

УДК 621.6 : 681.5

Е.В. Шитикова (аспірантка),
Г.В. Табунщик (канд. тех. наук, доц.)
Запорожский национальный технический университет
helenshitikova@gmail.com, galina.tabunshchik@gmail.com

МОДЕЛЬ РИСКОВ ПРОЦЕССА ИСПЫТАНИЙ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК НАЗЕМНОГО ПРИМЕНЕНИЯ

Рассмотрены вопросы надежности и функциональной безопасности газотурбинных установок наземного применения. Предложена интегрированная модель рисков процесса испытаний, выполнена ее формализация и детализация. Предложен метод выбора альтернативных контрмер.

Ключевые слова: газотурбинные установки наземного применения, надежность, безопасность, модель рисков, метод выбора контрмер.

Газотурбинные установки наземного применения (ГТУ НП) рассматриваются эксплуатирующими организациями как установки непрерывного действия, обеспечивающие бесперебойную работу в течение длительного рабочего времени. Одним из средств, позволяющих достигнуть хороших эксплуатационных характеристик установок, являются испытания, которые также обеспечивают высокую степень надежности и безопасности выпускаемых изделий.

Процесс испытаний ГТУ НП, начиная от подготовки технической документации до обработки результатов испытаний, характеризуется большим объемом решаемых задач, многоуровневостью этапов испытаний, неоднородностью информационных потоков, многообразием оцениваемых характеристик, большими материальными затратами и требует высокой точности обработки результатов. Поэтому обеспечение надежности проведения процесса испытаний ГТУ НП является достаточно актуальным направлением исследования.

Постановка задачи

При обеспечении надежности различных систем и процессов немаловажное место занимает риск-ориентированная методология, поскольку риск может служить количественной мерой надежности, безопасности, качества систем и объектов, а также является количественной оценкой неуспеха таких процессов и действий как проектирование, доводка и отладка, испытания, эксплуатация и т.д. [1].

Анализ нормативной документации позволил разработать макро- и микро- модели рисков для ГТУ НП, которые послужили основой для

создания интегрированной модели рисков ГТУ НП [2]. Однако испытания ГТУ НП - это процесс жизненного цикла ГТУ НП, который охватывает более широкий круг задач и имеет более обширные активы. Поэтому разработанные модели рисков ГТУ НП не учитывают всех аспектов анализа рисков процесса испытаний ГТУ НП.

Поэтому целью данной работы является разработка модели рисков процесса испытаний ГТУ НП. Для достижения данной цели необходимо разработать интегрированную модель рисков процесса испытаний ГТУ НП и формализовать ее.

Разработка моделей рисков процесса испытаний ГТУ НП

Применяя подход, использованный при разработке моделей рисков ГТУ НП [2], и опираясь на проведенную формализацию процесса испытаний [3] рассмотрим макро- и микро- модели рисков процесса испытаний.

Активами для макромоделей рисков являются материальные и нематериальные ресурсы процесса испытаний:

- материальная база, обеспечивающая проведение процесса испытаний;
- газотурбинная установка, включая все входящие функциональные системы и оборудование, как объект испытаний;
- участники испытаний и окружающая среда;
- результаты испытаний (информация о работе установки, данные результатов испытаний, отчеты и техническая документация).

Микромодель рисков отражает риски, влияющие на выполнение функций безопасности процесса испытаний (ФБПИ), которые были реализованы в качестве контрмер на уровне макромоделей. Под ФБПИ будем понимать функции, сбой которых может привести к немедленному возрастанию вероятности возникновения рисков [4].

Интегрированная модель рисков процесса испытаний, объединяющая макро- и микромоделей, представлена на рисунке 1, где уровни макро- и микро- моделей рисков для ГТУ НП являются подмножествами соответствующих уровней моделей рисков процесса испытаний. Таким образом, интегрированная модель рисков ГТУ НП [2] является составной частью интегрированной модели рисков процесса испытаний, способной к независимому функционированию.

Аналогом активов для микромоделей являются контрмеры макромоделей процесса испытаний. Контрмерами по снижению рисков в микромоделей являются меры обеспечения целостности безопасности процесса испытаний. Опасности для активов макромоделей, могут представлять опасность и для выполнения функций безопасности процесса испытаний.

Согласно рисунку 1 отличия между макро- и микромоделью состоит в активах, для которых обеспечивается безопасность.

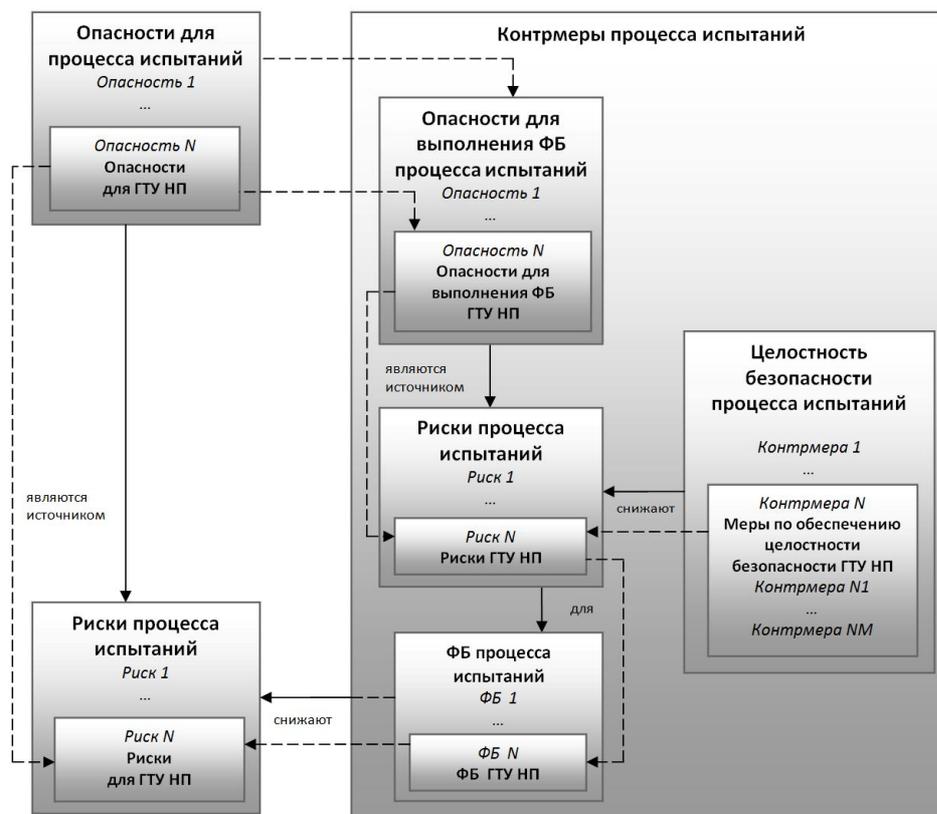


Рисунок 1 – Интегрированная модель рисков процесса испытаний

Была проведена формализация полученных моделей рисков процесса испытаний ГТУ НП.

Предложенные модели рисков представлены тройкой компонентов: для макромоделей - это "Опасности процесса испытаний", "Риски процесса испытаний" и "Контрмеры процесса испытаний"; для микромоделей рисков - "Опасности для выполнения ФБ процесса испытаний", "Риски для ФБ процесса испытаний", "Меры по обеспечению целостности безопасности процесса испытаний".

Каждая из этих моделей может быть представлена в виде гиперкуба данных, где измерения гиперкуба - это компоненты моделей рисков. Под гиперкубом данных будем понимать множество ячеек, которым соответствуют множества D и A :

$$M_R = H(D, A),$$

где $D = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$ - множество измерений гиперкуба (в нашем случае $n=3$ - по числу компонентов в каждой из моделей рисков);

$A_{d_i} = \{A_{1i}, A_{2i}, \dots, A_{ki}\}$, $i = 1, \dots, n$ - множество атрибутов измерения d_i

$A = A_{d_1} \cup A_{d_2} \cup \dots \cup A_{d_n}$ - множество атрибутов гиперкуба.

Каждой ячейке гиперкуба данных соответствует единственно возможный набор атрибутов измерений и они будут содержать меры - значение показателей: наименования опасности, риска и контрмеры. Множество атрибутов гиперкуба $H(D, A)$ обозначим как $V(H)$.

Полученную интегрированную модель рисков процесса испытаний ГТУ НП представим в виде следующего множества

$$R = \langle M_{R \text{ macro}}, M_{R \text{ micro}} \rangle,$$

где R – множество, отражающее интегрированную модель риска процесса испытаний ГТУ НП;

$M_{R \text{ macro}} = H_{\text{macro}}(D_{\text{macro}}, A_{\text{macro}})$ – макро модель рисков процесса испытаний ГТУ НП, представленная в виде гиперкуба данных;

$M_{R \text{ micro}} = H_{\text{micro}}(D_{\text{micro}}, A_{\text{micro}})$ – микро модель рисков процесса испытаний ГТУ НП, представленная в виде гиперкуба данных.

При этом срез $H'(D', A')$ будет определять подмножество гиперкуба, получившееся в результате фиксации атрибутов измерений и отражающее модель рисков для ГТУ НП. Таким образом справедливы записи

$$\begin{aligned} H'_{\text{macro}}(D'_{\text{macro}}, A'_{\text{macro}}) &\subseteq H_{\text{macro}}(D_{\text{macro}}, A_{\text{macro}}) \\ H'_{\text{micro}}(D'_{\text{micro}}, A'_{\text{micro}}) &\subseteq H_{\text{micro}}(D_{\text{micro}}, A_{\text{micro}}), \end{aligned}$$

где D'_{macro} - множество фиксированных измерений макро модели рисков процесса испытаний, соответствующее макро модели рисков ГТУ НП;

A'_{macro} - множество фиксированных атрибутов макро модели рисков процесса испытаний, соответствующее макро модели рисков ГТУ НП;

D'_{micro} - множество фиксированных измерений микро модели рисков процесса испытаний, соответствующее микро модели рисков ГТУ НП;

A'_{micro} - множество фиксированных атрибутов микро модели рисков процесса испытаний, соответствующее микро модели рисков ГТУ НП.

Идентификация компонент моделей рисков процесса испытаний

Детализацию макро- и микро- моделей рисков процесса испытаний необходимо проводить с учетом этапов испытаний, выделенных при декомпозиции процесса испытаний, основные из которых планирование, исполнение с мониторингом и управлением, обработка и анализ результатов [3].

В таблице 1 и таблице 2 представлены компоненты рассмотренных моделей рисков.

Таблица 1. Компоненты макромоделли рисков

	Опасности	Риски	Контрмеры
1	Этап планирования		
1.1	Ошибки при создании программы испытаний (ПИ) по причине человеческого фактора или отсутствии достоверной исходной информации	1) Создание некорректной ПИ 2) Риск нарушения сроков создания ПИ	Привлечение квалифицированного персонала 1) Корректная организация работ
1.2	Ошибки при создании технологии испытаний (ТИ) по причине человеческого фактора или отсутствии достоверной исходной информации	1) Создание некорректной ТИ 2) Риск нарушения сроков создания ТИ	1) Привлечение квалифицированного персонала 2) Корректная организация работ
1.3	Ошибки при создании графика испытаний (ГИ) по причине человеческого фактора или отсутствии достоверной исходной информации	1) Риск нарушения сроков создания ГИ	1) Обеспечение изготовления образца ГТУ НП
		2) Создание некорректного ГИ	2) Предусмотреть резерв материальных и нематериальных ресурсов для компенсации риска постфактум Корректная организация работ
2	Этап исполнения, мониторинга и управления		
2.1	Подготовительные работы		
2.1.1	Организационные ошибки персонала	Риски нарушения сроков решения организационных вопросов	Использование эффективных методик управления
2.1.2	Отказ или некорректная работа стендовых или объектовых систем, вспомогательного оборудования или дефекты установки в целом	Риски при производстве монтажа: дефекты изготовления ГТУ НП, нарушения сроков монтажа, отсутствия ресурсов	Обеспечение резерва материальных и нематериальных ресурсов
		Риски, возникающие при проверке систем ГТУ НП: физический отказ систем, оборудования; нарушение сроков, отсутствие ресурсов	
		Риски при подготовке стендовых или объектовых систем: физический отказ, нарушение сроков, отсутствие ресурсов	

Продолжение табл. 1

2.2	<i>Проведение испытаний</i>		
2.2.1	Отказ или некорректная работа функциональных систем, оборудования или установки в целом	Риск ошибок проектирования (конструктивные ошибки)	Применение новейших технологий проектирования и контроль на всех этапах проектирования Апробация технических решений
		Риск ошибок изготовления и/или монтажа установки (технологические ошибки)	Реализация процесса обеспечения качества
		Риск ошибок функционирования	Применение высоконадежной элементной базы
		Риск физического отказа систем, оборудования или установки в целом	Применение средств технического диагностирования*
2.2.2	Влияние внешних воздействий	Риск отказа из-за: <ul style="list-style-type: none"> • климатического воздействия; • механических и сейсмических воздействий; • электромагнитных воздействий 	Применение устойчивой элементной базы и физическая защита Обеспечение эксплуатации установки в проектных климатических условиях
		Риск отказа из-за нарушения параметров электропитания	Переключение на резервные источники питания*
		Риск отказа из-за пожара	Применение негорючих материалов Применение средств контроля, сигнализации и пожаротушения* Соблюдение правил пожарной безопасности персоналом
		Риск отказа из-за утечек топливного/магистрального газа	Применение средств сигнализации Применение взрывобезопасного оборудования Соблюдение правил пожарной безопасности персоналом
		Риск отказа из-за осознанных опасных действий или бездействий персонала	Защита от несанкционированного доступа (организационная, физическая, программная*)
		Риск отказа из-за ошибок или незнания персонала	Реализация мер по защите от ошибок персонала (маркировка, обучение и т.д.) Разграничение средств автоматического и ручного управления*

Продолжение табл. 1

2.2.3	Нанесение вреда окружающей среде и/или персоналу	1) Риск нанесения существенного или незначительного вреда окружающей среде 2) Риск нанесения существенного или незначительного вреда персоналу	Реализация мер по защите от чрезвычайных ситуаций (АО, НО, ЭО – аварийный, нормальный и экстренный останovy)*
3	Этап анализа и обработки результатов		
	Ошибки при анализе и обработке результатов	Риск потери информации о работе установки (тренды работы, акты, протоколы)	Реализация мер по защите информации, введение автоматизированной системы по учету, обработке и хранению результатов испытаний
		Риски неверной обработки результатов из-за ошибок или незнания персонала	Привлечение квалифицированного персонала

* – функции безопасности, реализованные в подсистемах безопасности и САУ

Таблица 2. Компоненты микромоделей рисков и соотношения между ними

	Опасности для выполнения ФБ	Риски для ФБ	Меры по обеспечению целостности безопасности
1	Физический отказ аппаратных средств подсистем обеспечения безопасности и САУ	Риск физического отказа аппаратных средств	Применение высоконадежной элементной базы
Структурная и функциональная избыточность			
Реконфигурация			
Соблюдение принципа единичного отказа			
Гальваническое и физическое разделение элементов			
Техническое диагностирование			
2	Нарушения качества выполнения ФБ	Риск отказа из-за неточности измерений	Метрологическое обеспечение
Риск отказа из-за нарушения временных характеристик		Временная, информационная и ресурсная избыточность	
		Применение элементной базы с высокими временными характеристиками	
3	Отсутствие ресурсов по причине некорректного их планирования	Риски нехватки временных, материальных и нематериальных ресурсов	Использование эффективных методик по управлению проектами
4	Ошибки персонала	Риск возникновения нештатных ситуаций	Реализация мер по обучению и дисциплинарному контролю за персоналом

Как видно из представленных таблиц при детализации моделей рисков процесса испытаний ГТУ НП для одних и тех же рисков были

выделены несколько альтернативных контрмер. Поэтому была определена новая задача - разработать метод по выбору контрмер из альтернативных вариантов.

Метод выбора контрмер

Следует отметить, что контрмеры разделяются по времени применения на упреждающие и контрмеры реакции на риск. Применение упреждающих контрмер осуществляется до наступления события неуспеха, а контрмер реакции на риск - после. При этом необходимо понимать, что затраты по реализации упреждающих контрмер будут взиматься вне зависимости от того наступило или нет событие неуспеха в отличие от контрмер реакции на риск, затраты на реализацию которых требуются только в случае наступления нежелательного события. С другой стороны применение последних не всегда полностью может компенсировать событие неуспеха, что, в конечном счете, может привести к увеличению риска осуществления данного события.

Поэтому при наличии альтернативных вариантов контрмер у одного и того же события неуспеха был разработан метод выбора контрмер, который состоит в следующем.

Шаг 1. Выделим для рассматриваемого объекта опасности P , риски R и контрмеры K , причем некоторые из выделенных контрмер могут быть как упреждающими, так и реакции на риск.

Шаг 2. Для каждой из контрмер определим следующие критерии сравнения: затраты на реализацию контрмер $L(K)$, степень компенсации события неуспеха от применения контрмеры k' , тип контрмер - является ли данная контрмера упреждающей или реакцией на риск.

Шаг 3. Оценим относительные веса k каждой из контрмер по отношению к альтернативным вариантам.

При определении относительных весов альтернативных контрмер рекомендуется придерживаться принципа приемлемого риска ALARP, который подразумевает, что реализация контрмер не должна требовать неоправданно высоких затрат или неоправданно больших усилий, т.е. применение контрмер K осуществляется за счет реально имеющихся (ограниченных) ресурсов и целесообразно только в том случае, если $L(K) < L(R)$, где $L(R)$ - ущерб при наступлении риска R .

Полученные расчетные данные вносятся в качестве мер (значений параметров) в соответствующие ячейки гиперкуба данных разработанных моделей рисков и использоваться лицом принимающим решение при выборе альтернативных контрмер.

Шаг 4. На основании относительных весов k каждой из контрмер определим график реакции на риск.

Пример выбора относительных весов для этапа "Планирование" процесса испытаний ГТУ НП приведен в таблице 3.

Как видно из таблицы 3 контрмера «Привлечение квалифицированного персонала» может быть как упреждающей так и реакцией на риск. А контрмеры K_{311} и K_{312} изначально были альтернативными.

Таким образом, как видно по относительным весам каждой из альтернативных контрмер, риски R_{11} , R_{12} , R_{21} и R_{22} целесообразно компенсировать упреждающими контрмерами, тогда как R_{31} контрмерой реакции на риск.

Таблица 3. Компоненты этапа "Планирование" процесса испытаний ГТУ НП

	Опасности, Р	Риски, R	Контрмеры, K	Относительные веса, k	Степень компенсации события неуспеха, k'
1	Р ₁ - Ошибки при создании ПИ по причине человеческого фактора или недостатка достоверной исходной информации	R ₁₁ – Риск создания некорректной ПИ R ₁₂ - Риск нарушения сроков создания ПИ	K ₁₁₁ =K ₁₂₁ – Содержание квалифицированного персонала на постоянной основе	0,67	0,17
			K ₁₁₂ =K ₁₂₂ – Временное привлечение квалифицированных кадров	0,33	0,83
			K ₁₃₁ =K ₁₃₂ – Корректная организация работ	1	–
2	Р ₂ - Ошибки при создании ТИ по причине человеческого фактора или недостатка достоверной исходной информации	R ₂₁ – Риск создания некорректной ТИ R ₂₂ - Риск нарушения сроков создания ТИ	K ₂₁₁ =K ₂₂₁ – Содержание квалифицированного персонала на постоянной основе	0,67	0,17
			K ₂₁₂ =K ₂₂₂ – Временное привлечение квалифицированных кадров	0,33	0,83
			K ₂₁₃ =K ₂₂₃ – Корректная организация работ	1	–
3	Р ₃ - Ошибки при создании ГИ по причине человеческого фактора или недостатка достоверной исходной информации	R ₃₁ - Риск нарушения сроков создания ГИ	K ₃₁₁ – Обеспечение изготовления образца ГТУ НП	0,43	0,14
			K ₃₁₂ – Предусмотреть резерв материальных и нематериальных ресурсов для компенсации неуспеха постфактум	0,57	0,86
		R ₃₂ – Риск создания некорректного ГИ	K ₃₂₁ – Корректная организация работ	1	–

Выводы

В ходе проведенной работы были разработаны макро- и микромоделли рисков процесса испытаний ГТУ НП, а также интегрированная модель рисков процесса испытаний.

По результатам разработки интегрированной модели рисков процесса испытаний ГТУ НП установлено, что макро- и микромоделли рисков ГТУ НП являются подмножествами соответствующих моделей рисков процесса испытаний, т.е. риски процесса испытаний ГТУ НП содержат риски и самой установки, что отражено в формальном представлении данной модели в виде гиперкуба данных.

Проведена детализация компонентов представленной модели.

Авторами предложен метод выбора контрмер, основанный на принципе приемлемого риска, что позволяет построить экономически обоснованный график реакции на риск.

По результатам проведенной работы можно сделать вывод, что риск с большей долей вероятности и приносящий больший ущерб целесообразно компенсировать до наступления этого события, тогда как риск с большей долей неопределенности необходимо компенсировать постфактум за счет резервных фондов материальных и нематериальных ресурсов, формирование которых и должно происходить, исходя из приведенного анализа.

Разработанные модели рисков могут быть использованы в качестве основы для оценки рисков как самой ГТУ НП, так и ее процесса испытаний, с использованием полученных результатов в автоматизированной системе мониторинга процесса испытаний ГТУ НП.

Список литературы

1 Шитикова Е.В. Модель анализа рисков газотурбинных установок наземного применения [Текст] / Е.В. Шитикова, Г.В. Табунщик // Тези доповідей. II Всеукраїнська науково-практична конференція, м. Запоріжжя, 10-11 березня 2011р. «Системний аналіз. Інформатика. Управління. САІУ-2011». – Запоріжжя: Класичний приватний університет, 2011. – С. 238-239.

2 Шитикова Е.В. Анализ рисков газотурбинных установок наземного применения [Текст] / Е.В. Шитикова, Г.В. Табунщик // Вісник двигунобудування. – 2012. - №1. – С. 54-59.

3 Шитикова Е.В. Моделирование процесса испытаний газотурбинных установок наземного применения [Текст] / Е.В. Шитикова, Г.В. Табунщик // Системний аналіз. Інформатика. Управління (САІУ-2012): матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції (м. Запоріжжя, 14–16 березня 2012 року) / Міністерство освіти і науки України, Запорізька обласна державна адміністрація, Академія наук вищої школи України, Класичний приватний університет. – Запоріжжя : КПУ, 2012. – С. 307-308.

4 ISO 12100:2010 Safety of machinery – General principles for design – Risk assessment and risk reduction – 77 pg.

Надійшла до редакції 08.09.2011.

Рецензент: канд. техн. наук, доц. Зеленева І.Я.

О.В. Шитікова, Г.В. Табунщик

Запорізький національний технічний університе

Модель ризиків процесу випробувань газотурбінних установок наземного використання. Розглянуті питання надійності та функціональної безпеки газотурбінних установок наземного використання. Запропонована інтегрована модель ризиків процесу випробувань, виконана її формалізація та деталізація. Запропоновано метод вибору альтернативних контрзаходів.

Ключові слова: газотурбінні установки наземного використання, надійність, безпека, модель ризиків, метод вибору контрзаходів

H. Shitikova, G. Tabunshchik

Zaporizhzhya National Technical University, Zaporizhzhya

Risk model of the process of testing gas turbine units for terrestrial usage . The article deals with the questions of reliability and functional safety of the gas turbine units for terrestrial usage. An integrated risk model of the gas turbine units for terrestrial usage is developed by the authors. Formalization and detalization of risk models are performed. A method for selection of alternative countermeasures is proposed.

Keywords: gas turbine unit for terrestrial using, reliability, safety, risk model, countermeasures, selection method of countermeasures