

ПРИНЦИПЫ КОМПЛЕКСНОЙ ЗАЩИТЫ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИКИ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

Доктор техн. наук *В.И. Гуменюк*

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)

Кандидат химич. наук *А.В. Кулинкович*

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций

Кандидат техн. наук *Сакова Н.В.*

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического
приборостроения

Рассмотрены вопросы обеспечения комплексной защиты объектов энергетики (ОЭ) в чрезвычайных ситуациях (ЧС) природного и техногенного характера. В качестве цели организации комплексной защиты рассматривают обеспечение выполнения поставленных задач с минимальными потерями. В работе подробно анализируются математические модели основных принципов защиты: комплексности, оперативности, непрерывности, достаточности. На основе описанных в статье теоретических основ математических моделей взаимодействия поражающих факторов (ПФ) с ОЭ обоснованы критерии, с помощью которых возможны создание теории оценки параметров ПФ, а также разработка способов и средств защиты ОЭ в ЧС.

Ключевые слова: объект энергетики, комплексная защита, принципы защиты в чрезвычайных ситуациях, модели воздействия поражающих факторов чрезвычайных ситуаций.

PRINCIPLES OF COMPREHENSIVE PROTECTION OF ENERGY FACILITIES IN EMERGENCY SITUATIONS

Dr (Tech) *V.I. Gumenyuk*

St. Petersburg Politechnic University

Ph.D. (Chem.) *A.V. Kulinkovich*

Saint - Petersburg State University of Telecommunications

Ph.D. (Tech.) *N.V. Sakova*

Saint - Petersburg State University of Telecommunications

Saint- Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

The article deals with the issues of providing comprehensive protection of energy facilities (EF) in emergency situations (ES) of natural and man-made. As the goal of establishing comprehensive protection consider the security of executing tasks with minimal losses. The article analyzes in detail the mathematical models of the basic principles of protection: complexity, efficiency, continuity, sufficiency. On the basis of the theoretical foundations of mathematical models of the interaction of damaging factors (DF) with EF described in the article, the criteria

by which it is possible to create a theory of evaluation of DF parameters, as well as the development of methods and means of protection of EF in emergency situations.

Keywords: energy facility, comprehensive protection, principles of protection in emergency situations, models of impact of damaging factors of emergency situations.

Обеспечение защищенности объектов топливно-энергетического комплекса от поражающих факторов чрезвычайных ситуаций (ПФ ЧС) связано с ключевой ролью энергетики в устойчивом развитии государства и качественной жизни населения. Изучение влияния полей ПФ от источников ЧС на различные элементы системы энергетики, поиск способов уменьшения этого вредного влияния представляют в настоящее время не только теоретический интерес, но и прикладные задачи, требующие быстрого и надежного решения [1-4].

В настоящее время возникла необходимость при проектировании новых объектов энергетики рассматривать такое их свойство, как защищенность и предусматривать меры защиты для уже существующих объектов. Главным направлением решения указанных прикладных задач, является совершенствование методов расчета параметров и характеристик тех физических процессов и явлений, которые протекают при формировании ПФ, и их влияние на системы энергетики (ОЭ), а также разработка методов рационального проектирования ОЭ с учетом ожидаемых воздействий и обеспечения требуемой надежности функционирования систем и объекта в целом [5-7].

С целью обеспечения устойчивого функционирования ОЭ в ЧС из существующих компонент живучести наиболее гибкой является защищенность, так как средства и методы защиты могут применяться на любой стадии жизненного цикла системы – от проектирования до эксплуатации как в мирное, так и в военное время. На практике свойство защищенности обеспечивается путем организации и осуществления комплексной защиты ОЭ [2,3,9].

Как известно, комплексная защита – это совокупность организационных инженерно-технических мероприятий, направленных на обеспечение требуемой живучести ОЭ в условиях воздействия ПФ ЧС природного и техногенного характера [3,7].

Известно, что всякая система защиты предназначается для уменьшения или предотвращения предполагаемого ущерба. Однако, указанное снижение не является самоцелью, а направлено на осуществление обеспечения выполнения поставленных задач. Следовательно, основную цель комплексной защиты можно сформулировать следующим образом: обеспечение выполнения поставленных задач и требований с минимальными потерями или требуемая живучесть при минимуме потерь П. В аналитическом виде

$$P = \min \{P_i\}, P_{\text{ж}}(T) \geq P_{\text{ж}}^{\text{треб}}(T), \quad (1)$$

где P_i – множество потерь структурных элементов i -го вида (технические системы, персонал и т. д.), при ограничениях на возможные ресурсы защиты и время ее осуществления [6,8].

Подобная формулировка определяет подчиненное значение системы защиты как одной из обеспечивающих подсистем, которая способствует успешному выполнению целевых функций ОЭ.

Основные цели комплексной защиты достигаются путем решения следующих основных ее задач [2,10]:

предотвращением воздействия на структурные элементы ОЭ;

при осуществленном воздействии уменьшением до допустимых значений уровней действующих механических, электромагнитных, радиационных и других ПФ;

обеспечением нормального функционирования ОЭ при радиоактивном, химическом и биологическом (РХБ) загрязнении окружающей среды.

Решение этих задач позволяет обеспечить требуемую живучесть как в момент воздействия ПФ, так и после него, в течение времени действия длительных ПФ.

Организация и осуществление комплексной защиты ОЭ базируется на четырех главных основных принципах: комплексности, оперативности, непрерывности, достаточности [9].

Принцип комплексности предусматривает обеспечение защиты полностью всех структурных элементов рассматриваемой системы, от которых зависит ее функционирование, от всех возможных видов поражающих воздействий, а также и генерируемых ими ПФ.

Это означает, что должно осуществляться сохранение технических систем, зданий и сооружений, персонала от всех ПФ ЧС, т. е.

$$P_c^{\Pi}(\tau) = P_c^{\Phi\Pi\Phi}(\tau) \cdot P_c^{\text{ХПФ}}(\tau) \cdot P_c^{\text{БПФ}}(\tau), \quad (2a)$$

$$P_c^{\text{ТС}}(\tau) = \prod_j \prod_i P_{cij}^{\Phi\Pi\Phi}(\tau), \quad (2б)$$

где $P_c^{\Pi}(\tau)$ – вероятность сохранения персонала при воздействии ПФ ЧС; $P_c^{\text{ТС}}(\tau)$ – вероятность сохранения технических систем при воздействии ПФ ЧС; $P_{cij}^{\Phi\Pi\Phi}(\tau)$ – вероятность сохранения j -го средства при воздействии i -го ПФ.

Принцип непрерывности защиты основывается на ее постоянном осуществлении как в пространстве, так и во времени, т. е. на всех этапах функционирования ОЭ (непрерывность во времени). В соответствии с этим принципом защита осуществляется с различным уровнем защищенности на всех этапах жизненного цикла ОЭ [6,11].

Для формального описания этого принципа процесс функционирования ОЭ в условиях воздействия ПФ ЧС возможно представить в виде операционной модели, т. е. последовательности действий и операций, которые необходимо осуществить для достижения целей функционирования. Для достижения указанных целей каждый этап должен осуществляться с необходимой вероятностью сохранения, т.е.

$$P_c(\tau_{\phi}) = \prod_i P_c(t_i), \quad \tau_{\phi} = \sum_i t_i, \quad (3)$$

где τ_{ϕ} – продолжительность (время) функционирования; t_i – длительность i -го этапа функционирования; $P_c(t_i)$ – вероятность сохранения на i -м этапе.

Принцип оперативности базируется на своевременном проведении всех защитных мероприятий, постоянной готовности объекта к выполнению поставленных задач. Оперативность защиты определяется прежде всего качеством работы органов управления.

И, наконец, принцип достаточности допускает, что объем и содержание предпринимаемых защитных мер и усилий должен обеспечивать требуемый уровень живучести ОЭ. Задачи, стоящие перед защитой, и принципы ее осуществления определяют структуру и содержание комплексной защиты ОЭ.

В основу построения структуры комплексной защиты ОЭ положен принцип эшелонирования защиты. Этот принцип устанавливает ряд защитных барьеров между поражающими воздействиями и защищаемой системой (ее структурными элементами) [5,6].

В структуре можно выделить два основных функционально независимых защитных барьера: активную и пассивную системы защиты (рис. 1). В подобной схеме недостаточная защитная способность каждого из барьеров повышается за счет их взаимного резервирования: сначала решается задача активной защиты, а в случае ее «отказа» срабатывает барьер пассивной защиты.

Показатель защищенности при этом описывается с помощью выражения

$$P_{cз}(T) = 1 - [(1 - P_{cз}^a) \cdot (1 - P_{cз}^n(T))], \quad (4)$$

где $P_{cз}^a, P_{cз}^n$ – вероятности сохранения, обеспечиваемые активной и пассивной защитой, соответственно.

Активная защита предназначена для предотвращения частичного или полного уничтожения (вывода из строя) поражающими факторами ЧС или средствами поражения противника, и, следовательно, решает первую задачу комплексной защиты. Вероятность сохранения защищаемого элемента будет определяться вероятностью поражения соответствующим ПФ.



Рис. 1. Структура комплексной защиты

Цель активной защиты достигается решением следующих задач (выполнением мероприятий) защиты [8,9]:

- раннее обнаружение источников ЧС. Задача решается силами и средствами системы мониторинга и прогнозирования ЧС;
- физическая охрана ОЭ.

Барьер пассивной защиты начинает «функционировать», если активная защита не смогла предотвратить факт воздействия, и оно свершилось.

Следовательно, пассивная защита предназначена для того, чтобы исключить или снизить результаты воздействия ПФ как в момент их возникновения (взрывы различного

происхождения и др.), так и в течение времени сохранения их поражающего действия. В свою очередь, пассивная защита подразделяется на составляющие (подсистемы) – структурную и инженерно-техническую (ИТЗ) защиту.

Инженерно-техническая защита предназначена для обеспечения защищенности (стойкости) элементов системы при комплексном воздействии ПФ.

Как уже отмечалось, стойкость структурных элементов обеспечивается удовлетворением требований по стойкости, задаваемых в процессе проектирования относительно всех механических, радиационных, химических, биологических и электромагнитных ПФ и оценивается при помощи вышеприведенных показателей.

Для обеспечения живучести структуры в целом проводятся следующие основные мероприятия, образующие в совокупности подсистему структурной защиты [4].

Во-первых, рассредоточение элементов структуры в пространстве, т. е. выбор взаиморасположений, исключающих возможность одновременного поражения более одного элемента при воздействии ПФ ЧС. В этом случае минимальное расстояние между двумя элементами будет равно

$$L_{\min} \geq R_{n1} + R_{n2}, \quad (5)$$

где R_{n1}, R_{n2} – радиусы поражения элементов.

Во-вторых, структурная избыточность, достигаемая при помощи дублирования и резервирования.

Дублирование (резервирование) позволяет существенно увеличить стойкость элементов и связей между ними, так как вероятность сохранения в этом случае будет равна (аналогично 4)

$$P_{c2}(T) = 1 - (1 - P_{c1}) \cdot (1 - P_{c2}), \quad (6)$$

где P_{c1}, P_{c2} – вероятности сохранения основного и резервного элементов, соответственно.

Мероприятия структурной и ИТЗ осуществляются, как правило, на этапе проектирования и строительства (создания систем). Для созданной системы защищенность становится ее внутренним свойством, определяющим сохранение структуры и элементов. Изменить ее можно только путем модернизации или реконструкции, проводимой силами проектных организаций и организаций промышленности.

Создание современных сложных систем связано с использованием приемов и методов системного подхода, в основу которого положен комплексный охват главных показателей совершенства системы, таких как качество, стоимость, эффективность, реализуемость, и, кроме этого, наиболее полный учет множества связей ее многочисленных элементарных объектов и подсистем. При этом сложную задачу создания ОЭ необходимо решать, обеспечивая заданные свойства ЭМРХБ защищенности, являющиеся частными структурными составляющими более общих свойств.

При самом высоком уровне технического совершенства современных ОЭ (например, АЭС), их высокой технической и эксплуатационной, эффективности функционирования в условиях действия ПФ ЧС может быть крайне низкой, если не будет обеспечено одно из важнейших свойств ОЭ – их защищенности [9].

Моделирование ОЭ позволяет проанализировать и оценить все виды опасных ПФ, которые физически в целом воссоздать не представляется возможным. При этом решаются последовательно задачи анализа и синтеза ЭМРХБ защищенности ОЭ, включающие анализ возможных воздействий на функционирование ОЭ, сравнительную оценку уровней

воздействия, защищенности; формирование и нормирование требований к системам и подсистемам ОЭ с учетом требований ЭМРХБ защищенности.

Разработка обобщенной модели защищенности ОЭ включает в себя формализацию процесса функционирования объекта во времени с учетом влияния последствий прекращения функционирования элементов, при воздействии ПФ.

При этом защищенность ОЭ достигается при помощи не одного, а практически всех ее структурных элементов и обеспечивается мероприятиями, проводимыми на каждой из составляющих, структуры в зависимости от их защищенности [6,7].

При практическом моделировании одна из главных проблем заключается в большой размерности модели, которая связана со сложностью структуры ОЭ, сложностью функциональных и конструкционных связей подсистемы, а также разнородностью параметров совершенства (надежность, стоимость, техническая эффективность, живучесть, целевая эффективность и т. п.). С целью решения указанной проблемы используют различные инженерные и научные приемы, связанные с формализацией наиболее важных факторов и ограничением степени детализации структуры, которые можно определить решением конкретной поставленной задачи.

На первом этапе необходимо самая общая укрепленная концептуальная модель защищенности, которая по возможности должна охватывать наиболее общие и существенно влияющие факторы и использовать обобщенные показатели. В дальнейшем более детальному исследованию подлежат «узкие» места с точки зрения ПФ, требующие учета достаточно большого числа характеристик и параметров опасности. Такой анализ производится для специализированных субмоделей по частным показателям электромагнитной, РХБ защищенности, увязанным с обобщенным показателем.

Наиболее общий показатель для ОЭ – вероятность функционирования в условиях воздействия ПФ ЧС. Тогда обобщенная модель реализует случай независимого рассмотрения опасности ПФ по соответствующим показателям, когда ЭМРХБ защищенность определяется как вероятность непревышения допустимых с точки зрения нормального функционирования состояний элементов (подсистем), а общий показатель защищенности определяется как вероятность выполнения задач без учета ПФ.

В общем виде модель ОЭ представляет собой многоуровневую систему блочной структуры на основе последовательной декомпозиции, которой строятся специализированные модели [3,8].

На высоком уровне такой системы находится ОЭ, представленный в виде сложной системы (рис. 2), на втором уровне ее основные составляющие узлы технических систем объекта.

Следующий уровень (блоки) охватывает специализированные блоки, которые являются объектом моделирования – функциональные подсистемы ОЭ, системы обеспечения и т. д. На этом уровне в качестве показателей нормального функционирования выступают показатели стойкости и защищенности. Отдельные блоки этого уровня уже не решают отдельную целевую задачу всей системы, а рассматриваются в плане обеспечения живучести ОЭ в целом.

Поэтому они сами не обладают свойством живучести, когда рассматриваются в составе ОЭ.

На нижнем уровне структуризации объекта моделирования находятся разнообразные элементы системы, которые анализируются вне рамок модели и рассматриваются как базовые элементы подсистем. Их характеристики могут рассматриваться в определенной степени независимо от рассматриваемого ОЭ, так как здесь удобно оперировать статическими характеристиками стойкости и защищенности узлов [7,9].

На этом уровне производится оценка типа «отказа» и установление его влияния (связи) на работу других элементов и на более высокие уровни, вплоть до самого верхнего.

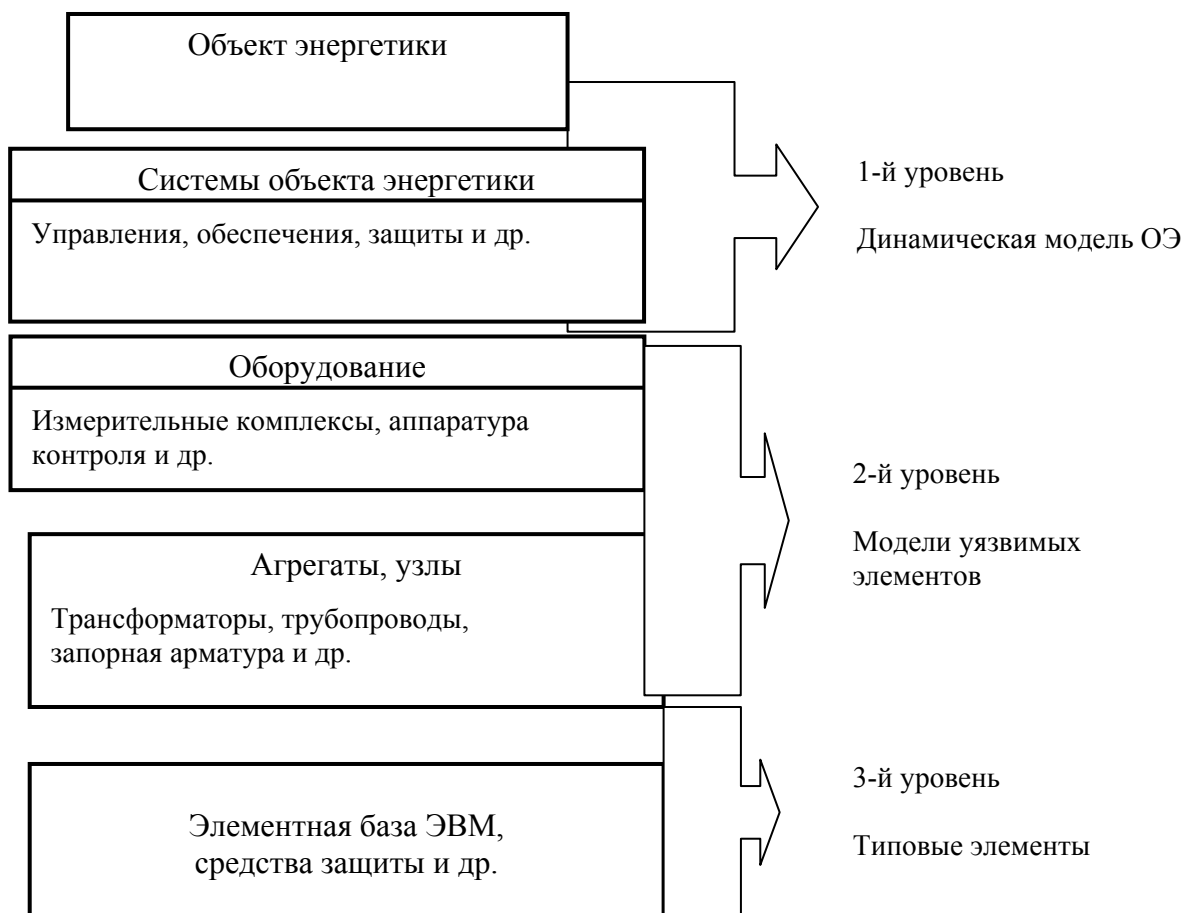


Рис. 2. Обобщенная модель объекта энергетики

Элементы при осуществлении анализа подразделяются на группы согласно следующим признакам, связанных с характером и проявлением «отказа»:

- прямое воздействие «отказа» на завершение функционирования второго и первого уровней;

- временное прекращение выполнения целевой задачи при восстановлении в течение определенного (допустимого) времени для восстанавливаемых ОЭ;

- частное снижение эффекта целевого назначения на 1-м и 2-м уровнях.

На этом уровне производится оценка типа «отказа» и установление его влияния (связи) на работу других элементов и на более высокие уровни, вплоть до самого верхнего. Элементы при анализе делятся на группы по следующим признакам, связанным с характером и проявлением «отказа»:

- прямое влияние «отказа» на прекращение функционирования второго и первого уровней;

- временное прекращение выполнения целевой задачи при восстановлении в течение определенного (допустимого) времени для восстанавливаемых ОЭ;

- частное снижение эффекта целевого назначения на 1-м и 2-м уровнях.

Облик ОЭ по защищенности определяется методом итерации, существо которого заключается в следующем: на первом этапе определяются показатели защищенности и увязываются с задаваемыми общими требованиями по живучести. Если уровень защищенности оказывается недостаточным, то применяются способы и средства защиты, и далее цикл по-

вторяется на новом уровне. Следует отметить, что указанный метод может эффективно применяться как на стадии разработки системы (прогнозирование защищенности). Производимые при этом расчеты охватывают анализ воздействующих поражающих нагрузок и стойкостных характеристик при выполнении всех ограничений, структурных и функциональных связей и требований. На базе полученных данных строится структурно-логическая схема работы системы. При использовании данных о работе рассматриваемой системы осуществляется разработка логико-вероятностной модели штатного (без ПФ) и внештатного функционирования ОЭ, являющаяся центральным звеном модели живучести.

В соответствии с рис. 1, безусловное выполнение целевых задач ОЭ зависит от совместного сохранения нормального функционирования технических систем объекта различного целевого назначения. В свою очередь, их нормальное функционирование определяется сохранением работоспособности функциональных подсистем объекта при воздействии ПФ. Вышеназванные компоненты ОЭ являются пространственно разнесенными, поэтому осуществлять оценку воздействия на них и их живучесть возможно независимо для каждой, объединяя следствие в общем показателе

$$P_3^{OЭ}(t) = P_3^{TC}(t) \cdot P_3^{BTC}(t), \quad (7)$$

где $P_3^{OЭ}$ – показатель защищенности ОЭ в целом; P_3^{TC} – условная вероятность сохранения технической системы ОЭ при условии воздействия ПФ; $P_3^{BTC}(t)$ – условная вероятность выполнения целевой задачи технической системой ОЭ при условии сохранения технической системы.

Функциональная модель данной совокупности может быть представлена в виде структуры:

$$S(OЭ) = \{ S_1, S_2, R_{(S_1 S_2)}, R_{(S_1 S_1)}, R_{(S_2 S_2)}, R_{(S_1 C)}, R_{(S_2 C)} \},$$

где $S_1 = \left[\{S_i / i A\}_1, A = \{1, 2, \dots, a\} \right]$ – множество элементов ОЭ; i – номер элемента ОЭ.

Для i -го элемента ОЭ $S_i = \langle i, x_i, t_i^i, t_i^e, \gamma_i \rangle$; n_i – номер элемента (количество в ОЭ), x_i – режим работы; $[t_i^h, t_i^k]$ – интервал работы; γ_i – значимость системы.

$S_2 = \left[\{S_j / j B\}_2, B = \{1, 2, \dots, b\} \right]$ – множество элементов, обслуживающих i -ю систему;

$$S_j = \langle c_j, x_j, t_j^h, t_j^k, \gamma_j \rangle;$$

c_j – число задействованных элементов на j -ой системе ОЭ; v_j – режим работы; $[t_j^h, t_j^k]$ – интервал цикла управления; $\{R_{\sigma, \tau} / \sigma, \tau \{S_1, S_2\}\}$ – совокупность отношений между множествами и воздействующими ПФ [3,6].

В первом приближении показатель результативности функционирования ОЭ при воздействии ПФ ЧС запишем в виде математического ожидания числа целевых задач, успешно решаемых всеми элементами систем ОЭ.

$$M[S_1(t)] = \sum_{i=1}^a \gamma_i \cdot P_i^{OЭ}(t),$$

где $P_i^{OЭ}$ – вероятность выполнения задач для i -го элемента ОЭ.

$$P^{cc}(t) = P_{i1}^{cc}(t) \cdot P_3^{cc}(t),$$

здесь P_{i1}^{cc} – вероятность выполнения целевых задач в отсутствии воздействия ПФ; $P_K^{cc}(t)$ – вероятность выполнения целевых задач при воздействии ПФ на ОЭ.

Выбывший из строя элемент восполняется из резерва. Тогда

$$P_K^{BTC}(t) = \prod_{i=1}^n [P_{Ki} + (1 - P_{Ki}) P_{%oi}],$$

где $P_3^{BTC}(t)$ – вероятность выполнения задачи i -м элементом; P_{zi} – вероятность сохранения образца i -го элемента при воздействии ПФ; P_{ei} – вероятность его «восстановления» (ремонта или ввода из резерва).

При прекращении функционирования j -го элемента управление передается на другой. Тогда для i -ой системы ОЭ функционирование будет зависеть от числа элементов, сохранивших нормальное функционирование после воздействия ПФ. Вероятность сохранения Z объектов из общего числа b будет равна

$$P(b, z) = \sum_{j=0}^b C_b^z \cdot P_{ij}^z \cdot (1 - P_{ij})^{b-z} \cdot \Phi(Z),$$

где $\Phi(Z)$ – показатель эффективности элемента при функционировании Z их сохранившихся; P_{ij}^z – вероятность обеспечения управления, зависящая от вероятности сохранения i -го элемента.

$$P_t = \left[1 - \prod_{\ell} (1 - P_{\ell}) \right],$$

где $\ell = 1, \dots, q$ – число сеансов управления за время t .

Рассматривая для ОЭ только условия, связанные с сохранением технических средств и персонала, обеспечивающих функционирование ОЭ за время, не превышающие заданное, получим:

$$P_t(t \leq t_3) = [1 - (1 - P_{1ст}) (1 - P_{2пн})],$$

где $P_{1ст}$ – вероятность выполнения задачи стационарным элементом; $P_{2пн}$ – то же для подвижного элемента.

Для каждого из них

$$P_{1,2} = P_{мс}^{пф} + (1 - P_{мс}^{пф}) \cdot P_{\epsilon 1,2}(t \leq t_{30}),$$

где $P_{мс}^{пф}$ – вероятность сохранения технических средств при воздействии ПФ;

$P_{\epsilon 1,2}(t \leq t_{30})$ – вероятность их восстановления за время не более заданного.

Окончательно получаем

$$P_3^{OЭ}(t) = \prod_{i=1}^n [P_{zi} + (1 - P_{zi}) \cdot P_{6i}] \cdot \sum_{j=0}^6 C_6^z \cdot P_{ij}^z (1 - P_{ij})^{6-z} \cdot \Phi(z) \quad (8)$$

По приведенным выражениям можно произвести количественное оценивание как вклада, вносимого обеспечиваемыми уровнями защищенности ОЭ в решение целевых задач, так и степени точности их решения за счет возложенных на систему защиты в различных условиях воздействия ПФ функций.

Таким образом, описание теоретические основы базируются на математических и физических моделях взаимодействия ПФ с ОЭ и отражают взаимосвязь элементов теории ЭМРХБ защищенности и позволяют исследовать ее показатели и обосновывать критерии в зависимости от условий функционирования системы, ее структуры и топологии. На базе развитой теории ниже разрабатываются методы оценки параметров ПФ и исследования трансформации ЭМРХБ факторов в образцах системах ОЭ, способы и средства их защиты, а также иерархические имитационные модели ЭМРХБ защищенности систем ОЭ.

Литература

1. Кармишин А.М., Гуменюк В.И., Киреев В.А., Карнюшкин А.И., Резничек В.Ф. Общие интегральные представления показателей опасности техногенных аварий // Безопасность в техносфере. - 2013. Т. 2. № 6. С. 38-45.
2. Гуменюк В.И., Кармишин А.М., Киреев В.А. Проблемные вопросы промышленной безопасности // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. - 2013. № 3 (178). С. 320-324.
3. Махутов Н.А., Светик Ф.Ф., Гаденин М.М., Макартумьян В.Г. Фундаментальные исследования и прикладные разработки проблем комплексной безопасности // Материалы к 20-летней (1998-2018 гг.) реализации проекта «Многотомная серия «Безопасность России / Москва. - 2018. Сер. № 5 Информационный бюллетень.
4. Федосов А.В., Маннанова Г.Р., Шипилова Ю.А. Анализ опасностей, оценка риска аварий на опасных производственных объектах и рекомендации по выбору методов анализа риска // Нефтегазовое дело. Электронный научный журнал. - 2016. № 3. С. 322–336.
5. Гуменюк В.И., Кармишин А.М., Киреев В.А. О количественных показателях опасности техногенных аварий // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. - 2013. № 2 (171). С. 281-288.
6. Махутов Н.А. Комплексные, экспериментальные и расчетные методы исследования безопасности // В сборнике: Безопасность и мониторинг техногенных и природных систем материалы и доклады. - 2018. С. 7-8.
7. Котенко Д.А. Методы количественного оценивания безопасности АС // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. - 2008. № 52. С. 197-200.
8. Махутов Н.А. Безопасность и риски: системные исследования и разработки. Монография. Новосибирск. - 2017.
9. Махутов Н.А., Резников Д.О. Защищенность сложных технических систем: способы обеспечения в условиях наличия широкого спектра неопределенностей. // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. - 2017. № 6. С. 26-47.
10. Туманов А.Ю. Техногенные факторы воздействия и требования к защите энергетических народнохозяйственных объектов / А.Ю. Туманов, В.В. Домаков, В.Г. Кондратьев / НТВ СПбГПУ. Наука и образование. - 2010. № 4(110). С. 245–250.

11. Ефимов В. Ф. Актуальные проблемы оценки пространственно-временных показателей опасности техногенных аварий [Текст] / В.Ф. Ефимов, А.М. Кармишин, В.А. Киреев, А.И. Карнюшкин // Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций: Сб. докладов и выступлений на VIII научно-практ. конф. 8–10 октября 2008. СПб.: Изд-во УГПС МЧС России. - 2009. С. 199–210.

Сведения об авторах

Гуменюк Василий Иванович, профессор, профессор Высшей школы техносферной безопасности Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (СПбПУ), 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29. vasily.gumenyuk@mail.ru SPIN-код: 9387-7543

Куликович Алексей Викторович, доцент кафедры «Экологической безопасности телекоммуникаций» Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций, г. Санкт-Петербург; пр. Большевиков д. 22, корп. 1, 193232; E-mail: geochem@mail.ru SPIN-код: 9909-5911

Сакова Наталья Владимировна, доцент, доцент кафедры «Экологической безопасности телекоммуникаций» Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций, г. Санкт-Петербург; пр. Большевиков д. 22, корп. 1, 193232; доцент кафедры «Инноватики и интегрированных систем качества» Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург; E-mail: nat.sakova@mail.ru, SPIN-код: 2177-4133