и г. Севастополь	2105,909	2185,908	2501,909

В связи с такой низкой температурой ВИЭ должны испытывать проблемы с функционированием. Основная проблема для СЭС будет заключаться в выпадении осадков. При выпадении их большого количества поверхности фотоэлементов могут быть просто засыпаны снегом и перестать функционировать. В расчетах будет считаться, что все СЭС региона полностью выведены из строя. В случае ВЭС, скорее всего, возникнут проблемы с обледенением и процент вышедших из строя ВЭС можно принять, как в Техасе, до 75 %.

Важным вопросом остается работоспособность тепловых электростанций в регионе. Главное отличие, прежде всего, заключается в том, что на электростанциях и хранилищах газа всегда есть запасы газа. По этой причине логично предположить, что проблем с отключением тепловых электростанций не будет. Соответственно, примем, что все ТЭС будут работать, за исключением одного наиболее мощного блока, который отключен по причине ремонта/резерва.

Последний и немаловажный параметр, который необходимо определить – нагрузка. В Техасе большой рост нагрузки был в первую очередь связан с тем, что 60 % домохозяйств отапливались с помощью электричества. В Крыму же ситуация иная. По состоянию на 2015 г., уровень газификации республики составил 73 %. В городах и поселках городского типа обеспеченность населения природным газом – 84,9 %, в селах – 47,7 % [13]. В апреле 2016 г. была утверждена первая программа газификации

населенный пунктов Республики Крым, а в декабре 2017 г. – вторая. Поэтому логично предположить, что на данный момент уровень газификации еще выше. Тогда повышения нагрузки более чем в 1,5 раза, как это было в Техасе, произойти не должно. Несмотря на повышение расхода газа, отключения электростанций также не должно произойти по причине того, что, помимо собственного газа, в Крым также был проложен газопровод, который пущен в эксплуатацию в 2016 г. [14]. Однако, несмотря на это, при понижении температуры в регионе должна возрасти нагрузка на электрическую сеть. Это произойдет по двум основным причинам: будет включено дополнительное электрическое отопление, и большая часть людей будет проводить время в помещениях, а не на улице, включая больше бытовых приборов.

VII. Анализ полученных режимов

В работе было рассмотрено множество режимов для каждого из трех вариантов энергосистемы. Вычислить точное значение увеличения нагрузки относительно пика потребления в рассматриваемом режиме является трудновыполнимой задачей по причине отсутствия большого количества необходимых данных в открытом доступе и сложностью самого расчета. Поэтому для каждого из трех вариантов была построена зависимость перетока активной мощности по межсистемной связи энергосистемы Крыма с энергосистемой Краснодарского края от доли увеличения нагрузки относительно уровня максимума нагрузки энергосистемы каждого варианта в процентах (рис. 7).

Более подробно полученные режимные данные представлены в табл. 2. Обозначения, используемые в табл. 2: 1 – максимум нагрузки энергосистемы Крыма, МВт; 2 – переток по межсистемной связи; 3 – доля увеличения нагрузки, МВт; 4 – доля увеличения нагрузки, %.

Из полученных данных видно, что при текущем состоянии и уровнях нагрузки крымской энергосистемы повторение аварии аналогичной в Техасе невозможно при отсутствии каких-либо дополнительных аварий или отказов. При этом следует заметить, что даже при практически полном отключении ВИЭ энергосистема Крыма может покрыть увеличение максимума нагрузки на 35 %.

При рассмотрении режима на 2024 г. в соответствии с базовым прогнозом видно, что отключение потребителей будет наблюдаться только при увеличении максимума нагрузки свыше 55 %. Как уже было описано ранее с учетом структуры потребления, системы отопления и в целом большей подготовленности инфраструктуры к низким температурам, потребления выше 50 % маловероятно.

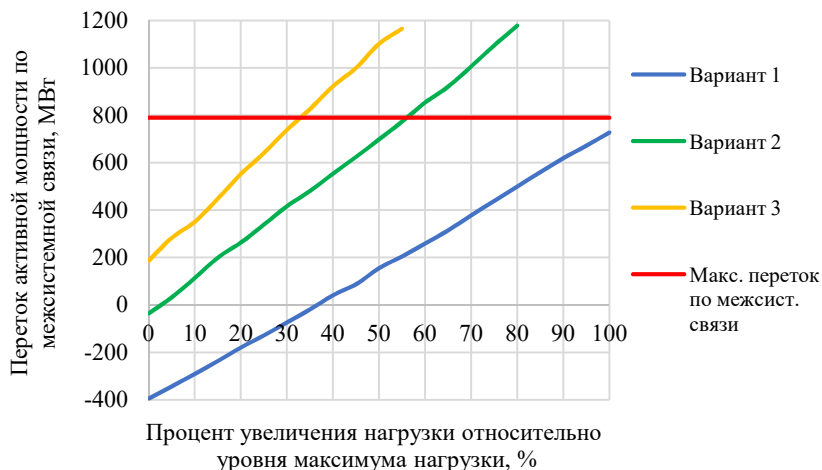


Рис. 7. Зависимость перетока активной мощности по межсистемной связи от доли увеличения нагрузки Крымской энергосистемы

Fig. 7. Dependence of the active power flow through the intersystem communication on the share of the increase in the load of the Crimean power system

В последнем рассмотренном режиме максимальное увеличение нагрузки чуть менее 35 %. В данном случае уже могут возникнуть проблемы с электроснабжением потребителей, однако, несмотря на это, очевидно, что даже при такой нагрузке система имеет большой запас по мощности для покрытия нагрузки.

VIII. Заключение

Проведено исследование возможности возникновения аварии вследствие резкого уменьшения температуры в энергосистеме Крыма, которая была бы аналогична недавней аварии в штате Техас. Получены следующие выводы.

1. В настоящее время для энергосистемы Крыма возникновение аналогичной аварии невозможно, так как с учетом текущего максимума нагрузки энергосистема избыточна, имея также сильную межсистемную связь с энергосистемой Краснодарского края.

2. В будущем, если исходить из базового и условно-оптимистичного прогноза на 2024 г., аналогичная авария гипотетически может произойти только в случае увеличения нагрузки до уровня, обозначенного в данном прогнозе.

Благодарим всех представителей ООО «ЕТАР СИСТЕМС» (ETAP SYSTEMS Russia) за проведенные консультации, занятия, видеоуроки и предоставленные учебные материалы на русском языке.

© Кузнецов О.Н., 2021

© Аверьянов Д.А., 2021

Поступила в редакцию 03.09.2021

Received 03.09.2021

Библиографический список

- [1] Схема и программа развития электроэнергетики республики Крым на 2020-2024 годы. Утв. расп. Главы Республики Крым №187-рг от 28 апреля 2020 г. [Электронный ресурс]. URL: <https://mtop.rk.gov.ru/ru/structure/764> (дата обращения 11.06.2021).
- [2] Yuxin Z., Xuemin Z., Shengwei M., Deming X., Shuai W., Rui S., Blackout risk analysis and control of power system integrated with wind farm // 2016 Chinese Control and Decision Conference (CCDC), May 28-30, 2016, Yinchuan, China. IEEE, 2016. P. 876-882. DOI: 10.1109/CCDC.2016.7531107
- [3] Henneaux P., Labeau P., Maun J., Blackout probabilistic risk assessment and thermal effects: impacts of changes in generation // IEEE Transactions on Power Systems. 2013. Т. 28. № 4. P. 4722-4731. DOI: 10.1109/TPWRS.2013.2263851
- [4] Ветер энергоперемен // Атомный эксперт. 2018. № 6. [Электронный ресурс]. URL: https://atomicexpert.com/novawind_gosatom (дата обращения 12.03.2021).
- [5] Блэкаут в Техасе. Как нефтегазовый штат остался без топлива, электричества и одной АЭС // Хабр [Электронный ресурс]. URL: <https://habr.com/ru/post/543494/> (дата обращения 14.03.2021)
- [6] Основные характеристики российской электроэнергетики // Официальный сайт Министерства энергетики Российской Федерации. [Электронный ресурс]. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/532> (дата обращения 12.03.2021).
- [7] Карапетян И.Г., Файбисович Д.Л., Шапиро И.М. Справочник по проектированию электрических сетей, 2-е изд. М.: НИЦ ЭНАС, 2005. – 320 с.
- [8] Симонов А.В. [и др.]. Схема и программа развития электроэнергетики Республики Крым на 2019-2023. Заключительный отчет о НИР. 106-2.2/1. М.: АО «НТЦ ЕЭС (Московское отделение), 2018. – 210 с.
- [9] Об утверждении схемы и программы развития электроэнергетики Ростовской области на 2020-2024 годы. Утв. расп. губернатора Ростовской области № 91 от 30 апреля 2020. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.donland.ru/documents/12002/> (дата обращения 11.04.2021).
- [10] Безруких П.П., Грибков С.В. XIII Международная научно-практическая конференция «Возобновляемая и малая энергетика '2016» // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. 2016. № 7 (175). С. 58-72.
- [11] ETAP 19.0 User Guide. Operation Technology, Inc., 2019.

- [12] Летопись погоды // Справочно-информационный портал «Погода и климат». [Электронный ресурс]. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/history.php?id=ru®ion=82> (дата обращения 18.03.2021).
- [13] По состоянию на июль 2020 года в Крыму газифицировано 75% населенных пунктов // Строй-Крым.рф [Электронный ресурс]. URL: <http://stroy-krim.org/encyclopedia/news/po-sostoyaniyu-na-iyul-2020-goda-v-krymu-gazificirovano-75-naselyonnyh-punktov> (дата обращения 15.03.2021).
- [14] Трухина В. Газопровод в Крым. «Краснодарский край - Крым» - магистральный газопровод протяженностью 400 км // FB.ru [Электронный ресурс]. URL: <https://fb.ru/article/293159/gazoprovod-v-kryim-krasnodarskiy-kray---kryim---magistralnyiy-gazoprovod-protyaj-nnostyu-km> (дата обращения 15.03.2021).

References

- [1] Skhema i programma razvitiya elektroenergetiki respubliki Krym na 2020-2024 gody [Scheme and program for the development of the electric power industry of the republic of Crimea for 2020-2024]. Approved by the Order of the Head of the Republic of Crimea No. 187-rg dated Apr. 28, 2020. [Online]. Available at: <https://mtop.rk.gov.ru/ru/structure/764> [Accessed: June 28, 2021] (in Russian).
- [2] Z. Yuxin, Z. Xuemin, M. Shengwei, X. Deming, W. Shuai and S. Rui, "Blackout risk analysis and control of power system integrated with wind farm", in *proc. 2016 Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, May 28-30, 2016, Yinchuan, China, pp. 876-882. DOI: 10.1109/CCDC.2016.7531107
- [3] P. Henneaux, P. Labeau and J. Maun, "Blackout probabilistic risk assessment and thermal effects: impacts of changes in generation", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 4, pp. 4722-4731, Nov. 2013. DOI: 10.1109/TPWRS.2013.2263851
- [4] "Veter energoperemen [The wind of energy changes]", *Atomnyj ekspert [Atomic expert]*, no. 6, Aug.-Sept. 2018. [Online]. Available at: https://atomicexpert.com/novawind_rosatom (in Russian).
- [5] Blekaut v Tekhase. Kak neftegazovyy shtat ostalsya bez topliva, elektrichestva i odnoj AES [Blackout in Texas. How the oil and gas state was left without fuel, electricity and one nuclear power plant]. [Online]. Available at: <https://habr.com/ru/post/543494> [Accessed: Mar. 14, 2021] (in Russian).
- [6] *Osnovnye harakteristiki Rossijskoj elektroenergetiki [Main characteristics of the Russian electric power industry]*, Ministry of Energy of Russian Federation. [Online]. Available at: <https://minenergo.gov.ru/node/532> [Accessed: Mar. 12, 2021] (in Russian).
- [7] I.G. Karapetyan, D.L. Faibisovich and I.M. Shapiro, *Spravochnik po proektirovaniyu elektricheskikh setej [Handbook for the design of electrical networks]*, 2nd ed. Moscow: NC ENAS, 2005 (in Russian).
- [8] A.V. Simonov et al., "Skhema i programma razvitiya elektroenergetiki Respubliki Krym na 2019-2023 [Scheme and program for the development of the electric power industry of the Republic of Crimea for 2019-2023]", JSC "STC UES (moacow branch), Moscow, Russia, Research report 106-2.2/1, 2018 (in Russian).
- [9] Ob utverzhdenii skhemy i programmy razvitiya elektroenergetiki Rostovskoy oblasti na 2020-2024 gody [About the approval of the scheme and the program of perspec-

- tive development of power industry of the Rostov region for 2020 - 2024]. Approved by the Order of the Governor of the Rostov Region No. 91 dated Apr. 30, 2020. [Online]. Available at: <https://mtop.rk.gov.ru/ru/structure/764> [Accessed: Apr. 11, 2021] (in Russian).
- [10] P.P. Bezrukih and S.V. Gribkov, "XIII Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konfe-renciya «Vozobnovlyaemaya i malaya energetika '2016» [XIII International Scientific and Practical Conference "Renewable and Small Energy '2016"]", *Plumbing, Heating, Air-Conditioning*, no. 7 (175), pp. 58-72, 2016 (in Russian).
- [11] *ETAP 19.0 User Guide*. Operation Technology, Inc., 2019.
- [12] Letopis' pogody [Chronicle of the weather]. [Online]. Available at: <http://www.pogodaiklimat.ru/history.php?id=ru®ion=82> [Accessed: Mar. 18, 2021] (in Russian).
- [13] Po sostoyaniyu na iyul' 2020 goda v Krymu gazificirovano 75% naselyonnyh punktov [As of July 2020, 75% of settlements were gasified in Crimea]. [Online]. Available at: <http://stroy-krim.org/encyclopedia/news/po-sostoyaniyu-na-iyul-2020-goda-v-krymu-gazificirovano-75-naselyonnyh-punktov> [Accessed: Mar. 15, 2021] (in Russian).
- [14] Truhina V., "Gazoprovod v Krym. «Krasnodarskiy kraj - Krym» - magistral'nyj gazopro-vod protyazhyonnost'yu 400 km [Gas pipeline to Crimea. "Krasnodar Territory - Crimea" - main gas pipeline with a length of 400 km]". [Online]. Available at: <https://fb.ru/article/293159/gazoprovod-v-kryim-krasnodarskiy-kraj---kryim---magistralnyiy-gazoprovod-protyaj-nnostyu-km> [Accessed: Mar. 15, 2021] (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Кузнецов Олег Николаевич, кандидат технических наук, доцент Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Российская Федерация

Аверьянов Данила Андреевич, аспирант, Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Российская Федерация

Oleg N. Kuznetsov, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russia

Danila A. Averyanov, postgraduate student, National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russia