

К IV Международной научно-технической конференции «Информационные и управляющие системы АЭС: аспекты безопасности»

УДК 621.039.058

Государственный научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности

М. А. Ястребенецкий,
В. Н. Васильченко

Регулирование безопасности и автоматическое регулирование

Рассмотрена связь общепринятых понятий «регулирование безопасности» и «автоматическое регулирование». Приведена общая схема регулирования ядерной и радиационной безопасности АЭС, включающая в себя на нижнем уровне контур автоматического регулирования технологическим процессом и на верхнем уровне — контур регулирования безопасности. Дано описание контура регулирования безопасности в терминах теории управления.

М. О. Ястребенецкий, В. М. Васильченко

Регулювання безпеки й автоматичне регулювання

Розглянуто зв'язок загальноприйнятих понять «регулювання безпеки» і «автоматичне регулювання». Наведено загальну схему регулювання ядерної та радіаційної безпеки АЕС, що включає в себе на нижньому рівні контур автоматичного регулювання технологічним процесом і на верхньому рівні — контур регулювання безпеки. Дано опис контуру регулювання безпеки в термінах теорії керування.

Трудовая и научная деятельность обоих авторов всегда была связана со словами «регулирование» и «регулятор». Темой кандидатской диссертации М. А. Ястребенецкого была динамика одного класса автоматических регуляторов, что позже нашло отражение в монографии «Промышленные автоматические регуляторы» [1]. Затем последовал анализ надежности автоматических регуляторов, когда впервые были получены количественные показатели эксплуатационной надежности регуляторов энергоблоков тепловых электростанций (см., например, [2] и [3]).

В. Н. Васильченко на Чернобыльской АЭС (начиная с должности обходчика турбинного цеха и заканчивая должностью главного инженера) занимался эксплуатацией автоматических регуляторов.

В последние годы оба автора решают разнообразные вопросы обеспечения ядерной и радиационной безопасности под эгидой Государственного комитета ядерного регулирования Украины.

Естественно, перед авторами возник вопрос: что общего и что различного в понятиях *регулирования* в их предыдущей и настоящей деятельности?

Терминология

В толковом словаре Д. Н. Ушакова [4] *регулировать* означает «упорядочить, направить что-нибудь, воздействовать на что-нибудь с целью внести порядок, правильность, систему в движение, деятельность или развитие какого-нибудь явления», а *регулятор* — «то, что служит для регулирования, упорядочивания чего-нибудь».

Термины «регулирование» и «регулятор» уже много лет используются в технике. Еще в 30–40-х годах XIX века теория *автоматического регулирования* стала формироваться как самостоятельная научная дисциплина (вспомним центробежный регулятор Д. Уатта), которая в последние десятилетия была обобщена и преобразована в теорию *автоматического управления*. *Управление* состоит в том, чтобы, воздействуя на управляемый объект, изменять протекающие в нем процессы для достижения цели управления. *Регулирование* — это частный случай управления, цель которого заключается в обеспечении близости одного или нескольких координат объекта управления их заданным значениям.

В отличие от теории автоматического регулирования, где, как правило, рассматриваются технические объекты (в частности оборудование электростанций), в теории управления рассматриваются объекты различной физической природы (например, биологические системы [5], системы управления производством, управление войсками и оружием [6]). Кроме того, в теории управления решаются задачи не только стабилизации режимов, но и их желаемого изменения.

Термин «регулирование» применительно к деятельности и названиям организаций, реализующих государственную политику в области обеспечения безопасности ядерных установок, в настоящее время общепринят. Этот термин использован в «Конвенции о ядерной безопасности» [7], ратифицированной парламентами ряда стран, включая Украину, принят законодательствами всех стран, где имеются АЭС (например, Украины [8], России [9]). В США государственную политику реализует Комиссия ядерного регулирования (Nuclear Regulatory Commission), в Украине — Государственный комитет ядерного регулирования Украины. Общим названием для таких организаций является, согласно [7], регу-

лирующий орган (Regulatory Body), иногда используются названия Regulatory Authority или просто Regulator.

Формального определения понятия «регулирование безопасности при использовании ядерной энергии» нет в законах Украины [8] или России [9]: есть цель этого регулирования — обеспечение безопасности людей, окружающей природной среды, ядерных установок и виды деятельности, составляющие регулирование (нормирование, лицензирование, надзор).

Схема регулирования ядерной и радиационной безопасности

В качестве примера рассмотрим схему регулирования ядерной и радиационной безопасности применительно к АЭС Украины. Отличия от аналогичных схем применительно к иным странам (например, России) имеют место, в основном, в верхней части схемы, не включающей АЭС. Вне АЭС выделены следующие элементы:

руководство государства (президент, Кабинет Министров, парламент);

Министерство топлива и энергетики (Минтопэнерго); энергокомпания (в Украине — Национальная атомная энергетическая компания «Энергоатом», являющаяся эксплуатирующей организацией, а АЭС — обособленные подразделения эксплуатирующей организации);

регулирующий орган*. Органами государственного регулирования ядерной и радиационной безопасности являются Государственный комитет ядерного регулирования Украины, Министерство здравоохранения Украины и другие органы государственной исполнительной власти согласно с законодательством. В настоящей статье ограничимся Государственным комитетом ядерного регулирования как регулирующим органом. Этот комитет не зависит от иных органов исполнительной власти (в частности, от Минтопэнерго и энергокомпаний). Регулирующий орган имеет в своем составе кризисный (аварийный) центр, предназначенный для выработки рекомендаций персоналу АЭС при аварийных ситуациях и авариях;

внешняя окружающая среда АЭС, воздействия которой (землетрясения, наводнения, диверсии, падение самолетов и т. п.) могут быть причиной нарушения безопасности;

потребители электроэнергии.

Внутри АЭС выделены следующие элементы:

технологическое оборудование АЭС;

информационные и управляющие системы (ИУС) АЭС;

административный персонал, выполняющий распоряжения энергокомпании и регулирующего органа и передающий эти распоряжения оперативному и ремонтному персоналу;

аварийный центр АЭС (другие названия — центр ликвидации аварии, центр технической поддержки);

оперативный персонал АЭС, осуществляющий управление энергоблоком;

*Приведем определение понятия «регулирующий орган» из документа МАГАТЭ GS-G.1.1 [11]: «Regulatory body an authority or a system of a State as having legal authority for conducting the regulatory process, including issuing authorizations, and thereby regulating nuclear, radiation, radioactive waste and transport safety» («Регулирующий орган — государственная структура или система, имеющая узаконенную власть для проведения регулирующего процесса, включая выдачу разрешений для регулирования ядерной, радиационной, транспортной безопасности и безопасности радиоактивных отходов»).

Согласно Конвенции о ядерной безопасности [15], «Регулирующий орган означает для каждой Договаривающейся стороны любой орган или органы, наделенные юридическими полномочиями этой Договаривающейся стороны выдавать лицензии и регулировать деятельность по выбору площадки, проектированию, сооружению, вводу в эксплуатацию, эксплуатации или снятию с эксплуатации ядерных установок».

ремонтный персонал АЭС, выполняющий техническое обслуживание и восстановление после отказов как технологического оборудования, так и ИУС;

аварийный центр АЭС (другие названия — центр ликвидации аварии, центр технической поддержки).

Схема на рис. 1 является упрощенной — на ней даны только наиболее существенные элементы и не показано разделение АЭС на отдельные энергоблоки и общестанционное оборудование.

Нумерация связей на рис. 1 дана в табл. 1.

Штрихом на рис. 1 выделены связи, действующие только при аварийных ситуациях и авариях в случае оперативной поддержки деятельности оперативного персонала со стороны аварийного центра АЭС и регулирующего органа.

Рис. 1 преобразуем в два замкнутых контура управления.

На нижнем уровне имеет место контур управления (автоматического или автоматизированного) технологическим процессом выработки электроэнергии. Такой контур (для простоты — контур автоматического регулирования) показан на рис. 2. Управляемым объектом является технологическое оборудование энергоблока, управляющей системой — информационные и управляющие системы. Воздействия на управляемый объект (связь 2) осуществляются с помощью регулирующих стержней, заслонок, задвижек, включением/отключением механизмов и т. п.**

Функции персонала на этой схеме ограничены задающими воздействиями от оперативного персонала (связь 5), на который, в свою очередь, поступают задающие воздействия от административного персонала (связь 14).

Наблюдаемые величины служат значениями технологических параметров энергоблоков: обратная связь в этом контуре реализована от технологического оборудования к ИУС (связь 1).

В этом контуре источниками нарушений безопасности могут быть:

отказы технологического оборудования;

неправильные воздействия ИУС на технологическое оборудование;

неправильные воздействия оперативного персонала АЭС на ИУС;

воздействия внешней окружающей среды на технологическое оборудование и на ИУС.

Контур управления технологическим оборудованием в АЭС рассмотрены во многих учебниках, монографиях и статьях (см., например, [11], [12]). Далее на таких контурах останавливаться не будем и перейдем к находящемуся на верхнем уровне иерархии контуру регулирования безопасности.

Контур регулирования безопасности

Контур регулирования безопасности представлен на рис. 3. Проведем описание этого контура в терминах теории управления.

Управляемый объект. Следуя рис. 1, управляемым объектом является атомная станция, включая:

** В практике разработки, проектирования и эксплуатации автоматических регуляторов в разных отраслях промышленности используется термин «регулирующий орган», под которым понимается устройство, непосредственно осуществляющее при регулировании изменение количества вещества или энергии. Примерами таких устройств являются поворотная дроссельная заслонка, регулирующий клапан. Именно это определение регулирующего органа в течение многих лет используется в литературе по промышленной автоматике (см., например, [13]). Очевиден совершенно различный смысл одного термина в настоящей и предыдущей сносках.

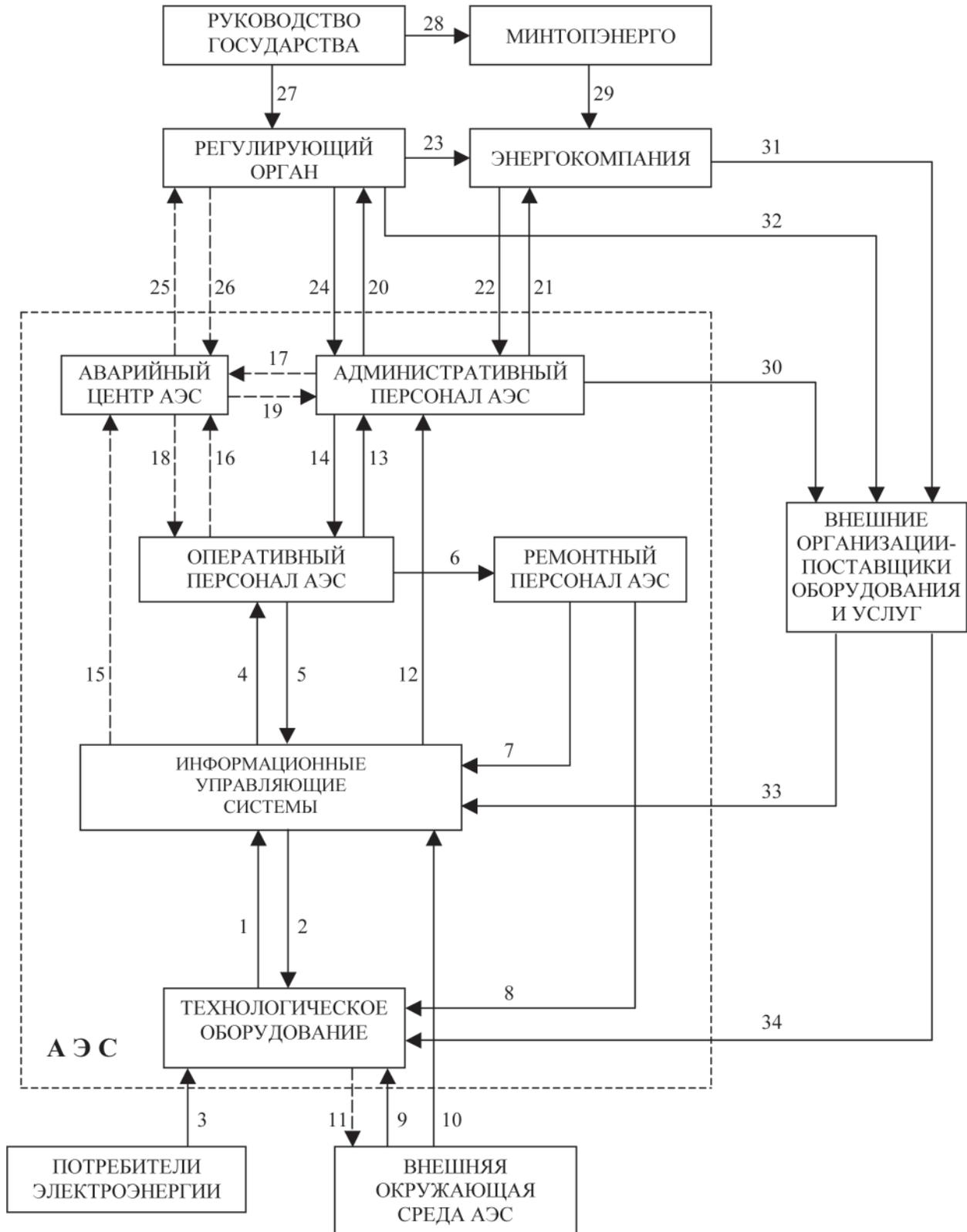


Рис. 1. Общая схема регулирования ядерной и радиационной безопасности АЭС

оборудование (технологическое, информационные и управляющие системы);

персонал (административный, оперативный, ремонтный).

Отметим, что управляемым объектом при государственном регулировании ядерной и радиационной безопасности могут быть и все АЭС энергоблоки определенно-

го типа (например, все блоки ВВЭР-1000) и вообще все АЭС государства. В настоящей статье рассматривается регулирование безопасности применительно к АЭС. В принципе, управляемыми объектами государственного регулирования ядерной и радиационной безопасности являются также:

Таблица 1. Взаимосвязи в схеме регулирования ядерной и радиационной безопасности

№ связи	Содержание связи
1	Информация о состоянии технологического оборудования, поступающая в ИУС и необходимая для выработки управляющих воздействий во всех режимах работы АЭС (измеряемые технологические параметры)
2	Управляющие воздействия от ИУС на технологическое оборудование (функция автоматического регулирования параметров технологического процесса реализуется по связям 1 и 2)
3	Возмущающие воздействия на АЭС со стороны потребителей электроэнергии
4	Информация о состоянии технологического оборудования и ИУС, поступающая к оперативному персоналу АЭС
5	Управляющие воздействия оперативного персонала на ИУС (задания, настройки, команды дистанционного управления и т. п.)
6	Заявки ремонтному персоналу на восстановление после отказов
7, 8	Исполнение ремонтным персоналом заявок на восстановление ИУС (связь 7) и технологического оборудования (связь 8), выполнение им технического обслуживания
9, 10	Воздействия внешней окружающей среды на технологическое оборудование (связь 9) и ИУС (связь 10)
11	Воздействие технологического оборудования на внешнюю окружающую среду АЭС (в том числе в случае аварии)
12, 13	Информация о параметрах, характеризующих безопасность АЭС, поступающая административному персоналу АЭС непосредственно от ИУС (связь 12) или от оперативного персонала (связь 13)
14	Распоряжения административного персонала, поступающие к оперативному персоналу
15–17	Информация о параметрах, характеризующих безопасность, поступающая в случае аварии в аварийный центр непосредственно от ИУС (связь 15), от оперативного персонала (связь 16) и от административного персонала АЭС (связь 17)
18, 19	Управляющие воздействия в случае аварии от аварийного центра, поступающие оперативному (связь 18) и административному (связь 19) персоналу АЭС
20, 21	Сведения, характеризующие безопасность блока, поступающие от административного персонала АЭС в регулирующий орган (связь 20) и в энергокомпанию (связь 21) (например, отчеты о нарушениях, сведения о корректирующих мероприятиях в результате расследований нарушений и др.)
22	Документы энергокомпании, касающиеся безопасности (приказы, распоряжения, циркуляры и др.), поступающие административному персоналу АЭС
23, 24	Документы регулирующего органа (например, нормы и правила по ядерной безопасности, лицензии или временные разрешения на эксплуатацию), поступающие в энергокомпанию (связь 23) или непосредственно на АЭС (связь 24)
25	Информация, поступающая в случае аварии от аварийного центра в регулирующий орган (например, в кризисный или аварийный центр регулирующего органа)
26	Указания, поступающие из регулирующего органа в аварийный центр АЭС
27, 28	Законы, постановления и иные документы, поступающие от руководства государства в регулирующий орган (связь 27) и Минтопэнерго (связь 28)
29	Указания, поступающие от Минтопэнерго в энергокомпанию
30, 31	Заявки от АЭС (связь 30) и от энергокомпании (связь 31) на поставку оборудования и оказание услуг (проектирование, монтаж, наладка, ремонт и др.)
32	Документы регулирующего органа, касающиеся поставки оборудования АЭС и оказания услуг
33, 34	Поставка оборудования и оказание услуг для информационных и управляющих систем (связь 33) и технологического оборудования (связь 34) АЭС

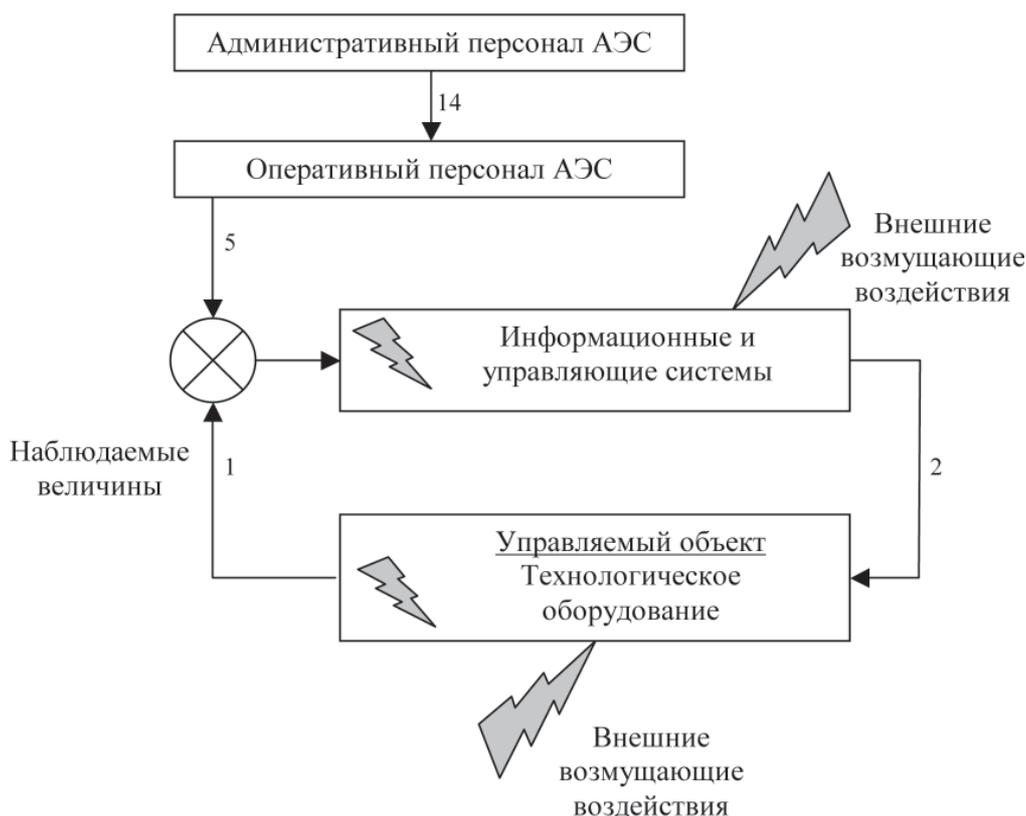


Рис. 2. Контур автоматического регулирования технологическим процессом

различные ядерные установки помимо АЭС (например, исследовательские реакторы);
отработанное ядерное топливо;
радиационные отходы;
источники ионизирующего излучения и др.

Задатчик и управляющая система. Регулирующий орган, определение которого дано на с. 52 (т. е. Государственный комитет ядерного регулирования) в контуре регулирования безопасности АЭС относится к различным элементам (рис. 3): задатчику при установлении нормативных критериев безопасности и требований, которые определяют условия использования АЭС (т. е. при осуществлении функции нормирования);

управляющей системе, которую в свою очередь можно представить состоящей из двух элементов: 1) регулирующего органа при осуществлении надзора за соблюдением нормативных требований и условий предоставленных разрешений; 2) регулирующего органа при осуществлении разрешительной деятельности (предоставлении разрешений на осуществление деятельности, связанной с использованием АЭС).

Задающие и управляющие воздействия. Задающими воздействиями являются критерии, правила и нормы по ядерной и радиационной безопасности, установленные в законах Украины, в документах, разработанных Государственным комитетом ядерного регулирования либо иными государственными организациями (например, Министерством здравоохранения).

Управляющими воздействиями (сигналами с выхода управляющей системы) являются:

выдача / аннулирование лицензий или временных разрешений на эксплуатацию энергоблока;
приказы, циркуляры, распоряжения, условия лицензии и др.

Управляющие воздействия вырабатываются: после нарушений безопасности, требующих скорейшего принятия решений, которые могут распространяться как на конкретную АЭС/энергоблок, в котором произошло нарушение, так и на все однотипные энергоблоки; периодически, например, по результатам анализа статистических данных за определенный промежуток времени; в темпе с технологическим процессом для передачи в аварийный центр АЭС в случае аварий и аварийных ситуаций.

Замкнутая система. Замкнутой системой (контуром) регулирования безопасности является совокупность взаимодействующих между собой управляемого объекта (АЭС/энергоблок) и управляющей системы (регулирующего органа при осуществлении надзора и разрешительной деятельности).

Наблюдаемые величины. Наблюдаемыми величинами (входными сигналами в управляющую систему) служат сведения по безопасности АЭС, поступающие в регулирующий орган:

оперативная информация о работе АЭС;
отчеты АЭС о нарушениях;
сведения АЭС о корректирующих мероприятиях в результате расследования нарушений;
годовые отчеты АЭС по оценке текущего уровня эксплуатационной безопасности;
результаты инспекционных проверок и др.

Внешняя среда замкнутой системы и внешние возмущающие воздействия. Компоненты внешней среды замкнутой системы показаны на рис. 1:

внешняя окружающая среда АЭС;
потребители электроэнергии;
вышестоящие организации регулирующего органа (руководство государства);

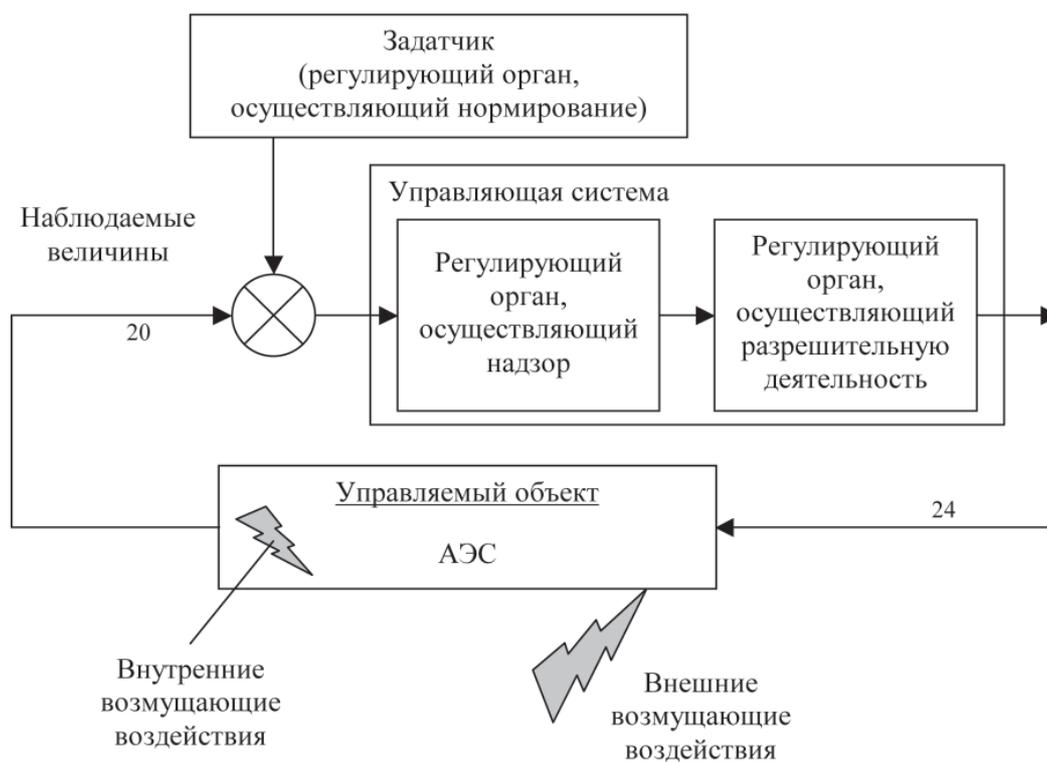


Рис. 3. Контур регулирования безопасности

Таблица 2. Классификация контура регулирования безопасности

№ п/п	Классификационный признак	Вид системы
1	По наличию обратной связи от объекта управления к управляющей системе	Замкнутая (имеющая обратную связь)
2	По наличию взаимосвязей с внешней средой	Открытая (имеющая взаимосвязи с внешней средой)
3	По участию человека в функционировании контура	Организационно-техническая (включающая в качестве элементов взаимодействующие коллективы)
4	По принципу управления	По отклонению параметров, характеризующих безопасность
5	По сложности	Большая (сложная, пространственно распределенная, с особо большими размерами, со сложной иерархической структурой, с циркуляцией в системе больших информационных потоков)
6	По степени неопределенности описания и возможности предсказания будущих состояний	Стохастическая (поведение управляемого объекта носит случайный характер)
7	По существенности описания переходного процесса в контуре вследствие управляющих воздействий изменения задающих воздействий	Статическая (рассматривается только установившийся режим)
8	По числу вводимых в рассмотрение составляющих вектора состояния управляемого объекта	Многомерная система (рассматриваются разнообразные нарушения безопасности, их предшественники и др.)
9	По юридическому статусу	Государственное регулирование

вышестоящая организация АЭС (энергокомпания); внешние по отношению к АЭС организации, осуществляющие поставку оборудования и услуг.

От первых двух компонентов могут быть внешние возмущающие воздействия природного или техногенного происхождения на замкнутую систему, включая возмущающие воздействия от внешней окружающей среды (например, землетрясения) и от потребителей электроэнергии (например, резкий сброс нагрузки).

Внутренние возмущающие воздействия. Эти воздействия перечислены в НП 306.2.141 [13]. К ним относятся воздействия, возникающие на энергоблоках АЭС вследствие пожаров, затоплений, высокоэнергетических воздействий (ударные волны, летающие предметы, хлестание трубопроводов, воздействие струй и т. п.) и изменений параметров сред (давления, температуры, химической активности и т. п.).

Цель управления. Целью управления безопасностью АЭС является обеспечение безопасности АЭС, под которой, согласно [13], понимается свойство АЭС не превышать установленные пределы радиационного воздействия на персонал, население и окружающую среду при нормальной эксплуатации АЭС, нарушениях нормальной эксплуатации и проектных авариях, а также ограничивать радиационное воздействие при запроектных авариях.

В широко используемом в Украине для регулирования безопасности АЭС документе МАГАТЭ INSAG-12 [14] сформулированы цели безопасности, совпадающие с целями управления безопасностью:

- общая цель ядерной безопасности;
- цели радиационной защиты;
- техническая цель безопасности.

Общая цель ядерной безопасности — защитить отдельные лица, общество и окружающую среду путем создания и поддержания на АЭС эффективной защиты от радиологической опасности. В сформулированной общей цели ядерной безопасности радиологическая опасность означает вредные последствия облучения для здоровья отдельных лиц как из числа персонала станции, так и населения, а также радиоактивное загрязнение земли, воздуха, воды или пищевых продуктов. Она не включает какие-либо обычные виды опасностей, которые существуют при любой промышленной деятельности.

Цель радиационной защиты:

обеспечить разумно достижимый с учетом экономических и социальных факторов низкий уровень радиационного облучения на станции при нормальной эксплуатации и в результате любого выброса радиоактивных веществ со станции;

обеспечить уменьшение дозы радиоактивного излучения в результате аварий.

Техническая цель безопасности:

предпринять все разумные практические меры для предотвращения аварий;

обеспечить с высокой степенью достоверности для всех возможных аварий, учитываемых в проекте станции, включая те, вероятность которых крайне мала, незначительность любых радиологических последствий;

обеспечить чрезвычайно малую вероятность тяжелых аварий с серьезными радиологическими последствиями.

Ограничения. Ограничения на управляющие воздействия определяются:

конструктивными и технологическими характеристиками АЭС;

ресурсами, выделяемыми АЭС и энергокомпанией на обеспечение безопасности. Эти ресурсы во многом следуют из принципа ALARA (As Low As Reasonably Achievable).

В свою очередь, качество выработки управляющих воздействий со стороны регулирующего органа также зависит от ресурсов, выделяемых государством на функционирование регулирующего органа.

В качестве следующего шага по рассмотрению контура регулирования безопасности в табл. 2 проведена классификация этого контура, следуя общим принципам классификации систем управления, указанным в [15], [16], [6].

Заключение

В статье представлено вербальное описание системы регулирования безопасности на языке теории управления и дана классификация системы регулирования безопасности как частного случая системы управления. Такое описание и классификация могут стать базой для следующего шага — построения математической модели системы регулирования безопасности. Прочитав известное специалисту по управлению войсками и по надежности А. А. Ларина (одного из немногих ученых, являющихся заслуженным деятелем науки и техники Украины и заслуженным деятелем науки и техники России) [6]: «Наибольший эффект от применения математических моделей может быть достигнут в том случае, если система достаточно хорошо осмыслена и предварительно описана на словесном (вербальном) уровне».

Авторы благодарят заведующего кафедрой «Системный анализ и управление» Национального технического университета «Харьковский политехнический институт» д-ра техн. наук, проф. А. С. Куценко за ценные замечания, данные при обсуждении работы.

Литература

1. Штейнберг Ш. Е., Хвелевицкий Л. О., Ястребенецкий М. А. Промышленные автоматические регуляторы. — М.: Энергия, 1973.
2. Ястребенецкий М. А., Соляник Б. Л. Надежность промышленных автоматических систем в условиях эксплуатации. — М.: Энергия, 1978.
3. Ястребенецкий М. А., Иванова Г. М. Надежность автоматизированных систем управления технологическими процессами. — М.: Энергоиздат, 1989.
4. Толковый словарь русского языка / Под ред. Д. Н. Ушакова. — М.: Гос. изд-во иностр. и нац. словарей, 1939.
5. Новосельцев В. В. Организм в мире техники. Кибернетический аспект. — М.: Наука, 1989. — 288 с.
6. Ларин А. А. Теоретические основы управления. Ч. 1: Процессы, системы и средства управления. — М.: РВСН, 1998. — 300 с.
7. Конвенция про ядерную безопасность // В кн. «Ядерне законодавство», т.2. — К.: Видавничий дiм, 1990.
8. Закон Украины «Об использовании ядерной энергии и радиационной безопасности» №39/35 ВР от 08.02.95.
9. Федеральный закон России «Об использовании атомной энергии» №170-ФЗ, 21.11.1995.
10. IAEA GS-G-1.1. Organization and Staffing of the Regulatory Body for Nuclear Facilities.
11. Ястребенецкий М. А., Василюченко В. Н., Виноградская С. В. и др. Безопасность атомных станций. Информационные и управляющие системы. — К.: Техніка, 2004.
12. Машиностроение. Энциклопедия. Т. IV-25: Машиностроение ядерной техники. Кн.2. — М.: Машиностроение, 2005.
13. НП 306.2.141-2008. Общие положения безопасности атомных станций. — К., 2008.
14. IAEA INSAG-12. Basic safety principles for nuclear power plants 75-INSAG-3 Rev.1. Vienna, 1999.
15. Теория управления. Терминология. — М.: Наука, 1984. — 67 с.