
УДК 620.9.002.5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА С ПОЗИЦИЙ НАДЕЖНОГО ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ

© 2020 г. Н. И. Пяткова¹, *, Н. М. Береснева¹, **

¹Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения РАН, Иркутск, Россия

*e-mail: nata@isem.irk.ru

**e-mail: beresneva@isem.irk.ru

Поступила в редакцию 17.12.2019 г.

После доработки 13.01.2020 г.

Принята к публикации 13.01.2020 г.

В работе представлены основные положения методики определения уязвимых элементов в ТЭК, исследуемого в качестве совокупности отраслевых критических инфраструктур энергетики. Данная методика основана на использовании иерархической системы моделей отраслей ТЭК, на анализе взаимосвязанной работы отраслевых критических инфраструктур энергетики в условиях нормального функционирования и при реализации нештатных ситуаций. В работе предложена принципиальная схема формирования перечня уязвимых элементов верхнего уровня технологической иерархии на базе отраслевых критических инфраструктур. Приводится схема работы с двухуровневой системой моделей. Приведены результаты апробации методики и разработанных моделей (иллюстрационный пример).

Ключевые слова: надежное энергообеспечение, топливно-энергетический комплекс, системы энергетики, экономико-математические модели

DOI: 10.31857/S0002331020010100

ВВЕДЕНИЕ

К критическим инфраструктурам в соответствии с определениями [1, 2] с полной уверенностью можно отнести отраслевые системы энергетики и топливно-энергетический комплекс (ТЭК), представляющий собой взаимосвязанную инфраструктуру, состоящую из отдельных систем энергетики. Данное утверждение подтверждается значимостью этих инфраструктур для экономики страны, подкрепляется необходимостью обеспечения энергетической безопасности, характеризующейся как “состояние защищенности граждан, общества, государства и экономики от угроз дефицита в обеспечении их потребностей в энергоресурсах приемлемого качества, от угроз нарушения бесперебойности энергоснабжения”. Основные решаемые в этом случае задачи [3]:

- прогнозирование условий функционирования и развития систем энергетики и ТЭК в целом с учетом возможных нештатных (критических и чрезвычайных) ситуаций;
- оценка состояния энергетики в этих условиях;
- выявление “узких мест” в системах топливо- и энергоснабжения потребителей;
- выбор альтернатив, направлений и конкретных мер по предотвращению или снижению последствий влияния нештатных ситуаций в системах.

Последствия реализации этих ситуаций могут привести к значительным перебоям в топливо- и энергоснабжении потребителей, могут вызвать дефицит энергоресурсов.

Это обосновывает необходимость применения моделей критических инфраструктур энергетики для выявления их уязвимых элементов, оценки критичности этих элементов с позиций гарантированного и своевременного обеспечения потребностей в энергоресурсах. Для проведения таких исследований была разработана и апробирована методика определения критических (уязвимых) для ТЭК элементов, представленная ниже.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРИТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Исследования по выявлению наиболее уязвимых элементов взаимосвязанных критических инфраструктур энергетики (систем энергетики) проводятся с использованием оптимизационных территориально-производственных моделей функционирования ТЭК страны. Набор анализируемых элементов в большинстве случаев определяется в рамках исследований отдельных критических инфраструктур с помощью моделей их функционирования. Тем самым задействуется система равноуровневых моделей энергетики (рис. 1), различных по территориальной, временной и технологической иерархии. В ней модели систем энергетики, представленные схемой взаимосвязанных детализированных отраслевых объектов, используются для определения уязвимых отраслевых элементов при максимальной суточной загрузке производственных мощностей. Модели ТЭК, в свою очередь, после перехода на суточный временной разрез, позволяют определить критичность этих отраслевых объектов для энергетики территорий в условиях совместного функционирования различных отраслей. При этом в обоих случаях анализируются гипотетические расчетные возмущенные состояния, имитирующие резкое снижение работоспособности анализируемых элементов, либо задачи реконструкции сети в условиях неработоспособности данных элементов. В случае имитации неработоспособности элементов возмущенные состояния формируются на базе бездефицитного для единичных отключений элементов, либо

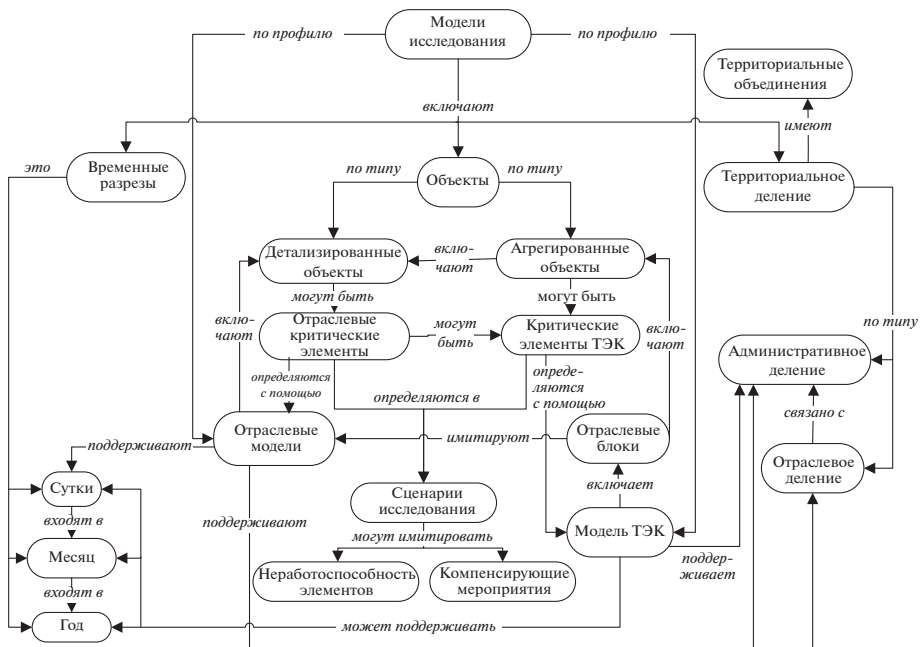


Рис. 1. Взаимосвязь двухуровневых моделей при определении критических элементов энергетики.

для отключений их групп различной кратности. Под кратностью понимается число одновременно отключаемых элементов. Комплексная оценка расчетных состояний в случае общеэнергетических исследований выполняется на базе модельных показателей по различным территориям и по анализируемым критическим инфраструктурам. Для этого используется конечный критерий эффективности функционирования каждой инфраструктуры – складывающиеся у потребителей относительные дефициты энергоресурсов. Дополнительно возможно рассмотрение сработки резервных возможностей отраслей – запасов топлива, резервов генерирующих мощностей в электро- и теплоэнергетике, возможности диверсификации топлива на объектах с двойной топливоподачей.

Для оценки критичности элементов ТЭК в рамках оптимизационных расчетов используется критерий значимости элементов, характеризующий относительные изменения анализируемых модельных показателей при изменении режима функционирования данного объекта по всему множеству состояний. Формализовано этот показатель задан следующими формулами:

$$ZO_i = \sum_{j=1}^J \left[\sum_{k=1}^K ZO_i^{j,k} ZC^j \right];$$

$$ZO_i^{j,k} = \sum_{r=1}^R ZS_r^{j,k} / R,$$

где

ZO_i – значимость i -го элемента ТЭК,

$ZO_i^{j,k}$ – значимость i -го элемента по j -ому показателю в расчетах кратности k ,

$ZO_r^{j,k}$ – оценки состояний по j -ому показателю в расчетах с включением i -го элемента в группы отключений кратности k ,

R – число оцененных по j -му показателю состояний с включением i -го элемента в группы отключений кратности k ,

ZC^j – значимость (удельный вес) j -ого показателя,

K – максимальная кратность отключений в оптимизационных расчетах,

J – количество анализируемых показателей,

I – множество отключаемых элементов ТЭК, $i \in I$.

Формализация выбора категории критичности элементов может быть представлена следующим образом:

$$f(ZO_i) = \begin{cases} 1, & \text{если } ZO_i > ZO_i^{pc} \\ 2, & \text{если } ZO_i^c \leq ZO_i \leq ZO_i^{pc}; \\ 3, & \text{если } ZO_i < ZO_i^c \end{cases}$$

$$ZO_i^c = ZO_i^{\max} P_i^c;$$

$$ZO_i^{pc} = ZO_i^{\max} P_i^{pc},$$

где

ZO_i^c, ZO_i^{pc} – численные значения порогов качественной оценки по i -ому элементу,

ZO_i^{\max} – максимальное значение значимости i -го элемента,

P_i^c, P_i^{pc} – экспертно установленные пороговые значения в процентном выражении.

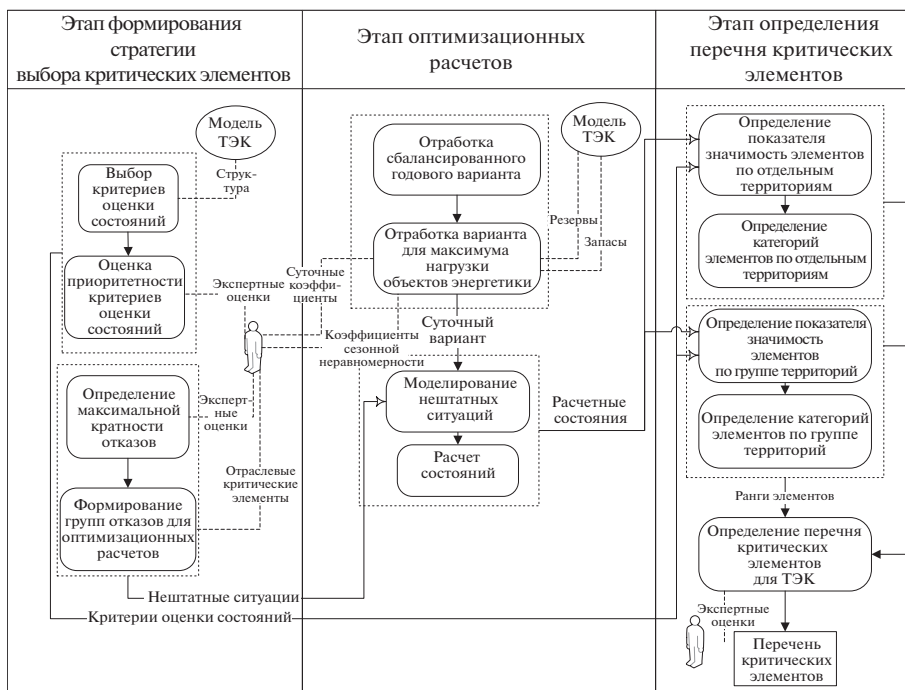


Рис. 2. Обобщенная схема поиска критических элементов в рамках модельных расчетов.

Схема определения критических элементов ТЭК (рис. 2) формально представлена тремя этапами:

- этапом формирования стратегии выбора критических объектов;
- этапом проведения оптимизационных расчетов;
- этапом формирования перечня критических объектов на базе их рассчитанных показателей значимости.

На первом этапе:

- определяются объекты смоделированной территориально-производственной структуры ТЭК;
- формируются группы отключаемых элементов для их последующего включения в моделируемые ситуации;
- формируется набор критериев оценки состояний (относительных модельных показателей), определяется значимость этих критериев
- определяются категории критичности элементов и их пороговые значения;
- формируются сценарии реализации нештатных ситуаций.

На втором этапе проводятся оптимизационные расчеты модели ТЭК, в рамках которых:

- отлаживается сбалансированный годичный вариант по статистической информации;
- отлаживается вариант для суточного максимума нагрузки в системах энергетики;
- рассчитываются смоделированные нештатные ситуации с различными вариантами отключений потенциальных уязвимых элементов.

На третьем этапе формируются результаты оценки состояния критических инфраструктур при отключении заданных элементов:

- корректируется состав анализируемых расчетных состояний путем исключения состояний с допустимым для страны в целом относительным дефицитом хотя бы по одному ресурсу (на данном этапе принят 5%-ный барьер оценки дефицита по стране в целом);

- определяются критерии значимости элементов по рассматриваемым территориям или их группам;
- определяются категории критичности для анализируемых элементов;
- формируется перечень критических для ТЭК элементов.

ИЛЛЮСТРАТИВНЫЙ ПРИМЕР АПРОБАЦИИ МЕТОДИКИ

Апробация методики проводилась на базе суточных вариантов модели функционирования ТЭК из-за нивелирования последствий сбоя работы отраслевых объектов для ТЭК в целом при рассмотрении более длительных временных периодов. Поэтому при выборе критических элементов ТЭК формируется три типа суточных вариантов модели: среднесуточный сбалансированный вариант, вариант максимума нагрузки объектов энергетики, варианты отключения отраслевых критических элементов при максимальной загруженности объектов. В двух последних случаях при возникновении дефицитов активизировались модельные механизмы структурной избыточности систем в виде резервирования и диверсификации энергоресурсов.

В модели территория страны представлена 79-ю субъектами федерации. Технологически модель состоит из отраслевых подсистем энергетического комплекса (газовой, угольной, нефтеперерабатывающей (в части мазутоснабжения) отраслями, электро- и теплоэнергетикой) [4].

С использованием модели был проведен ряд экспериментальных расчетов, в которых в качестве расчетных условий анализировалось влияние отключения критических элементов газовой отрасли [5] на функционирование ТЭК в целом. Результатом поочередного отключения выбранных объектов газовой отрасли стала недовыработка рассматриваемых в модели энергоресурсов и соответственно их дефицит у потребителей.

В целом по стране по каждому отключаемому объекту газовой отрасли сложилась следующая ситуация (рис. 3–5).

При определении коэффициентов значимости были отброшены потенциальные критические элементы, при отключении которых дефициты энергоресурсов составляли менее 5% потребностей. В результате из первоначального списка 61 критического

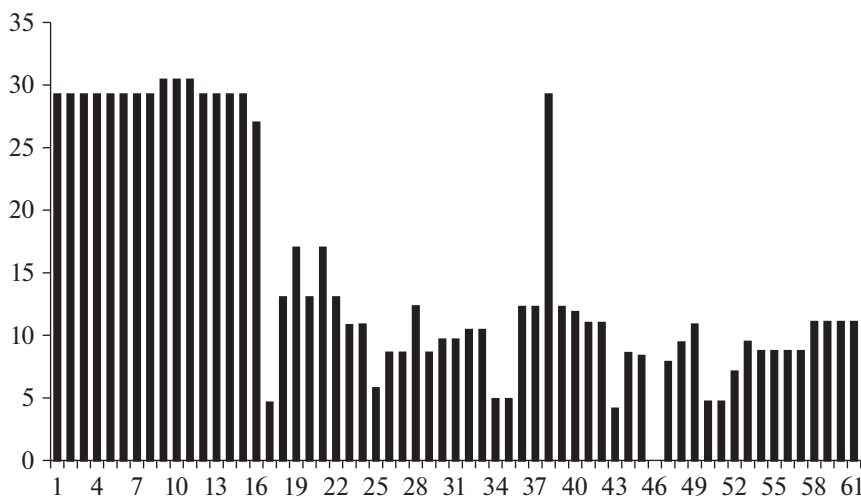


Рис. 3. Дефицит теплоэнергии при отключении критических элементов газовой отрасли %/сутки.

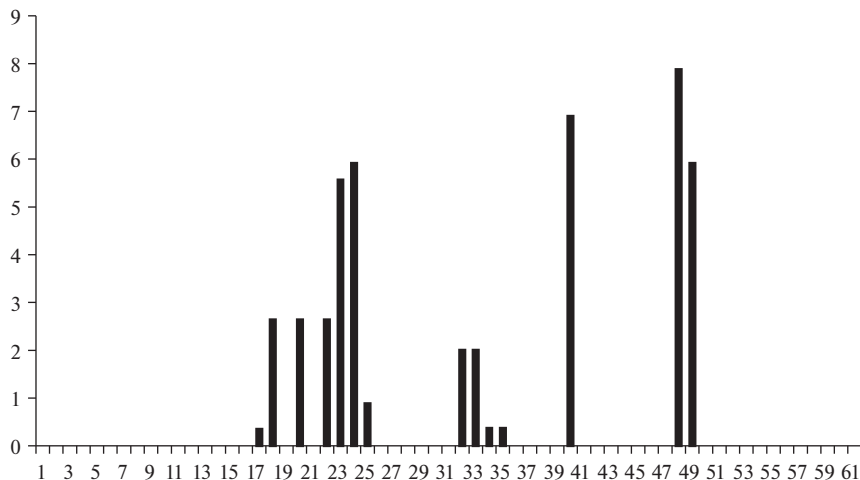


Рис. 4. Дефицит электроэнергии при отключении критических элементов газовой отрасли, %/сутки.

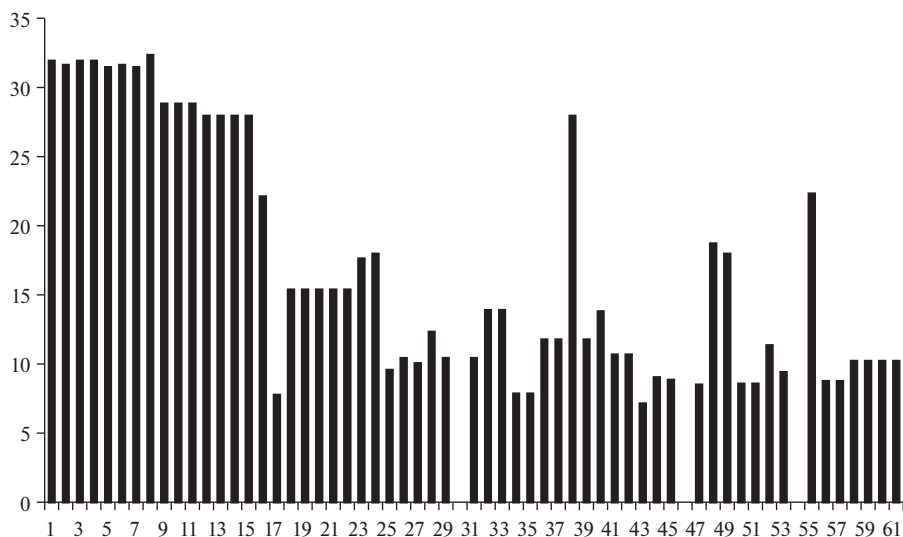


Рис. 5. Дефицит природного газа при отключении критических элементов газовой отрасли, %/сутки.

элемента в газовой отрасли остались 52 элемента, отключение которых приводило к более значительным недопоставкам (рис. 6).

Анализ полученных графиков показал, что ранжированный список критических элементов газовой отрасли практически соответствует отключениям этих элементов при взаимосогласованной работе всех систем энергетики в едином комплексе (ТЭК) за редким исключением.

По полученным коэффициентам значимости было выделено три категории критических элементов по их влиянию на энергоснабжение (на величину дефицита от их отключения): 1 категория, к которой отнесены элементы вызывающие суммарный от-

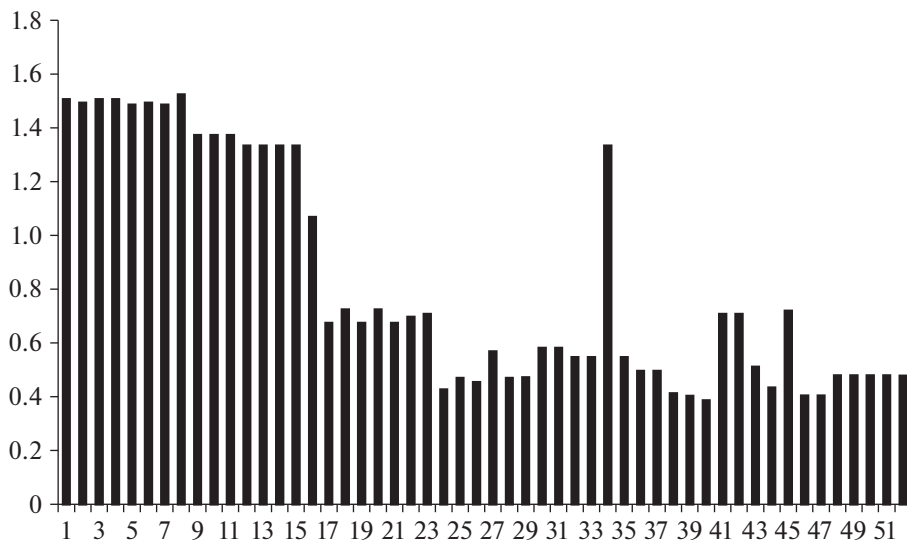


Рис. 6. Коэффициенты значимости критических элементов газовой отрасли.

носительный дефицит свыше 70%, 2 категория — от 30 до 70%, 3 категория — показатели ниже 30%. Количество критических элементов по этим группам по территории страны (по федеральным округам) распределилось следующим образом (табл. 1). Значительный дефицит был получен на территориях, топливно-энергетический баланс которых ориентирован на использование природного газа. Это — Северо-Кавказский, Южный и Приволжский округа, где количество критических элементов первой категории составило от 17 до 25.

Далее критические элементы были рассмотрены по технологическому признаку: источники (предприятия по добыче газа) (табл. 2), компрессорные станции (табл. 3), участки магистральных газопроводов (табл. 4). Коэффициенты значимости этих элементов отличаются по глубине вызываемого ими дефицита на рассматриваемых территориях. Значительный дефицит вызывает отключения компрессорных станций и отдельных участков газопроводов.

Был проведен анализ частоты (повторяемости) попадания уязвимых элементов в наиболее критичную первую категорию по всем федеральным округам, который показал, что это в основном компрессорные станции и участки газопроводов, частота по-

Таблица 1. Классификация критических элементов газовой отрасли по влиянию на энергоснабжение потребителей

Федеральный округ	1 кат. (70–100%)	2 кат. (30–70%)	3 кат. (0–30%)
Центральный	15	3	34
Северо-Западный	14	27	11
Южный	17	20	15
Северо-Кавказский	25	17	10
Приволжский	17	15	20
Уральский	6	7	39

Таблица 2. Коэффициенты значимости отдельных источников газовой отрасли по федеральным округам

Критические элементы	Федеральные округа					
	Централь- ный	Северо- Западный	Южный	Северо- Кавказский	Приволж- ский	Ураль- ский
28	1.73	1.79	1.54	1.77	1.29	1.17
43	0.41	0.98	0.91	1.12	0.29	1
44	0.41	0.98	0.4	1.12	0.09	0.54
48	0.41	0.97	0.4	1.12	0.09	0.5

Таблица 3. Коэффициенты значимости отдельных компрессорных станций газовой отрасли по федеральным округам

Критические элементы	Федеральные округа					
	Центральный	Северо- Западный	Южный	Северо- Кавказский	Приволжский	Уральский
1	2.30	1.88	2.15	1.77	1.18	0.82
2	2.28	1.88	1.54	1.77	1.33	0.82
3	2.28	1.88	1.54	1.77	1.38	0.82
7	2.27	1.88	1.54	1.77	1.32	0.82
8	2.30	2.07	1.54	1.77	1.30	0.82
11	1.73	1.79	1.54	1.77	1.30	1.17
12	1.64	2.07	1.54	1.77	1.30	0.82
15	1.64	2.07	1.54	1.77	1.30	0.82
18	0.41	0.98	0.68	1.22	0.85	0.80
19	0.66	1.05	1.08	1.34	0.78	0.82
22	0.41	0.98	0.68	1.22	0.85	0.80
23	0.16	0.51	0.02	0.36	0.09	2.74
24	0.16	0.51	0.02	0.36	0.09	2.79
25	0.16	2.64	0.00	0.00	0.00	0.00
26	0.16	0.51	0.02	0.31	0.09	1.87
32	0.16	0.51	0.02	0.36	0.09	2.21
36	0.41	0.98	0.91	1.13	0.45	0.73
38	1.64	2.07	1.54	1.77	1.30	0.82
40	0.41	0.98	0.91	1.13	0.44	0.46
47	0.16	0.51	0.02	0.36	0.09	3.14
51	0.42	2.30	0.14	0.31	0.00	0.15
54	0.71	1.76	0.91	1.80	0.16	0.78
57	0.54	1.05	0.91	1.34	0.53	0.00
58	0.54	1.05	0.91	1.34	0.53	0.00
61	0.52	0.98	0.91	1.34	0.58	0.00

Таблица 4. Коэффициенты значимости отдельных участков газопроводов газовой отрасли по федеральным округам

Критические элементы	Федеральные округа					
	Центральный	Северо-Западный	Южный	Северо-Кавказский	Приволжский	Уральский
4	2.28	1.88	1.54	1.77	1.38	0.82
5	2.27	1.88	1.54	1.77	1.32	0.82
6	2.26	1.88	1.54	1.77	1.35	0.82
9	1.73	1.79	1.54	1.77	1.30	1.17
13	1.59	2.06	1.70	1.77	1.30	0.82
14	1.64	2.07	1.54	1.77	1.30	0.82
16	1.48	1.29	1.54	1.65	0.96	0.82
20	0.41	0.98	0.68	1.22	0.85	0.80
21	0.66	1.05	1.08	1.34	0.78	0.82
27	0.16	0.51	0.02	0.31	0.09	1.68
29	0.16	0.51	0.02	0.31	0.09	1.87
31	0.41	0.98	0.40	1.13	0.09	0.82
33	0.16	0.51	0.02	0.36	0.09	2.21
37	0.41	0.98	0.91	1.13	0.45	0.73
39	0.41	0.98	0.91	1.13	0.45	0.73
41	0.41	0.98	0.91	1.13	0.44	0.46
48	0.16	0.51	0.02	0.36	0.09	2.79
52	0.41	0.98	0.91	1.13	0.13	0.46
55	0.41	0.98	0.54	1.13	0.09	0.46
56	0.41	0.98	0.54	1.13	0.09	0.46
49	0.54	1.05	0.91	1.34	0.53	0.00
60	0.54	1.05	0.91	1.34	0.53	0.00

падения которых составляет 5 и 6, из источников – один элемент, частота которого по повторяемости по территории составила 4.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены основные положения методики определения критических (уязвимых элементов) в ТЭК. Эта методика основана на использовании иерархической системы моделей отраслей ТЭК, на анализе взаимосвязанной работы отраслевых критических инфраструктур энергетики в условиях нормального функционирования и при реализации нештатных ситуаций. Также приведены результаты апробации методики и разработанных моделей по исследованию влияния критических элементов газовой отрасли на взаимосогласованную работу отраслей энергетики в едином комплексе. Получены коэффициенты значимости рассматриваемых элементов с учетом системного эффекта.

Результаты, представленные в статье, получены при частичной финансовой поддержке проекта по государственному заданию ИСЭМ СО РАН No. АААА-А17-117030310451-0.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кондратьев А.Е.* Современные тенденции в исследовании критической инфраструктуры в зарубежных странах // *Зарубежное военное обозрение*, 2012, № 1, с. 19–30.
2. *Rinaldi S., Peerenboom J. and Kelly T.* Identifying, Understanding, and Analyzing Critical Infrastructure Interdependencies // *IEEE Control Systems Magazine*, IEEE, December 2001, pp. 11–25.
3. Энергетическая безопасность России: проблемы и пути решения / *Пяткова Н.И.* [и др.], отв. ред. *Вороний Н.И., Чельцов М.Б.* Рос. Акад. Наук, Сиб. отд-ние, Ин-т систем энергетики им. Л.А. Мелентьева. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2011, 198 с.
4. *Beresneva N., Pyatkova N.* Choosing of the FEC critical objects in model researches of energy security problems and its features // *Rudenko International Conference “Methodological problems in reliability study of large energy systems” (RSES 2018)*. E3S Web Conf. Volume 58, 2018. (DOI <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20185803004>).
5. *Воробьев С.В., Еделев А.В.* Применение метода определения критических элементов в сетях технических инфраструктур для поиска критически важных объектов газотранспортной сети России // *Энергетическая политика*, 2018, № 1, с. 45–51.

**Critical Elements Determination of Fuel and Energy Complex
from the Reliable Energy Supply Positions**

N. I. Pyatkova^{a,*} and N. M. Beresneva^{a,}**

^a*Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia*

^{*}*e-mail: nata@isem.irk.ru*

^{**}*e-mail: beresneva@isem.irk.ru*

The paper presents the main provisions of the methodology for identifying vulnerable elements in the fuel and energy complex, which is studied as a set of industry critical energy infrastructures. This methodology is based on the use of a hierarchical system of models of industries in the fuel and energy sector, on the analysis of the interconnected work of industry critical energy infrastructures in normal functioning and during emergency situations. The paper proposes a schematic diagram of the formation of a list of vulnerable elements of the upper level of the technological hierarchy based on industry critical infrastructures. The scheme of work with a two-level system of models is given. The results of testing the methodology and developed models are presented (illustrative example).

Keywords: reliable energy supply, fuel and energy complex, energy systems, economic and mathematical models