

УДК 33:519.21

***М. В. Бунда***

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»,  
Санкт-Петербург, e-mail: bunda.mv@edu.spbstu.ru

***Т. М. Бугаева***

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»,  
Санкт-Петербург, e-mail: bug\_tatiana@bk.ru

***В. В. Бразовская***

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»,  
Санкт-Петербург, e-mail: brazovskaya\_vv@spbstu.ru

***Е. А. Конников***

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»,  
Санкт-Петербург, e-mail: konnikov\_ea@spbstu.ru

## **ВЕРОЯТНОСТНЫЙ АНАЛИЗ РИСКОВ ДЛЯ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ МАЛОЙ МОЩНОСТИ**

**Ключевые слова:** вероятность, анализ, атомные станции, энергетика, вероятностный анализ, риски.

Целью данной работы является исследование нарушений, приводящих к недоотпуску электроэнергии, и вероятностный анализ рисков для атомных электростанций (АЭС) малой мощности. В качестве метода для проведения исследования выбран анализ профиля риска для атомных станций большой мощности и прогнозирование возможных рисков для атомных станций малой мощности на основании их конструктивных особенностей, отличий от АЭС большой мощности. Считается, что большинство инцидентов на АЭС происходит из-за деятельности персонала, примерно 70–80%. Поэтому, чтобы уменьшить количество таких происшествий, необходимо продолжать исследования и развивать практику, чтобы лучше понять, как влияет человеческий фактор на риск возникновения инцидентов на АЭС. Человеческий фактор играет ключевую роль на всех этапах жизненного цикла АЭС. Поэтому необходимо принимать системный подход и разрабатывать системы, которые снижают антропогенные риски или менее подвержены им. Было доказано, что существует опасность возникновения серьезных аварий из-за ошибок человека. Поэтому мы должны отдавать предпочтение технологиям, которые минимизируют возможные последствия в случае чрезвычайных происшествий.

***М. В. Бунда***

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, e-mail bunda.mv@edu.spbstu.ru

***Т. М. Бугаева***

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, e-mail: bug\_tatiana@bk.ru

***В. В. Бразовская***

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, e-mail: brazovskaya\_vv@spbstu.ru

***Е. А. Конников***

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, e-mail: konnikov\_ea@spbstu.ru

## **PROBABILISTIC RISK ANALYSIS FOR LOW-POWER NUCLEAR POWER PLANTS**

**Keywords:** probability, analysis, nuclear power plants, energy, probabilistic analysis, risks.

The purpose of this work is to investigate violations leading to under-discharge of electricity and a probabilistic risk analysis for low-power nuclear power plants (NPP). The analysis of the risk profile for high-power nuclear power plants and forecasting possible risks for low-power nuclear power plants based on their design features, differences from high-power nuclear power plants, was chosen as a method for conducting the study. It is believed that the majority of incidents at nuclear power plants occur due to the activities of personnel, approximately 70–80%. Therefore, in order to reduce the number of such incidents, it is necessary to continue research and develop practice in order to better understand how the human factor affects the risk of incidents at nuclear power plants. The human factor plays a key role at all stages of the NPP life cycle. Therefore, it is necessary to take a systematic approach and develop systems that reduce anthropogenic risks or are less susceptible to them. It has been proven that there is a risk of serious accidents due to human error. Therefore, we must give preference to technologies that minimize the possible consequences in the event of an emergency.

### Введение

В настоящее время широко обсуждается проблема энергообеспечения отдаленных районов. В большинстве случаев, это малонаселенные и труднодоступные районы северных территорий РФ [1]. На данный момент обеспечение таких территорий энергией происходит с помощью дизельных и мазутных энергоустановок. Но данный способ выработки энергии в труднодоступных районах имеет ряд недостатков: большие транспортные расходы на доставку топлива и запасных частей, негативное воздействие на окружающую среду и т. д. Для решения данных проблем предлагается введение генерации атомных станций малой мощности (АСММ). Целевыми потребителями энергоресурсов в этом случае будут отдельные группы населенных пунктов и промышленных предприятий, имеющих компактное расположение [2].

Атомные станции имеют свои особенности. В течение девяти месяцев 2020 г. на 11 энергоблоках шести АЭС произошло 16 нарушений: в первом квартале – четыре, во втором – пять и в третьем – семь нарушений [3]. На Балаковской, Билибинской, Кольской и Курской АЭС нарушений не зарегистрировано. Всего в промышленной эксплуатации находилось 36 энергоблоков на 10 АЭС России. На энергоблоке № 2 Ленинградской АЭС-2, находящемся на стадии ввода в эксплуатацию, произошло пять нарушений. Общая недовыработка электроэнергии за девять месяцев 2020 г., вызванная ремонтом оборудования, ограничениями мощности, отклонениями на АЭС и т. д., кроме нарушений в работе АЭС без учета недовыработки на ПАТЭС, составила 48606,962 млн кВт·ч. С учетом статистических данных из отчетности ГК РОСАТОМ, недовыработка электроэнергии из-за нарушений в работе АЭС была в два раза меньше по сравнению с недовыработкой электроэнергии в результате произошедших отклонений на АЭС и составила 1% от всей недовыработанной электроэнергии АЭС России за девять месяцев 2020 г. По сравнению с аналогичным периодом 2019 г. недовыработка электроэнергии из-за нарушений в работе действующих энергоблоков АЭС уменьшилась в 2,14 раза – на 669,484 млн кВт·ч. В данной работе представлена информа-

ция о нарушениях в работе АЭС России за девять месяцев 2020 г., которые подлежат учету и сообщению регулирующему органу в соответствии с НП-004 [4, 5]. Так как атомная энергетика является одной из приоритетных видов генераций в контексте обеспечения устойчивого развития территорий, проведения анализа рисков представляется актуальной задачей [6, 7].

### Цель исследования

Целью данной работы является выявление потенциальных рисков для атомных станций малой мощности с реакторами типа РИТМ, которые предполагается использовать в качестве автономного источника электроснабжения в изолированных энергосистемах. Так как на данный момент станций с данным типом реактора все еще нет в эксплуатации, воспользуемся статистикой для энергоблоков с наиболее близкими по конструкции реакторами – ВВЭР-1000/1200. Затем интерпретируем полученные результаты для атомных станций малой мощности с реакторами типа РИТМ на основании технических особенностей их конструкции, отличий от станций с ВВЭР-1000/1200.

### Материал и методы исследования

Исследование проводилось в рамках следующих этапов:

#### 1. Составление профиля риска.

На основании статистических данных составляется профиль риска. Анализ проводится для всех энергоблоков с реакторами ВВЭР-1000/1200 за период 9 месяцев 2020 г. В указанный период на 16 энергоблоках ВВЭР-1000/1200 произошло 11 нарушений. Для каждой группы нарушений рассчитывается совокупная величина ущерба, которая также указывается в профиле риска.

#### 2. Формирование вероятностной структуры портфеля риска.

Моделирование 1 млн событий в соответствии с нормальным распределением. При этом дисперсия определяется уровнем риск-адаптации цены, т. е. насколько мы готовы допускать, что она будет отклоняться. В нашем случае дисперсия составляет 50% от математического ожидания.

#### 3. Аппроксимация данных для выявления степени их предсказуемости.

С целью выявления степени предсказуемости полученных данных выполним

аппроксимацию с помощью функции нормального распределения:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}, \quad (1)$$

где  $\mu$  – математическое ожидание (среднее значение), медиана и мода распределения;  $\sigma$  – среднеквадратическое отклонение.

Чем более точно функция аппроксимирует данные, тем более полученный массив вероятных цен событий системно описываемый.

Далее выполняется аппроксимация гамма-распределением. Функция плотности вероятности для гамма равна:

$$f(x, a) = \frac{x^{a-1}e^{-x}}{\Gamma(a)}, \quad (2)$$

для  $x \geq 0, a > 0$ . Здесь  $\Gamma(a)$  относится к гамма-функции. Гамма принимает  $a$  в качестве параметра формы. Для того, чтобы эффективно подобрать коэффициент сдвига функции, используется итеративный алгоритм в Python. Данный алгоритм определяет, при каком значении сдвига функция становится наиболее предсказуемой. То есть подбирает то значение  $a$ , при котором гамма-функция

описывает сгенерированный массив наилучшим образом.

4. Применение гамма-распределения к каждой группе нарушений.
5. Интерпретация результатов анализа.

### Результаты исследования и их обсуждение

В соответствии с рассмотренными статистическими данными был составлен профиль риска, в котором для каждой группы нарушений подсчитана совокупная величина ущерба (табл. 1).

Любое событие характеризуется частотой и тяжестью, а их произведение дает вероятную цену события. В результате моделирования 1 млн событий получена вероятностная структура портфеля риска, представленная в табл. 2.

Из столбца вероятной цены события (аварии) видно, что есть две дорогостоящие группы нарушений:

- нарушения с отключением энергоблока от сети;
- нарушения без изменения мощности.

А две другие группы в сравнении стоят мало. Параметры квантилей вероятности позволяют провести более детальный анализ.

Таблица 1

Профиль риска, полученный за 9 мес. 2020 для реакторов ВВЭР-1000/1200

Группа нарушений	Число нарушений за 9 мес. 2020	Число реакторов	Совокупная величина ущерба, млн руб.
Нарушения с отключением энергоблока от сети	6,00	16,00	1 415,53
Нарушения со снижением нагрузки	2,00	16,00	153,95
Нарушения без изменения мощности	2,00	16,00	1 397,23
Нарушения с остановом реактора, не включенного в сеть энергоблока	1,00	16,00	10,12

И с т о ч н и к : составлено авторами по данным ГК Росатом

Таблица 2

Вероятностная структура портфеля риска

Группа нарушений	Вероятная цена аварии	99 квантиль ущерба	95 квантиль ущерба	Вероятность превышения среднего ущерба	Вероятность превышения половины среднего ущерба
Нарушения с отключением энергоблока от сети	88,344	453,259	370,299	18,70%	31,30%
Нарушения со снижением нагрузки	10,760	139,399	96,309	7,30%	11,20%
Нарушения без изменения мощности	80,647	1 188,426	763,686	5,90%	9,70%
Нарушения с остановом реактора, не включенного в сеть энергоблока	0,530	12,832	3,230	2,50%	4,70%

И с т о ч н и к : составлено авторами по данным ГК Росатом

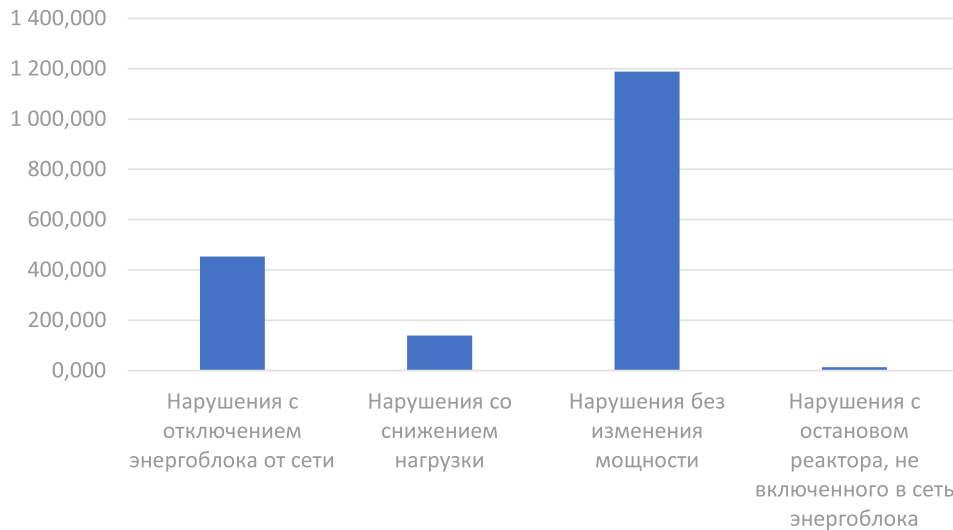


Рис. 1. 99-й квантиль ущерба.  
Источник: составлено авторами

99-й квантиль, представленный на рис. 1, показывает ту максимальную вероятную цену, которая будет получена в 99% случаев.

Из графика видно, что цена *нарушений без изменения мощности* значительно опережает остальные группы нарушений. Их вероятная цена события сопоставима с ценой *нарушений с отключением энергоблока от сети*. Это происходит вследствие того, что они встречаются не часто, но при этом дорогостоящие.

Соотнося 99-й квантиль и вероятную цену аварий, можно сделать следующие выводы:

1. Вероятная цена *нарушения с отключением энергоблока от сети* – самая высокая,

при этом ее 99-й квантиль становится меньше, но все равно принимает достаточно большое значение. А значит, эта величина **требует контроля**, т. е. необходимо вводить мероприятия, которые будут компенсировать данные происшествия.

2. 99-й квантиль *нарушений без изменения мощности* крайне высок, следовательно, их **необходимо купировать**, т. е. исключать.

3. Остальными группами нарушений можно пренебречь.

Вероятность превышения среднего ущерба и половины среднего ущерба представлена на рис. 2.

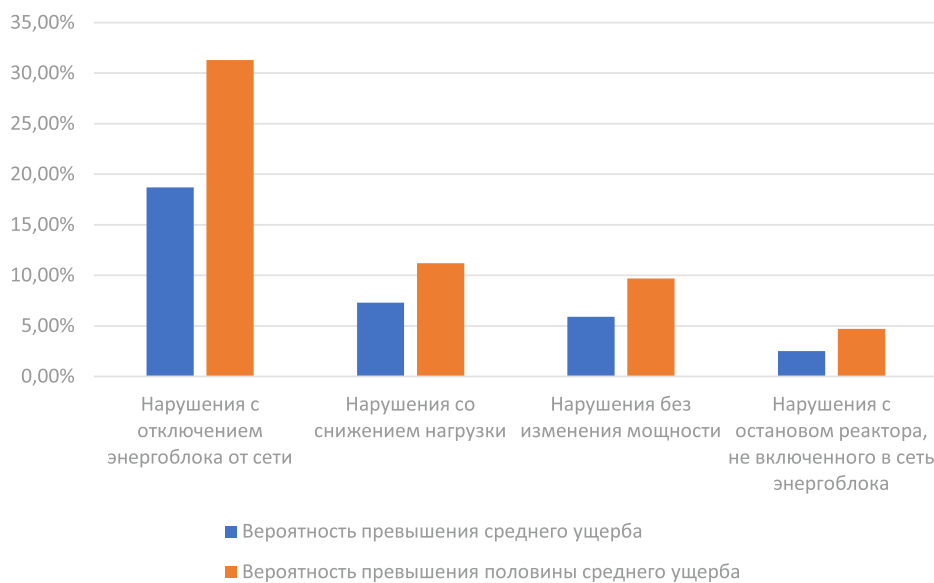


Рис. 2. Вероятность превышения среднего ущерба и половины среднего ущерба.  
Источник: составлено авторами

Нарушения с отключением энергоблока от сети превысят средний ущерб с вероятностью 17–18%. Из этого следует, что в данной группе нарушений высокий разброс цен и данную группу нарушений **необходимо купировать**.

Таким образом мы можем выделить два типа событий: куплируемые и управляемые.

К событиям, которые необходимо **купировать** относятся следующие группы нарушений:

- Нарушения с отключением энергоблока от сети;
- Нарушения без изменения мощности.

К **управляемым** относятся следующие группы нарушений:

- Нарушения со снижением нагрузки;
- Нарушения с остановом реактора, не включенного в сеть энергоблока.

Атомные станции малой мощности проектируются для работы в режиме следования за нагрузкой в диапазоне от 30–100% (по другим данным от 15–100%). Следовательно, они могут продолжать работу в случае снижения нагрузки без рисков для безопасности, обеспечивая потребителей изолированных энергосистем бесперебойным питанием в широком диапазоне. Таким образом, обеспечивается управление в группе «Нарушения со снижением нагрузки».

С целью выявления степени предсказуемости полученных данных выполним

аппроксимацию с помощью функции нормального распределения. С помощью функции нормального распределения мы пытаемся описать массив вероятных цен событий, т. е. тяжестей, скорректированных на частоту (рис. 3).

Точность аппроксимации можно оценить с помощью коэффициента детерминации ( $R^2$ ). Чем ниже коэффициент детерминации, тем более события индивидуальны и меньше подвержены массовому анализу. В нашем случае коэффициент детерминации принимает значение  $R^2 \approx 0,36$ . Это достаточно низкое значение, а значит события носят уникальный, индивидуальный характер и каждое из них должно рассматриваться в отдельности.

Далее проведем аппроксимацию вероятной цены гамма-распределением (рис. 4). В результате реализации алгоритма оказалось, что коэффициент детерминации ведет себя неоднородно. Причем при определенных значениях  $\alpha$  сильно возрастает дисперсия, при других наступает покой, т. е. имеются периоды схождения. Для правильной идентификации данных периодов используются скользящие средние. Идея скользящей средней состоит в том, чтобы взять среднее значение за определенное количество предыдущих периодов, чтобы получить «скользящую среднюю» для данного периода. Для расчета скользящих средних было выбрано окно в 15 значений.

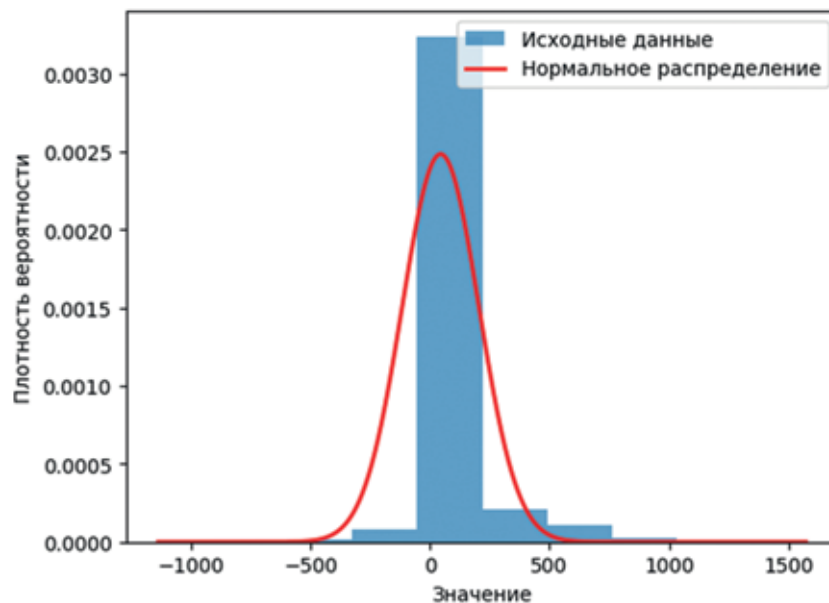


Рис. 3. Аппроксимация вероятной цены нормальным распределением.  
Источник: составлено авторами

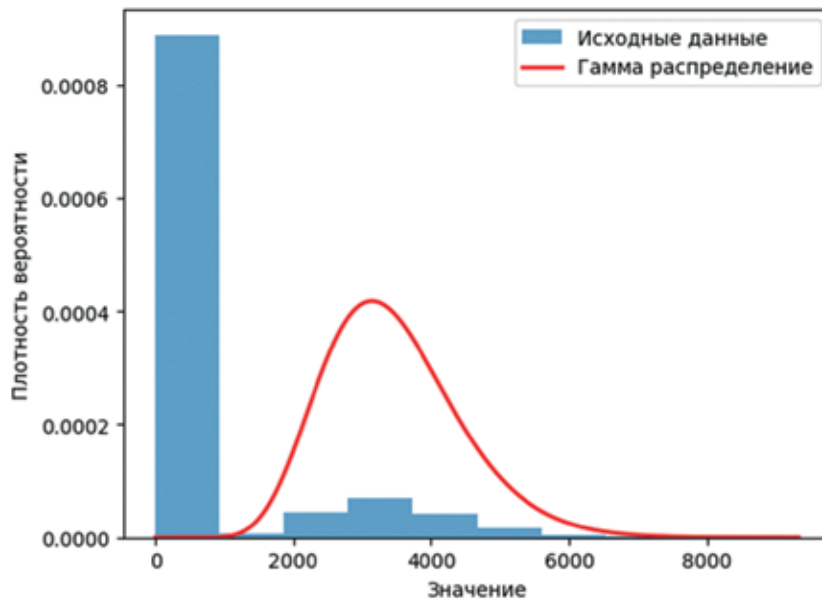


Рис.4. Аппроксимация вероятной цены гамма-распределением.  
Источник: составлено авторами

В данном случае эффективно описывается не все распределение, а та его часть, которая является предельным выбросом. То есть существует множество промежутков времени, в течение которых аварийное событие не происходит, но когда нарушение все же происходит, то оно имеет высокую стоимость.

В результате можно заключить, что частота является очень низкой и необходимо ориентироваться на предельную сумму компенсации убытков. Стоит обратить внимание, что гамма-функция показывает распределение стоимости именно произошедших аварийных событий, т. е. не описывает события с нулевым ущербом.

В результате количественного анализа получаем, что вероятное событие стоит пример-

но 606 млн руб., при этом 95-й и 99-й квантиле составляют миллиарды рублей. Средняя тяжесть будет превышена с вероятностью 17%, и эта величина является относительно устойчивой. То есть параметр доверия при рассмотрении данной вероятностной модели рисков составляет 17%.

Получим массив, сгенерированный на основе гамма-распределения для каждой группы нарушений, а затем аппроксимируем его с помощью гамма-функции. В результате выполнения алгоритма подбирается такой параметр сдвига  $a$ , при котором гамма-функция описывает полученное распределение наилучшим образом. Значения альфа параметра и аппроксимация гамма-функцией для различных групп нарушений представлены на рис. 5–6.

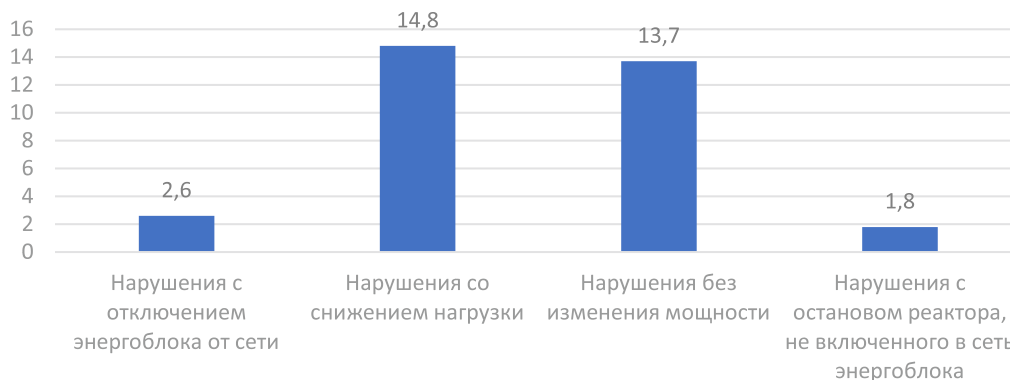


Рис. 5. Альфа-параметр.  
Источник: составлено авторами

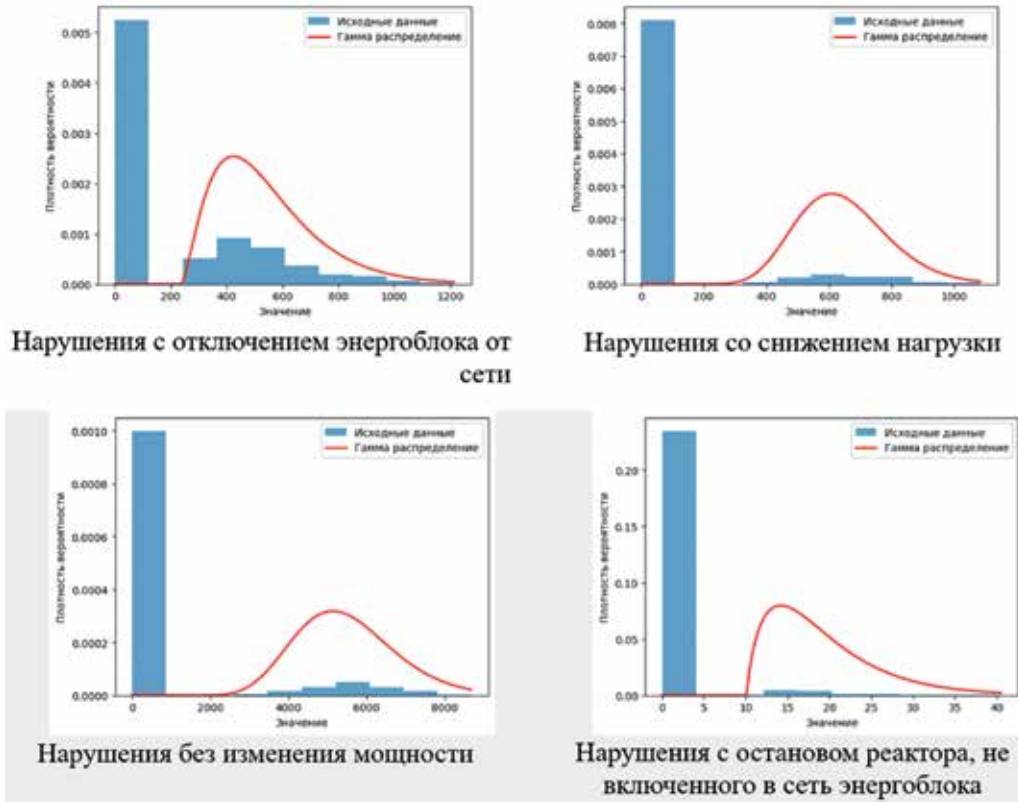


Рис. 6. Аппроксимация гамма-распределением для каждой группы нарушений.  
Источник: составлено авторами

Чем больше альфа-параметр, тем больше сдвиг вправо, соответственно, выше значение средней цены. Таким образом, нарушения с отключением энергоблока от сети и нарушения с остановом реактора, не включенного в сеть энергоблока значительно более системные.

А нарушения со снижением нагрузки и нарушения без изменения мощности наиболее смещенные.

На рис. 7 представлена столбчатая диаграмма с вероятными ценами и вероятными моделируемыми ценами по каждой группе нарушений.

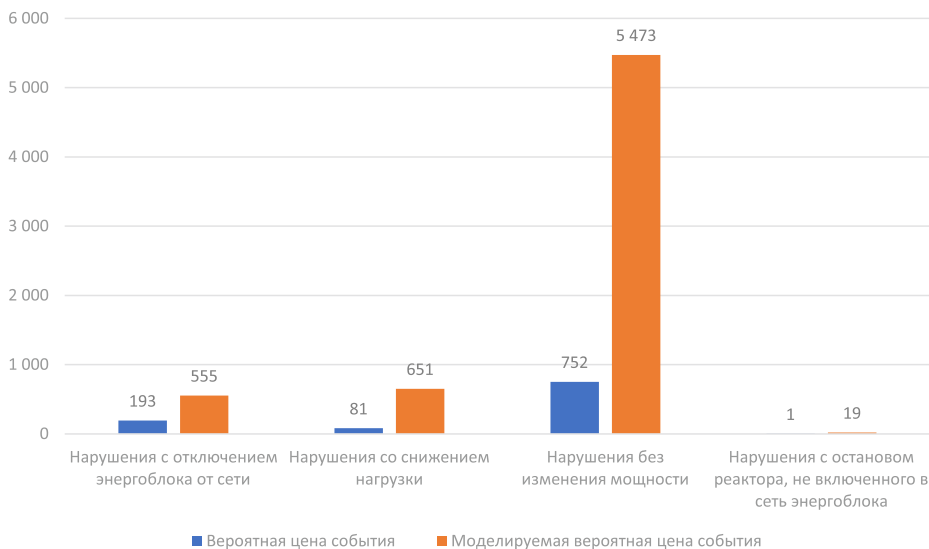


Рис. 7. Вероятная цена и моделируемая вероятная цена события.  
Источник: составлено авторами

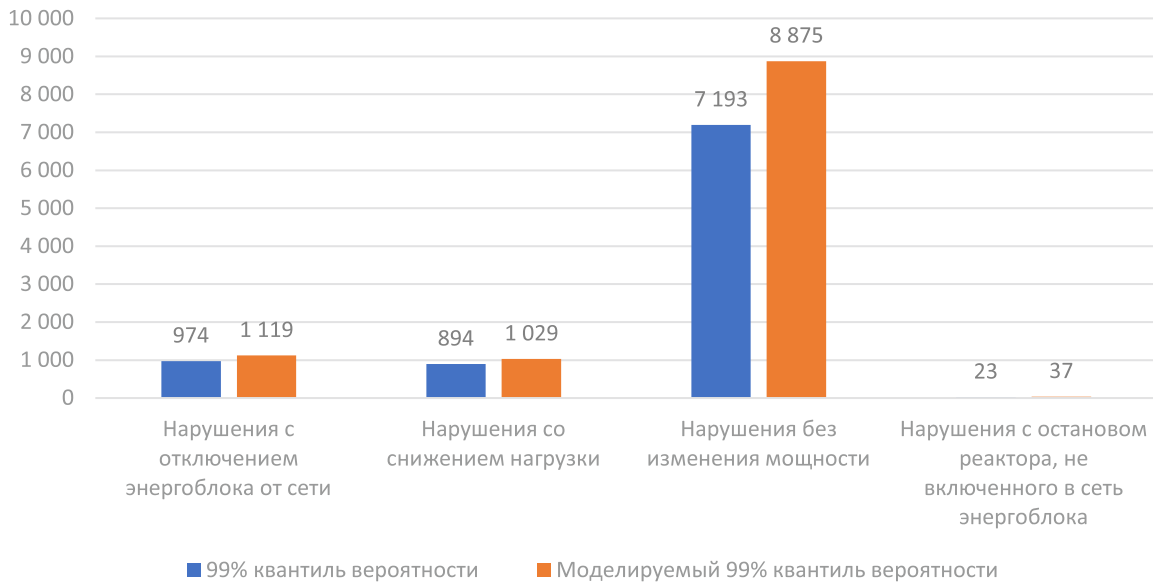


Рис. 8. 99-й квантиль вероятности.  
Источник: составлено авторами

Чем больше разрыв между значениями, тем более непредсказуемым является распределение. Также рассмотрим 99-й квантиль вероятности, представленный на рис. 8.

На уровне 99-го квантиля вероятности данные начинают друг к другу стремиться. Значит, он первичен с аналитической точки зрения, потому что чем выше соответствующее отклонение, тем больше удельный вес нулевых значений, которые обесценивают сам результат нарушений. Если на уровне 99-го квантиля они не равны, значит, этот массив является сложно описываемым с точки зрения моделирования.

### Выводы

Вышеприведенный анализ выполнялся для АЭС с ВВЭР-1000/1200, при этом отмечалось их технологическое сходство с АСММ с реакторами типа РИТМ. В данном разделе производится интерпретация полученных результатов применительно к АСММ с реакторами типа РИТМ на основании их сходства и различия. Таким образом, прогнозируется ожидаемое поведение данных типов станций на основании смоделированных данных.

Атомные станции малой мощности обладают рядом преимуществ, которые делают их более надежными по сравнению с атомными станциями большой мощности. Что касается нарушений с отключением энергоблока от сети, то данная группа нарушений может быть купирована при выполнении определенных условий. Когда

речь идет о строительстве атомных станций малой мощности, особенно в заводских условиях, имеется ряд конструктивных особенностей. Они позволяют строить эти станции на площадках, которые предварительно подготовлены, в высокой степени готовности к эксплуатации. Благодаря этому сроки строительства, монтажа и наладки АЭС сокращаются. Это также помогает избежать проблемы прерывистости поставки энергии и снизить требования к замещающим источникам энергии, поскольку в случае аварийной остановки одного блока или перегрузки топлива остальные блоки ( $n - 1$ ) продолжают работать.

Нарушения без изменения мощности на атомной электростанции относятся к ситуациям, когда возникают некоторые проблемы или неисправности на станции, но сама мощность, вырабатываемая реактором, остается неизменной. Обычно такие нарушения бывают связаны с работой различных систем или оборудования на АЭС.

В случаях нарушений без изменения мощности на АЭС может возникать риск недоотпуска электроэнергии из-за необходимости обеспечения безопасности работы станции. Когда возникает некоторая проблема или неисправность в работе системы или оборудования на АЭС, может потребоваться временно снизить производство электроэнергии или остановить работу реактора для предотвращения возможности серьезных последствий.



Например, если система охлаждения испытывает проблемы, то может потребоваться принять меры для снижения нагрузки на станцию, чтобы избежать перегрева реактора или других частей системы. В таких ситуациях оперативные действия могут потребоваться для обеспечения безопасности и предотвращения возможных аварийных ситуаций. Кроме того, в процессе исправления неисправности или проблемы может потребоваться временно остановить работу реактора или определенных систем, чтобы провести обслуживание или ремонт.

Атомные станции малой мощности обладают рядом преимуществ, которые делают их более надежными по сравнению с атомными станциями большой мощности. АСММ могут быть более гибкими в использовании. Уровень автоматизации АСММ позволит им быть более устойчивыми к потенциальным аварийным ситуациям.

Все вышеперечисленные преимущества приведут к повышению надежности систем и оборудования, снижению зависимости от человеческого фактора. Тем самым, можно сказать, что происходит значительное уменьшение вероятности возникновения рисков «Нарушения без изменения мощности» и «Нарушения с остановом реактора, не включенного в сеть энергоблока».

Атомные станции малой мощности проектируются для работы в режиме следования за нагрузкой в диапазоне от 30–100%. Следовательно, они могут продолжать работу в случае снижения нагрузки без рисков для безопасности, обеспечивая потребителей изолированных энергосистем бесперебойным питанием в широком диапазоне. Таким образом, обеспечивается управление в группе «Нарушения со снижением нагрузки».

#### *Библиографический список*

1. Васильев Ю.С., Амосов Н.Т. Атомные станции малой мощности // Материаловедение. Энергетика. 2014. №2 (195). С. 26-33.
2. Саркисов А.А. Атомные станции малой мощности: новое направление развития энергетики. М.: Академ-Принт, 2015.
3. Рыжикова Т.Н., Щепетина Т.Д., Чумак Д.Ю. Анализ экономических аспектов развития атомных станций малой и средней мощности в России // Экономический анализ: теория и практика. 2018. №8 (479) [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-ekonomicheskikh-aspektov-razvitiya-atomnyh-stantsiy-maloy-i-sredney-moschnosti-v-rossii> (дата обращения: 07.12.2023).
4. Анализ показателей балансов электрической энергии и мощности ЭЭС России. [Электронный ресурс]. URL: [https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/company/reports/ups-review/2021/ups\\_balance\\_analysis\\_2020q4.pdf](https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/company/reports/ups-review/2021/ups_balance_analysis_2020q4.pdf) (дата обращения: 07.12.2023).
5. НП-004-08 Положение о порядке расследования и учета нарушений в работе атомных станций.
6. Алексеев В.А., Родионов Д.Г., Конников. Е.А. Специфика реализации концепции устойчивого развития применительно к атомной энергетике // Экономические науки. 2022. №215. С. 155-161. DOI 10.14451/1.215.155.
7. Гутман С.С., Бразовская В.В. Оценка уровня энергетической безопасности Российской Федерации в контексте устойчивого развития // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2022. Т. 18, №6 (411). С. 1039-1058. DOI: 10.24891/ni.18.6.1039.