

Подходы к математическому описанию процессов отраслевого управления и надзора за безопасностью производственного цикла на АЭС

Выполнен анализ характерных особенностей процессов регулирования и оперативного управления безопасностью энергоблоков АЭС. По результатам анализа предложены подходы к математическому описанию указанных процессов и формированию шкалы управления текущим уровнем безопасности как части производственного цикла выработки электроэнергии на АЭС. В основе предлагаемых подходов лежат положения теории автоматического управления, методика построения экспериментальных уравнений и процессный подход системы качества ISO:9001.

Ключевые слова: функционал; регулирование; надзор; управление безопасностью; шкала управления безопасностью; процессный подход; ресурсы безопасности; эшелоны защиты; текущий уровень безопасности.

Д. В. Білей, С. В. Бержанський

Підходи до математичного опису процесів галузевого управління та нагляду за безпекою виробничого циклу на АЕС

Виконано аналіз характерних особливостей процесів регулювання та оперативного управління безпекою енергоблоків АЕС. За результатами аналізу запропоновано підходи до математичного опису зазначених процесів та до формування шкали управління поточним рівнем безпеки як частини виробничого циклу видобутку електроенергії на АЕС. В основі запропонованих підходів лежать положення теорії автоматичного управління, методика побудови експериментальних рівнянь та процесний підхід системи якості ISO:9001.

Ключові слова: функціонал; регулювання; нагляд за безпекою; управління безпекою; шкала управління безпекою; процесний підхід; ресурси безпеки; ешелони захисту; поточний рівень безпеки.

© Д. В. Билей, С. В. Бержанский, 2014

В статье «Надзор как элемент системы управления и системы качества ISO:9001», опубликованной в № 2 журнала «Ядерна та радіаційна безпека» за 2013 год, представлены направления развития отраслевого надзора и управления текущим уровнем безопасности (далее — ТУБ) исходя из предложенной структуры количественной оценки ТУБ (аспекты безопасности, производственные факторы риска, эшелоны защиты от производственных факторов риска), положений теории управления и процессного подхода стандарта [1].

Настоящая статья является продолжением исследования по направлению «Совершенствование системы надзора и управления ТУБ». В ней проанализированы характерные признаки надзорной деятельности и управления; по результатам анализа предложены основы (подходы) математического описания регулирования безопасности и оперативного внутриотраслевого управления ТУБ (далее — оперативное управление), а также принципы построения шкалы управления ТУБ, детерминированной по уровням, соответствующим минимально необходимому набору ресурсов для реализации вмешательства в текущее состояние эшелонов защиты.

Прежде чем приступить непосредственно к анализу надзорной деятельности и управления ТУБ, необходимо ответить на вопрос, что же представляет собой надзор в рамках предлагаемого подхода: управление или регулирование? Для этого необходимо установить отличие указанных понятий исходя из идентичности условий разрешения любой регулируемой государством практической деятельности (как в области ядерной и радиационной безопасности, так и общепромышленной безопасности), а именно исходя из приоритета безопасности человека и окружающей среды над любыми экономическими выгодами. Так, согласно Закону Украины «Про охорону праці» [2, ст. 1] охрана труда представляет собой комплекс нормативно-правовых, организационно-технических и других мероприятий, направленных на сохранение жизни, здоровья и трудоспособности человека в процессе трудовой деятельности; согласно Закону Украины «Про охорону навколишнього природного середовища» [3, ст. 3] одним из основных принципов охраны окружающей среды является гарантия экологической безопасности среды для жизни и здоровья человека; согласно Закону Украины «Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку» [4, ст. 1] и ОПБУ [5, п. 2.7] соблюдение ядерной и радиационной безопасности обеспечивается деятельностью эксплуатирующей организации, направленной на ограничение воздействия радиоактивных продуктов и ионизирующего излучения на персонал, население и окружающую среду установленными в нормативных документах пределами безопасности.

В разделе 1 статьи обосновывается подход к математическому описанию регулирующей деятельности; в разделе 2 — подход к математическому описанию оперативного управления ТУБ; в разделе 3 предлагается подход к построению шкалы управления ТУБ исходя из понятий контрольных уровней безопасности.

1. Регулирование

Из сложившейся практики надзора, регулирование представляет собой разрешительную систему, цель которой — оценить соответствие лицензиата установленным требованиям к запрашиваемому разрешению практической

деятельности* и контролировать в дальнейшем соответствие осуществляемой лицензиатом деятельности условиям, установленным в разрешении.

Иными словами, регулирование представляет собой изменение условий выданного разрешения на осуществление практической деятельности (введение дополнительных эксплуатационных условий, назначение отдельных мероприятий и т. п.) в случае отступления от установленных требований и контролируемых значений критериев безопасности. Например, в сфере ядерной и радиационной безопасности — это условия лицензии на производство электроэнергии на АЭС, выдаваемой Госатомрегулированием, и нормативные критерии безопасности — ЧПАЗ и ЧПАВ (частота повреждения активной зоны и частота предельного аварийного выброса [5, п. 4.1.1]).

По результатам контроля регулирующий орган принимает решение о соответствии или несоответствии владельца производственного процесса установленным требованиям. В случае отступления от установленных условий регулирующий орган имеет право аннулировать разрешение на осуществление деятельности или изменить условия их выполнения, предписав лицензиату устранить выявленные нарушения лицензии. Как правило, лицензиат разрабатывает корректирующие мероприятия, согласовывает с регулирующим органом порядок и сроки устранения нарушения.

Но в любом случае *регулирующее вмешательство представляет собой управление условиями* осуществления разрешенной практической деятельности и не является оперативным управлением безопасностью. Например, в области использования ядерной энергии государственное регулирование безопасности регламентировано следующим образом: «Госатомрегулирование определяет критерии и требования относительно безопасности АС, выдает лицензии и разрешения на выполнение работ на соответствующих этапах жизненного цикла АС, осуществляет государственный надзор за соблюдением нормативных *требований и условий* предоставленных разрешений, применяет в пределах своих полномочий меры принуждения к юридическим и физическим лицам в соответствии с законодательством» [5, п. 5.4.2].

В настоящее время основным подходом к регулированию безопасности является консервативный (одновариантный — да/нет) подход к соблюдению установленных требований и условий безопасности. Однако в последнее время все большее распространение получает риск-ориентированный подход к регулированию безопасности, основанный на комплексном (вариантном) подходе к регулированию безопасности: рассматриваются технические решения совместно с различного рода дополнительными мерами, в совокупности обеспечивающие соответствие установленным требованиям и критериям безопасности. Это позволяет отойти от избыточного консерватизма и перейти к более гибкой технологии принятия регулирующего решения. Однако после принятия решения последнее становится одновариантным, т. е. его соблюдение контролируется в целом, со всеми дополнительными мерами, как одно условие разрешения регулируемой деятельности. Отклонение от любого из них классифицируется

как нарушение условия разрешения и инициирует регулирующее вмешательство. При этом величина отклонения не имеет значения, так как регулирующим органом фиксируется сам факт отклонения.

Таким образом, регулирование безопасности как при консервативном, так и при риск-ориентированном подходе представляет собой оценку безопасности, математически представляемую бинарной функцией Хевисайда $\Phi(x)$:

$$\left. \begin{array}{l} \text{если параметр } x \text{ не соответствует требованиям, то } \Phi(x) = 0; \\ \text{если параметр } x \text{ соответствует требованиям, то } \Phi(x) = 1. \end{array} \right\} (1)$$

В рассматриваемом случае $\Phi(x)$ — функция ТУБ (текущий уровень безопасности), нормированная к единице; x — нормативные критерии безопасности.

Нормирование функции ТУБ вводится с целью приведения к общей шкале измерения производственных факторов риска (ПФР), поскольку ПФР имеют различную размерность, но равнозначны с точки зрения законодательных норм по охране труда (охрана труда в данном случае относится к обобщенным требованиям законодательства, распространяемым на *все* виды трудовой деятельности, включая производство электроэнергии и смежных с ним производств). Такой подход позволит в дальнейшем задать функцию ТУБ в системе координат с общим центром в n -мерном векторном пространстве, где каждый вектор нормирован к единице и не зависит от других векторов.

2. Управление

Управление разрешенной практической деятельностью представляет собой оперативное управление технологическим циклом производства, состоящее из непрерывного процесса регулирования его ресурсов с целью достижения максимальной выгоды при обязательном соблюдении условий безопасности производства.

Безопасность разрешенной практической деятельности является потребительским свойством товара [6, раздел 2, пп. 1 и 2], поскольку направлена на удовлетворение ожиданий потребителя: минимизацию вредного влияния и рисков производственного цикла (в нашем случае — цикл выработки электроэнергии) как на человека, так и на среду его обитания.

Следовательно, в рамках процессного подхода стандарта [1], безопасность также является ресурсом производственного процесса, поскольку косвенно влияет на его выход — достижение максимальной выгоды безопасным способом.

С учетом сказанного следует, что *в нашем случае управление текущим уровнем безопасности является элементом управления циклом производства электроэнергии*. Оперативное управление ТУБ осуществляется аналогично управлению ресурсами цикла — воздействием на технологические, эксплуатационные, надежностные, экономические и прочие ресурсы, обеспечивающие безопасность производственного процесса (далее — ресурсы безопасности**).

Исходя из положений теории управления [7, 8], количественная оценка безопасности должна описываться дифференцируемой и непрерывной функцией на оцениваемом

* Здесь и далее под практической деятельностью понимается деятельность в области использования ядерной энергии для выработки киловатт-часа. Однако в целом предлагаемый подход к управлению и надзору за безопасностью направлен на защиту от производственных факторов риска (ПФР) различной природы, включая общепромышленные.

** Далее в статье рассматриваются технологические ресурсы, контролируемые проектными контрольно-измерительными приборами и автоматикой (КИПиА). Для остальных ресурсов требуется проведение исследований для определения их функции состояния.

временном интервале (например, ежеквартально [5, п. 6.3.3]). Причем указанная функция должна быть однозначной в каждой точке оцениваемого интервала.

Количественная оценка невозможна без соответствующего математического аппарата — подходов к оценке, уравнений состояния, методик измерений и обработки исходных данных, системы управления на основе полученной оценки ТУБ. С учетом предложений по дальнейшему развитию научно-технического уровня процессов надзора и управления безопасностью [6], в рамках предлагаемого подхода количественная оценка безопасности представляет собой оценку текущего состояния *ресурсов безопасности* на основе уравнений их состояния как систему эмпирических функций от проектных (и, следовательно, регистрируемых проектными средствами КИПиА) параметров и эксплуатационных характеристик энергоблока.

В настоящее время распространенным математическим аппаратом количественной оценки безопасности являются вероятностные методы оценки нормативных критериев безопасности ЧПА3 и ЧПАВ. Однако данные критерии являются нормативными критериями, нарушение которых приводит к изменению *условий осуществления* разрешенной практической деятельности. Как отмечено в разделе 1, нормативные критерии относятся к механизму регулирования безопасности и оперативно (непосредственно) не влияют на проектные параметры и эксплуатационные характеристики энергоблока, так как не имеют с ними проектно и научно обоснованных причинно-следственных связей.

Согласно установленной процедуре регулирования, приведение отклонившихся от требуемого состояния проектных параметров и эксплуатационных характеристик энергоблока осуществляется опосредовано через мероприятия, разработанные лицензиатом и согласованные с регулирующим органом.

Следовательно, использование нормативных критериев безопасности направлено на регулируемую деятельность и является механизмом разрешительной системы управления, описываемой бинарной функцией Хевисайда. Оперативное же управление требует набора детерминированных и заранее установленных состояний управляемого объекта. В нашем случае — это шкала управления ТУБ энергоблока.

Для целей оперативного управления ТУБ, в соответствии с [8, п. 2.3], необходимым условием является наличие математической модели для анализа и получения количественной оценки ТУБ.

В идеальном случае упомянутая модель представляет собой систему уравнений состояния объекта управления. Каждое уравнение при этом является функцией параметров рабочих сред и характеристик материалов, которые обеспечивают функционирование объекта управления. Указанная функциональная зависимость основана на естественных закономерностях, описывающих поведение объекта управления.

К сожалению, построение такого уравнения состояния в настоящее время сопряжено с объективными трудностями научного характера: существующие физические закономерности описывают состояние *идеального* объекта. Для практического применения в инженерной практике уравнение состояния *реального* объекта описывается эмпирическими зависимостями, определяемыми на основе исследования свойств объекта. Кроме того, изменение состояния реального объекта задается, в основном, в виде

последовательных отрезков его квазистационарных состояний на всем интервале изменения. Ярким примером такого подхода к математическому моделированию объекта управления является использование в детерминистических методах исследования конечноразностных схем с неравномерным шагом сетки.

Именно по этой причине и предлагается подход, характерный для теории управления: исследуется реакция объекта управления на изменение его входных параметров и описывается как закон регулирования, представляющий собой модель поведения объекта управления. Достоинством такого подхода служит возможность прогнозирования реакции объекта управления (в нашем случае — значение функции ТУБ) на основе аппроксимирующего уравнения (системы уравнений)*, без описания его внутренних взаимосвязей на основе точных и подробных физических закономерностей. Аппроксимацию предполагается осуществлять стандартным методом задания эмпирической функции: использовать множество зарегистрированных значений входного набора параметров и характеристик энергоблока, формирующих текущее состояние ресурсов безопасности, и определять соответствующее им текущее значение функции ТУБ, после чего ранжировать полученные значения функции ТУБ по соответствующим уровням заранее постулируемой шкалы (подход к постулированию шкалы описан в разделе 3).

Таким образом, предлагаемый подход к управлению ТУБ основан не на естественнонаучных причинно-следственных связях, описываемых физико-математическими закономерностями, а на логическом (структурном) предстании функции ТУБ как объекта управления со своим набором входных параметров — ресурсов безопасности.

Обобщая сказанное, можно утверждать, что для оперативного управления ТУБ необходимо иметь математическую модель ТУБ как функцию текущего состояния ресурсов безопасности.

В качестве подхода к математическому описанию ТУБ предлагается использовать функционал от реальных параметров и характеристик энергоблока как наиболее подходящий для решения поставленной задачи — задания функции ТУБ в формате целевой функции управления (непрерывной) и дифференцируемой математической функции).

Согласно определению, функционал — это отображение (функция, правило), по которому каждому элементу одного множества (называемого областью определения) ставится в соответствие некоторый элемент другого множества (называемого областью значений). В нашем случае областью определения функционала ТУБ является множество показателей текущего состояния ресурсов безопасности, определенных на множестве неотрицательных действительных чисел R . Как будет показано далее, область значений функции ТУБ (соответствующего ей функционала) будет преобразована методом квантования в шкалу так называемых детерминированных уровней ТУБ.

Таким образом, предлагается запись функции ТУБ как функционала Φ :

$$\Phi(t) = \Phi(x_1(t), x_2(t), x_3(t), \dots, x_N(t)), \quad (2)$$

где $\Phi(t)$ — нормированная функция ТУБ; $x_i(t)$ — i -й ресурс безопасности; t — время.

* Данное утверждение не является окончательным, так как цель данной статьи — установить подход к формированию математической модели ТУБ.

При этом значение функции $\Phi(t)$ должно подчиняться условию

$$0 \leq M \times \Phi(x_1(t), x_2(t), x_3(t), \dots, x_N(t)) \leq N \times M, \quad (3)$$

где N — нормирующий коэффициент, традиционно равен 1 для простого перехода от количественной оценки к шкале измерения функции в долях от 100 % (физический смысл равенства 100 % функции (t) означает максимальный уровень безопасности энергоблока); M — целочисленный коэффициент масштабирования, по умолчанию равен 1. При необходимости увеличить размах регистрируемого значения функции $\Phi(t)$ коэффициент масштабирования принимает значения из ряда натуральных чисел N . При необходимости уменьшить размах регистрируемого значения функции $\Phi(t)$ коэффициент принимает значения из ряда обратного натуральному ряду чисел $(1/N)$.

Такой подход к моделированию ТУБ позволяет, при необходимости, легко увеличить размах регистрируемого значения функции $\Phi(t)$ простым изменением масштаба шкалы измерения без потери предыдущих результатов анализа — достаточно увеличить коэффициент масштабирования на следующее за единицей значение.

Следует помнить, что данное преобразование увеличивает на аналогичную величину все ранее полученные нормированные значения функции $\Phi(t)$, включая абсолютное отклонение текущего значения функции $\Phi(t)$ от предыдущего ее значения. Однако это не распространяется на показатель *относительного* отклонения функции $\Phi(t)$ от ее требуемого значения, так как в этом случае коэффициент масштабирования M при текущем значении $\Phi(t)$ и при требуемом ее значении взаимосокращается.

Так как предлагаемый подход к управлению ТУБ основан на логическом (структурном) представлении функционала (2), то он позволяет:

при формировании математического описания функционала (2) использовать подход, характерный для теории управления и регулирования: функционал отражает реакцию выхода процесса $\Phi(t)$ на изменение входа процесса — текущего состояния ресурсов безопасности $x_i(t)$;

утверждать, что, поскольку значение функции ТУБ нормированное, данная функция является ограниченной (математически описывается условием (3));

при необходимости акцентирования внимания на определенном аспекте безопасности в процессе мониторинга изменения $\Phi(t)$ выполнять перегруппирование ресурсов безопасности $x_i(t)$ в различные группы* без потери ранее полученных итоговых значений $\Phi(t)$, поскольку все множество ресурсов безопасности $x_i(t)$ является конечным и остается неизменным.

При этом обязательным условием предлагаемого подхода к количественной оценке ТУБ с помощью предлагаемого функционала (2) является независимость друг от друга всех ресурсов безопасности.

Обоснуем данное утверждение на примере основных ресурсов безопасности — технологических.

Технологические ресурсы безопасности, согласно нормативным требованиям, делятся на защитные, обеспечивающие, локализирующие и управляющие системы. Указанные технологические системы, согласно проекту,

взаимосвязаны общей целью — обеспечением безопасности — и независимы друг от друга по способу своего функционирования. Соответственно, и управление такими системами осуществляется независимыми друг от друга методами, а оценка их текущего состояния выполняется по самостоятельным методикам и независимым технологическим параметрам. Следовательно, указанные ресурсы безопасности являются независимыми друг от друга.

Аналогично можно утверждать и относительно остальных ресурсов безопасности (надежностных, эксплуатационных, экономических, человеческого фактора и пр.): ресурсы направлены на общую цель — обеспечение безопасности производственного процесса — и отличны друг от друга по способам функционирования и, соответственно, управления.

Таким образом, ресурсы безопасности математически можно описать как систему независимых переменных.

Такой подход, с учетом нормирования показателей состояния ресурсов безопасности к единице, позволит в дальнейшем объединить все показатели состояния ресурсов $x_i(t)$ в единую систему координат с общим центром в n -мерном векторном пространстве, где проекция вектора на вектор равна нулю, а каждый вектор представляет собой нормированный к единице показатель текущего состояния ресурса безопасности $x_i(t)$.

С учетом сказанного, уравнение (2) можно записать в следующем виде:

$$\Phi(t) = \Phi(x_1(t), \dots, x_N(t), \mathcal{E}_1(t), \mathcal{E}_2(t), \dots, \mathcal{E}_j(t)); \quad (4)$$

$$\mathcal{E}_j(t) = \Theta_j(x_N + 1(t), \dots, x_M(t)), \quad (5)$$

где $\mathcal{E}_j(t)$ — специализированные ресурсы, сгруппированные функционалом Θ_j в j -й эшелон защиты от соответствующих ПФР; $x_N + 1(t), \dots, x_M(t)$ — ресурсы безопасности, на которых определен эшелон защиты $\mathcal{E}_j(t)$. Остальные обозначения аналогичны принятым в уравнении (2).

Очевидно, что количество ресурсов производственного цикла конечно. Соответственно, функция ТУБ $\Phi(t)$ представляет собой конечное множество ресурсов безопасности $x_i(t)$ с исчисляемым количеством их сочетаний — эшелонов защиты $\mathcal{E}_j(t)$. Исходный набор ресурсов безопасности $x_i(t)$ является базовым набором элементов функций $\Phi(t)$ и $\mathcal{E}_j(t)$ для данного типа энергоблока АЭС. Таким образом, значения функций $\Phi(t)$ и $\mathcal{E}_j(t)$ представляют собой также конечные множества, формируемые из базового множества ресурсов безопасности $x_i(t)$.

Так как ресурсы безопасности $x_i(t)$ являются независимыми друг от друга переменными, они представляют собой непересекающиеся множества, состоящие из проектных параметров и эксплуатационных характеристик энергоблока. Подробнее подход к формированию $x_i(t)$ описывается ниже (см. функционал (6)).

Как было отмечено, первой характерной особенностью такого подхода является возможность (при необходимости акцентирования внимания на том или ином факторе, влияющем на ТУБ) выделить интересующий набор ресурсов безопасности $x_i(t)$ и/или эшелонов защиты $\mathcal{E}_j(t)$ в специализированный ЭЗ путем перегруппирования базового набора проектных параметров и эксплуатационных характеристик энергоблока с помощью математического аппарата алгебры множеств. Однако следует помнить, что в рамках предлагаемого подхода к управлению ТУБ, эшелоны защиты и их элементы имеют проектно заданные функции и соответствующие им наборы параметров. Соответственно,

* В предлагаемом подходе это, как правило, самостоятельные эшелоны защиты от ПФР, но могут также рассматриваться их автономные элементы, независимые по заданным для них технологическим функциям.

интеграция (группирование) проектных параметров и эксплуатационных характеристик в специализированный ЭЗ должна быть подкреплена технологической функцией или самостоятельной ее частью, описываемой аналитической зависимостью. При этом существование зависимости должно быть доказано на всем интервале мониторинга контролируемых параметров энергоблока.

Необоснованное объединение проектных параметров и эксплуатационных характеристик в эшелон защиты ведет к необъективному представлению о текущем уровне безопасности и, как следствие, повышает риск ошибочной оценки ТУБ, в пределе приводящей к нарушению требований и условий разрешенной практической деятельности.

Второй характерной особенностью предлагаемого подхода к управлению ТУБ, выгодно отличающей его от существующей системы оценки ТУБ, является оперативное управление состоянием технологических ресурсов $x_i(t)$ на основании мониторинга соответствующих технологических параметров энергоблока, регистрируемых *проектными средствами КИПиА*.

Для управления ресурсом «проектные параметры» предусматривается оперативное управление персоналом проектными средствами КИПиА, результат которого оценивается количественной оценкой показателей текущего состояния соответствующего элемента эшелона защиты.

Для управления ресурсом «эксплуатационные процедуры» предусматривается разработка соответствующих эмпирических показателей качества соблюдения указанных процедур. При этом, как показано в [6], надзор за качеством выполнения процедур является вторым, после количественной оценки безопасности, необходимым условием предлагаемого метода оперативного управления ТУБ.

Обобщая вышеизложенное, можно утверждать, что для ресурсов безопасности оценивается готовность выполнить *заданную функцию* [9]:

для технологических ресурсов — регулирование предписываемых процедурами допустимых технологических параметров для режимов нормальной эксплуатации, нарушения нормальной эксплуатации и управления авариями;

для эксплуатационных процедур безопасности — обеспечение и упорядочение корректного выполнения указанных технологических процедур, начиная с наличия самих процедур и заканчивая соблюдением норм и правил ведения производственного процесса согласно требованиям по охране труда, включая параметры на рабочем месте;

для надежных ресурсов — соблюдение правил входного контроля, а также установленной стратегии технического обслуживания и ремонта;

для экономических и других обеспечивающих ресурсов — оценка достаточности и эффективности мероприятий по обеспечению безопасности производственного процесса, включая обеспечение необходимыми материально-техническими и административными ресурсами.

С учетом вышеизложенного, в рамках предлагаемого подхода ресурсы описываются аналитическими зависимостями, полученными исследовательским (эмпирическим) методом с использованием методологии планирования и проведения физического эксперимента. За основу построения зависимости (целевой показатель управления) первоначально предполагается взять надежный показатель, характеризующий готовность ресурсом безопасности выполнить заданную функцию.

В качестве математического описания ресурса $x_i(t)$ предлагается использовать функционал, определенный на множестве значений контролируемых параметров $a_j(t)$, характеризующих готовность i -м ресурсом $x_i(t)$ выполнить заданную функцию безопасности:

$$x_i(t) = W(a_1(t), a_2(t), a_3(t), \dots, a_j(t)), \quad (6)$$

где $x_i(t)$ — выход процесса преобразования, представляет собой текущее значение показателя готовности выполнить заданную функцию i -м ресурсом*; $a_j(t)$ — вход процесса преобразования, представляет собой набор реальных параметров и характеристик эксплуатационных процедур энергоблока, формирующих текущее значение выхода процесса преобразования $x_i(t)$; W — оператор преобразования входного набора $(a_1(t), a_2(t), a_3(t), \dots, a_j(t))$ в выход $x_i(t)$, представляет собой аналитическую зависимость, полученную исследовательским путем; t — время.

3. Шкала управления ТУБ

Как показано в разделе 2, в рамках предлагаемого подхода оперативное управление ТУБ предполагает наличие набора детерминированных и заранее установленных состояний управляемого объекта, по которым ранжируются получаемые в результате мониторинга значения функции ТУБ, иными словами — наличие детерминированной шкалы управления ТУБ энергоблока. Это означает наличие фиксированных значений функции ТУБ и соответствующих им состояний ресурсов безопасности $x_i(t)$. При этом уровень управляющего вмешательства ранжируется по располагаемым средствам для реализации вмешательства: материально-техническим, временным и людским ресурсам, обеспечивающим необходимое изменение состояния эшелона защиты $\Xi Z_i(t)$ и ресурсов безопасности $x_i(t)$. Однако прежде, чем формировать шкалу, необходимо обосновать, что предлагаемый подход обеспечивает непрерывность и однозначность функции ТУБ, поскольку последнее является условием управляемости функции.

Анализ функции ТУБ на непрерывность и однозначность. Функционалы (2)—(6) представляют собой метод формализованной математической записи функции ТУБ. Сам подход к формированию функционалов характерен для теории регулирования и управления: аппроксимирующее уравнение, моделирующее ТУБ, представляет собой математически выраженную прямую взаимосвязь между входными данными ТУБ (проектными и эксплуатационными характеристиками энергоблока) и самим значением ТУБ. Причем для управления ТУБ используется схема «по отклонению» [6], что позволяет уйти от необходимости оценки абсолютного значения самой функции ТУБ.

Отметим также, что при отсутствии управляющего или иного регулирующего вмешательства входные данные функции ТУБ подвержены во времени стохастическому изменению, так как, в основном, описываются нормальным законом распределения контролируемых проектных параметров среды — давления, температуры, расхода и т. п.

* Понимается совокупность технологических и процедурных ресурсов безопасности производственного цикла.

Соответственно, значение функции ТУБ описывается аппроксимирующими уравнениями, асимптотически приближающимися к некоторому пороговому значению, после которого можно с инженерной достоверностью (обычно 0,95) утверждать о потере готовности выполнить заданную функцию тем или иным ресурсом $x_i(t)$.

Очевидно, что указанный процесс естественного снижения степени готовности отразится на регистрируемых параметрах ресурса $a_j(t)$, контролируемых проектными КИПиА, а точнее — снижение степени готовности ресурса безопасности $x_i(t)$ выполнить заданную функцию регистрируется по ухудшению показаний соответствующего набора параметров $a_j(t)$.

Так как физические закономерности изменения контролируемых параметров $a_j(t)$ являются непрерывными функциями, то, исходя из свойства аддитивности непрерывных функций, функционал (6), описывающий математически текущее состояние ресурса безопасности $x_i(t)$, представляет собой также непрерывную функцию. Аналогично, функционал (2) определен на множестве ресурсов безопасности $x_i(t)$, а значит, представляет собой также непрерывную функцию.

Учитывая однозначность взаимосвязи текущего состояния соответствующего ресурса безопасности $x_i(t)$ с его входным набором контролируемых параметров $a_j(t)$, можно утверждать однозначность и последующих функционалов (4) и (5), областью определения которых также является указанный базовый входной набор контролируемых параметров $a_j(t)$ энергоблока.

Таким образом, в рамках предлагаемого подхода, и функция ТУБ $\Phi(t)$, и эшелоны защиты $\Xi_j(t)$, и ресурсы безопасности $x_i(t)$ математически описываются однозначными и непрерывными во времени функциями, поэтому возможно построение проектно и научно обоснованной шкалы управления ТУБ (эшелонов защиты, ресурсов безопасности), детерминированной по состояниям перечисленных аспектов безопасности.

Предлагаемый подход к формированию шкалы управления ТУБ. Предлагаемый подход основан на оценке изменения текущего уровня безопасности путем математического преобразования недетерминированного множества значений параметров энергоблока в детерминированный набор предварительно установленных целочисленных значений шкалы уровней ТУБ (метод квантования* текущих состояний).

Для формирования шкалы управления ТУБ предлагается использовать метод квантования как по уровню функции ТУБ, так и по времени. Более детально указанные методы квантования описаны на сайте кафедры «Электроэнергетические системы и сети» Московского энергетического института [10]. Исходные значения функции ТУБ определяются согласно предлагаемому подходу функционалом (2).

Текущий уровень ТУБ определяется как максимально близкий к значению функционала (2) квантовый уровень шкалы ТУБ. Оперативный контроль текущего уровня безопасности осуществляется с помощью соответствующих контрольных уровней ТУБ.

Контрольные уровни ТУБ (проектный уровень [5, п. 6.4.4]), достигнутый уровень ([5, п. 6.4.5]),

* Квантование — процедура построения чего-либо (в нашем случае — шкалы управления) с помощью дискретного набора величин, например целых чисел, в отличие от построения с помощью непрерывного набора величин, например вещественных чисел.

нормативный уровень ([5, п. 4.1.1]) представляют собой значения функции ТУБ, соответствующие состояниям энергоблока, регламентируемым нормативными требованиями к безопасности.

Выводы

Предлагаемый подход к оценке и управлению ТУБ представляет собой последовательную систему количественной оценки, начиная с оперативного управления ТУБ на уровне отрасли (на основе мониторинга проектных и эксплуатационных параметров и характеристик энергоблока) и заканчивая государственным регулированием безопасности, поскольку, согласно предлагаемому подходу:

1) любая разрешительная система моделируется функцией бинарного типа — на основе определения соответствия или несоответствия оцениваемого объекта регулирования установленному требованию по безопасности. Функция регулирования при этом принимает значения 0 (не соответствует требованиям) и 1 (соответствует требованиям);

2) методика количественной оценки безопасности строится исходя из проектных функций безопасности и дополнительных к ним функций, заданных по результатам переоценки безопасности энергоблока, а также заданных в инструкциях по управлению авариями и их последствиями. Количественная оценка ТУБ математически описывается аналитическим уравнением текущего состояния ресурсов безопасности, формируемых проектными параметрами и эксплуатационными процедурами энергоблока (см. уравнения (2)—(6));

3) непосредственное управление ТУБ осуществляется по предварительно установленной шкале детерминированных значений функции ТУБ, соответствующих состояниям энергоблока, регламентируемым нормативными требованиями к безопасности. Уровень управления определяется по соответствующим контрольным уровням ТУБ: проектному, достигнутому и нормативному ([5, п. 6.4.4, 6.4.5, 4.1.1]);

4) возможна реструктуризация функционала ТУБ $\Phi(t)$ перегруппированием ресурсов безопасности $x_i(t)$ в самостоятельные эшелоны защиты или их автономные элементы с самостоятельными технологическими функциями при необходимости акцентирования внимания на определенном аспекте безопасности без потери ранее полученных значений $\Phi(t)$.

Таким образом, предлагаемый подход закладывает основы для создания научно и проектно обоснованной системы регулирования (уравнение $\Phi(x)$) и оперативного управления ТУБ (уравнения (2)—(6)) и, одновременно, основы количественной оценки текущего состояния уровней глубокоэшелонированной защиты, что соответствует требованиям [11, п. 3.2].

Кроме того, предложенный подход к математическому описанию процесса управления безопасностью закладывает возможность интегрировать отраслевые и нормативные требования по безопасности в единую и последовательную систему управления и надзора за безопасностью.

Следовательно, предложенный в статье подход к оперативному управлению и безопасностью является элементом последовательной реализации ГП НАЭК «Энергоатом» нормативного требования повышения безопасности на основе применения научно обоснованных математических моделей безопасности осуществляемой практической деятельности [5, п. 3.2.4].

Список использованной литературы

1. ДСТУ ISO 9001:2009. Система управління якістю. Вимоги. — К. : Держстандарт України, 2009. — 26 с.
2. Закон України «Про охорону праці» // Відомості Верховної Ради України. — 1992. — № 49. — 668 с.
3. Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища» // Відомості Верховної Ради України. — 1991. — № 41. — 546 с.
4. Закон України «Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку» // Відомості Верховної Ради України. — 1995. — № 12. — 81 с.
5. НП 306.2.141. Общие положения безопасности атомных станций. — К. : ГКЯРУ, 2008. — 59 с.
6. Билей Д. В. Надзор как элемент системы управления и системы качества ISO:9001 / Д. В. Билей, С. В. Бержанский // Ядерна та радіаційна безпека. — 2013. — № 2(58). — С. 12–18.
7. Поляков К. Ю. Теория автоматического управления: Учеб. издание / К. Ю. Поляков. — С-Пб, 2008. — 80 с.
8. Егоров А. И. Основы теории управления / А. И. Егоров. — М. : Физматлит, 2004. — 504 с.
9. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення. — К. : Держстандарт України, 1995. — 92 с.
10. Квантование по уровню и по времени. [Электронный документ]. — Режим доступа: <http://esis-kgeu.ru/telmeh/96-telemeh>
11. НП 306.2.162. Вимоги до оцінки безпеки атомних станцій. — К. : ГКЯРУ, 2010. — 17 с.

References

1. State Standard of Ukraine ISO 9001:2009 (2009), Quality Management System. Requirements [DSTU ISO 9001:2009. Systema upravlinnia yakistiu. Vymohy], Kyiv, State Standard of Ukraine, 26 p. (Ukr).
2. The Law of Ukraine. On Labor Protection [Zakon Ukrainy "Pro okhoronu pratsi"], Vidomosti Verkhovnoi Rady Ukrainy, 1992, No. 49, 668 p. (Ukr).

3. The Law of Ukraine. On Environmental Protection [Zakon Ukrainy "Pro okhoronu navkolyshnioho seredovishcha"], Vidomosti Verkhovnoi Rady Ukrainy, 1991, No. 41, 546 p. (Ukr).
4. The Law of Ukraine. "On Nuclear Energy Use and Radiation Safety [Zakon Ukrainy "Pro vykorystannia yadernoi enerhii ta radiatsiinu bezpeku"], Vidomosti Verkhovnoi Rady Ukrainy, 1995, No. 12, 81 p. (Ukr).
5. NP 306.2.141. General Requirements for NPP Safety [Obschchie polozheniia bezopasnosti atomnykh stantsii], Kyiv, SNRIU, 2008, 59 p. (Rus).
6. Biley D., Berzhanskii S. (2013), "Supervision as an Element of Management System and Quality System ISO:9001" [Nadzor kak element sistemy upravleniia i sistemy kachestva ISO:9001. Yaderna ta radiatsiina bezpeka], Nuclear and Radiation Safety, No. 2(58), pp. 12–18. (Rus).
7. Poliakov K. (2008), The Theory of Automatic Control [Teoriia avtomaticheskogo upravleniia], Educational Edition, Saint Petersburg, 80 p. (Rus).
8. Yegorov A. (2004), The Basic Theory of Control [Osnovy teorii upravleniia], Moscow, Fizmatlit, 504 p. (Rus).
9. State Standard of Ukraine 2860-94. Reliability of Technical Equipment. Terms and Definitions [DSTU 2860-94. Nadiinist tekhniki. Terminy ta vyznachennia], Kyiv, State Standard of Ukraine, 1995, 92 p.
10. Level and time quantization [Kvantovaniie po urovniu i po vremeni], available at <http://esis-kgeu.ru/telmeh/96-telemeh> (Rus).
11. NP 306.2.162. Requirements for NPP Safety Assessment [Vymohy do otsinky bezpeky atomnykh stantsii], Kyiv, SNRIU, 2010, 17 p. (Ukr).

Получено 03.09.2014.