

УДК 621.311

В. Х. НАСИБОВ

МОДЕЛИ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ДЛЯ СРЕДНЕСРОЧНОГО И ДОЛГОСРОЧНОГО ПЕРИОДОВ

Азербайджанский научно-исследовательский и проектно-изыскательский институт энергетики

(Поступила в редакцию 20.11.2013)

Надежная и устойчивая работа топливно-энергетического комплекса и составляющих его систем энергетики является необходимым условием экономической и национальной безопасности любой из стран мира. Всевозрастающая сложность систем энергетики, их взаимосвязанность и взаимозависимость требуют проведения исследования задачи энергетической безопасности на уровне отдельных систем энергетики для разных временных периодов [1].

В [2] приведены модели оценки электроэнергетической безопасности для краткосрочных периодов, где электроэнергетика представлена в виде четырех взаимосвязанных подсистем: топливообеспечение, производство электроэнергии, передача и распределение электроэнергии, связи с соседними энергосистемами и импорт электроэнергии. Для каждой из них выбраны наиболее характерные показатели, отдельно сгруппированы внешние и внутренние риски и устойчивости и оценен уровень безопасности каждой подсистемы по классификации Международного Энергетического Агентства. Здесь под риском понимаются наиболее значимые угрозы, которые имеют большую вероятность реализации, а устойчивость – устойчивость подсистемы к различным возмущениям, направленным на нарушение электроэнергетической безопасности.

В данной статье рассматриваются вопросы электроэнергетической безопасности для среднесрочных и долгосрочных периодов. Под электроэнергетической безопасностью понимается состояние защищенности государства, общества и отдельных граждан от угроз дефицита в обеспечении их потребностей в экономически доступной электроэнергии приемлемого качества и нарушений бесперебойности электроснабжения.

Как и при исследовании краткосрочных периодов, основное внимание уделяется возможным физическим нарушениям. При исследовании электроэнергетической безопасности для среднесрочных и особенно долгосрочных периодов электроэнергетика представляется совокупностью семи взаимосвязанных подсистем (к перечисленным четырем подсистемам добавляется еще три подсистемы: потребление электроэнергии, воспроизводство основных производственных фондов и перспективное развитие).

Несмотря на то что названия первых четырех подсистем и для краткосрочных периодов, и для среднесрочных и долгосрочных периодов одинаковые, методы исследования их безопасности существенно различаются. Различия имеются и по составу индикаторов, и по их значениям. Например, если в качестве значения индикаторов для краткосрочных периодов выступают их текущие величины, то для среднесрочных и долгосрочных периодов значениями индикаторов являются их прогнозные величины. Схемы исследования первых четырех блоков для среднесрочных и долгосрочных периодов по сравнению с краткосрочными периодами несколько модифицируются.

Как и для краткосрочных периодов, для среднесрочных и долгосрочных периодов безопасность всех подсистем, составляющих электроэнергетику, классифицируется буквенными обозначениями от *A* до *E*, где *A* соответствует наименьшим рискам и максимальной устойчивости, а *E* – наибольшим рискам и наименьшей устойчивости (рис. 1) [3]. Если применить лингвистиче-

ские переменные к классификации безопасности подсистем, составляющих электроэнергетику, то можно получить примерно следующие соответствия: *A* – отлично, *B* – нормально, *C* – неплохо, *D* – плохо и *E* – очень плохо. Как и для краткосрочных периодов, выбранные показатели каждой подсистемы принимают одно из трех значений: «низкое, среднее и высокое». Ниже рассматриваются все подсистемы в отдельности.

Топливообеспечение электроэнергетики. В табл. 1 показаны риски и устойчивость для оценки безопасности обеспечения природным газом электроэнергетического сектора. Безопасность подсистемы топливообеспечения электроэнергетики оценивается в два шага по схеме, представленной на рис. 1. Главным показателем этой подсистемы является зависимость от импорта, для Азербайджана этот параметр принимает значение «низкое» и относится к группе *A*, так как Азербайджан является экспортером природного газа.

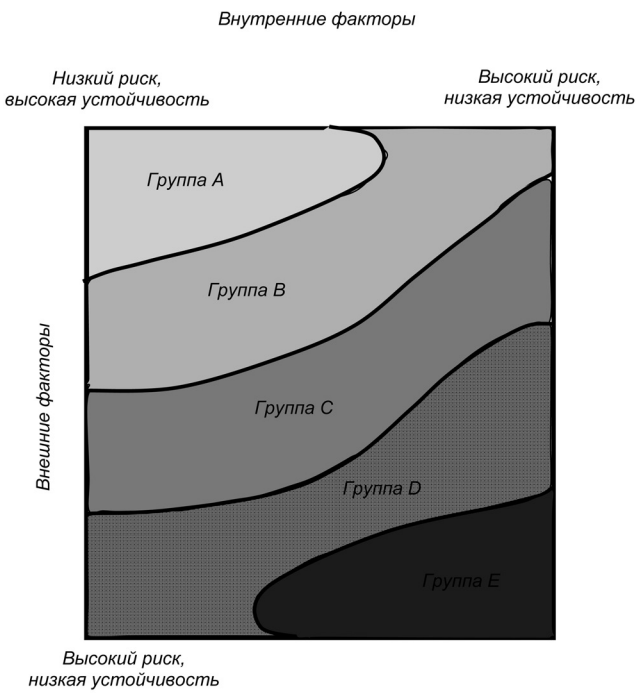


Рис. 1. Классификация оценки безопасности подсистем электроэнергетики

Таблица 1. Оценка безопасности обеспечения природным газом электроэнергетического сектора

Риски	Устойчивость
Внутренние: доля морской добычи основного вида топлива	Разнообразие видов топлива Диверсификация путей доставки

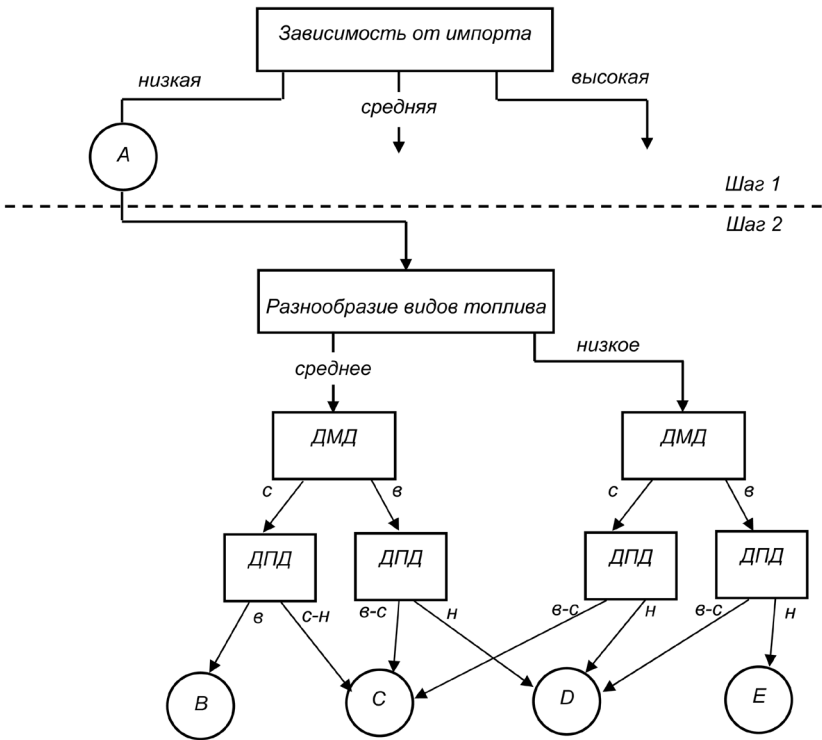


Рис. 2. Схема топливообеспечения энергетики Азербайджана для долгосрочных периодов (ДМД – доля морской добычи, DPD – диверсификация путей доставки)

Значение параметра «доля морской добычи» делится на следующие группы: высокая $>80\%$ и низкая $<30\%$. Разнообразие видов топлива и диверсификация путей доставки рассчитываются по методу Герфиндаля – Хиршмана. Этот параметр для всех показателей делится на три диапазона: высокое разнообразие ($<0,33$), умеренное разнообразие ($0,33-0,64$) и низкое разнообразие ($>0,64$) [3].

Как видно из рис. 2, прогнозное значение безопасности подсистемы топливообеспечения электроэнергетики Азербайджана для долгосрочных периодов может соответствовать буквенным обозначениям от *B* до *D* в зависимости от разнообразия видов топлива, доли морской добычи и диверсификации путей доставки основного вида топлива. При этом при складывающихся условиях, когда на электростанциях Азербайджана в основном сжигается (используется) природный газ и доля морской добычи имеет тенденцию роста (это положение сохранится на долгосрочную перспективу), относительно благополучное состояние безопасности этой подсистемы достигается при высоком уровне диверсификации путей доставки основного вида топлива.

Производство электроэнергии. В табл. 2 показаны наиболее опасные риски и устойчивость для подсистемы производства электроэнергии для долгосрочных периодов. Оценка безопасности подсистемы производства электроэнергии осуществляется в три шага. Наиболее важным показателем безопасности подсистемы производства электроэнергии является выработка электроэнергии собственными источниками, первый шаг определяется этим параметром. Для азербайджанской энергосистемы данный параметр относится к диапазону «высокий» (100%). Вторым шагом классификация ведется в зависимости от уровня резервирования. Резерв, как и все другие параметры, оценивается тремя диапазонами: $<15\%$ – низкий резерв, $15-25\%$ – средний резерв, $>30\%$ – высокий резерв [4]. Анализ проводимых и запланированных работ в электроэнергетике показывает, что параметр резерва мощности будет соответствовать значению «высокое» или «среднее» [5].

Т а б л и ц а 2. Опасные риски и устойчивость для подсистемы производства электроэнергии для долгосрочных периодов

Категория	Риски	Устойчивость
Внешние	Отсутствуют	Отсутствует
Внутренние	Выработка электроэнергии собственными источниками Степень изношенности основного генерирующего оборудования	Доля ГЭС Доля модульной (быстровводимой) распределенной генерации Резерв мощности

Степень изношенности основного генерирующего оборудования является третьим шагом и определяет дальнейшую классификацию данной подсистемы [6]. При этом изменчивость производства электроэнергии на ГЭС необходимо определять отдельно. Как было показано в [2], в азербайджанской энергосистеме на ГЭС производится 10–15% электроэнергии и максимальная годовая изменчивость производства по сравнению с предыдущим годом не превышает 30%. Прогнозные значения этих показателей на долгосрочную перспективу существенно не изменятся и поэтому безопасность производства электроэнергии на ГЭС нужно отнести к группе *B*. Сте-

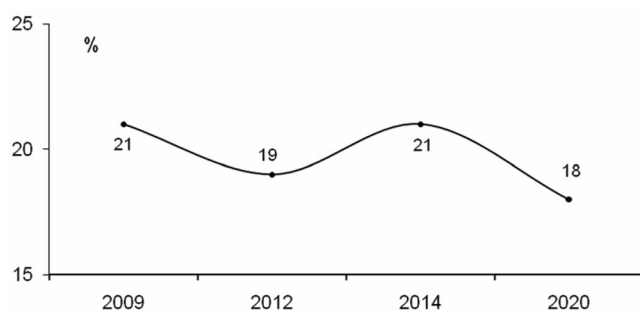


Рис. 3. Степень изношенности основного генерирующего оборудования

пень изношенности основного генерирующего оборудования принимает одно из трех значений $<15\%$ – «низкое», от 15 до 30% – «среднее», $>40\%$ – «высокое». На рис. 3 показана степень изношенности основного генерирующего оборудования [2]. Из рисунка видно, что этот параметр относится ко второму диапазону.

На рис. 4 приведена структурная схема оценки подсистемы производства электроэнергии для долгосрочных периодов. Как

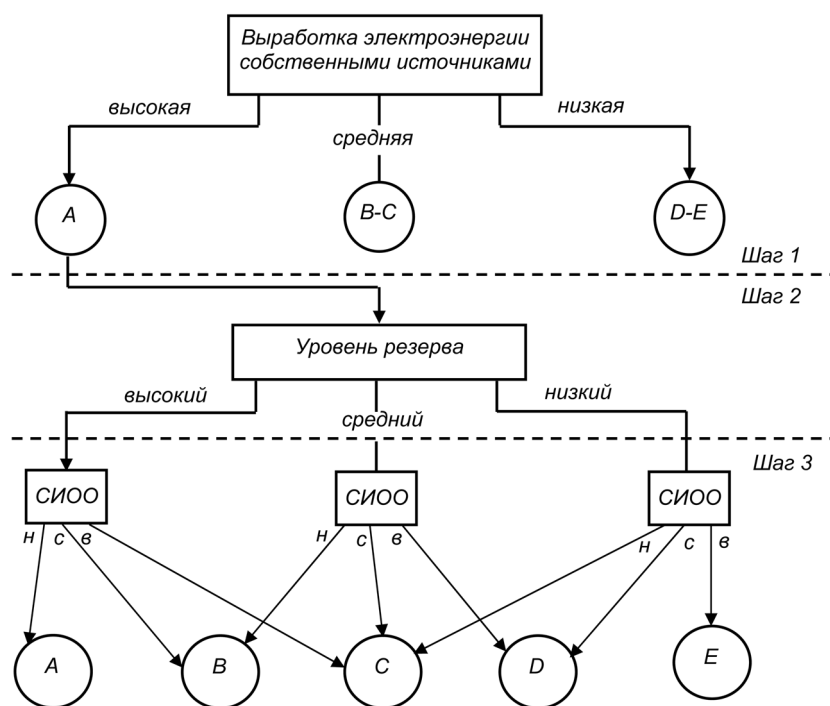


Рис. 4. Структурная схема оценки подсистемы производства электроэнергии для долгосрочных периодов (СИОО – степень изношенности основного оборудования)

видно из рисунка, по прогнозным значениям резерва мощности и степени изношенности основного генерирующего оборудования безопасность подсистемы производства электроэнергии для среднесрочных и долгосрочных периодов можно отнести к диапазону $A-C$.

Передача и распределение электроэнергии. Параметрами безопасности этой подсистемы являются износ подстанций, трансформаторов, воздушных линий электропередачи, а также степень сбалансированности и самообеспеченности регионов электроэнергией. В табл. 3 показаны риски и устойчивость этой подсистемы.

Т а б л и ц а 3. Риски и устойчивость подсистемы «передача и распределение электроэнергии»

Категория	Характер рисков	Устойчивость
Внешние	Отсутствуют	Отсутствует
Внутренние	Уровень износа подстанций Уровень износа трансформаторов Уровень износа воздушных линий	Степень сбалансированности и самообеспеченности регионов или крупных экономических регионов

Показатель износа оборудования принимает одно из трех значений: «низкое» (<25%), «среднее» (30–50%) и «высокое» (>60%) [7], а показатель степени сбалансированности имеет следующие значения: <40% – «низкое», 40–70% – «среднее», >70% – «высокое» [6]. На рис. 5 показан прогноз износа электросетевого оборудования азербайджанской энергосистемы. Как видно из рисунка, износ оборудования для долгосрочных периодов относится к диапазону, имеющему «среднее» значение.

Как было показано в [2], степень сбалансированности и самообеспеченности электроэнергией регионов Азербайджана оценивается по схеме, приведенной на рис. 6. По этой же схеме оцениваются прогнозные значения показателя сбалансированности регионов электроэнергией. Для долгосрочных периодов данный показатель принимает значение «высокое», так как для регионов Север и Восток ожидается, что будет $P_H \approx P_T$, а для регионов Запад и Юг сохранится соотношение $P_H < P_T$.

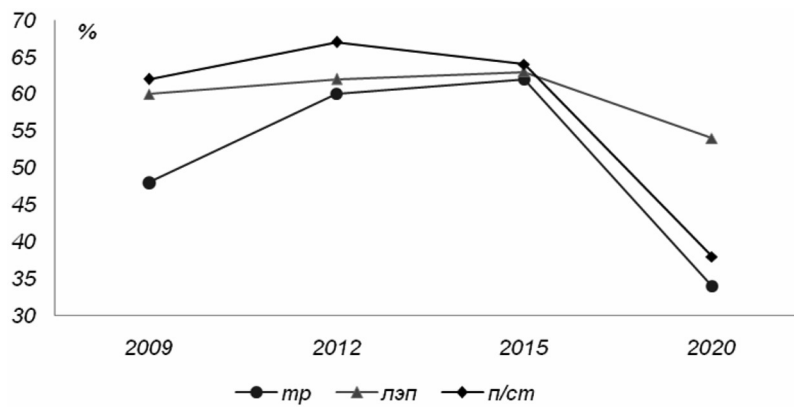


Рис. 5. Прогноз износа электросетевого оборудования азербайджанской энергосистемы

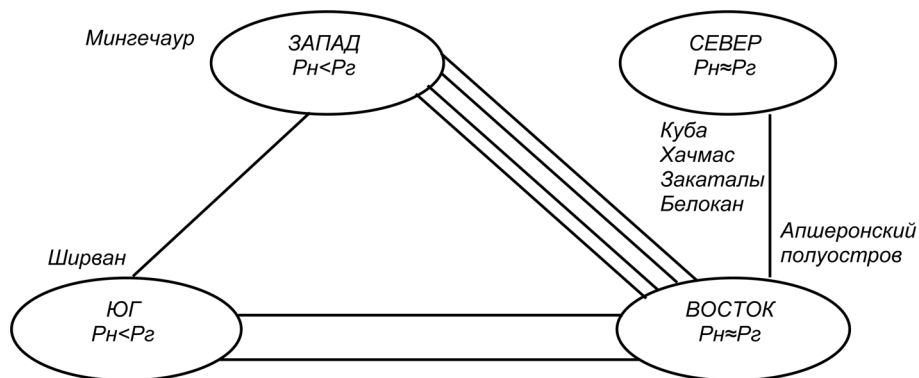


Рис. 6. Схема сбалансированности и самообеспеченности электроэнергией регионов Азербайджана и прогнозных значений показателя сбалансированности регионов электроэнергией

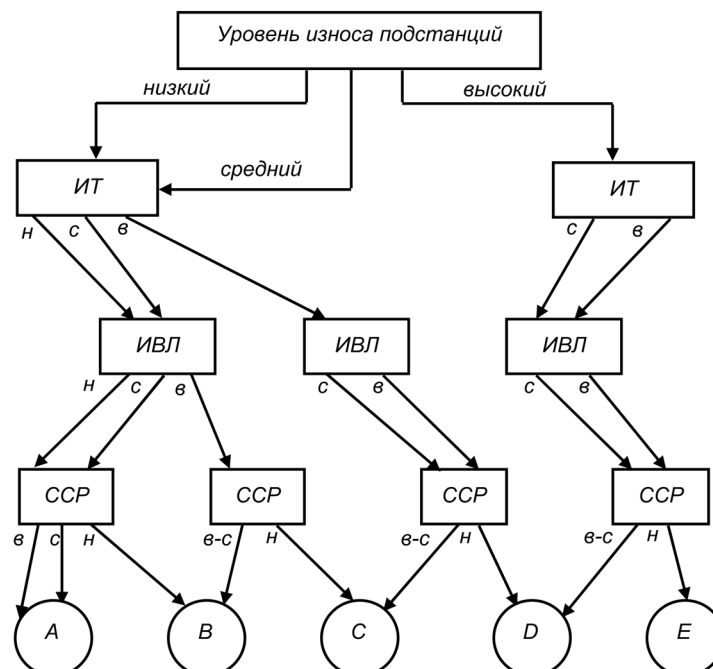


Рис. 7. Схема безопасности подсистемы передачи и распределения электроэнергии для долгосрочных периодов (ИТ – износ трансформаторов; ИВЛ – износ воздушных линий; ССР – степень сбалансированности регионов)

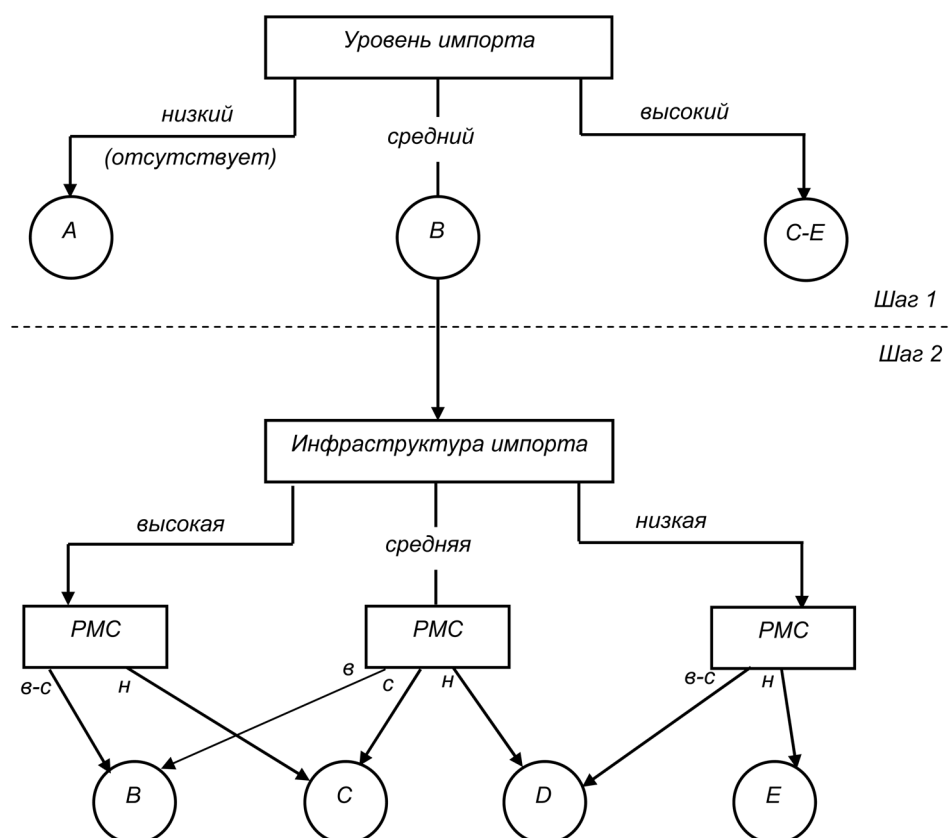


Рис. 8. Схема связей и импорта электроэнергии (PMC – резерв по пропускной способности межсистемных связей)

Безопасность подсистемы передачи и распределения электроэнергии для долгосрочных периодов оценивается по схеме, показанной на рис. 7. Как следует из рисунка, в результате большого обновления электросетевого оборудования безопасность этой подсистемы для долгосрочных периодов по сравнению с краткосрочными периодами может существенно улучшиться и соответствовать группе *B* (для краткосрочных периодов – группа *D*).

Связи с соседними энергосистемами и импорт электроэнергии. Безопасность этой подсистемы как для краткосрочных, так и среднесрочных и долгосрочных периодов исследуется по схеме рис. 8 и относится к группе *A*. Главным показателем этой подсистемы является уровень импорта, а Азербайджан в настоящее время практически не импортирует электроэнергию и в ближайшей перспективе его экспортный потенциал оценивается в 4–5 млрд кВт·ч электроэнергии.

Потребление электроэнергии. В табл. 4 показаны риски и устойчивость для этого блока. Главным показателем данной подсистемы является продолжительность отключений. Этот параметр, как и все другие, принимает одно из трех значений: «высокое», «среднее» и «низкое», где «низкое» соответствует нормативному времени отключений потребителей, «среднее» связано с частыми мелкими или редкими крупными авариями, когда время отключений больше, чем нормативное время, при значении «высокое» – время отключений значительно больше, чем нормативное время. Значение «высокое» связано как с аварийными отключениями, так и нехваткой генерирующих мощностей и режимными ограничениями.

Таблица 4. Риски и устойчивость для блока «передача и распределение энергии»

Категория	Характер рисков	Устойчивость
Внешние	Отсутствуют	Отсутствует
Внутренние	Доля отключаемых потребителей в суммарном электропотреблении Продолжительность отключений Продолжительность работы с низким качеством электроэнергии Доля дохода на душу населения, затрачиваемого на оплату электроэнергии	Относительное уменьшение электропотребления, связанное применением эффективных технологий.

Планируется, что в ближайшие годы в Азербайджане среднее время отключения потребителей будет на уровне 24 ч в году и параметр продолжительности отключений может соответствовать значениям «низкое» или «среднее».

Доля дохода на душу населения, затрачиваемого на оплату электроэнергии, соответствует следующим значениям: «низкое» (<1,5%), «среднее» (2–4%) и «высокое» (>6%) [8].

В табл. 5 представлена тенденция изменения доли среднего дохода на душу населения, затрачиваемого на оплату электроэнергии. Проводимая политика в энергетике – реабилитация отопительной системы, газификация населенных пунктов, 100%-ное установление электрических счетчиков и т. д. привела к относительному уменьшению электропотребления населением при его росте в промышленности и особенно в транспорте, в сфере услуг. В результате доля среднего дохода на душу населения, затрачиваемого на оплату электроэнергии, имеет тенденцию уменьшения. Из таблицы видно, что этот параметр на сегодня соответствует значению «среднее» и в ближайшие 3–5 лет останется в этом диапазоне.

Таблица 5. Тенденция изменения доли среднегодового дохода на душу населения на оплату электроэнергии

Параметр	2009 г.	2010 г.	2011 г.	2012 г.
Потребление населением, млн кВт·ч	8423	8229	8848	9190
Численность населения	8897000	8997600	9111100	9235100
Доход на душу населения, дол. США	3211,65	3627,85	4283,29	4790,25
Доля дохода, затрачиваемая на оплату электроэнергии, %	2,2	1,9	1,7	1,6

Параметр «относительное уменьшение электропотребления за счет энергосбережения и применения эффективных технологий» соответствует следующим значениям: «низкое» (<1%), «среднее» (2–4%) и «высокое» (>6%) [8].

На рис. 9 показана структурная схема исследования безопасности подсистемы потребления электроэнергии. Как видно из рисунка, безопасность подсистемы потребления электроэнергии Азербайджана для долгосрочных периодов может находиться в диапазоне А–С.

Подсистема воспроизводства основных фондов. В табл. 6 представлены риски и устойчивость для подсистемы воспроизводства основных фондов. Наиболее важными показателями подсистемы воспроизводства основных фондов являются доля вводимых генерирующих мощностей (ДГМ) и доля вводимого электросетевого оборудования (ДЭО). Значения параметров ДГМ и ДЭО связаны соответственно с параметрами степени изношенности основного оборудо-

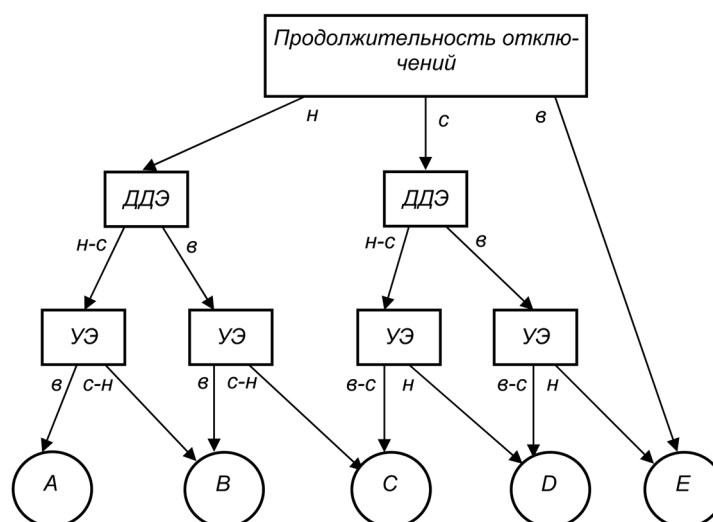


Рис. 9. Структурная схема исследования безопасности подсистемы потребления электроэнергии (ДДЭ – доля среднего дохода на душу населения, затрачиваемого на оплату электроэнергии; УЭ – относительное уменьшение электропотребления за счет энергосбережения и применения эффективных технологий)

вания из подсистемы производства электроэнергии и показателем износа оборудования из подсистемы передачи и распределения электроэнергии. Значения этих параметров: ДГМ за каждые 3 г.: <7% – «низкое»; 8–9% – «среднее»; >9,5% – «высокое». ДЭО – за каждые 3 г.: <5 % – «низкое»; 6–8% – «среднее»; >8,5% – «высокое».

Т а б л и ц а 6. Риски и устойчивость для подсистемы воспроизводства основных фондов

Риски	Устойчивость
Нехватка объема инвестиций	Доля мощности вводимых генерирующих мощностей в общей установленной мощности Доля вводимого электросетевого оборудования

Величины параметров ДГМ и ДЭО связаны с параметрами степени изношенности основного оборудования из подсистемы производства электроэнергии и показателем износа оборудования из подсистемы передачи и распределения электроэнергии [8].

В табл. 7 представлены доля вводимых генерирующих мощностей в общей установленной мощности и доля вводимого электросетевого оборудования до 2020 г. Как видно из таблицы, доля вводимых генерирующих мощностей и доля вводимого электросетевого оборудования могут принимать значение или «среднее», или «высокое». На рис. 10 представлена схема подсистемы воспроизводства основных фондов. Как показывает рисунок, безопасность подсистемы воспроизводства основных фондов может соответствовать диапазону А–С.

Т а б л и ц а 7. Доли вводимых генерирующих мощностей в общей установленной мощности и вводимого электросетевого оборудования

Напряжение, кВ	Доля вводимого электросетевого оборудования, %	Доля вводимых генерирующих мощностей, %
500	25	28
330	20	28
220	27	28
110	22	28

Подсистема перспективного развития. В табл. 8 показаны важные показатели подсистемы перспективного развития. Наиболее значимыми параметрами подсистемы перспективного развития являются резерв установленной мощности (РУМ), резерв пропускной способности межсистемных связей (РПС) и энергоемкость (ЭЕ) экономики. РУМ принимает следующие значения: «низкое» (<10%), «среднее» (10–20%), «высокое» (>25%), для параметра РПС межсистемных связей: «низкое» (<7%), «среднее» (10–15%), «высокое» (>20%). При сложившихся условиях энергоемкость экономики Азербайджана привязывается к среднемировому значению энергоемкости в следующих пропорциях: «низкое» на 15%, «среднее» на 20–40%, «высокое» на 50% больше среднемирового значения энергоемкости [8].

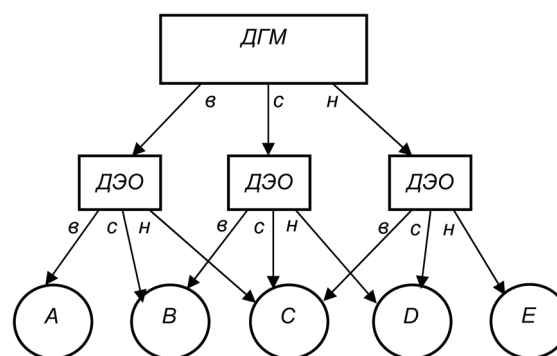


Рис. 10. Схема исследования подсистемы воспроизводства основных фондов (ДГМ – доля мощности вводимых генерирующих мощностей; ДЭО – доля вводимого электросетевого оборудования)

Т а б л и ц а 8. Значимые показатели подсистемы перспективного развития

Риски	Устойчивость
Прогнозируемый уровень потребности в установленной мощности	Необходимая величина пропускной способности межсистемных связей Энергоемкость

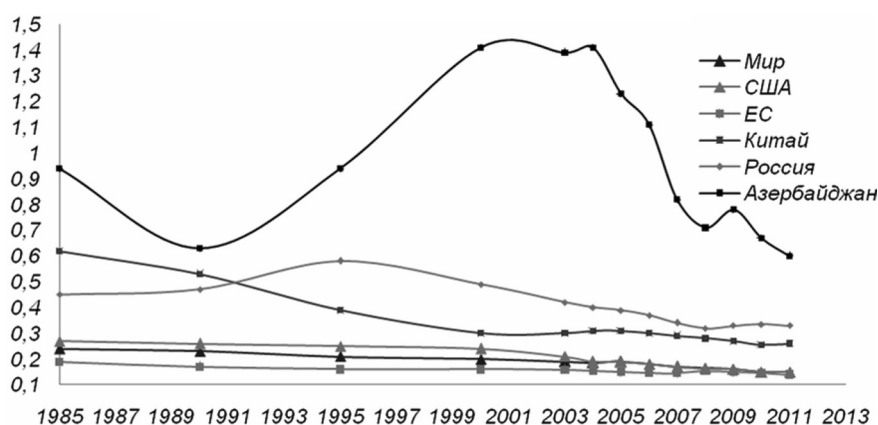


Рис. 11. Динамика изменения энергоёмкости ВВП, т н.э./тыс. дол. США

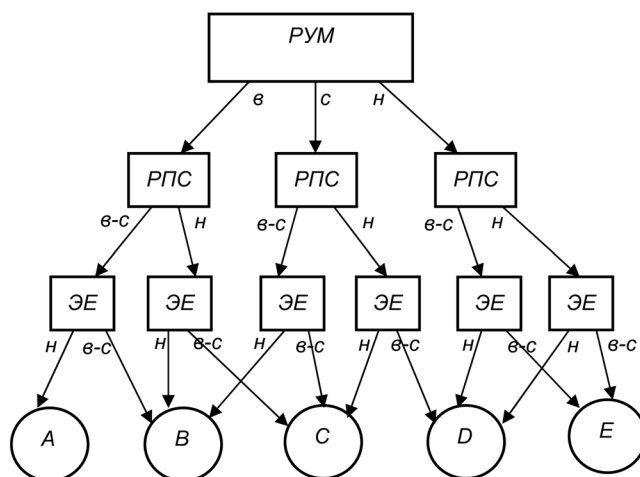


Рис. 12. Схема подсистемы перспективного развития (РУМ – резерв установленной мощности; РПС – резерв пропускной способности; ЭЕ – энергоёмкость)

Анализ планов развития электроэнергетики Азербайджана показывает, что РУМ примет значение «высокое», а РПС – или «высокое», или же «среднее» значения. На рис. 11 представлена динамика изменения энергоёмкости. Из рисунка видно, что для среднесрочных и долгосрочных периодов значение энергоёмкости экономики Азербайджана будет соответствовать значению «высокое». На рис. 12 приведена схема подсистемы перспективного развития. Из нее видно, что при принятых значениях параметров безопасность подсистемы перспективного развития может соответствовать диапазону В–С.

В табл. 9 представлены наиболее важные показатели составляющих подсистем электроэнергетики, их диапазоны значений и источники литературы.

Т а б л и ц а 9. Важные показатели составляющих подсистем энергетики

Подсистема	Параметр	Значение диапазона			Литература
		«низкое»	«среднее»	«высокое»	
Топливообеспечение электроэнергетики	ДМД	<30%		>80%	[3]
	ДПД	<0,33	0,33–0,64	>0,64	[3]
Производство электроэнергии	Выработка	<50%	60–80%	>90%	[3]
	Резерв	<15%	15–25%	>30%	[4]
	СИОО	<15%	15–30%	>40%	[6]
Передача и распределение электроэнергии	ИТ	<25%	30–50%	>60%	[7]
	ИВЛ	<25%	30–50%	>60%	[7]
	ССР	<40%	40–70%	>70%	[6]

Подсистема	Параметр	Значение диапазона			Литература
		«низкое»	«среднее»	«высокое»	
Связи с соседними энергосистемами и импорта электроэнергии	Импорт	<10%	10–30%	>50%	[3]
Потребление электроэнергии	ДДЭ	<1,5%	2–4%	>6%	[8]
	УЭ	<1%	2–4%	>6%	[8]
Воспроизводство основных фондов	ДГМ	<7%	8–9%	>9,5%	[8]
	ДЭО	<5%	6–8%	>8,5%	[8]
Перспективное развитие	РУМ	<10%	10–20%	>25%	[8]
	РПС	<7%	10–15%	>20%	[8]
	ЭЕ	>15%	>20–40%	>50%	[8]

Выводы

1. Энергетическая безопасность электроэнергетики для среднесрочных и долгосрочных периодов может быть исследована с использованием семи взаимосвязанных подсистем.

2. Разработаны принципиальные схемы исследования безопасности подсистем электроэнергетики для различных временных периодов.

3. Установлено, что прогнозные значения безопасности подсистем электроэнергетики Азербайджана для среднесрочных и долгосрочных периодов могут соответствовать состояниям безопасности, имеющим следующие термины: подсистема топливообеспечения – от «нормально» до «плохо» (*B–D*); подсистема производства электроэнергии – от «отлично» до «неплохо» (*A–C*); выработка электроэнергии на ГЭС – «нормально» (*B*); подсистема передачи и распределения электроэнергии – от «нормально» до «плохо» (*B–D*); связи с соседними энергосистемами и импорт электроэнергии – «отлично» (*A*), потребление электроэнергии – от «отлично» до «неплохо» (*A–C*); воспроизводство основных фондов – от «отлично» до «неплохо» (*A–C*); перспективное развитие – от «отлично» до «неплохо» (*A–C*).

4. Представленная методика оценки безопасности подсистем электроэнергетики позволяет создать информационную систему, на базе которой синтезируются факторы, определяющие общую электроэнергетическую безопасность.

5. Представленная методика позволяет отслеживать изменения уровня энергетической безопасности электроэнергетики во времени и оценивать эффективность проводимой политики в электроэнергетике.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке Фонда развития науки при Президенте Азербайджана. Грант № EIF-BGM-2-BRFTF-1-2012/2013–07/05/1.

Литература

1. Yusifbeyli N. A., Gouseinov A. M. Power supply system of Azerbaijan in new conditions of economic development Asian Energy Cooperation: what is After the Crisis? / The Intern. Conf. AEC–2010. Irkutsk, 2010.
2. Юсифбейли Н. А., Насибов В. Х. // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Баку, 2013. Вып. 63. С. 175–186.
3. Jessica Jewell. The IEA Model of Short-term Energy Security (MOSES). Primary Energy Sources and Secondary Fuels. International Energy Agency, 2011.
4. Розанов М. Н. Надежность электроэнергетических систем. М., 1984.
5. Yusifbeyli N. A., Nasibov V. Kh., Alizade R. R. Factors affecting the scale and pattern of generation capacity expansion and Azerbaijan's energy security / The Caucasus & globalization, CA & CC Press. Sweden. 2010. Vol. 4, issue 1-2. P. 117–123.
6. Гусейнов А. М., Юсифбейли Н. А. // «Физика-2005»: Междунар. конф. / Сб. тр. № 120. июнь 2005. Баку. 2005. С. 455–459.
7. Быкова Е. В. Методы расчета и анализ показателей энергетической безопасности. Кишинев, 2005.
8. Отчеты ОАО «Азербэнерго» за 2002–2012 гг.

V. Kh. NASIBOV

MODELS FOR RESEARCH OF ELECTRIC POWER SAFETY FOR MEDIUM- AND LONG TERMS

Summary

An approach that is used to study short-term energy security of Azerbaijan is developed. For the medium- and long-term security challenges, the system consists on a set of 7-blocks, namely fuel supply, power electricity, power transmission and distribution, power consumption, power export and import of electricity, power reproduction of fixed assets, long-term development blocks.