

М. А. Ястребенецкий, А. Л. Клевцов,  
О. Н. Бутова

Харьковский филиал Государственного научно-технического центра по ядерной и радиационной безопасности, г. Харьков, Украина

## К рассмотрению потоков событий при функционировании критических объектов

Рассмотрены потоки существенных для безопасности событий при работе критических объектов различных стран и различного назначения, в частности: нарушения в работе АЭС Украины; докладываемые события по энергоблокам PWR США; значимые для безопасности события по энергоблокам PWR Франции; аварии ракетно-космической техники. Приведены зависимости изменения параметров этих потоков во времени. Отмечена идентичность этих зависимостей для АЭС Украины и АЭС США с реакторами PWR.

Ключевые слова: критический объект, событие, поток событий, информационная и управляющая система, энергоблок.

М. О. Ястребенецкий, О. Л. Клевцов, О. М. Бутова

### До розгляду потоків подій у процесі функціонування критичних об'єктів

Розглянуто потоки суттєвих для безпеки подій під час роботи критичних об'єктів різних країн та різного призначення, зокрема: порушення в роботі АЕС України; події на блоках PWR США, про які подаються доповіді; значимі для безпеки події по блоках PWR Франції; аварії в ракетно-космічній техніці. Наведено залежності змін параметрів цих потоків у часі. Відзначено ідентичність цих залежностей для АЕС України та АЕС США з реакторами PWR.

Ключові слова: критичний об'єкт, подія, потік подій, інформаційна та керуюча система, енергоблок.

Критическим объектам (safety critical objects, safety related objects) относятся оборудование, машины, аппаратура, предприятия для производства, обработки, транспортировки, медицинской, военной и иной деятельности, функционирование которых в некоторых неблагоприятных ситуациях может привести к угрозе (а в худшем случае — потерям) человеческой жизни, серьезным экологическим нарушениям, разрушению сооружений и оборудования, значительному экономическому ущербу.

Естественно, что для разных видов объектов определения событий, существенных для безопасности, различны. Для каждого рассматриваемого объекта такие определения приведены далее.

Целью работы является рассмотрение потоков существенных для безопасности событий для двух различных классов критических объектов различных стран: АЭС и ракетно-космических комплексов. Углубленный анализ причин возникновения событий и выработка вытекающих рекомендаций по повышению безопасности не является целью данной статьи, так для АЭС Украины результаты анализа регулярно публикуются в журнале «Ядерна та радіаційна безпека» [1–3].

### Атомные электростанции

**АЭС Украины: все нарушения в работе.** Изменение во времени числа событий при функционировании непрерывно работающего критического объекта — АЭС — характеризуется параметром потока событий, статистическая оценка которого определяется соотношением

$$\omega_i = \frac{n_i}{k_i},$$

где  $i$  — порядковый номер года наблюдений;  $n_i$  — количество событий при функционировании всех АЭС рассматриваемого вида за  $i$ -й год;  $k_i$  — количество энергоблоков рассматриваемого вида, функционировавших в  $i$ -м году.

Для АЭС Украины рассматриваются события, именуемые по терминологии [4] нарушениями в работе АЭС, — события, заключающиеся в нарушении нормальной эксплуатации АЭС, или аварийная ситуация, или авария. Определение нарушений в работе атомных станций в документе регулирующего органа РФ [5] по сути аналогично приведенному в [4].

Источником информации в настоящей статье являются сведения, которые АЭС, согласно [4], в обязательном порядке направляют в ряд организаций, включая Госатомрегулирование Украины и ГНТЦ ЯРБ.

На рис. 1 приведен график изменения параметра потока нарушений всех энергоблоков ВВЭР-1000 и ВВЭР-440 с 1992 по 2012 гг. Количество ( $k$ ) энергоблоков с 1992 по 1995 гг. — 12; с 1996 по 2003 гг. — 13; с 2004 г. — 15.

Из рис. 1 видно, что поток нарушений нестационарный. Параметр потока нарушений на АЭС Украины снизился с уровня более 12 нарушений на один энергоблок в 1993 г. до одного нарушения в год на один энергоблок в 2011–2012.

В 2000 и 2001 гг. имело место некоторое увеличение параметра потока нарушений. С 2002 г. продолжается плавное уменьшение этого параметра и затем его стабилизация на некотором уровне с небольшими колебаниями и с продолжением общей тенденции к снижению.

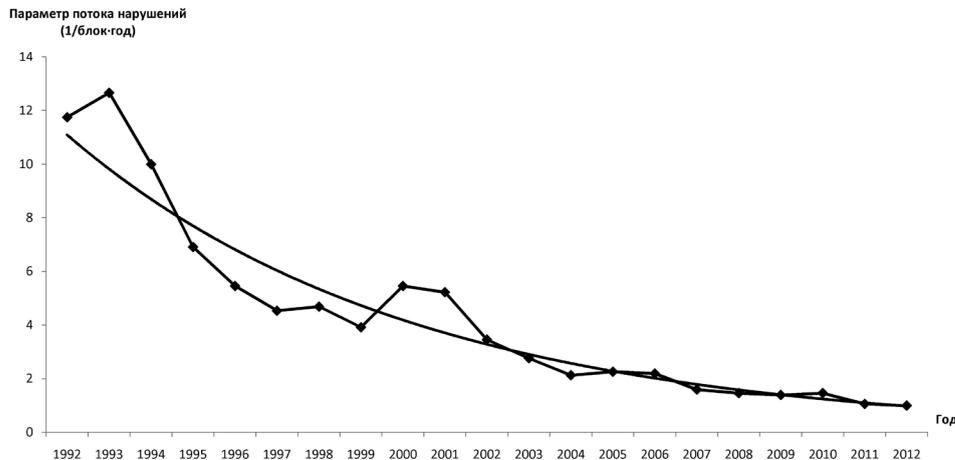


Рис. 1. Параметр потока нарушений в работе АЭС Украины

Исходя из характера имеющихся статистических данных, проведена аппроксимация экспоненциальной функцией, в результате чего получено соотношение

$$\omega_i = 12,5 \cdot e^{-0,12 \cdot i},$$

где  $i$  — порядковый номер года в рамках рассматриваемого периода времени;  $\omega_i$  — параметр потока нарушений в  $i$ -м году.

Построенная по данной формуле кривая, представленная на рис. 1, подтверждает, что снижение параметра потока нарушений в работе АЭС Украины с 1992 по 2012 гг. близко к экспоненциальной зависимости (достоверность аппроксимации, измеряемая коэффициентом детерминации, составляет  $R^2 = 0,95$ ). Отметим, что выполненная аппроксимация не имеет целью прогнозирование изменения параметра потока нарушений в последующие годы, а лишь направлена на анализ характера его изменений за рассматриваемый период.

Не повторяя результаты анализа нарушений в работе АЭС Украины, приведенные в [1–3], ещё раз подчеркнем, что тенденция к снижению параметра потока нарушений вызвана проведением совместных работ эксплуатирующей организации, разработчиков оборудования и регулирующего органа по повышению безопасности (выполнение «Комплексной программы повышения безопасности», модернизация оборудования при продлении эксплуатации энергоблоков в сверхпроектный срок, реализация программ продления срока эксплуатации различных видов оборудования в сверхпроектный для него срок, стабильность кадров АЭС, повышение квалификации персонала с течением времени и др.).

**АЭС США с реакторами PWR: все докладываемые события.** Проанализирована представленная в базе данных на веб-сайте NRC [6] информация о докладываемых событиях (licensing events) в работе АЭС США. По каждому из таких событий лицензиат предоставляет специальный отчет (Licensee Event Report, LER) в регулирующий орган США. В базе содержится информация о более чем 51000 докладываемых событиях за период с 1980 по 2012 гг., которая может быть отфильтрована по следующим основным критериям поиска:

период времени, для которого производится отбор событий;

типы реакторов, применяемых на АЭС США;

разработчики реакторов;  
регионы NRC;  
конкретные АЭС США;  
режимы работы энергоблоков и др.

В США перечень событий, отчеты о которых лицензиат должен подавать в регулирующий орган, несколько шире, чем в Украине. К таким событиям, согласно [7, 8], относятся:

остановы реактора, требуемые технической спецификацией энергоблока;

действия или условия, запрещенные технической спецификацией;

отклонения от технической спецификации;

деградация безопасности энергоблока;

внешние угрозы безопасности АЭС или препятствия действиям персонала в выполнении их обязанностей по безопасной эксплуатации энергоблока;

события или условия, повлекшие срабатывание систем безопасности;

события или условия, которые могут воспрепятствовать выполнению функций безопасности;

вызванная общей причиной неработоспособность независимых цепей или каналов одной или нескольких систем;

радиоактивный выброс;

вызванная общей причиной невозможность выполнения функций безопасности цепями или каналами различных систем;

внутренние угрозы безопасности АЭС или препятствия действиям персонала в выполнении их обязанностей по безопасной эксплуатации энергоблока (включая пожары, выбросы токсичных газов, радиационные выбросы и т. д.).

Хотя критерии отбора событий (нарушений) в работе АЭС, которые подлежат анализу, подготовке отчетов и рассмотрению регулирующим органом, отличаются в Украине и США, тем не менее представляет интерес анализ общих тенденций в изменении потоков таких нарушений за последний 21 год (поскольку по Украине авторам доступна информация о нарушениях только с 1992 г., для сравнения выбран аналогичный период и для АЭС США).

На рис. 2 показаны графики параметра потока нарушений/ докладываемых событий в работе АЭС в Украине и США за период с 1992 по 2012 гг. (при этом для США рассматриваются только блоки PWR).

Количество энергоблоков PWR США в 1992 г. — 75, с 1993 по 1996 гг. — 73 (в связи с прекращением эксплуатации

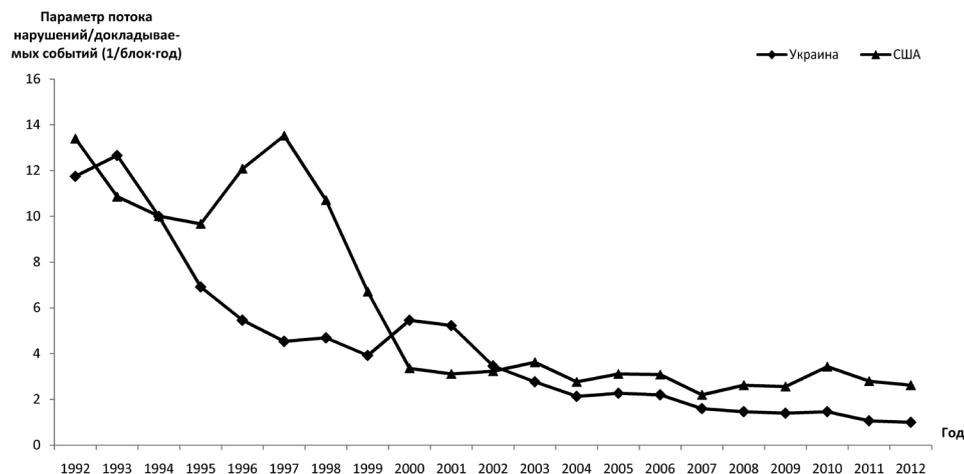


Рис. 2. Параметр потока нарушений/докладываемых событий в работе АЭС Украины и США

двух энергоблоков); в 1997 г. — 72 (в связи с прекращением эксплуатации одного энергоблока); с 1998 г. — 69 (в связи с прекращением эксплуатации трех энергоблоков).

Представленные графики наглядно показывают, что с начала 1990-х к началу 2000-х годов, как в Украине, так и в США, происходит существенное снижение интенсивности нарушений/ докладываемых событий в работе АЭС. В период с 2000 до 2012 гг. в США стабилизируется интенсивность потока докладываемых событий (два-три события в год на один энергоблок). В Украине интенсивность нарушений в этот период продолжает незначительно снижаться до одного-двух нарушений в год на один энергоблок.

Анализируя общий характер представленных графиков, а также принимая во внимание отличие в применяемых в Украине и США подходах к отбору нарушений/докладываемых событий в работе АЭС, можно сделать вывод об идентичности характера нестационарности потока нарушений и (или) докладываемых событий в целом. Улучшение эксплуатации и меры борьбы со старением дают возможность преодолевать тенденцию к старению оборудования.

Впрочем, аппроксимация экспоненциальной функцией (аналогично приведенной выше для АЭС Украины) для параметра потока событий в работе АЭС США

$$\omega_i = 13,4 \cdot e^{-0,09 \cdot i}$$

хуже соответствует характеру изменений параметра потока событий (достоверность аппроксимации в данном случае составляет  $R^2 = 0,77$ ).

Отметим также, что идентичность характера изменений параметра потоков нарушений и (или) докладываемых событий в работе АЭС Украины и США не наблюдается по отношению к АЭС Франции и, возможно, других стран, что проиллюстрировано в следующем подразделе статьи.

**АЭС Франции: все значимые для безопасности события.** Рассмотрена информация о значимых для безопасности событиях в работе АЭС Франции, представленная в отчете EDF [9]. Данный отчет содержит сведения о параметрах потоков таких событий в год на один энергоблок за период с 2002 по 2011 гг.

Согласно [10], во Франции для определения событий, значимых для безопасности, определены следующие критерии:

срабатывание аварийной защиты реактора, за исключением запланированных остановок или остановок, связанных с неполадками турбогенератора;

срабатывание какой-либо системы безопасности, за исключением преднамеренного запланированного запуска; любой инцидент, возникший в одном из стандартных состояний реактора и потребовавший, в соответствии с технологическим регламентом, перехода в другое состояние (длительная неготовность или наложение состояний неготовности оборудования, превышение некоторых уставок или допустимых значений, реальный или возможный отказ по общей причине);

внешнее воздействие (например, землетрясение или падение самолета);

реальные или предполагаемые акты вредительства; неконтролируемый или превышающий допустимые пределы выброс радиоактивности;

внутреннее или внешнее облучение персонала дозами, превышающими допустимые значения;

ядерный инцидент, повлекший за собой летальный случай или серьезные ранения;

происшествия или инцидент, в результате которого энергоблок вышел или мог выйти за проектные пределы эксплуатации;

любое другое событие, признанное достаточно важным эксплуатирующей организацией или регулирующим органом.

Таким образом, множество событий, рассматриваемых во Франции как существенные для безопасности, намного шире, чем множество нарушений, рассматриваемых в Украине. Тем не менее, интересен анализ динамики изменений параметра потоков нарушений/событий в работе АЭС Украины и Франции. Для корректного сопоставления будем рассматривать одинаковый период времени для обеих стран.

На рис. 3 показаны графики параметра потока нарушений/событий в работе АЭС в Украине и во Франции за период с 2002 по 2011 гг. Отметим, что в настоящее время во Франции эксплуатируются только энергоблоки с реакторами PWR и их количество (58) остается неизменным на протяжении всего рассматриваемого периода.

Из представленных графиков видны существенные отличия динамики изменения параметра потока нарушений/событий в работе АЭС Украины и Франции:

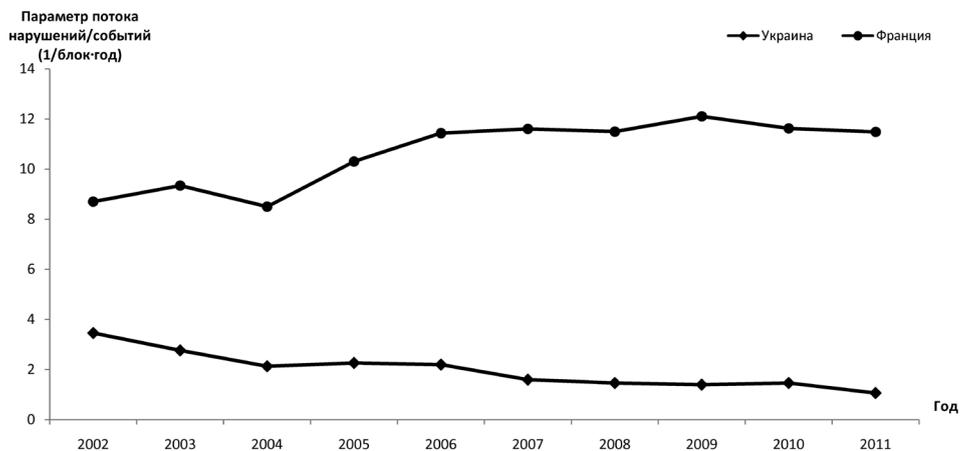


Рис. 3. Параметр потока нарушений / значимых для безопасности событий в работе АЭС Украины и Франции

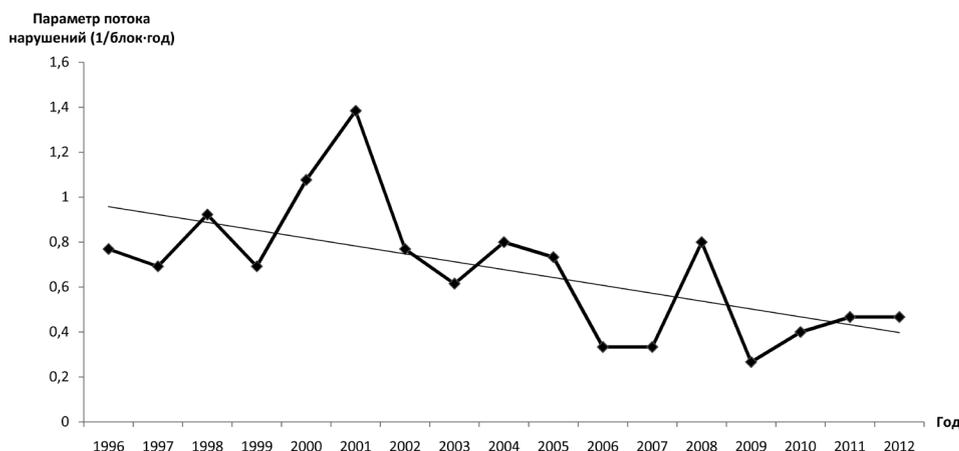


Рис. 4. Параметр потока нарушений в работе АЭС Украины из-за информационно-управляющих систем

в Украине параметр потока нарушений в работе АЭС в каждом отдельно взятом году в несколько раз ниже, чем параметр потока событий для АЭС Франции, что объясняется существенной разницей в отборе событий, значимых для безопасности;

во Франции наблюдается некоторый рост параметра потока событий в работе АЭС за последнее десятилетие, в то время как в Украине за этот же период имеет место существенное снижение соответствующего параметра потока нарушений.

**АЭС Украины: нарушения из-за неправильного функционирования информационных и управляющих систем.** Часть всех нарушений (см. ранее) в работе АЭС Украины, возникающих из-за различных причин, вызвана неправильным функционированием информационных и управляющих систем (ИУС).

В состав ИУС включается вся цепь управления: как периферийное оборудование — импульсные линии, датчики, гермопроходки, исполнительные механизмы, — так и центральная часть, реализуемая в настоящее время для значительной части ИУС на АЭС Украины в виде программно-технических комплексов.

Причинами, которые вызывали нарушения из-за ИУС, являлись:

- отказы компонентов ИУС;
- отклонение условий эксплуатации ИУС за заданные пределы вследствие отказа или неправильного функционирования обеспечивающих систем электропитания, кондиционирования, вентиляции;
- воздействия технологического оборудования (разрывы трубопроводов, внутренние затопления, ударные воздействия, нерасчетные помехи);
- воздействия внешней окружающей среды на АЭС.

Информация о нарушениях в работе энергоблоков ВВЭР на АЭС Украины из-за неправильного функционирования ИУС рассмотрена с 1996 по 2012 гг. График изменения параметра потока нарушений энергоблоков АЭС Украины из-за ИУС за этот период приведен на рис. 4, число нарушений из-за ИУС составило 159.

Из графика в целом следует тенденция к уменьшению параметра потока нарушений (увеличение наблюдалось в 2001 и 2008 гг.). Линейная аппроксимация, выбранная исходя из характера имеющихся статистических данных, этой зависимости методом наименьших квадратов дает соотношение

$$\omega_i = 0,99 - 0,04 \cdot i.$$

(Аппроксимация не имеет целью прогнозирование изменения параметра потока нарушений в последующие годы.)

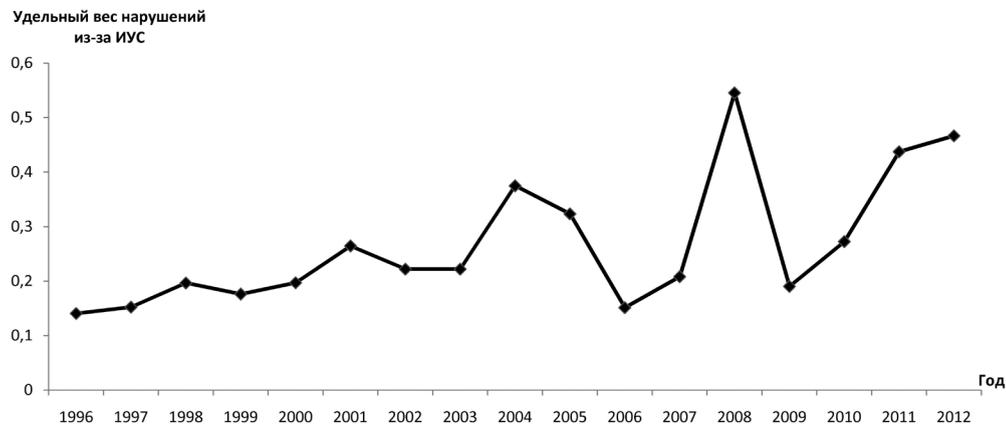


Рис. 5. Удельный вес нарушений из-за ИУС в общем количестве нарушений в работе АЭС Украины

Причиной снижения параметра потока нарушений из-за ИУС является масштабное проведение с 2001 г. реконструкции/модернизации на энергоблоках АЭС Украины (например, внедрение новых ПТК АЗ-ПЗ, ПТК СГИУ-М, АКНП-И(ИФ), ПТК АРМ-РОМ-УПЗ, ПТК САР РО и др.)<sup>1</sup>.

На рис. 5 приведен удельный вес нарушений в работе энергоблоков АЭС Украины, вызванных неправильным функционированием ИУС, в общем количестве нарушений. График в целом демонстрирует тенденцию к увеличению удельного веса нарушений — от 0,15 в 1996 г. до 0,45 в 2012 г. и даже 0,5 в 2008 г. Таким образом, несмотря на уменьшение параметра потока нарушений из-за ИУС, их удельный вес в общем количестве увеличивается, количество нарушений из-за других систем уменьшается быстрее. В среднем за весь рассмотренный период доля нарушений, вызванных неправильным функционированием ИУС, по отношению к общему количеству нарушений в работе энергоблоков АЭС Украины составила 0,23.

### Ракетно-космические комплексы

Атомная энергетика и ракетно-космические комплексы (РКК) имеют некоторые общие особенности:

они олицетворяют технический прогресс, начиная со второй половины XX века;

их развитие во многом определяет имидж государства в мире;

убытки от аварий РКК не столь велики, как от аварий на АЭС, однако стоимость аварий РКК может быть весьма существенной (например, убытки от аварии европейского ракетносителя Ariane-5 в 1996 г. превысила полмиллиарда долларов).

Системы управления (СУ) этими объектами имеют больше общих черт. Они относятся к одному классу — СУ критическими (с точки зрения безопасности) объектами, и развитие этих систем подчиняется общим закономерностям развития СУ критическими объектами. На оба этих класса систем распространяется стандарт МЭК 61508 [14], согласно которому такого рода системы обозначены как электрические/электронные/программируемые электронные системы,

<sup>1</sup> Некоторые результаты рассмотрения влияния ИУС на нарушения в работе АЭС Украины приведены в [11—13].

относящиеся к безопасности (E/E/PE системы в обозначении этого стандарта). Термин «safety related» в данном стандарте аналогичен термину «safety important» в документах МАГАТЭ, МЭК и, соответственно, в документах Украины по атомной энергетике.

В 2002 г. была опубликована статья [15], содержащая сопоставление принципов обеспечения безопасности систем управления АЭС и ракетами-носителями с ядерными боеголовками. Соавтор статьи — генеральный конструктор систем управления ракет и космических аппаратов Украины, генеральный директор НПО «Хартрон» (организации-разработчика СУ ракетами-носителями, включая самую мощную ракету в мире SS-18M «Сатана») Я. Е. Айзенберг.

Указанное направление работ было продолжено; в статье [16] дан сравнительный анализ тенденций развития цифровых ИУС АЭС и ракетно-космических комплексов (РКК), а также приведен анализ дефицитов безопасности, возникающих при модификации ранее разработанного программного обеспечения компьютерных систем.

В настоящей статье сопоставление будет идти по следующим направлениям:

изменения во времени параметра потоков событий — аварий РКК и нарушений в работе АЭС;

изменения во времени удельного веса этих событий из-за систем управления в общем числе событий.

Рассматриваемыми событиями для РКК являются аварии ракетносителей при их пуске и выводе на расчетную орбиту. При этом можно рассматривать два потока событий: входящий — поток пусков; выходящий (редеющий) поток аварий при пусках, являющийся разрежением входящего потока (разрежение — преобразование потока, заключающееся в том, что входящий поток событий теряет некоторую часть событий; оставшаяся часть образует выходящий поток).

Безопасность при этом характеризуется коэффициентом разрежения входящего потока за определенный интервал времени, что можно также назвать средней вероятностью аварии за интервал времени или риском запуска<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> Задача разрежения потоков была поставлена в статье А. Реньи [17]; основные результаты получены в работах [18, 19], где оператор разрежения не зависел от времени. В [20] решена задача разрежения марковского процесса восстановления, где вероятность разрежения зависела от времени до предшествующего вызова и типа предшествующего вызова. Однако для рассматриваемого потока вероятность разрежения зависит от календарного времени, причем эмпирическая зависимость определяется на рис. 6.

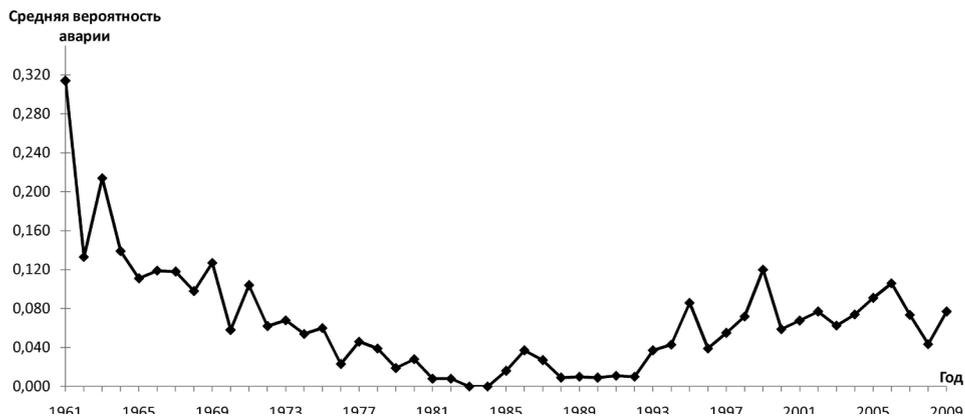


Рис. 6. Средняя вероятность аварии ракет-носителей по объединенной информации различных стран

Статистическая точечная оценка средней вероятности аварии  $p_i$  за  $i$ -й год определяется соотношением

$$p_i = \frac{r_i}{l_i},$$

где  $r_i$  — количество аварий при пуске за  $i$ -й год;  $l_i$  — количество пусков за  $i$ -й год.

В [21] приведены анализ аварий для различных типов РКК и зависимость от времени изменения средней вероятности за год, охватывающие генеральную совокупность (по всем странам) всех запусков ракет-носителей, выполнявших коммерческие и научно-исследовательские задачи (баллистические и крылатые ракеты-носители военного назначения в этой работе не рассматривались). График изменения средней вероятности с 1961 по 2000 гг. (4128 запусков) и с 2001 по 2009 гг. (572 запуска) дан на рис. 6. Подавляющее большинство запусков было произведено СССР/РФ (63 % в 1961—2000 гг. и 35 % — в 2001—2009 гг.) и США (соответственно 30 и 29 %). Имело место 55 запусков разработанных в Украине ракет в 2000—2009 гг., из них 32 — в рамках международного проекта «Морской старт». Поток аварий существенно не стационарен. Однако характер этой нестационарности заметно отличается от зависимостей изменения параметра потока нарушений/событий

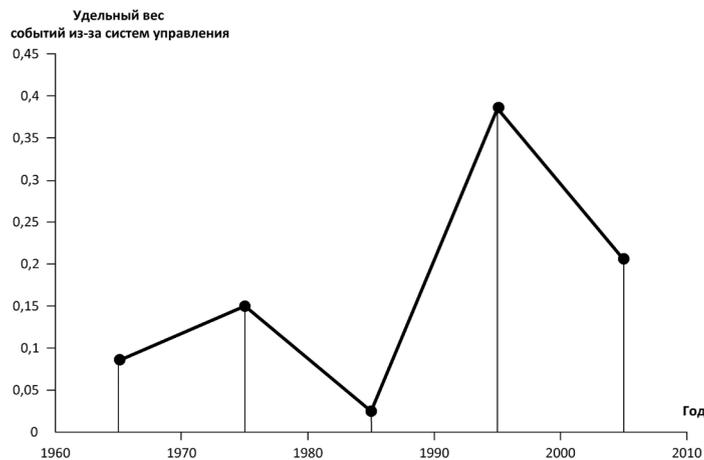


Рис. 7. Удельный вес событий при функционировании РКК из-за систем управления в общем количестве событий

для АЭС Украины и США (см. рис. 2). Тенденция к снижению величины  $p_i$  имела место до 1980 г., оставалась на стабильно низком уровне в 1980—1993 гг., а затем происходило ее повышение. Причинами этого предположительно можно считать следующее:

значительно больший консерватизм действующих энергоблоков АЭС (рис. 2), чем РКК, для которых характерна более быстрая смена поколений;

появление значительного количества коммерческих пусков для нужд телекоммуникаций;

появление новых стран-изготовителей РКК.

Для всех РКК, объединяя сведения о ракетах-носителях и космических аппаратах, и далее объединяя такие события, как аварии, выводы на нерасчетную орбиту, фатальные, частичные отказы и сбои, из данных [21] можно получить график изменения удельного веса указанных событий по вине систем управления (рис. 7).

Как и для АЭС (рис. 5), здесь, впрочем за значительно больший интервал времени, наблюдается рост удельного веса указанных событий из-за систем управления. Это связано с расширением функций, реализуемых системами управления и особенно их программным обеспечением.

## Выводы

1. Сопоставлены зависимости изменения параметра потоков следующих событий при функционировании различных критических объектов: нарушений в работе АЭС Украины; докладываемых событий по блокам PWR США; значимых для безопасности событий по блокам PWR Франции; аварий ракет-носителей.

Обращает на себя внимание сходство указанных зависимостей для АЭС Украины и США.

2. Параметр потока нарушений в работе АЭС Украины из-за неправильного функционирования информационных и управляющих систем, как и параметр потока всех нарушений, нестационарен и имеет тенденцию к снижению. В то же время удельный вес этих нарушений по отношению к общему количеству нарушений имеет тенденцию к повышению (как и удельный вес аварий и аналогичных событий по вине систем управления в ракетно-космической технике по отношению к общему числу таких событий).

3. Значительный интерес может представить продолжение этой работы в следующих направлениях: сопоставление потоков нарушений в работе АЭС Украины с аналогичными данными по блокам ВВЭР иных стран, в первую очередь РФ (тем более, классификации этих нарушений в Украине и России весьма близки); сопоставление потоков событий в работе АЭС разных стран с учетом оценки по международной шкале INES [22]; анализ функциональной безопасности систем управления различными критическими объектами.

#### Список использованной литературы

1. Аналіз потоку порушень в роботі АЕС України, які сталися протягом 2007 року / М. Х. Гашев, О. І. Лігоцький, С. В. Недбай, А. В. Носовський // Ядерна та радіаційна безпека. — 2008. — № 4.
2. Аналіз порушень в роботі АЕС України, які сталися протягом 2008 року / М. Х. Гашев, О. І. Лігоцький, Л. М. Печериця, А. В. Носовський // Ядерна та радіаційна безпека. — 2009. — № 3.
3. Узагальнений аналіз порушень у роботі АЕС України з блоками ВВЭР за період 2001–2011 рр. / М. Х. Гашев, О. І. Лігоцький, С. В. Недбай, А. В. Носовський // Ядерна та радіаційна безпека. — 2012. — № 4 (56).
4. НП 306.2.100–2004. Положение о порядке расследования и учета нарушений в работе атомных электрических станций. — К., 2005.
5. НП-004–08. Положение о порядке расследования и учета нарушений в работе атомных станций / Федеральная служба по эколог., технолог. и атомному надзору. — М., 2008.
6. Поисковая система LER. Официальный сайт US NRC [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://lersearch.inl.gov>
7. U.S. NRC Regulations: Title 10, Code of Federal Regulations. — USA: NRC, 2013.
8. NUREG-1022. Event Reporting Guidelines 10 CFR 50.72 and 50.73: Final Report — Revision 3. — USA: NRC, 2013.
9. The Inspector General's report on Nuclear Safety and Radiation Protection 2011. — France: EDF, 2012.
10. Либманн Ж. О ядерной безопасности. — Франция: ИПСН, 1997.
11. Нарушения в работе АЭС, вызванные системой управления технологическими процессами энергоблока / О. Н. Бутова, В. В. Инюшев, Л. И. Спектор, М. А. Ястребенецкий // Ядерная и радиационная безопасность. — 2004. — № 4.
12. Показатели функциональной безопасности систем управления энергоблоком АЭС / М. А. Ястребенецкий, О. Н. Бутова, В. В. Инюшев, Л. И. Спектор // Ядерные измерительно-информационные технологии. — 2005. — № 3/15.
13. Yastrebenetsky M., Siora A. Operating reliability of WWER NPP digital I&C systems. — Sixth American Nuclear Society International Topical Meeting on Nuclear Plant Instrumentation, Control, and Human-Machine Interface Technologies NPIC&HMIT 2009, Knoxville, Tennessee, 2009, American Nuclear Society.
14. IEC 61508, Ed. 2. Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems, 2008.
15. Айзенберг Я. Е. Сопоставление принципов обеспечения безопасности систем управления ракетами-носителями и атомными электростанциями / Я. Е. Айзенберг, М. А. Ястребенецкий // Космічна наука і технологія. — 2002. — Т. 8, № 43.
16. Скляр В. В. Цифровые информационные и управляющие системы атомных электростанций и ракетно-космических комплексов: сравнительный анализ, тенденции развития, обеспечение безопасности / В. В. Скляр, В. С. Харченко, М. А. Ястребенецкий // Ядерная и радиационная безопасность. — 2004. — № 2.
17. Renyi A. A. Poisson-folyamat egy jellemezése. Magyar tud. akad. Mat. kutat oint. kuzl., 1956, 4.
18. Беляев Ю. К. Предельные теоремы для редящихся потоков. Теория вероятностей и ее применения / Ю. К. Беляев. — 1963. — VIII, вып. 2.
19. Гнеденко Б. В. Введение в теорию массового обслуживания / Б. В. Гнеденко, И. Н. Коваленко. — М.: Наука, 1966.
20. Ястребенецкий М. А. О разрежении марковского процесса восстановления применительно к некоторым задачам надежности // Известия Академии наук СССР. Техническая кибернетика. — 1972. — № 4.
21. Безопасность критических инфраструктур: математические и инженерные методы анализа и обеспечения / Под ред. Харченко В.С. — Х.: ХАИ, 2011.
22. INES. The international nuclear and radiological event scale. User's manual. — Austria: IAEA, 2009.

Получено 22.04.2013.