

# Регулирование ядерной и радиационной безопасности как задача системного анализа

*Регулирование ядерной и радиационной безопасности АЭС рассматривается как задача системного анализа. Приведены основные понятия системного анализа применительно к регулированию безопасности, структурные схемы систем регулирования безопасности, классификация этих систем. Описаны некоторые законы управления в системе регулирования безопасности.*

*Ключевые слова: безопасность, регулирование, системный анализ, структурная схема.*

М. О. Ястребенецкий

## Регулювання ядерної та радіаційної безпеки як задача системного аналізу

*Регулювання ядерної та радіаційної безпеки АЕС розглядається як задача системного аналізу. Наведено основні поняття системного аналізу, структурні схеми систем регулювання безпеки, класифікацію цих схем. Описані деякі закони керування в системах регулювання безпеки.*

*Ключові слова: безпека, регулювання, системний аналіз, структурна схема.*

Развитие любого научного направления имеет две основные тенденции, и регулирование ядерной и радиационной безопасности (далее — ЯРБ) не является исключением. Первая тенденция — детализация знаний о том или ином объекте исследования (в нашем случае — о регулировании ЯРБ: уточнение расчетных кодов, накопление информации о разнообразных исходных событиях и нарушениях безопасности и т. п.). Вторая тенденция — рассмотрение объекта исследования как частного случая более общего класса объектов с привлечением некоторых междисциплинарных методологий и идей. В нашем случае такой методологией может быть системный анализ.

Настоящая работа развивает некоторые представления о связи понятий «регулирование безопасности» и «автоматическое регулирование», изложенные в [1].

Основными принципами системности являются:

разбиение системы на совокупность составляющих ее элементов, каждый из которых при некоторых условиях может рассматриваться как система, а любая рассматриваемая система может быть элементом системы более высокого порядка;

наличие взаимосвязей (механических, информационных и др.) между элементами, причем связи между элементами внутри системы сильнее, чем связи с элементами вне системы;

наличие свойств, характерных только для систем в целом (свойства всей системы не являются совокупностью свойств элементов);

предназначение системы для выполнения определенной цели.

Системность издавна в той или иной степени была методом различных наук. Современная теория систем сформировалась под влиянием работ А. А. Богданова (теория организации — тектология) [2], Н. Винера («кибернетика как наука об управлении и связи в машине, животном и обществе») [3], Л. Фон Бергаланфи (общие математические закономерности сложных биологических, общественных и иных систем) [4].

Определения понятия «системный анализ», приведенные в книге одного из крупнейших советских специалистов в области применения компьютеров для решения разнообразных сложных задач акад. Н. Н. Моисеева [5] и учебнике для университетов России, написанном деканом факультета кибернетики Обнинского института атомной энергетики проф. А. В. Антоновым [6], одинаковы: «Системный анализ — это дисциплина, занимающаяся проблемами принятия решений в условиях, когда выбор альтернативы требует анализа сложной информации различной физической природы».

Из учебника для университетов Украины, написанного ректором Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт» (НТУУ КПИ) акад. НАНУ М. З. Згуровским и проф. Н. Д. Панкратовой следует такое определение: «Сьогодні можна говорити лише про формування систем аналізу як наукової методології, або сукупності методів вивчення структури, логічної організації, властивостей і характеристик поведінки та розвитку складних систем» [7].

Системный анализ автором данной статьи трактуется как совокупность понятий, процедур, методов, способов и средств для изучения и последующего решения сложных задач различной физической природы и характера.

Развитие системного анализа во многом связано с возможностями применения компьютеров для решения задач анализа и синтеза систем. В настоящее время системный анализ все шире используется для рассмотрения систем любой природы — технических, биологических, общественных и др.

Главным достоинством системного анализа является то, что он исходит из качественного анализа целостных объектов и явлений и раскрытия механизмов интеграции их частей в целое. Цель системного анализа — исследование связей и отношений с тем, чтобы изучаемые объекты стали более управляемыми, изучаемыми.

В системном анализе существуют два подхода:

формальный, использующий математический аппарат разного уровня строгости — от простых соотношений до методов исследования операций, методов теории возмущений оптимизации и др. (см., например, [5]);

понятийно-содержательный, использующий основные понятия, идеи, концепции, подходы, «полуформальное» введение в суть идей и понятий.

Именно второй подход принят в настоящей статье.

Отметим, что в Украине проводится подготовка специалистов по системному анализу. В частности, в составе НТУ КПИ имеется учебно-научный комплекс «Институт прикладного системного анализа», в который входит кафедра математических методов системного анализа. В Национальном техническом университете «Харьковский политехнический институт» имеется кафедра «Системный анализ и управление».

В то же время системный анализ как наука находится в стадии развития: «На жаль, усе що відсутнє загальноприйняте розуміння багатьох ключових понять проблематики і методології системного аналізу, зокрема понять, що відображають специфіку та інструментарій системного аналізу, особливості і властивості об'єктів системних досліджень, умови формалізації і розв'язання системних задач» [7].

К основным процедурам системного анализа можно отнести:

- формулирование целей системы;
- изучение элементов системы, составление структуры системы с анализом взаимосвязи между ее элементами;
- рассмотрение алгоритмов достижения цели;
- построение моделей системы и верификацию этих моделей.

### **Основные понятия системного анализа применительно к регулированию ЯРБ**

**Процесс управления и система управления.** Системный анализ позволяет рассматривать деятельность по управлению с двух сторон:

как процесс управления, для которого важен ответ на вопрос, что, когда и в каком порядке делать для достижения цели управления;

как систему управления, для которой важен ответ на вопрос, кому, где и чем делать для достижения цели управления.

Процесс управления отражает алгоритм деятельности, а система управления — организационную и инструментальную (включая людей) стороны управления. Оба эти понятия взаимосвязаны, поскольку процесс управления не может быть реализован вне системы. На практике име-

ет место единое и неразрывное явление — деятельность по управлению.

Регулирование ЯРБ является процессом управления. Определения термина «регулирование безопасности» нет в Законе Украины [8]. В документе МАГАТЭ [9], посвященном деятельности регулирующего органа, также нет определения термина «regulatory process», хотя это понятие является базовым. Однако из определения термина «regulatory body» следует, что регулирование безопасности осуществляется органом, назначенным правительством государства и имеющим официальные полномочия. Кроме того, там же отмечены функции регулирующего органа, которые и составляют содержание процесса регулирования и по сути аналогичны составу регулирования в Законе Украины [8] (нормирование, лицензирование, надзор).

Ниже будет рассмотрена система регулирования безопасности как система управления.

**Двойственность определения понятия «система управления».** В терминологии [10] система управления определена как система, состоящая из управляющего объекта и объекта управления. На практике такую замкнутую управляющую систему зачастую называют системой управления. Примером является широко распространенное в промышленности, включая атомную энергетику, понятие «автоматизированная система управления технологическим процессом». В зарубежной практике под «control system» понимается именно система, осуществляющая управление некоторым объектом (см. например, [11]), под «instrumentation and control system» в атомной энергетике понимается система, реализующая функции управления и мониторинга технологического процесса [12].

Для определения понятия «система регулирования ЯРБ» примем подход, соответствующий [10]: под системой регулирования ЯРБ будем понимать замкнутую систему, включающую в себя и объект управления (объект регулирования ЯРБ), и управляющий объект — систему, выполняющую регулирование безопасности.

**Управляемые объекты при регулировании ЯРБ.**

Действующая в настоящее время система стандартов МАГАТЭ по безопасности [13] определяет следующие виды объектов регулирования безопасности: ядерные установки; источники радиации; радиоактивные отходы; транспортировка радиоактивных материалов.

В Украине (см., например, [14]) объекты регулирования разделены следующим образом: действующие энергоблоки АЭС и исследовательские реакторы; энергоблоки на этапе снятия с эксплуатации; хранилища отработанного ядерного топлива, радиоактивных отходов и деятельность предприятий по обращению с радиоактивными отходами; предприятия ураноперерабатывающей промышленности; источники ионизирующего излучения и радиационных технологий; перевозка радиоактивных материалов.

Далее ограничимся рассмотрением только одного класса управляемых объектов — действующими АЭС. Все остальные перечисленные объекты приведены только затем, чтобы отметить, что системный анализ может быть использован и для них.

При регулировании ЯРБ применительно к АЭС объектами управления могут быть: один энергоблок; группа однотипных энергоблоков одной АЭС; одна АЭС; все однотипные энергоблоки всех АЭС; все АЭС безотносительно к типам энергоблоков.

Задачи регулирования различных указанных выше объектов тесно взаимосвязаны.

**Управляющая система.** В системе регулирования ЯРБ управляющей системой является регулирующий орган. Здесь ограничимся одним регулирующим органом (Государственным комитетом ядерного регулирования Украины).

Декомпозиция управляющей системы на элементы также определяется решаемыми задачами. Наиболее очевидна декомпозиция на функциональные подсистемы (элементы), осуществляющие нормирование, лицензирование, надзор. В управляющей системе могут быть выделены элементы, реализующие управление АЭС в случае аварийных ситуаций (информационно-кризисный центр).

**Внешняя среда системы регулирования ЯРБ.** Конвенция о ядерной безопасности [15] требует независимости регулирующего органа от организаций, связанных с производством или использованием ядерной энергии. Документ МАГАТЭ [9] рассматривает следующие аспекты независимости регулирующего органа: политические; законодательные; финансовые; аспекты компетенции; аспекты информации для общественности; международные. Однако независимость отнюдь не является синонимом отсутствия взаимосвязи. Системный анализ любой системы предусматривает выделение компонентов ее внешней среды, влияющих на функционирование этой системы.

Внешней средой замкнутой системы регулирования ЯРБ являются: источники внешних природных воздействий на АЭС (землетрясения, удары молний, затопления и т. п.); потребители электроэнергии и электрические сети, связывающие потребителей с АЭС; организации — поставщики услуг (наладка, монтаж, ремонт и пр.) и оборудования на АЭС; вышестоящие по отношению к АЭС организации (энергочемпиания НАЭК «Энергоатом», Минтопэнерго); вышестоящие по отношению к регулирующему органу организации (Кабинет Министров и др.).

**Вектор состояния управляемого объекта.** Информация о безопасности АЭС, которая поступает в регулирующий орган, составляет вектор состояния управляемого объекта.

В последние годы в ряде стран активно разрабатывается комплексный набор показателей (индикаторов) эксплуатационной безопасности (performance indicators). Обзор подходов к разработке показателей безопасности в США, Канаде, Финляндии, Испании и рекомендации международных организаций — МАГАТЭ, ЕОСД/NEA — приведен в [16].

При рассмотрении системы регулирования безопасности как системы управления существенна периодичность поступления информации. По этому принципу входящую информацию можно классифицировать как:

поступающую в регулирующий орган практически сразу же после возникновения того или иного события (например, предварительное уведомление о нарушении безопасности);

поступающую в регулирующий орган через некоторый интервал времени после возникновения события (например, отчет о расследовании нарушений, поступающий не более чем через 15 суток с момента нарушения);

периодически поступающую (ежеквартально, по полугодиям, ежегодно).

Примером периодически поступающей информации могут служить ежегодные отчеты АЭС по оценке текущего уровня эксплуатационной безопасности, содержащие сведения о нарушениях характеристик технологического оборудования, негерметичности ТВС, разгерметизации оборудования и трубопроводов 1-го контура, неготовности

систем безопасности, несанкционированной работе систем безопасности, срабатываниях АЗ, показателях состояния оборудования, выработке ресурса по времени и по циклам и др.

**Вектор управления.** Вектор управления включает в себя управляющие воздействия. Ими могут быть: выдача лицензий и временных разрешений на эксплуатацию действующих энергоблоков; выпуск утвержденных заключений государственной экспертизы, согласованных (утвержденных) технических решений АЭС и других документов; издание приказов, распоряжений, предписаний, составление писем, справок, отчетов, прохождение согласований и др.

Управляющие воздействия в зависимости от периодичности поступления к управляемому объекту можно классифицировать как:

воздействия, вырабатываемые после возникновения некоторого события и требующие скорейшего решения (например, после аварии или существенного нарушения безопасности); такое воздействие может распространяться на различные объекты из перечисленных выше (энергоблок, на котором произошла авария или нарушение, АЭС в целом, их совокупность и т. п.);

воздействия, вырабатываемые на основе информации, полученной за определенное время по реализации дискретного случайного процесса возникновения определенных событий или по реализации непрерывного случайного процесса изменения тех или иных параметров.

Далее второй вид воздействий можно классифицировать как воздействия, вырабатываемые:

в фиксированные моменты времени (например, ежегодно);

в случайные моменты времени по мере обработки некоторой информации (например, NRC рассылает письма лицензиатам раз в полгода).

Повторим, что здесь не рассматриваются воздействия, вырабатываемые при кризисном реагировании.

В общем случае воздействия управляющей системы являются дискретными и многообразными (многошаговыми).

**Цель системы.** Цель системы регулирования безопасности для АЭС следует из определения безопасности АЭС, приведенного в [19]: обеспечение защиты персонала, населения и окружающей природной среды от недопустимого радиационного воздействия при вводе в эксплуатацию, эксплуатации и снятии с эксплуатации АЭС.

Целью управления в любой системе управления является достижение некоторого конечного состояния управляемого объекта. Исходя из этого, целью системы регулирования безопасности можно считать функционирование АЭС с характеристиками безопасности, соответствующими заданным.

### Структурные схемы системы регулирования безопасности

Графическое представление системы в виде структурной схемы (причем не одной) является общепринятым средством исследования систем. Выбор структурной схемы определяется целями исследования, необходимой степенью подробности и принимаемыми допущениями. Всё это относится и к структурным схемам системы регулирования безопасности АЭС.

Разделение АЭС как системы на элементы определяется решаемыми задачами. Помимо энергоблоков, элементами

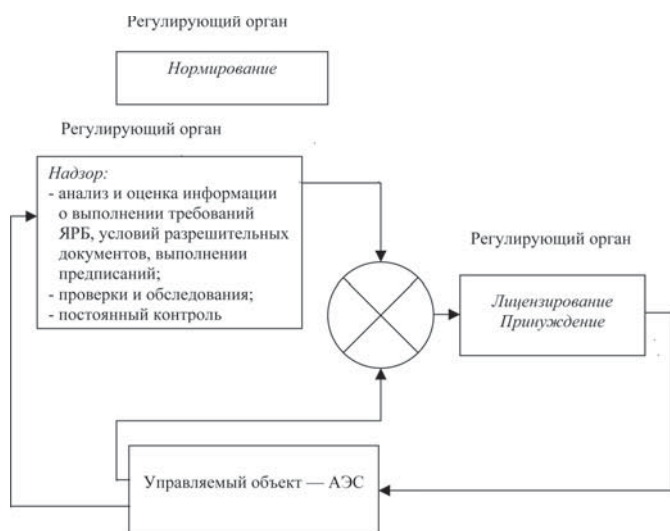


Рис. 1. Структурная схема системы регулирования безопасности АЭС

регулировании безопасности энергоблока могут быть: технологическое оборудование; информационные и управляющие системы (ИУС); оперативный персонал АЭС; административный персонал, через который передаются воздействия от регулирующего органа к АЭС и информация регулирующему органу; ремонтный персонал АЭС; аварийный центр АЭС.

Структурная схема системы регулирования безопасности зависит: 1) от объекта управления (см. выше); 2) от того, рассматриваются ли элементы, реализующие управление АЭС в случае аварийных ситуаций (информационно-кризисный центр регулирующего органа и аварийный центр АЭС); 3) рассматриваются ли вышестоящие организации как по отношению к АЭС, так и по отношению к регулирующему органу; 4) от детальности рассмотрения (например, выделены ли как отдельные элементы административный, оперативный и ремонтный персонал, проведено ли разделение оборудования АЭС на элементы и т. п.); 5) от рассматриваемой стадии жизненного цикла АЭС: эксплуатация (что подразумевалась выше), сооружение, вывод из эксплуатации.

В [1] приведена развернутая схема системы регулирования безопасности действующей АЭС, где выделены технологическое оборудование и виды персонала, вышестоящие организации и элементы, реализующие управление АЭС при аварийных ситуациях. Упрощенная структурная схема системы регулирования безопасности АЭС, соответствующая функциональной декомпозиции управляющей системы — регулирующего органа согласно Закону Украины [8], дана на рис. 1. На этой схеме не показаны ни вышестоящие организации, ни элементы, реализующие управление в случае аварийных ситуаций.

Регулирующий орган, выполняющий функцию нормирования (установление нормативных критериев безопасности и требований, которые определяют условия использования АЭС), является задающим устройством в управляющей системе. В Украине (и в иных странах) имеется иерархическая структура законодательных и нормативных документов, включающая как нормативные акты, нормы и правила, разработанные регулирующим органом, так и государственные стандарты, межгосударственные стандарты и др. (см. [18]).

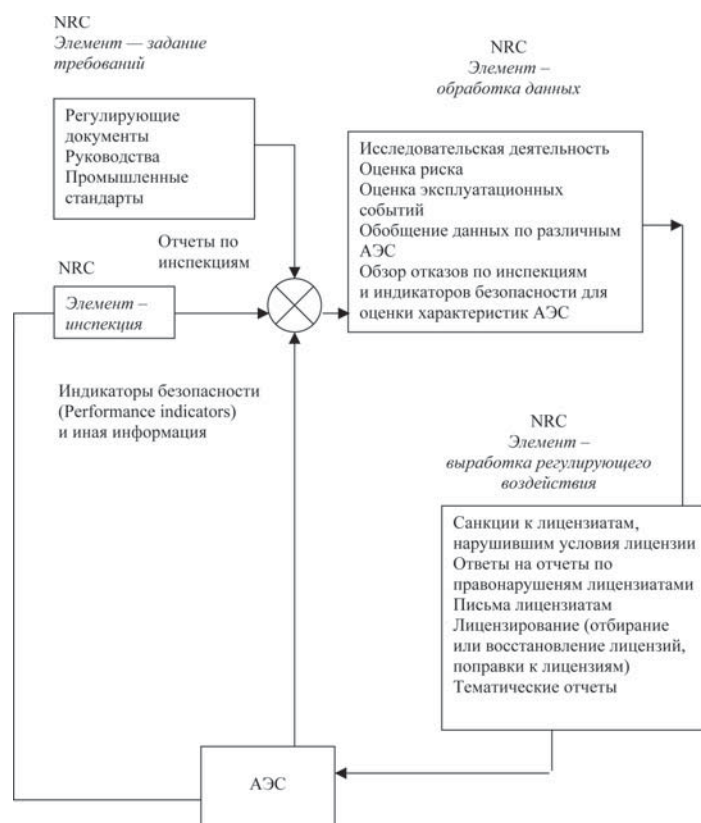


Рис. 2. Структурная схема системы регулирования безопасности, соответствующая практике NRC

Для реализации функций лицензирования и принуждения информация поступает как непосредственно от управляемого объекта — АЭС, так и от элемента «Регулирующий орган», функция «Надзор».

Знаком ⊗ обозначено (как это обычно делается в структурных схемах систем управления) сопоставление задаваемых и наблюдаемых величин.

Структурная схема системы регулирования ЯРБ, соответствующая принятой в US NRC и описанной на сайте NRC [19], а также в статье [16], дана на рис. 2. На этой схеме в управляющей системе нами выделены четыре элемента: задание требований (задающее устройство); обработка данных; выработка регулирующего воздействия; инспекция. В первых трех элементах приведены их функции.

### Классификация системы регулирования безопасности АЭС согласно системному анализу

По наличию взаимосвязей с внешней средой система регулирования ядерной и радиационной безопасности АЭС (далее — СРБ), как, впрочем, практически все системы управления, относится к *открытым* системам.

В СРБ (и в большинстве систем управления) имеется как прямая связь — от управляющей системы к объекту управления, так и обратная связь — от объекта управления к управляющей системе. По этому принципу СРБ относится к *замкнутым* системам.

По сложности СРБ относится к *большим* системам. Особенности, характеризующими СРБ как большую систему, являются пространственная распределенность,

особо большие размеры, сложная структура, циркуляция больших информационных потоков.

Рассмотрению классификации по степени определенности описания и возможности предсказания будущих состояний СРБ предшествовало рассмотрение изменений характеристик объекта действующей АЭС. Эти изменения, существенные с точки зрения безопасности, классифицируем:

а) по причинам:

изменение состава и схем оборудования (введение новых систем, например систем представления параметров безопасности или систем управления аварией при большой течи из 1-го контура; замена оборудования на новое, как правило, с улучшенными характеристиками);

изменение свойств действующего оборудования (в первую очередь, из-за старения);

отказы оборудования и ошибки персонала;

б) по характеру изменения во времени:

детерминированное, когда заранее известны моменты изменения состава и схем оборудования или когда процесс старения носит заведомо предвиденный характер;

стохастическое, когда поведение управляемого объекта не определено во времени и невозможно предсказать моменты изменения состояний (например, из-за отказов оборудования или ошибок персонала).

Отсюда следует, что СРБ по степени определенности относится к *стохастическим* системам, поведение которых может быть описано случайными величинами и функциями с заданными или предполагаемыми законами распределения. Возможно предсказание поведения системы, которое имеет вероятностный характер. Источниками стохастичности являются также воздействия внешней среды (землетрясения, падения аэропланов, террористические акты и др.).

Широкое применение вероятностных методов анализа безопасности АЭС является подтверждением утверждения об отнесении СРБ к стохастическим системам. Необходимо, впрочем, отметить, что в некоторых случаях СРБ следует отнести к *нечетким* системам, описываемым величинами, закон формирования которых неизвестен, а задан, как правило, только диапазон их изменения.

В зависимости от особенностей управления, СРБ относится к *организационным (общественным)* системам (в отличие от СРБ, автоматический регулятор относится к техническим системам, АСУТП энергоблока — к эргатическим системам, поскольку в состав АСУТП включен оперативный персонал). Организационные системы включают взаимодействующие коллективы и, если это требуется, технические и эргатические элементы.

Отметим некоторые особенности организационных систем, в том числе СРБ, при управлении:

цели управления организационной системой могут не совпадать с целями отдельных элементов. Так, цель СРБ — обеспечение безопасности — не всегда совпадает с целью АЭС (выработка электроэнергии и получение прибыли от ее продажи). Следование культуре безопасности\* позволяет разрешать это противоречие;

человек в организационных системах является активным элементом, что может как положительно, так и отрицательно влиять на достижение цели;

\* Отметим, что в общем понятии «культура безопасности» [17] предлагается и более частное понятие «культура обеспечения безопасности» [20], относящееся к процессу регулирования.

существуют ограничения прав личностей и коллективов (можно только то, что разрешено);

действует приказная форма управления, которая характеризуется соблюдением следующих правил: 1) исключением искажения или сокрытия информации членами организации в личных целях; 2) обеспечением всеми членами организации безусловного выполнения поставленных задач.

Организации, в которых выполняются оба эти условия, получили название организаций с *правильным механизмом управления* (в отличие от механизма открытого управления, где могут иметь место рыночные отношения).

Поскольку человеку в организационной системе управления присуща активность в целенаправленной деятельности (как положительной, что содействует достижению целей системы, так и отрицательной — противоречащей цели), то организационные системы, включая СР, можно отнести к категории *активных*.

В отличие от автоматического регулирования, которое имеет место в технических системах, в том числе на энергоблоках АЭС, в СРБ выполняется *неавтоматическое* ручное регулирование (управление) с некоторыми элементами автоматизации для поддержки принимаемых решений.

По числу вводимых в рассмотрение составляющих вектора состояния управляемого объекта и вектора управления, СРБ относится к категории *многомерных* систем. Многомерность проявляется в том, что связь управляющих воздействий и наблюдаемых величин трудно определить: одно и то же воздействие, например, влияет на множество наблюдаемых величин, а на одну наблюдаемую величину влияет множество воздействий. Впрочем, могут быть некоторые воздействия, которые приводят к одному скалярному (а не векторному) управляющему воздействию. Примером могут служить входная информация о нарушениях безопасности по одной определенной причине и управляющее воздействие в виде решения о внедрении мероприятия, устраняющего подобное нарушение.

По существенности описания переходных процессов СРБ относится к *динамическим* системам. Хотя скорость изменения вектора состояния управляемого объекта при регулировании безопасности не соизмерима со скоростью изменения параметров энергоблока при его автоматическом регулировании и, тем более, при аварийной защите, СРБ является динамической системой. Это определяется запаздыванием как в отношении выработки регулируемых воздействий вследствие возмущений, так и запаздыванием в реакции объекта управления на регулирующие воздействия.

По юридическому статусу процесс регулирования безопасности АЭС является *государственным*. Этим данный процесс отличается от ведомственных действий АЭС и энергокомпании по обеспечению безопасности, когда термин «регулирование безопасности» не используется (например, используется термин «надзор за безопасностью»). Государственный статус, в частности, означает, что управляющие воздействия поступают от государственной организации — регулирующего органа, и эти воздействия установлены соответствующими законодательными или регулирующими документами. Отметим, что и в иных отраслях деятельности, связанных с обеспечением безопасности объектов повышенной опасности, понятие «регулирование», как правило, подразумевается как государственное (см., например, [21]).

### Закон управления

Закон управления — это правила достижения целей управления. Упрощенная схема СРБ дана на рис. 3.

Обозначим через  $Y(t)$  вектор состояния (наблюдения), поступающий к управляющей системе (УС);  $X_{\text{зад}}(t)$  — задание (в общем случае, изменяющееся во времени);  $Z(t)$  — внешнее воздействие на объект управления (ОУ);  $U(t)$  — вектор управления, т. е. решение регулирующего органа для выполнения поставленной цели — обеспечения безопасности АЭС.

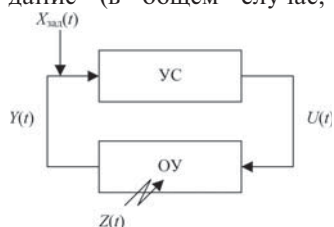


Рис. 3. Упрощенная схема системы регулирования безопасности

В общем случае изменение управляющих воздействий во времени описывается соотношением

$$U(t) = L[Y(t), Z(t), X_{\text{зад}}(t)], \quad (1)$$

где  $L$  — некоторый оператор; свойства этого оператора могут предполагать, что управляющее воздействие  $U(t)$  в момент  $t$  зависит также от воздействий на интервале времени, предшествующем  $t$  [например, если воздействия вырабатываются в дискретные моменты времени  $t_1, t_2, \dots, t_i$ , то  $U(t_i)$  зависит от  $U(t_{i-1}), U(t_{i-2})$  и т. д.].

Соотношение (1) может быть задано не только (и не сколько) с помощью аналитических формул, но и при помощи таблиц.

В настоящее время усилия регулирующих органов ряда стран направлены на формализацию законов управления. Тем самым, понятие «регулирование безопасности» начинает приближаться к понятию «автоматическое регулирование технических объектов», широко используемому уже больше ста лет.

Для такой формализации вектор состояния представляется в виде набора показателей безопасности по различным направлениям [16]. Например, согласно предложенному в US NRC «Reactor Oversight Process (ROP)» компонентами вектора наблюдения  $Y(t)$  являются индикаторы безопасности, весь диапазон изменения которых разбит на четыре цветные зоны. В зависимости от цвета индикаторов, их распределения по различным сферам — Strategic Performance Area (безопасность реактора, радиационная безопасность, физическая защита), а также от количества индикаторов каждого цвета вырабатываются управляющие воздействия  $U(t)$ , составляющие алгоритм управления — матрицу действий (Action Matrix) [16], [22]. Эти воздействия могут быть как на региональном уровне, так и на уровне центрального офиса US NRC.

Рассмотрим некоторые частные случаи выражения (1).

1. Управляющие воздействия  $U(t_i)$  вырабатываются в детерминированные моменты времени  $t_1, t_2, \dots, t_i$ . Информация о состоянии управляемого объекта (энергоблока, АЭС)  $Y(t)$  определяется через постоянные интервалы времени  $\Delta\theta$  и поступает к управляющей системе в детерминированные моменты времени  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_i$ , причем для всех  $i$

$$t_i - \theta_i = \tau, \quad (2)$$

где  $\tau$  — продолжительность времени между получением информации и выработкой управляющего воздействия  $U(t_i)$ .

Тогда управляющее воздействие в предположении неизменности задания  $X_{\text{зад}}(t)$  и внешних воздействий  $Z(t)$

$$U(t_i) = \Phi_{\theta_{i-1}}^{\theta_i} [Y(t), U(t_{i-1}), i = 1, 2, \dots], \quad (3)$$

где  $\Phi$  — некоторый функционал, определяемый значением  $Y(t)$  на интервале  $(\theta_{i-1}, \theta_i)$  (например, индикаторами безопасности) и зависящий от некоторого числа предыдущих управляющих воздействий  $U(t_j)$ . Если последняя зависимость отсутствует, то

$$U(t_i) = \Psi_{\theta_{i-1}}^{\theta_i} [Y(t)]. \quad (4)$$

2. Управляющие воздействия  $U(t)$  вырабатываются в некоторый случайный момент времени  $t$  по результатам наблюдения на некотором интервале времени  $(\theta - \eta, \theta)$  длительностью  $\eta$ , не определенном заранее:

$$U(t) = \Psi_{\theta - \eta}^{\theta} [Y(t)], \quad (5)$$

где  $\Psi$  — некоторый функционал, определяемый значениями  $Y(t)$  на интервале  $(\theta - \eta, \theta)$ . Как и в соотношении (2),  $t$  — время выработки управляющего воздействия,  $\theta$  — окончание интервала наблюдения:  $t - \theta = \tau$ .

Указанный алгоритм, например, имеет место при выработке воздействия по результатам однотипных нарушений в работе АЭС  $Y_i$ , имевших место за некоторое время  $\eta$ . В этом случае

$$U(t) = E^\eta [Y_1(\theta - \eta), \dots, Y_K(0)], \quad (6)$$

где  $E^\eta$  — некоторый функционал, определяемый набором нескольких значений  $Y$  на интервале  $(\theta - \eta, \theta)$ ;  $K$  — количество однотипных нарушений, после наступления которых вырабатываются управляющие воздействия.

Такая ситуация имела, в частности, место с конца 2007 до середины 2008 г. на АЭС Украины, когда произошло несколько нарушений в работе из-за перехода энергоблока в режим ускоренной разгрузки по сигналу периода после модернизации аппаратуры контроля нейтронного потока АКНП-И [23]. Управляющим воздействием после этих нарушений было согласование технического решения о внесении изменений в алгоритм СУЗ.

3. Управляющее воздействие  $U$  вырабатывается непосредственно после входного воздействия — нарушения  $Y(t)$ :

$$U(t) = f[Y(t)], \quad (7)$$

где  $f$  — некоторая функция, определяемая видом нарушения  $Y(t)$ .

Задержкой  $\tau$  между возникновением нарушения  $Y(t)$  и выработкой управляющего воздействия  $U(t)$  в этом случае, как правило, можно пренебречь.

Вариант 3 в принципе является частным случаем варианта 2 при количестве нарушений  $K = 1$  и замене функционала  $E$  функцией  $f$ .

Такая ситуация, например, имела место 22.09.09 после нарушения целостности 1-го контура реакторной установки энергоблока № 3 Ровенской АЭС. 23.09.09 РАЭС направила в регулирующий орган предварительное предупреждение. Уже 25.09.09 было выдано требование регулирующего органа (дополнительные требования были выданы 19.11.09 после расследований и дорасследований).

4. Управляющее воздействие вырабатывается в виде согласования входного воздействия  $Y(\theta)$  — некоторого документа АЭС, касающегося, например, изменения проекта энергоблока, относящегося к важным для безопасности системам и элементам, или разрешения на пуск энергоблока.

Пусть  $\theta$  — момент поступления документа в управляющую систему. Тогда управляющее воздействие (согласование, несогласование документа или согласование при соблюдении некоторых условий)

$$U(t) = \varphi[Y(\theta)],$$

где  $\varphi$  — некоторая функция;  $\tau = t - \theta$  — время, требуемое для проведения государственной экспертизы документа АЭС и для оформления соответствующих решений.

Отметим, что общее количество экспертиз, выполненных ГНТЦ ЯРБ в 2008 г. — 380, в 2009 г. — 390, из них более 90 % относились к АЭС.

### Выводы

Формализация задачи регулирования ядерной и радиационной безопасности в последние годы стала в центре внимания регулирующих органов различных стран.

Применение системного подхода может способствовать не столько решению, сколько более четкой постановке указанной задачи.

Автор благодарит д. т. н., проф. Л. М. Любчика и д. т. н. А. В. Носовского за замечания, способствующие улучшению статьи.

### Список литературы

1. Ястребенецкий М. А., Васильченко В. Н. Регулирование безопасности и автоматическое регулирование // Ядерная та радіаційна безпека. — 2008. — № 4. — С. 51–57.
2. Богданов А. А. Всеобщая организационная наука (тектология). — В 3-х т. — М., 1905–1924. — Т. 3.
3. Винер Н. Кибернетика. — М.: Сов. радио, 1968.
4. Bertalanffy L. An Outline of General System Theory // British J. For Phil. of Sci. — 1950. — V. 1. — № 2. — P. 134–165.

5. Мусеев Н. Н. Математические задачи системного анализа. — М.: Наука, 1981. — 488 с.

6. Антонов А. В. Системный анализ. — М.: Высш. шк., 2006. — 454 с.

7. Згуровский М. З., Панкратова Н. Д. Основы системного анализа. — К.: Видавнична група, 2007. — 544 с.

8. Закон Украины «Про использование ядерной энергии и радиационную безопасность» № 39/35 ВР от 08.02.95.

9. IAEA GS-G-1.1. Organization and Staffing of the Regulatory Body for Nuclear Facilities. — Vienna: IAEA, 2002.

10. Теория управления. Терминология // Сб. рекомендуемых терминов. — М.: Наука, 1988. — Вып. 107.

11. Chuley J. C. Reliability in Instrumentation and Control. — Butterworth, Heinemann, 1992. — 155 p.

12. IEC 6153. Nuclear power plants — Instrumentation and Control for systems important to safety — General requirements for systems. — 2001.

13. www-ns.iaea.org/standards.

14. Доклад о состоянии ядерной и радиационной безопасности в Украине в 2008 г. / Гос. комитет ядерного регулирования Украины. — К., 2009. — 47 с.

15. Convention on Nuclear Safety, Legal Series No.16. — Vienna: IAEA, 1994.

16. Лігоцький О. І. Аналіз міжнародних підходів до розробки систем показників безпеки / О. І. Лігоцький, А. В. Носовський, І. О. Чемерис // Ядерна та радіаційна безпека. — 2009. — № 4. — С. 36–41.

17. НП 306.2.141–2008. Общие положения безопасности атомных станций. — К., 2008.

18. Носовский А. В. Введение в безопасность ядерных технологий / А. В. Носовский, В. Н. Васильченко, А. А. Павленко и др. — К. Техніка, 2006. — 357 с. — (Серия «Безопасность атомных станций»).

19. www.nrc.gov.

20. Алтеев А. С. Аспекты «культуры безопасности» и деятельность, связанная с регулированием безопасности ОИЯИ // Ядерные измерительно-информационные технологии. — 2008. — № 3 (27). — С. 61–65.

21. Закон України «Про об'єкти підвищеної небезпеки» № 2 245-III, 18.01.2001.

22. Букринский А. М. Атомный надзор в США (основные черты и особенности) // Ядерная и радиационная безопасность. — М., 2009. — № 1. — С. 49–64.

22. Овдиенко Ю. Н. О срабатывании аварийной защиты по периоду реактора в режиме ускоренной разгрузки блока с ВВЭР-1000 / Ю. Н. Овдиенко, А. В. Кучин, В. А. Халимончук // Ядерная та радіаційна безпека. — 2008. — № 4. — С. 15–24.

Надійшла до редакції 26.05.2010.