

Технология комплексных исследований функционирования энергетических отраслей в условиях чрезвычайных ситуаций с применением байесовских сетей

08, август 2013

DOI: 10.7463/0813.0603646

УДК 621.311.019.3:519.226.3

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева (ИСЭМ) СО РАН,
Иркутск, Российская Федерация
elena.v.pyatkova@gmail.com

Введение. Задачи исследования и обеспечения энергетической безопасности (ЭБ) государства включают в себя задачи идентификации и анализа угроз энергетической безопасности, а также формирования набора мероприятий по их предупреждению, либо ликвидации результатов проявления негативных возмущений в топливно-энергетическом комплексе. Эти задачи осложняются уникальностью критических и чрезвычайных ситуаций (КС и ЧС, соответственно) экстремального характера и связанными с этим проблемами их моделирования, оценки вероятности таких явлений и последствий для систем энергетики [1]. В этих условиях необходимо применять все возможные взаимодополняющие подходы к измерению риска, базирующиеся на анализе статистических данных об авариях и ЧС, моделировании условий возникновения и развития крупномасштабных возмущений с тяжелыми последствиями, использовании экспертных оценок, в том числе субъективных вероятностей различных событий и явлений [2].

Таким образом, исследователям необходим инструмент, который бы позволял экспертам наглядно отражать вероятностные зависимости между факторами, обуславливающими характер и развитие угроз ЭБ, приводящими к возникновению критических и чрезвычайных ситуаций в ТЭК. При этом такой инструмент должен позволять оценивать значения некоторых факторов в ответ на изменение других.

Для этих целей автором было предложено использовать аппарат байесовских сетей [3–5]. Для проведения всестороннего качественного анализа угроз, критических и чрезвычайных ситуаций и применения полученных результатов в традиционных количественных исследованиях на классических математических моделях, используемых

энергетиками, необходимо провести интеграцию предложенного инструмента в среду интеллектуальной поддержки исследований проблемы ЭБ.

Целью работы является разработка усовершенствованной технологии постановки и реализации вычислительных экспериментов в области исследования проблем ЭБ для изучения комплексных сценариев развития критических и чрезвычайных ситуаций. Данная технология опирается на предложенную ранее интеллектуальную ИТ-среду [6] и на интеграцию в нее инструмента байесовских сетей для моделирования угроз энергетической безопасности.

Новым качеством, которое привносит предложенный инструмент в существующую технологию, является возможность оценки (на основе экспертных суждений):

- вероятности возникновения угроз и чрезвычайных ситуаций в энергетике и их возможных причин,
- масштабов последствий их реализации,
- эффективности мероприятий по их предупреждению или ликвидации их последствий.

Более того, данный инструмент представляет интерес с точки зрения совместного использования с другими инструментами интеллектуальной поддержки исследований проблем обеспечения ЭБ за счет дополнения качественных исследований количественной оценкой суждений исследователей, что позволит формализовать переход от качественных исследований к дальнейшим численным расчетам.

В первой части статьи описано место предлагаемого автором инструмента в исследованиях проблемы ЭБ. Далее предлагается формализованная постановка задачи моделирования угроз ЭБ с помощью байесовских сетей и приводится усовершенствованная технология проведения вычислительных экспериментов в исследованиях. В четвертом разделе предложенная технология апробируется на примере угрозы похолодания в объединенной энергосистеме (ОЭС) Центра.

1. Исследования проблемы энергетической безопасности и анализ угроз ЭБ

Традиционно на уровне топливно-энергетического комплекса (ТЭК) страны проблема ЭБ рассматривалась на базе анализа топливно-энергетических балансов с разбивкой на территориальные и отраслевые блоки при учете энергетических связей между территориальными единицами и отраслевыми блоками, а также детализацией крупных потребителей ТЭР.

Учет требований энергетической безопасности в рамках исследований

направлений развития ТЭК заключается в наложении сценариев развития угроз ЭБ, ЧС, КС и мероприятий по обеспечению ЭБ на базовые модели.

В программных вычислительных комплексах, используемых исследователями (зарубежные: MARKAL [7], MESSAGE [8], NEMS [9], отечественные: СтраТЭК [10], МЭНЭК [11], разработки ИСЭМ СО РАН: «Оптимизация ТЭК» [12], ЭНЕРГИЯ [13], «Нефть и газ России», КОРРЕКТИВА [14], ИНТЭК-М [15]), используется сценарный подход для задания расчетных ситуаций. При этом стоит отметить, что процесс формирования самих сценариев, как правило, остается неформализованным и проводится на экспертном уровне. Фактически, все программные средства предлагают решения только для этапа оценки состояния ТЭК после реализации сценариев возмущений, то есть учет требований энергетической безопасности, как и оценка полученных решений, выполняются исключительно на экспертном уровне.

В [16] излагается методический подход к обоснованию предварительного набора мероприятий по обеспечению ЭБ России и ее регионов, включающий три этапа.

1. Анализ состояния энергетического хозяйства страны и идентификация угроз ЭБ: выяснение состава и характера угроз, определение сценариев их развития, вероятности наступления и оценка масштабов их проявления.

2. Формирование располагаемого набора мероприятий по обеспечению ЭБ и определение сценариев реализации мероприятий (превентивных, оперативных, ликвидационных).

3. Оценка эффективности выбранных мероприятий для обоснованного отбора мероприятий, наилучшим образом противостоящих угрозам.

Для решения этих задач необходимо проводить экспертный инженерно-экономический анализ ЭБ, который охватывал бы более широкий круг показателей, нежели индикативный анализ, а иногда более полный состав угроз, оценку конкретных узких мест в энергетике страны или регионов. Формирование же набора мероприятий по обеспечению ЭБ и их оценка полностью ложится на плечи экспертов.

Задача формализации перечисленных задач является одним из направлений исследований в ИСЭМ СО РАН. Так, развивается новое направление, связанное с разработкой интеллектуальных информационных технологий для исследования проблем энергетической безопасности. Предложена двухуровневая информационная технология исследований проблем ЭБ, интегрирующая в рамках ситуационного подхода к исследованиям [17] программные средства онтологического, когнитивного и событийного моделирования [18] и существующее программное обеспечение исследований (мультиагентный программный комплекс ИНТЭК-М [15]). На данный момент

предложенные инструменты не позволяют оценивать вероятности наступления угроз, что является важной задачей в рамках их анализа. Таким образом, эта задача становится дальнейшим направлением развития предложенной технологии интеллектуальной поддержки исследований проблем энергетической безопасности.

Необходим инструмент, который бы позволял экспертам наглядно отражать вероятностные зависимости между факторами, обуславливающими характер и развитие угроз ЭБ, приводящими к возникновению критических и чрезвычайных ситуаций в ТЭК. При этом такой инструмент должен позволять оценивать значения некоторых факторов в ответ на изменение других.

2. Постановка задачи БСД-моделирования угроз энергетической безопасности

Автором предлагается использовать подход для моделирования угроз ЭБ, который описывает причинно-следственные отношения между факторами, формирующими угрозы и приводящими к наступлению ЧС, а также, помимо этого, учитывает вероятность их наступления или нахождения в определенном состоянии. Эти требования вытекают из особенностей задач обеспечения ЭБ и могут быть удовлетворены применением аппарата байесовских сетей (или байесовских сетей доверия). Графы позволяют описать структуру взаимозависимостей между переменными, которая предполагает прямое влияние только на ограниченное число других. Такой тип представления прозрачен и исследователь достаточно легко может понять и оценить свойства такой структуры.

Байесовской сетью является графическая модель, отображающая вероятностные зависимости множества переменных, и позволяющая проводить вероятностный вывод с помощью этих переменных [19].

В основном на практике байесовские сети применяются для диагностических задач (по имеющимся следствиям устанавливается наиболее вероятная их причина). В анализе же угроз энергетической безопасности большую роль также играют исследования возможных последствий реализации некоторых неблагоприятных событий, при которых после внесения свидетельства для одного узла выполняется оценка значений его потомков (последствий события). Иначе говоря, определяется либо риск реализации чрезвычайной ситуации по набору предшествующих факторов, либо последствия реализовавшейся ЧС. Диагностическая же задача решается, когда необходимо определить набор мероприятий по ликвидации негативных последствий заданных возмущений в системе.

Далее приводится формализация постановки задачи моделирования угроз ЭБ с использованием байесовских сетей доверия (далее будем называть их БСД-моделями угроз ЭБ, от сокращения «байесовские сети доверия»). В общем виде БСД-модель угроз

энергетической безопасности выглядит в виде байесовской сети, которая задается для множества переменных

$$X = \{X^C, X^T, X^I, X^M, X^R\},$$

где $X^C = \{X_i^C\}_{i=1}^L$ – переменные, соответствующие негативным факторам, являющимся причинами угроз и чрезвычайных ситуаций, $X^T = \{X_j^T\}_{j=1}^J$ – переменные для обозначения угроз или ЧС, $X^I = \{X_k^I\}_{k=1}^K$ – показатели функционирования ТЭК, $X^M = \{X_p^M\}_{p=1}^P$ – мероприятия по обеспечению энергетической безопасности, $X^R = \{X_n^R\}_{n=1}^N$ – ресурсы, необходимые для реализации набора мероприятий.

БСД-модель состоит из:

1) структуры сети S , такой, что

$$Parents_i^I = \{X_j^T, X_{p1}^M\},$$

$$Parents_j^T = \{X_i^C, X_{p2}^M\},$$

$$Parents_i^C = \{X_{p3}^M\},$$

$$Parents_m^M = \{X_n^R\},$$

где $p1 = 1 \dots P_1, p2 = 1 \dots P_2, p3 = 1 \dots P_3$ и $P_1 + P_2 + P_3 = P$.

2) и множества P распределений вероятностей для каждой переменной из X .

Так, для примеров структур, приведенных на рис. 1, множество X^C представлено переменной «Причина», X^T – «Угроза», X^I – «Показатель», X^M – «Компенсация», X^R – «Ресурс».

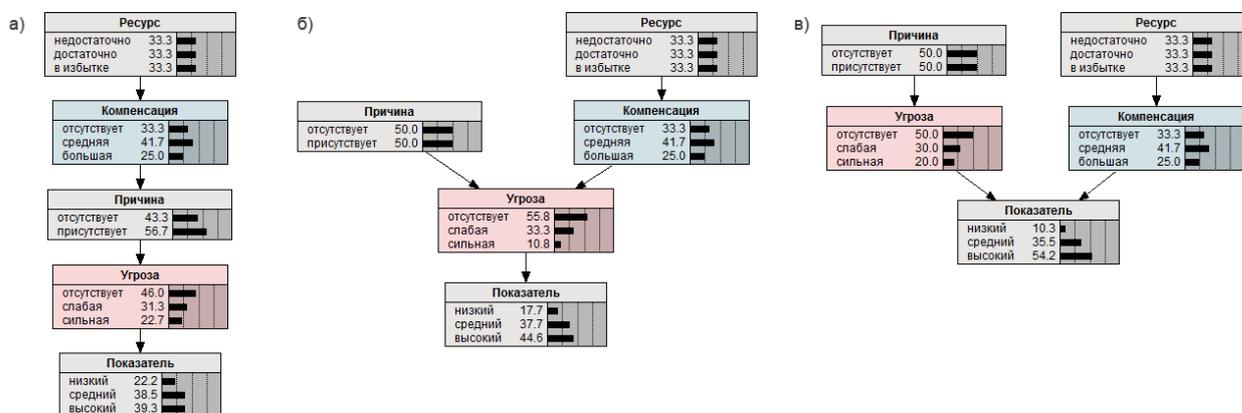


Рис. 1. Пример структур моделей:

а) «компенсация-причина-угроза-последствие»; б) «компенсация-угроза-последствие»;

в) «угроза-последствие-компенсация»

БСД-модели могут быть использованы для решения следующих задач в рамках исследования проблем обеспечения ЭБ.

1. При **прямом ходе вывода** или так называемом **прогностическом** (движении от причин к следствиям) могут решаться три задачи.

1.1. *Оценка вероятности реализации угрозы или чрезвычайной ситуации $P(x_j^T)$* в ответ на задание свидетельств для причин, обуславливающих рассматриваемую угрозу или ЧС.

1.2. *Оценка вероятных последствий реализации угрозы $P(x_k^I)$* в ответ на изменение значений, отражающих масштабы угрозы или ЧС.

1.3. *Оценка эффекта от мероприятий* по обеспечению энергетической безопасности $P(x_k^I)$ в ответ на задание значений размеров компенсационных/ликвидационных мероприятий.

2. При **обратном** или **диагностическом ходе** (движении от следствий к причинам) задаются желаемые значения целевых показателей и, с использованием свойства d-разделимости, определяются искомые значения негативных факторов и/или размеров компенсации.

2.1. *Оценка возможных причин реализации угрозы или чрезвычайной ситуации $P(x_i^C)$* в зависимости от заданных свидетельств для переменных, описывающих реализацию угрозы или чрезвычайной ситуации. При наличии нескольких причин, обуславливающих реализацию угрозы, появляется возможность оценить вклад того или иного фактора: какая из причин в большей степени оказывала влияние на развитие угрозы или ЧС.

2.2. *Оценка необходимых значений мероприятий* по обеспечению энергетической безопасности $P(x_m^M)$ и необходимых для этого ресурсов $P(x_n^R)$ в ответ на изменение значений масштаба угрозы или ЧС и необходимого уровня показателей функционирования ТЭК.

2.3. *Оценка масштабов реализации угрозы $P(x_j^T)$* представляет интерес в случае описания некой совокупности угроз и их влияния на определенные целевые показатели ТЭК: задаются свидетельства для показателей функционирования ТЭК и оцениваются уровни угроз, которые могли бы объяснить значения этих свидетельств.

3. Усовершенствованная информационная технология интеллектуальной поддержки исследований проблем энергетической безопасности

Суть усовершенствования заключается в том, что ранее численные корректировки, используемые в программных комплексах, определялись эмпирически, в том числе на основе экспертных суждений – интерпретаций результатов событийного и /или когнитивного моделирования. Автором предложено формализовать этот процесс и использовать количественные оценки экспертных суждений, полученных на основе использования БСД-моделей. Для дополнения технологии необходимо программное средство, позволяющее работать с байесовскими сетями для моделирования угроз ЭБ.

Для программной реализации инструмента БСД-моделирования угроз ЭБ решено использовать как базовую Java-библиотеку UnBBayes [20], реализующую необходимые алгоритмы для работы с байесовскими сетями доверия (алгоритмы вероятностного вывода и обучения).

Для создания, просмотра, редактирования и проведения рассуждений на байесовских сетях доверия предлагается разработать графическую среду для работы с байесовскими сетями, включающую базовые графические элементы, возможность задания таблиц условных вероятностей для заполнения сети и задания свидетельств переменным для проведения вероятностного вывода. Также эта среда должна содержать модуль формирования отчетов по результатам проведения экспериментов на моделях и модуль формирования корректировок для проведения дальнейших численных расчетов. Архитектура программного средства BayNet приведена на рис. 2.

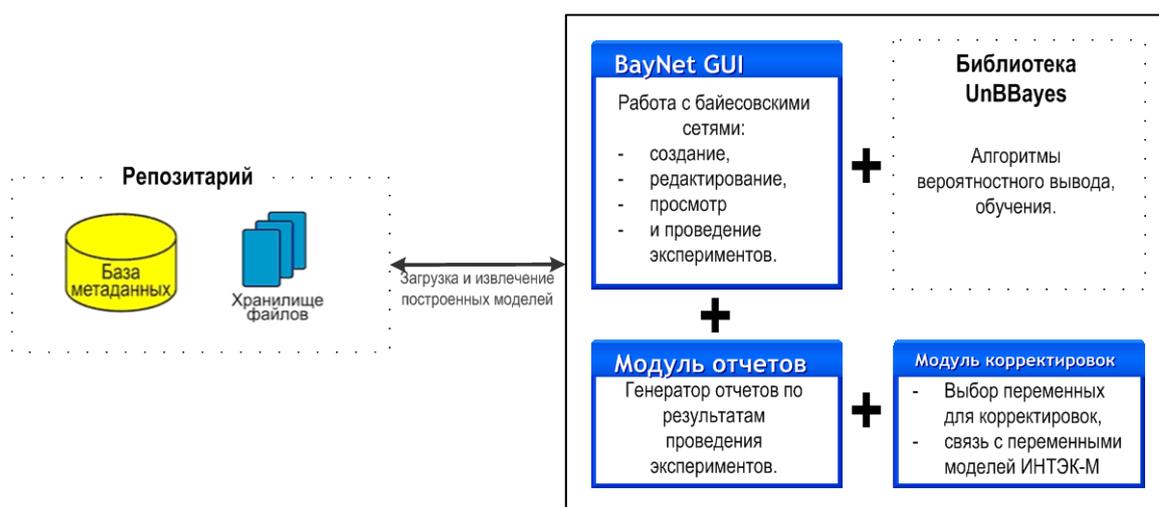


Рис. 2. Архитектура инструментального средства BayNet, реализующего работу с байесовскими сетями

Разработанное программное средство позволяет расширить существующий состав инструментов для проведения качественного анализа угроз ЭБ. Это позволит осуществлять переход между когнитивными и событийными моделями угроз энергетической безопасности, выделяя наиболее вероятные варианты развития угроз (определяя инициирующие факторы для событийных моделей), и позволит формировать корректировки информационных моделей для последующих расчетов.

Таким образом, **усовершенствованная информационная технология интеллектуальной поддержки исследований проблем энергетической безопасности** включает следующие этапы:

I уровень:

1. Построение онтологий с целью структурирования и классификации используемой в исследованиях информации.
2. Анализ прецедентов ЧС в энергетике с целью выявления и детализации угроз ЭБ.
3. Когнитивное моделирование угроз энергетической безопасности и чрезвычайных ситуаций в энергетике.
4. Моделирование угроз ЭБ и ЧС в энергетике с помощью БСД с целью оценки рисков их возникновения, масштаба их последствий и эффективности мероприятий по обеспечению ЭБ.
5. Событийное моделирование развития чрезвычайных ситуаций и анализ их последствий.

II уровень:

1. Передача результатов качественного анализа лицу, принимающему решения (ЛПР) в области обеспечения ЭБ, или в программный комплекс ИНТЭК-М.
 - 1.1. Формирование сценариев вычислительных экспериментов.
 - 1.2. Корректировка значений переменных модели при наложении полученных сценариев на базовый вариант, использующийся для расчетов за счет результатов, полученных при моделировании угроз ЭБ с помощью байесовских сетей.
2. Выполнение вычислительных экспериментов, с целью количественной оценки вариантов развития ТЭК с учетом требований энергетической безопасности.
3. Интерпретация и обработка экспертом результатов ВЭ и передача их ЛПР для поддержки принятия решений в области обеспечения ЭБ.

Расширенная технология и состав инструментальных средств представлены в таблице 1.

Таблица 1. Технология и инструментальные средства интеллектуальной поддержки принятия решений в исследованиях и обеспечении ЭБ

Технологический этап	Инструментальные средства поддержки	Результат этапа
I уровень. Проведение качественного анализа.		
Построение онтологий	Библиотека OntoMap (возможно использование внешних инструментов: SMapTools, Protégé и др.)	Онтологии предметных областей
Анализ прецедентов ЧС в энергетике	Экспертная система «Emergency»	Наиболее вероятные (часто встречающиеся) угрозы ЭБ
Когнитивное моделирование угроз ЭБ	Библиотека CogMap	Когнитивные модели угроз ЭБ
Событийное моделирование развития ЧС в энергетике	Библиотека EventMap	Событийные модели развития ЧС в энергетике
Моделирование угроз ЭБ и ЧС в энергетике с помощью БСД	Инструментальное средство BayNet	Модели угроз ЭБ и ЧС в энергетике, построенные с помощью БСД
Хранение моделей, разработанных в инструментальных средствах ИТ-среды	Репозиторий ИТ-инфраструктуры [21]	
II уровень. Проведение количественного анализа.		
Передача результатов качественного анализа ЛППР	CogMap, EventMap, BayNet	Когнитивные и событийные карты, байесовские сети и комментарии к ним
Передача результатов качественного анализа в программный комплекс ИНТЭК-М	Библиотеки CogMap и EventMap (XML-файлы), программный компонент для автоматического синтеза математических моделей [22]	Исходная информация для ПК ИНТЭК-М
Выполнение вычислительных экспериментов (ВЭ)	ПК ИНТЭК-М	Варианты развития ТЭК с учетом требований ЭБ
Интерпретация и обработка экспертом результатов ВЭ		Информация для принятия решений ЛППР

Также модифицируется схема передачи информации в рамках информационной технологии поддержки принятия решений в исследованиях и обеспечении ЭБ, которая принимает следующий вид (рис. 3).

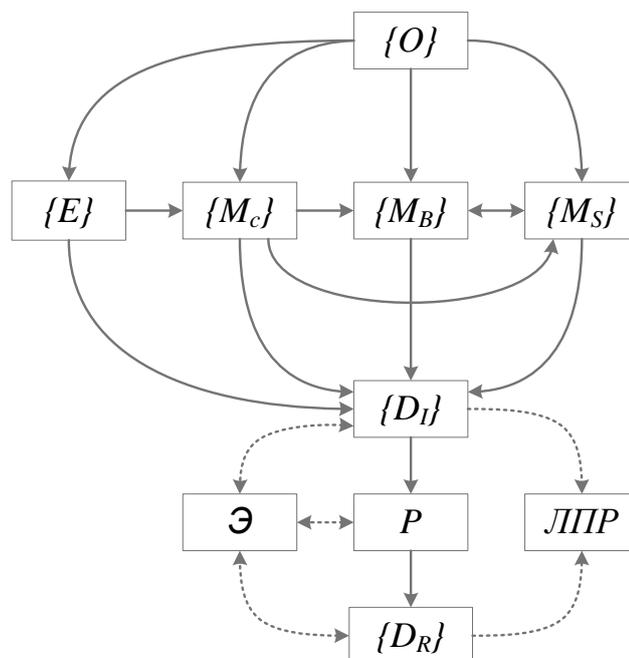


Рис. 3. Схема информационной технологии интеллектуальной поддержки принятия решений в исследованиях и обеспечении ЭБ

Обозначения: $\{O\}$ – множество онтологий, $\{E\}$ – множество описаний прецедентов чрезвычайных ситуаций, $\{M_C\}$ – множество когнитивных моделей, $\{M_B\}$ – множество БСД-моделей, $\{M_S\}$ – множество событийных моделей, $\{D_I\}$ – информация, необходимая для поддержки принятия решений при выборе стратегии проведения вычислительного эксперимента, $\{D_R\}$ – информация, полученная в результате проведения вычислительных экспериментов и предназначенная для поддержки принятия решений в области обеспечения энергетической безопасности, P – программный комплекс для проведения количественных расчетов (обоснования вариантов развития ТЭК с учетом требований энергетической безопасности), \mathcal{E} – эксперт-исследователь, $ЛПП$ – лицо, принимающее решения.

Информация $\{D_I\}$ формируется в результате использования инструментов интеллектуальной ИТ-среды. Она может использоваться либо для формирования необходимых вариантов расчетов с помощью ПК P , либо непосредственно для поддержки принятия решений ЛПП. Кроме того, эксперт может корректировать эту информацию в ходе проведения вычислительного эксперимента, а также интерпретировать результирующую информацию $\{D_R\}$, которая передается ЛПП.

4. Комплексное исследование функционирования объединенной энергетической системы Центра в ситуации похолодания с применением предложенной технологии

В качестве примера выбрана природная угроза ЭБ в виде аномального проявления

нормальных природных процессов: ситуация с похолоданием. В случае похолодания из-за снижения температуры наружного воздуха относительно среднемноголетней в определенные месяцы отопительного периода повышается потребление тепло- и электроэнергии.

Значение величин отпуска теплоэнергии для объединенной энергетической системы (ОЭС) Центра по месяцам отопительного периода представлены в таблице 2 [23].

Таблица 2. Отпуск теплоэнергии (тыс. ГКал) для ОЭС Центра в I и IV кварталах 2010-2011 гг.

	январь	февраль	март	ноябрь	декабрь	год
2010	19155	16396	14310	9689	16011	115600
2011	16841	15142	13401	8644	12509	110200

Значения величин потребления электроэнергии средних месячных температур (взяты средние значения по областям, входящим в ОЭС Центра [24]) и фактически наблюдаемых температур наружного воздуха для ОЭС Центра по месяцам отопительного периода представлены в таблице 36 [25, 26].

Данные значения потребления тепла и электроэнергии использовались в дальнейшем при создании БСД-модели и наполнении ее информацией.

Таблица 3. Потребление электроэнергии и температура наружного воздуха для ОЭС Центра в I и IV кварталах 2010-2012 гг.

	январь	февраль	март	октябрь	ноябрь	декабрь
Средняя месячная температура воздуха, °С	-10,91	-9,98	-4,70	3,98	-2,20	-6,96
2010						
Потребление э/э, млн. кВт*ч	21297,7	19036,6	19339,3	18745,5	18696,9	21673,5
Температура, °С	-15,27	-8,33	-2,44	3,90	2,81	-7,70
2011						
Потребление э/э, млн. кВт*ч	20570,0	19394,6	19927,9	18535,1	19636,9	20793,0
% к 2010 г.	-3,5	1,8	3,0	-1,1	4,8	-4,2
Температура, °С	-8,62	-11,91	-2,88	6,32	-0,64	-0,55
2012						
Потребление э/э, млн. кВт*ч	20612,8	21052,2	20213,9	18746,7	19655,9	22456,3
% к 2011 г.	0,2	7,9	1,4	1,1	0,1	7,4
Температура, °С	-7,57	-12,14	-3,38	6,98	1,36	-8,90

На первом этапе исследования разрабатывается онтология, описывающая взаимосвязи основных факторов в рамках угрозы похолодания (рис. 4).

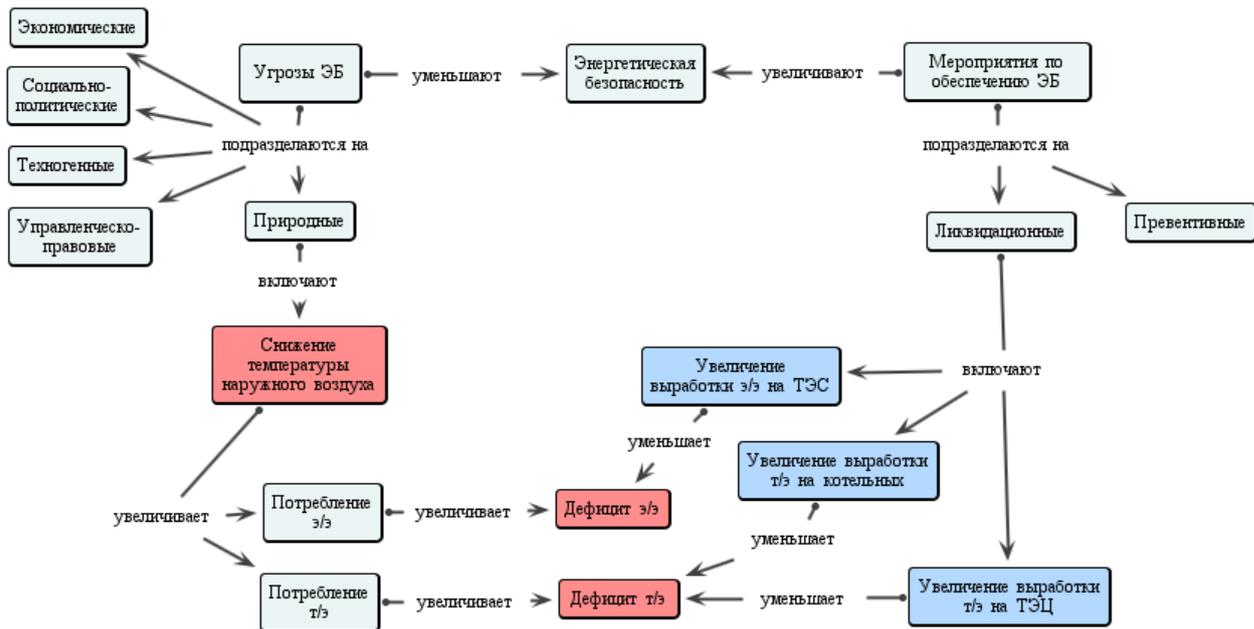


Рис. 4. Фрагмент онтологии, используемый для описания угрозы похолодания

На втором этапе выполняется когнитивное моделирование угрозы с описанием основных зависимостей между негативными факторами, показателями ТЭК и мероприятиями по обеспечению энергетической безопасности (рис. 5).

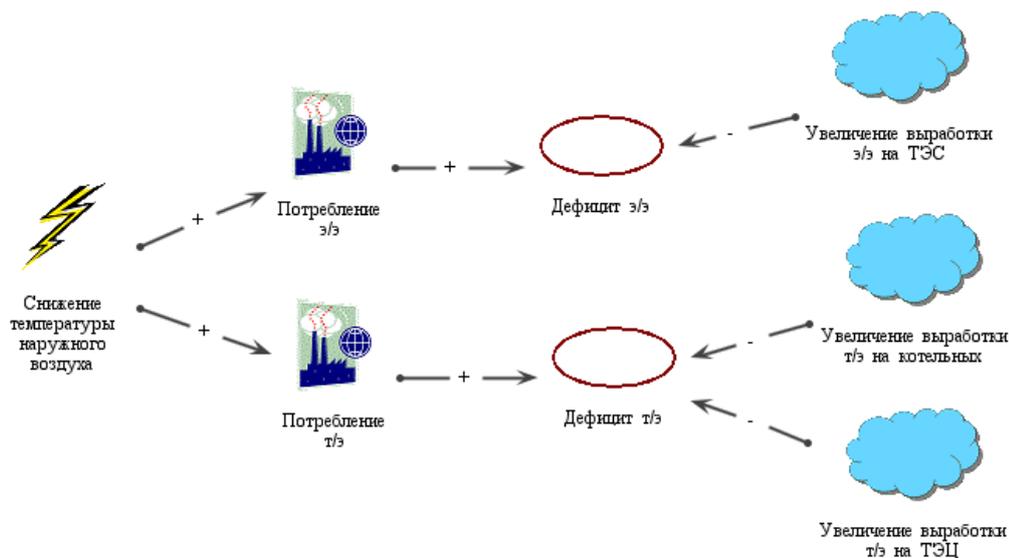


Рис. 5. Когнитивная карта угрозы похолодания

На основе имеющейся когнитивной карты построена БСД-модель, описывающая данную угрозу снижения температуры наружного воздуха за один месяц отопительного периода (рис. 6).

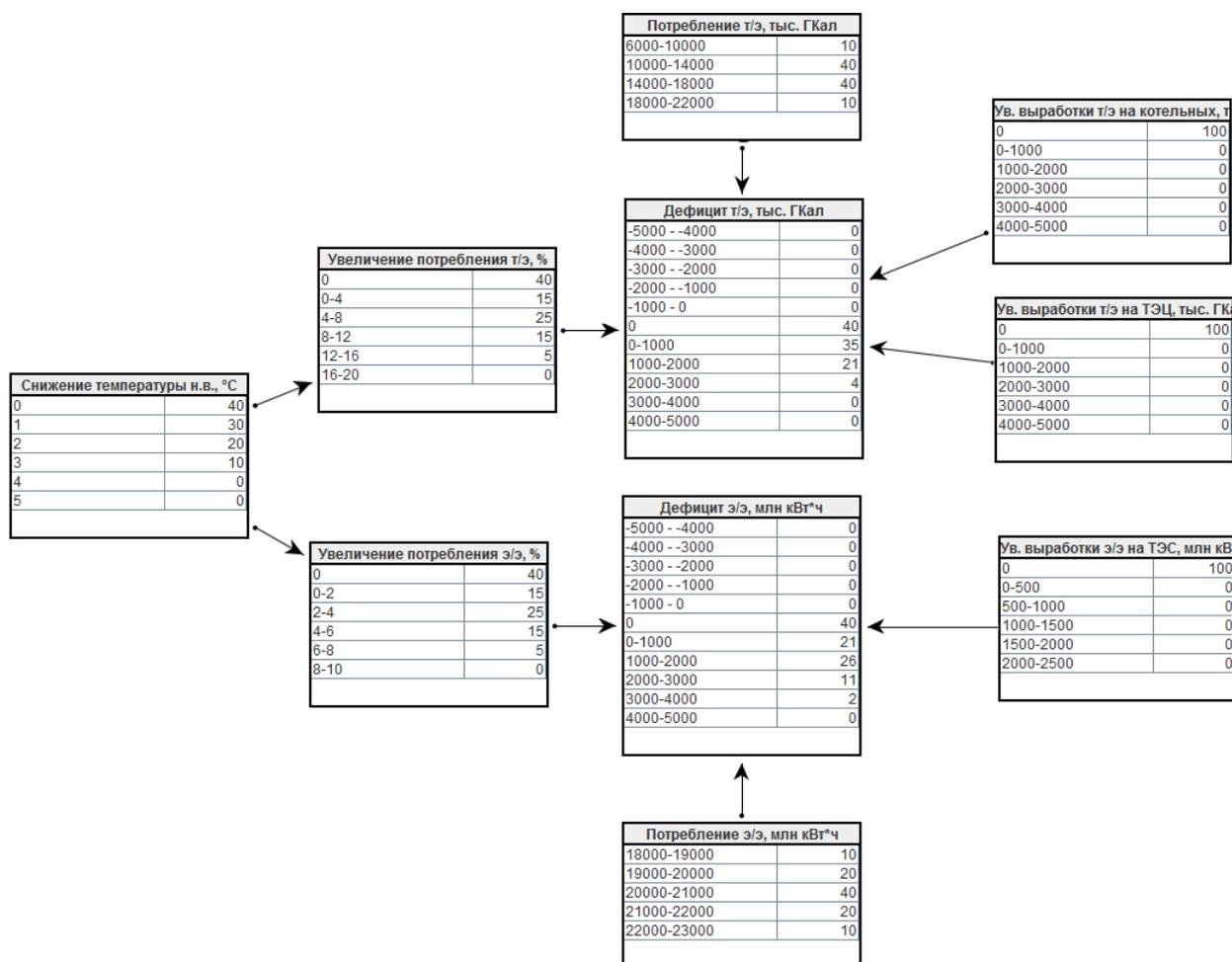


Рис. 6. БСД-модель угрозы похолодания

Далее для формирования сценария реализации мероприятий разрабатывается событийная модель. В отличие от построенной БСД-модели в событийной модели все связи отражают последовательность действий как реакцию на инициирующее событие. Так, понижение температуры вызывает увеличение потребления тепло- и электроэнергии, что вызывает потребность в реализации ликвидационных мероприятий по повышению выработки тепла и электроэнергии на объектах ТЭК (ГЭС, ТЭС и АЭС для электроэнергии и котельных и ТЭЦ для тепла). Результат представлен на рис. 7.

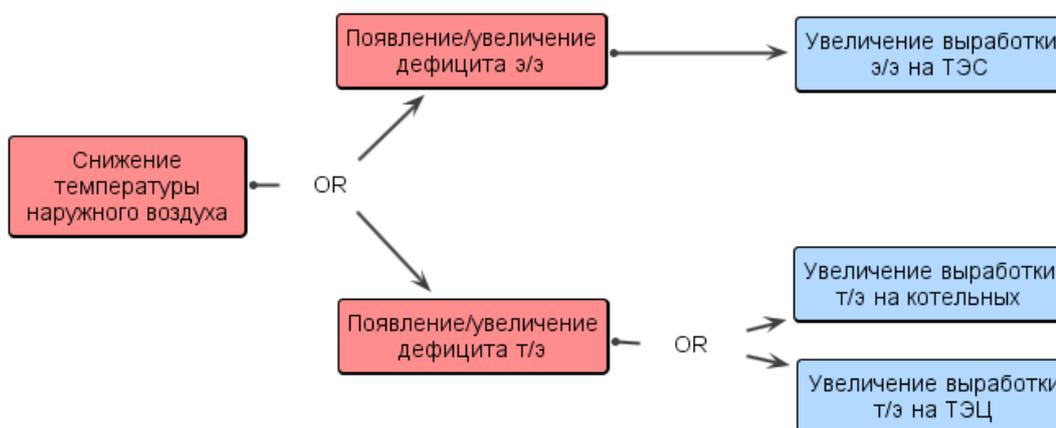


Рис. 7. Событийная карта угрозы похолодания

Управляющими воздействиями, которые позволят сформировать сценарий проведения вычислительного эксперимента и корректировки модели, являются фактор «Снижение температуры наружного воздуха» и набор ликвидационных мероприятий, приведенных справа на рис. 7. После наложения управляющих воздействий (реализации угрозы и набора мероприятий) возможно формирование многовариантных сценариев вычислительного эксперимента. Использование БСД-моделей позволяет сократить возможное число сценариев за счет выбора только наиболее эффективных для ликвидации последствий угрозы.

Проведены эксперименты на полученной БСД-модели угрозы похолодания, целью которых была оценка требуемых объемов увеличения выработки тепла и электроэнергии (заданные свидетельства приведены в таблице 4).

Таблица 4. Свидетельства при проведении эксперимента на БСД-модели угрозы похолодания

Переменные	Значения	Вероятности
Понижение температуры наружного воздуха, °С	0	40%
	1	30%
	2	20%
	3	10%
Потребление теплотенергии, тыс. ГКал	14000-18000	100%
Потребление электроэнергии, млн кВт*ч	21000-22000	100%
Увеличение выработки теплотенергии (ТЭЦ, котельные), тыс. Гкал	0	100%
Увеличение выработки электроэнергии (ТЭС), млн кВт*ч	0	100%

Это позволило определить рекомендуемые значения увеличения выработки тепла (на котельных – 167 тыс. Гкал, на ТЭЦ – 457 тыс. Гкал) и электроэнергии на ТЭС (262 млн. кВт*ч). Также результаты представлены на рис. 8.

Ув. выработки т/э на котельных, т		Ув. выработки т/э на ТЭЦ, тыс. ГК		Ув. выработки э/э на ТЭС, млн кВт	
0	73	0	42	0	38
0-1000	24	0-1000	42	0-500	42
1000-2000	3	1000-2000	15	500-1000	18
2000-3000	0	2000-3000	1	1000-1500	2
3000-4000	0	3000-4000	0	1500-2000	0
4000-5000	0	4000-5000	0	2000-2500	0

Рис. 8. Результаты третьего этапа эксперимента на БСД-модели похолодания

Следующим этапом является формирование численных корректировок информационной модели ПК ИНТЭК-М в соответствии с полученными в БСД-модели значениями увеличения потребления тепло- и электроэнергии и компенсирующих его воздействий. Заключительным этапом является проведение численных расчетов на сформированных информационных моделях.

Заключение. В статье предложено использование аппарата байесовских сетей для анализа угроз энергетической безопасности с целью оценки вероятности критических и чрезвычайных ситуаций, их последствий для систем энергетики и потребителей, а также определения набора компенсирующих мероприятий.

Также рассмотрена технология проведения комплексных вычислительных экспериментов в исследованиях проблем энергетической безопасности. Эта технология базируется на двухуровневой технологии исследований проблемы ЭБ с использованием интеллектуальной ИТ-среды. Вклад автора заключается как в развитии существующей технологии за счет включения программного средства моделирования угроз ЭБ с помощью байесовских сетей BayNet, так и в организации и проведении комплексного вычислительного эксперимента, в котором совместно используются все инструментальные средства ИТ-среды, что обеспечивает новое качество исследований. Появляется возможность проведения более глубокого комплексного анализа развития и действия угроз ЭБ на качественном уровне с привлечением количественных оценок экспертных суждений для сокращения возможного числа расчетных сценариев за счет выбора только наиболее эффективных для ликвидации последствий угрозы.

Результаты, описанные в статье, получены при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ №11-07-00192, №12-07-00359, №13-07-00140, а также гранта Программы Президиума РАН №2.29.

Список литературы

1. Воропай Н.И., Криворучкий Л.Д., Руденко Ю.Н. и др. Об энергетической безопасности государства // Энергетика и электрификация (Украина). 1995. № 3. С. 49-51.
2. Воропай Н.И., Голомолзин А.Н., Каганович Б.М. и др. Методы анализа и обоснования решений по повышению надежности и безопасности в энергетике // Системные исследования в энергетике в новых социально-экономических условиях. Новосибирск: Наука; Сиб. издат. фирма РАН, 1995. С. 64-125.
3. Pearl J. Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems: Networks of Plausible Inference. Morgan Kaufmann Publishers, Inc., San Mateo, CA, USA, 1988. 552 p.
4. Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект: современный подход: пер. с англ. 2-е изд. М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. 661 с.
5. Тулупьев А.Л., Николенко С.И., Сироткин А.В. Байесовские сети: Логико-вероятностный подход. СПб: Наука, 2006. С. 341-342.
6. Массель А.Г. Интеллектуальная ИТ-среда для исследований проблемы энергетической безопасности // Труды Международной конференции «Информационные технологии в науке, образовании, телекоммуникации и бизнесе». Гурзуф, 2010. С. 306-309.
7. MARKAL // Website IEA-ETSAP: The Energy Technology Systems Analysis Programme (ETSAP), 2011. Режим доступа: <http://www.iea-etsap.org/web/Markal.asp> (дата обращения 22.04.2013).
8. MESSAGE (Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impact) // International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA). Laxenburg, Austria. Режим доступа: <http://www.iiasa.ac.at/web/home/research/researchPrograms/Energy/MESSAGE.en.html> (дата обращения 22.04.2013).
9. The National Energy Modeling System: An Overview 2009. Режим доступа: <http://www.eia.doe.gov/oiaf/aeo/overview/index.html> (дата обращения 22.04.2013).
10. Веселов Ф.В., Курилов А.Е., Хоршев А.А. Построение и использование моделей линейного программирования в задачах развития. Режим доступа: <http://www.combienergy.ru/stat970.html> (дата обращения 22.04.2013).

11. Лукацкий А.М, Малахов В.А., Федорова Г.В. Информационно-аналитическая система исследования взаимосвязей энергетики и экономики: Препринт WP2/2003/01. М.: ГУ ВШЭ, 2003. 27 с. Режим доступа: https://www.hse.ru/data/2010/05/04/1216407449/WP2_2003_01.pdf (дата обращения 22.04.2013).
12. Криворучский Л.Д., Волошин Г.Н., Антонов Г.Н. Вопросы построения информационно-вычислительной системы прогнозирования развития топливно-энергетического комплекса страны СЭИ // Системы энергетики - тенденции развития и методы управления. Т. 1. Иркутск: СЭИ СО АН СССР, 1980. С. 71-79.
13. Антонов Г.Н., Антонова Н.Н., Беланова Г.А. и др. Вычислительные средства для исследования производственной структуры энергетического комплекса страны // Системы энергетики: управление развитием и функционированием. Вычислительные средства имитационного моделирования больших систем энергетики. Т. 5. Иркутск: СЭИ СО АН, 1986. С. 15-21.
14. Аршинский В.Л., Массель А.Г., Фартышев Д.А. Мультиагентный программный комплекс для исследований проблемы энергетической безопасности // Труды XIV Байкальской Всероссийской конференции «Информационные и математические технологии в науке и управлении». Ч. III. Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2009. С. 283-289.
15. Массель Л.В., Болдырев Е.А., Макагонова Н.Н., Копайгородский А.Н., Черноусов А.В. ИТ-инфраструктура научных исследований: методологический подход и реализация // Вычислительные технологии. 2006. Т. 11, спец. выпуск «Избранные доклады X Российской конференции "Распределенные информационно-вычислительные ресурсы" (DICR-2005) (Новосибирск, 6-8 октября 2005 г.)». С. 59-68.
16. Пяткова Н.И., Рабчук В.И., Сендеров С.М. и др. Энергетическая безопасность России: проблемы и пути решения / отв. Ред. Н.И. Воропай, М.Б. Чельцов; Рос. Акад. Наука, Сиб. отд-ние, Ин-т систем энергетики им. Л.А. Мелентьева. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2011. 198 с.
17. Макагонова Н.Н., Массель А.Г. Возможности применения ситуационного анализа при исследовании проблемы энергетической безопасности // Информационные и математические технологии в науке и управлении : труды XIII Байкал. Всерос. конф. «Информационные и математические технологии в науке и управлении». Т. 2. Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2008. С. 236-240.
18. Массель Л.В., Аршинский В.Л., Массель А.Г. Интеллектуальные информационные технологии поддержки принятия решений в исследованиях и обеспечении энергетической безопасности // Труды Международной конференции «Интеллектуальные системы

принятия решений и проблемы вычислительного эксперимента». Евпатория, 2010. С. 192-196.

19. Heckerman D. A tutorial on learning with Bayesian networks // In: Innovations in Bayesian Networks / Dawn E. Holmes, Lakhmi C. Jain, eds. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008. P. 33-82. DOI: 10.1007/978-3-540-85066-3_3

20. UnBBayes / University of Brasilia – UnB, 2001-2010. Режим доступа:

<http://unbbayes.sourceforge.net/index.html> (дата обращения 22.04.2013).

21. Копайгородский А.Н., Массель Л.В. Методы и технологии построения хранилища данных и знаний для исследований энергетики // Научный сервис в сети Интернет: суперкомпьютерные центры и задачи: труды Международной суперкомпьютерной конференции. М.: Изд-во МГУ, 2010. С. 481-485.

22. Массель Л.В., Курганская О.В. Автоматизация вычислительного эксперимента на основе логических моделей // Вестник ИрГТУ. 2011. № 2 (49). С. 8-14.

23. Статистическая информация / Минэнерго России. Режим доступа:

<http://minenergo.gov.ru/activity/statistic/> (дата обращения 31.07.2013).

24. СНиП 23-01-99. Строительная климатология. М.: Госстрой России, 2003. 109 с.

25. Системный оператор единой энергетической системы: Генерация и потребление (сутки) / ОАО «СО ЕЭС», 2009–2013. Режим доступа: http://www.sops.ru/index.php?id=ees_gen_consump_day (дата обращения 31.07.2013).

26. Системный оператор единой энергетической системы: Температура в ЕЭС России / ОАО «СО ЕЭС», 2009–2013. Режим доступа: http://www.sops.ru/index.php?id=ees_temperature (дата обращения 31.07.2013).

Technology of complex research of energy sector functioning in emergency situations with the use of Bayesian networks

08, August 2013

DOI: 10.7463/0813.0603646

Pyatkova E.V.

Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
(ESI SB RAS), Irkutsk
elena.v.pyatkova@gmail.com

In this paper the author proposes a technology of organization and execution of computational experiments in the field of energy security with the purpose of analyzing complex scenarios of emergency situations. This technology is based on application of intellectual research support within integrated IT-environment and integration with Bayesian networks tool for modeling energy security threats. An example of a naturally-emerging threat of cold snap in the Central interconnected power system was also described. The presented technology gives a new opportunity in describing energy security threats; this is obtained due to the joint use of intellectual technologies for generation of computation scenarios (at qualitative level) and further transition to a traditional quantitative research.

Publications with keywords: [intelligent research support](#), [Bayesian networks](#), [energy security](#), [energy security threats](#)

Publications with words: [intelligent research support](#), [Bayesian networks](#), [energy security](#), [energy security threats](#)

References

1. Voropay N.I., Krivorutskiy L.D., Rudenko Yu.N., et al. Ob energeticheskoy bezopasnosti gosudarstva [About the energy security of state]. *Energetika i elektrifikatsiya* (Ukrainian journal), 1995, no. 3, pp. 49-51.
2. Voropay N.I., Golomolzin A.N., Kaganovich B.M., et al. Metody analiza i obosnovaniya resheniy po povysheniyu nadezhnosti i bezopasnosti v energetike [Methods of analysis and justification of decisions on increase of reliability and safety in the energy sector]. *Sistemnye issledovaniya v energetike v novykh sotsial'no-ekonomicheskikh usloviyakh* [Systems research in power engineering in the new socio-economic conditions]. Novosibirsk, Nauka, 1995, pp. 64-125.

3. Pearl J. *Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems: Networks of Plausible Inference*. Morgan Kaufmann Publishers, Inc., San Mateo, CA, USA, 1988. 552 p.
4. Rassel S., Norvig P. *Iskusstvennyy intellekt: sovremennyy podkhod*. Moscow, Publishing House "Vil'yams", 2006. 661 p. (Russell S.J., Norvig P. *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. 2nd ed. Upper Saddle River, NJ, Prentice Hall, 2003.).
5. Tulup'ev A.L., Nikolenko S.I., Sirotkin A.V. *Bayesovskie seti: Logiko-veroyatnostnyy podkhod* [Bayesian networks: Logical-probabilistic approach]. St. Petersburg, Nauka, 2006, pp. 341-342.
6. Massel' A.G. Intellektual'naya IT-sreda dlya issledovaniy problemy energeticheskoy bezopasnosti [Intelligent IT-environment to research problems of energy security]. *Trudy Mezhdunarodnoy konferentsii «Informatsionnye tekhnologii v nauke, obrazovanii, telekommunikatsii i biznese»* [Proc. of the International conference "Information technologies in science, education, telecommunications and business"]. Gurzuf, 2010, pp. 306-309.
7. MARKAL. Website IEA-ETSAP: The Energy Technology Systems Analysis Programme (ETSAP), 2011. Available at: <http://www.iea-etsap.org/web/Markal.asp>, accessed 22.04.2013.
8. MESSAGE (*Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impact*). International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA). Laxenburg, Austria. Available at: <http://www.iiasa.ac.at/web/home/research/researchPrograms/Energy/MESSAGE.en.html>, accessed 22.04.2013.
9. *The National Energy Modeling System: An Overview 2009*. Available at: <http://www.eia.doe.gov/oiaf/aeo/overview/index.html>, accessed 22.04.2013.
10. Veselov F.V., Kurilov A.E., Khorshev A.A. *Postroenie i ispol'zovanie modeley lineynogo programmirovaniya v zadachakh razvitiya* [Construction and use of linear programming models in problems of development]. Available at: <http://www.combienergy.ru/stat970.html>, accessed 22.04.2013.
11. Lukatsky A.M., Malakchov V.A., Fedorova G.V. *Informational-analytical system for the investigation of interconnections of the energetic and the economics: Working paper P2/2003/01*. Moscow, State University - Higher School of Economics, 2003. 27 p. Available at: https://www.hse.ru/data/2010/05/04/1216407449/WP2_2003_01.pdf, accessed 22.04.2013.
12. Krivorutskiy L.D., Voloshin G.N., Antonov G.N. *Voprosy postroeniya informatsionno-vychislitel'noy sistemy prognozirovaniya razvitiya toplivno-energeticheskogo kompleksa strany SEI* [Problems of constructing of computer information system for forecasting the development of fuel and energy complex of the country]. *Sistemy energetiki - tendentsii razvitiya i metody upravleniya. T. 1* [Systems of energy - development trends and management methods. Vol. 1]. Irkutsk, SEI SO AN SSSR Publ., 1980, pp. 71-79.
13. Antonov G.N., Antonova N.N., Belanova G.A., et al. *Vychislitel'nye sredstva dlya issledovaniya proizvodstvennoy struktury energeticheskogo kompleksa strany* [Computational tools for study of production structure of energy complex of country]. *Sistemy energetiki: upravlenie razvitiem i funktsionirovaniem. Vychislitel'nye sredstva imitatsionnogo modelirovaniya bol'shikh sistem energetiki. T. 5* [Energy Systems: Managing the development

and operation. Computing means of simulation of large energy systems. Vol. 5.]. Irkutsk, SEI SO AN SSSR Publ., 1986, pp. 15-21.

14. Arshinskiy V.L., Massel' A.G., Fartyshev D.A. Mul'tiagentnyy programmnyy kompleks dlya issledovaniy problemy energeticheskoy bezopasnosti [Multiagent software complex for research on the problem of energy security]. *Trudy 14 Baykal'skoy Vserossiyskoy konferentsii «Informatsionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii»*. Ch. 3 [Proceedings of the 14th Baikal all-Russian conference “Information and mathematical technologies in science and management”. Pt. 3]. Irkutsk, ISEM SO RAN, 2009, pp. 283-289.

15. Massel' L.V., Boldyrev E.A., Makagonova N.N., Kopaygorodskiy A.N., Chernousov A.V. IT-infrastruktura nauchnykh issledovaniy: metodologicheskiy podkhod i realizatsiya [IT infrastructure of scientific research: an approach to realization]. *Vychislitel'nye tekhnologii* [Computational Technologies], 2006, vol. 11, spec. iss., pp. 59-68.

16. Pyatkova N.I., Rabchuk V.I., Senderov S.M., et al. *Energeticheskaya bezopasnost' Rossii: problemy i puti resheniya* [Russian Energy Security: Challenges and Solutions]. Novosibirsk, SO RAN Publ., 2011. 198 p.

17. Makagonova N.N., Massel' A.G. Vozmozhnosti primeneniya situatsionnogo analiza pri issledovanii problemy energeticheskoy bezopasnosti [Possibilities of application of situational analysis in the study of the problems of energy security]. *Informatsionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii : trudy 13 Baykal. Vseros. konf. “Informatsionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii”*. T. 2 [Information and mathematical technologies in science and management : proceedings of the 13th Baikal all-Russian Conf. “Information and mathematical technologies in science and management”. Vol. 2]. Irkutsk, ISEM SO RAN Publ., 2008, pp. 236-240.

18. Massel' L.V., Arshinskiy V.L., Massel' A.G. Intelletal'nye informatsionnye tekhnologii podderzhki prinyatiya resheniy v issledovaniyakh i obespechenii energeticheskoy bezopasnosti [Intelligent information technology to support decision-making in research and ensuring the energy security]. *Trudy Mezhdunarodnoy konferentsii “Intelletal'nye sistemy prinyatiya resheniy i problemy vychislitel'nogo eksperimenta”* [Proceedings of the International Conference “Intelligent decision-making system and the problems of computational experiment”]. Evpatoriya, 2010, pp. 192-196.

19. Heckerman D. A tutorial on learning with Bayesian networks. In: Holmes Dawn E., Jain Lakhmi C., eds. *Innovations in Bayesian Networks*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008, pp. 33-82. DOI: 10.1007/978-3-540-85066-3_3

20. *UnBBayes*. University of Brasilia - UnB, 2001-2010. Available at: <http://unbbayes.sourceforge.net/index.html> accessed 22.04.2013.

21. Kopaygorodskiy A.N., Massel' L.V. Metody i tekhnologii postroeniya khranilishcha dannykh i znaniy dlya issledovaniy energetiki [Methods and technologies of building data warehouse and knowledge for energy research]. *Nauchnyy servis v seti Internet: superkomp'yuternye tsentry i zadachi : trudy Mezhdunarodnoy superkomp'yuternoy konferentsii* [Scientific services on the Internet: supercomputing centers and objectives: proceedings of the International Supercomputer Conference]. Moscow, MSU, 2010, pp. 481-485.

22. Massel' L.V., Kurganskaya O.V. Avtomatizatsiya vychislitel'nogo eksperimenta na osnove logicheskikh modeley [Automation of computational experiment based on logical models]. *Vestnik IrSTU*, 2011, no. 2 (49), pp. 8-14.
23. *Statisticheskaya informatsiya* [Statistical information]. Ministry of Energy of Russian Federation. Available at: <http://minenergo.gov.ru/activity/statistic/> accessed 31.07.2013.
24. *SNiP 23-01-99. Stroitel'naya klimatologiya*. [Construction Norms and Regulations 23-01-99. Building climatology]. Moscow, Gosstroy Rossii Publ., 2003. 109 p.
25. *Sistemnyy operator edinoy energeticheskoy sistemy: Generatsiya i potreblenie (sutki)* [System Operator of the Unified Energy System: Generation and consumption (24 hours)]. JSC "System Operator of the Unified Energy System", 2009-2013. Available at: http://www.soups.ru/index.php?id=ees_gen_consump_day , accessed 31.07.2013.
26. *Sistemnyy operator edinoy energeticheskoy sistemy: Temperatura v EES Rossii* [System Operator of the Unified Energy System: The temperature in the UES of Russia]. JSC "System Operator of the Unified Energy System", 2009-2013. Available at: http://www.soups.ru/index.php?id=ees_temperature, accessed 31.07.2013.