ВТО И ЛОГИКО-ВЕРОЯТНОСТНЫЕ МОДЕЛИ НЕВАЛИДНОСТИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ

Е. Д. Соложенцев

В связи с вступлением страны в ВТО мы излагаем систематизации по построению логико-вероятностных моделей невалидности экономических, технических и организационных систем и процессов. Мы рассматриваем примеры построения ЛВ-моделей невалидности системы электроснабжения и предотвращения взрыва склада боеприпасов и описываем программное обеспечение для оценки и анализа риска невалидности систем и процессов.

Введение

В работе [3] академик А. И. Татаркин и член-корреспондент РАН Р. С. Гринберг оценивают социально-экономические последствия присоединения России к Всемирной торговой организации (ВТО) и излагают методики диагностирования экономической безопасности регионов страны. При вступлении в ВТО есть еще одна проблема: функционирующие системы, процессы и объекты должны иметь оценки невалидности в соответствии со стандартом ИСО 9000-2001. Наличие сертификата на оценку невалидности влияет на конкурентоспособность и стоимость системы и выпускаемой продукции.

Невалидность, согласно стандарту ISO 9001-2001 по оценке качества систем, экономических и производственных процессов, есть несоответствие параметров и элементов системы техническим условиям и требованиям [2]. Понятие «невалидность» применимо к системам и процессам, включая логистику, проектирование, изготовление, испытания, управление, маркетинг и др.

Первая работа по оценке невалидности экономических процессов на основе логико-вероятностного (ЛВ) моделирования принадлежит С. В. Богословскому [1]. Однако в ней отсутствует раздел построения моделей, а все примеры взяты из техники. Изложен только метод

группового исчисления Л-ситуаций путем их разложения по подфункциям, т. е. разложение Л-функции по набору ее аргументов [6].

Если для ЛВ-моделей риска имеется математический аппарат и программные комплексы, пусть даже с технической и военной терминологией [5][1], то проблема построения самих ЛВ-моделей невалидности сложных систем и процессов еще не решена. Поэтому говорить об участии экономистов и менеджеров в оценке и анализе невалидности их систем и процессов, да еще при отсутствии соответствующих коммерческих программных средств, не приходится. В работах [8, 9] рассмотрена только частная задача управления невалидностью доводочных испытаний сложного технического объекта, и необходимы дальнейшие разработки по этой важной проблеме.

Цель работы — выполнить систематизации по построению ЛВ-моделей риска невалидности / валидности сложных систем и процессов на основе компонентов и положений И[3]-технологий для экономики [8].

Задачи работы:

1. Предложить типовые решения по построению моделей невалидности систем.

2. Изложить обобщения и систематизации на примерах построения ЛВ-моделей риска невалидности:

— экономических, технических и технологических процессов,

— системы энергоснабжения промышленного предприятия,

— системы предотвращения взрыва склада боеприпасов.

3. Оценить Software для построения и анализа ЛВ-моделей невалидности.

1. Систематизации по построению ЛВ-моделей невалидности

В проблеме ЛВ-управления риском невалидности имеются четыре аспекта [6]:

1) *инженерно-экономический:* выделение состояний, приводящих к невалидности системы, и инициирующих параметров, вызывающих ее невалидность;

2) *методологический:* определение понятия невалидности как события по аналогии с такими событиями, как отказ и неуспех функционирования;

3) *логический:* определение невалидности событий и Л-переменных и кратчайших путей валидности (КПВС) и невалидности (КПНС) системы;

4) *вычислительный:* переход от Л-модели к В-модели риска невалидности, часто имеющий громадную вычислительную сложность.

Разработка сценария невалидности является творческим процессом, присущим людям, глубоко знающим функционирование системы. Только специалист может сформулировать полное число невалидных состояний.

Повторные события. ЛВ-модели риска невалидности сложных систем и процессов имеют:

— повторные элементы как средства резервирования для обеспечения валидности системы;

— повторные элементы, участвующие в нескольких сценариях и кратчайших путях возникновения невалидных состояний системы.

Повторные элементы приводят к большому числу комбинаций состояний системы. Впервые сложную ЛВ-модель с повторными элементами рассмотрел И. А. Рябинин для надежности электроснабжения атомной подводной лодки (задача № 35) [6].

ЛВ-модели риска на основе реальных и ассоциативных представлений. Сложными моделями невалидности на основе описания реальных процессов в документации схем и технологий являются: электроснабжение предприятия, экономические, производственные и технологические процессы.

Сложными моделями невалидности на основе ассоциативных представлений по сценариям событий являются взрыв склада боеприпасов и экономические и организационные системы.

Основные определения:

— *Валидность* — исправность, успешное функционирование, соответствие требованиям нормативов;

— *Невалидность* — отказ, неисправность, несоответствие требованиям функционирования по нормативам (например, температура газа после компрессора газоперекачивающего агрегата магистрального трубопровода больше допустимой, шумность самолета в децибелах при посадке больше допустимого значения, цвет покраски вентиля на компрессорной станции не

[1] См. также Аттестационный паспорт программного средства ROCS 2 [автор В. А. Проурзин] №270, выданный 18.02.2010 г. Федеральной службой по экологическому и атомному надзору.

Таблица 1

Модели в технологии построения ЛВ-модели риска невалидности системы

№	Исходные данные		Примечание
	Техническая документация	Сценарий	
1	Схема функционирования системы	Таблица связей событий в системе	Рис. 4, табл. 2, 6
2	Модель в виде таблицы КПВС или КПНС		Табл. 3, 5, 7
3	Упорядоченная таблица КПВС или КПНС		Табл. 5, 7
4	Модель в виде схемы функциональной целостности		Рис. 2
5	Модель в виде дерева невалидности системы		Рис. 3
6	Л-модель риска невалидности системы		Формулы (1–6)
7	Ортогональная Л-модель риска невалидности системы		—
8	В-модель риска невалидности системы		—
9	Кортежное представление ЛВ-модели невалидности		—
10	Машинное представление ЛВ-модели		—
11	Модель ЛВ-анализа риска невалидности системы		Табл. 4

соответствует установленному в технических условиях, наличие пыли на электрощите атомной электростанции и др.).

— *КПВС* — кратчайшие пути валидности системы или процесса;

— *КПНС* — кратчайшие пути невалидности системы или процесса.

ЛВ-модели риска невалидности систем и процессов. Построение ЛВ-модели риска невалидности сложной системы следует начинать сверху вниз. Представим в «стандартном» виде (рис. 1) верхнюю часть структурной модели риска невалидности системы:

Y — событие невалидности системы как дизъюнкция производных событий;

Y_1, Y_2, Y_3, Y_4 — производные события, в которые собраны КПВС или КПНС, обладающие каким-то важным свойством, например, включение в конъюнкции только инициирующего события X_1 — источника энергии — из множества возможных источников. Это позволяет исследовать риск невалидности как всей системы Y, так и ее производных событий, свойств и состояний. Появляется возможность исследовать комплексные Л-модели риска невалидности: например, $Y = Y_1 \vee Y_2$; $Y_1 \wedge \overline{Y}_2$; ….

Л-модель риска невалидности системы Y получим логическим объединением ($\vee$) Л-моделей Y_1, Y_2, Y_3, Y_4:

$$Y = Y_1 \vee Y_2 \vee Y_3 \vee Y_4. \qquad (1)$$

Далее ее приводят к ортогональной форме и получают вероятностную модель риска (В-модель), которую используют для вычисления риска невалидности и вкладов инициирующих событий в риск невалидности системы Y. Параллельно строятся и исследуются Л- и В-модели для Y_1, Y_2, Y_3, Y_4.

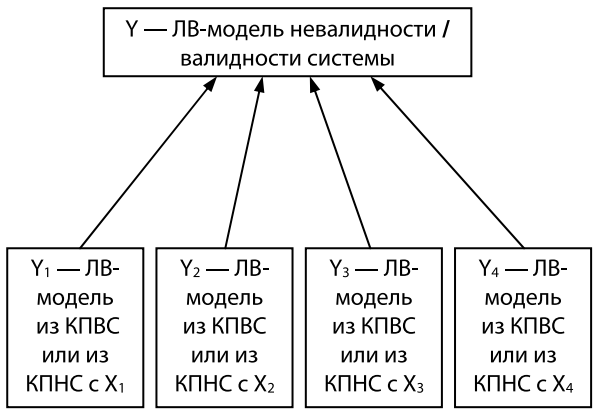


Рис. 1. *Верхние уровни структурной модели риска невалидности системы*

ЛВ-модели риска невалидности и валидности ради однотипности и простоты используют только кратчайшие пути успешного функционирования (валидности) или кратчайшие пути возникновения невалидности и не используют минимальные сечения отказов [6].

Для построения ЛВ-модели риска невалидности системы могут использоваться ЛВ-модели, приведенные в табл. 1. В столбце «Примечание» приведены ссылки на рисунки, таблицы и формулы, которые приводятся далее в статье.

Для вычислений используются программные комплексы [5][1], которые имеют разные интерфейсы для ввода данных (в том числе графического) и машинного представления ЛВ-модели риска невалидности. При построении ЛВ-модели риска невалидности конкретной системы в зависимости от используемого про-

[1] См. также Аттестационный паспорт программного средства ROCS 2 [автор В. А. Проурзин] №270, выданный 18.02.2010 г. Федеральной службой по экологическому и атомному надзору.

граммного комплекса используют не все модели табл. 1, а только некоторые.

2. Типовая ЛВ-модель риска невалидности систем и процессов

Рассмотрим задачу построения ЛВ-модели риска невалидности для экономических, технических и организационных систем. Приведенный пример достаточно прост, но соответствует реальной технологии доводочных испытаний сложного объекта [8].

Процесс или система Y может иметь несколько состояний Y_1, Y_2, …, Y_n, которые обозначим Л-переменными с теми же идентификаторами, принимающими значения 0 или 1. Эти состояния могут быть валидными или невалидными. Состояния вызываются параметрами Z_1, Z_2, …, Z_k. Эти качественные или количественные параметры имеют допустимые значения, могут быть неприемлемыми или опасными и рассматриваться как инициирующие для появления невалидных состояний Y_1, Y_2, …, Y_n. Обозначим параметры логическими переменными с теми же идентификаторами, имеющими значения 0 и 1.

Сценарий модели невалидности. Пусть например, в системе могут появиться невалидные состояния Y_1, Y_2, …, Y_6, которые вызываются (←) невалидностью параметров:

$$Y_1 \leftarrow Z_3, Z_8, Z_9, Z_{10};\ Y_2 \leftarrow Z_1, Z_5, Z_6, Z_{11};$$
$$Y_3 \leftarrow Z_1, Z_4, Z_5, Z_{10};\ Y_4 \leftarrow Z_2, Z_3, Z_8, Z_5, Z_{11};$$
$$Y_5 \leftarrow Z_4, Z_7, Z_9, Z_{10};\ Y_6 \leftarrow Z_2, Z_6, Z_8, Z_{11}.$$

Сценарий появления, например, невалидного состояния Y_1 выглядит так: появление невалидного состояния Y_1 зависит от $Z_3 \wedge Z_8 \wedge Z_9 \wedge Z_{10}$ ($\wedge$ — оператор Л-умножения).

Невалидные состояния системы или процесса инициируют (→) параметры:

$$Z_1 \rightarrow Y_2, Y_3;\ Z_2 \rightarrow Y_6, Y_4;\ Z_3 \rightarrow Y_1, Y_4;$$
$$Z_4 \rightarrow Y_3, Y_5;\ Z_5 \rightarrow Y_2, Y_3, Y_4;\ Z_6 \rightarrow Y_2, Y_6;$$
$$Z_7 \rightarrow Y_5;\ Z_8 \rightarrow Y_1, Y_6;\ Z_9 \rightarrow Y_1, Y_5;$$
$$Z_{10} \rightarrow Y_1, Y_3, Y_5;\ Z_{11} \rightarrow Y_4, Y_2, Y_6.$$

По изложенному сценарию связь невалидных состояний системы с невалидными параметрами представим в виде таблицы (табл. 2), где в клетках 1 — означает наличие связи. По табл. 2 запишем КПНС для Y_1, Y_2, …,Y_6 (табл. 3). ЛВ-модель невалидности всей системы Y является дизъюнкцией КПНС.

Кратчайшие пути возникновения невалидных состояний системы можно записать также в виде кортежей, где инициирующие события заданы в скобках своими номерами:

Таблица 2

Связь невалидных состояний системы и ее параметров

		Параметры										
		Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5	Z_6	Z_7	Z_8	Z_9	Z_{10}	Z_{11}
Состояния	Y_1			1					1	1	1	
	Y_2	1				1	1					1
	Y_3	1			1	1					1	
	Y_4		1	1		1						1
	Y_5				1			1		1	1	
	Y_6		1				1		1			1

Таблица 3

Кратчайшие пути невалидных состояний системы

№	Кратчайшие пути возникновения невалидных состояний системы (КПНС)
1	$Z_3Z_8Z_9Z_{10}$
2	$Z_1Z_5Z_6Z_{11}$
3	$Z_1Z_4Z_5Z_{10}$
4	$Z_2Z_3Z_5Z_{11}$
5	$Z_4Z_7Z_9Z_{10}$
6	$Z_2Z_6Z_8Z_{11}$

$$\begin{aligned} Y_1 &= (3, 8, 9, 10);\\ Y_2 &= (1, 5, 6, 11);\\ Y_3 &= (1, 4, 5, 10);\\ Y_4 &= (2, 3, 5, 11);\\ Y_5 &= (4, 7, 9, 10);\\ Y_6 &= (2, 6, 8, 11). \end{aligned} \qquad (2)$$

Кортежи Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5, Y_6 удобны для планирования исследований на компьютере при изменении повторных и инициирующих событий.

Логико-вероятностное описание невалидных событий. Обозначим заглавными буквами Z инициирующие события или логические переменные для этих параметров, принимающие значение 0 или 1 в зависимости от того, принадлежат ли значения параметров области допустимых значений Ω_z. Может быть несколько этапов развития системы. Для каждого этапа (режима) заданы (определены) свои множества Z, z, Ω_z. На этапе инициирующие события Z рассматриваются как Булевы логические переменные, принимающие значения 1 (валидность) и 0 (невалидность).

В Л-сценарии для итогового события Y логические выражения для производных событий Y_1, Y_2, Y_3, …, Y_6, зависящие от инициирующих событий Z, являются КПНС.

В оценке и анализе процессов и систем будем использовать термин «валидность» («невалидность») событий: инициирующих Z, производ-

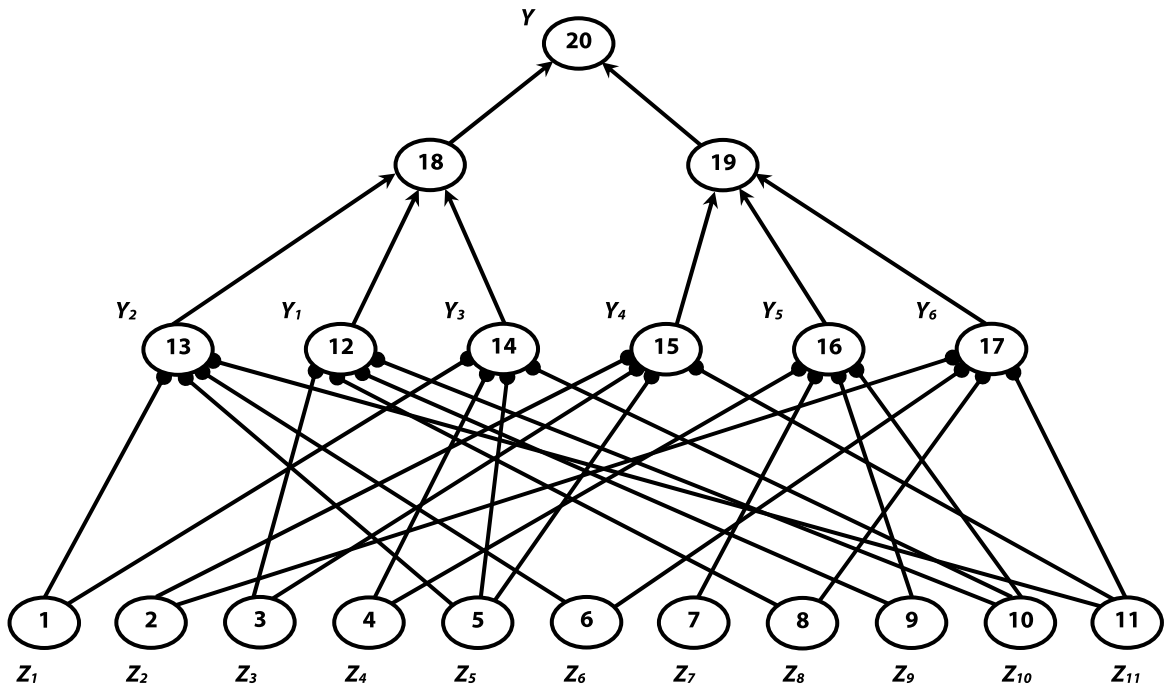


Рис. 2. *Схема функциональной целостности для невалидности системы*

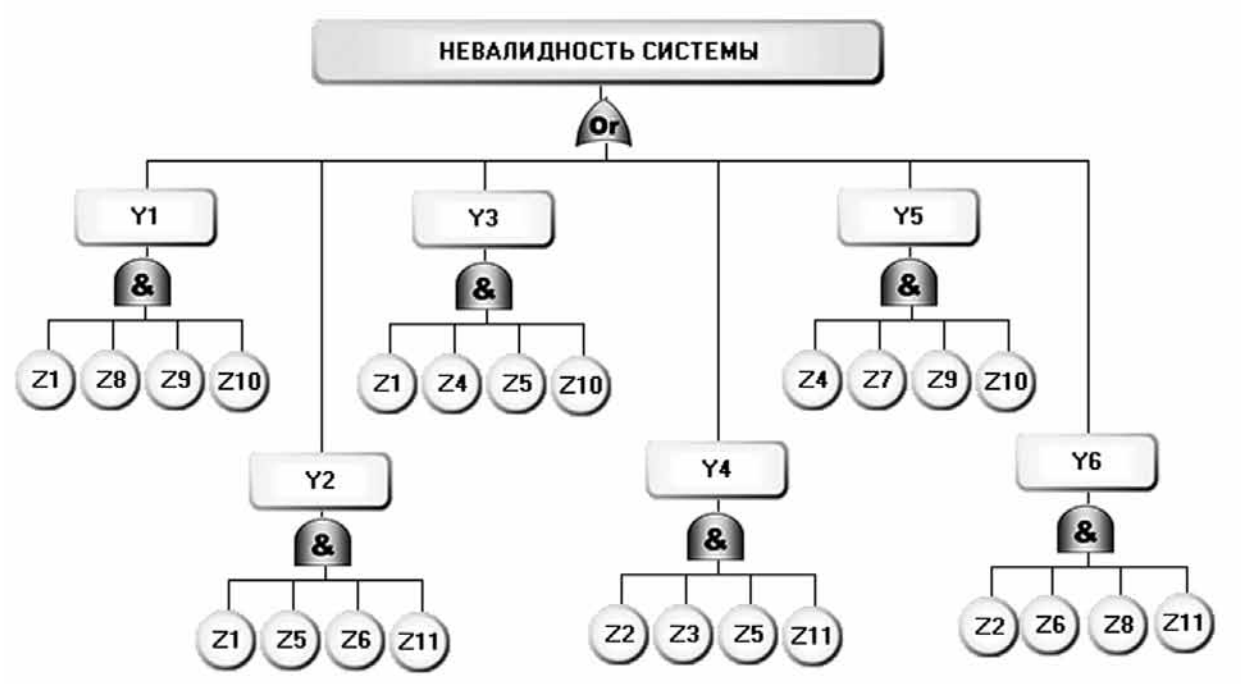


Рис. 3. *Дерево невалидности системы*

ных Y_1, Y_2, Y_3, …, Y_6 и итогового Y. Невалидность Y рассматривается в функции невалидности инициирующих событий.

Невалидность и валидность итогового события Y будем измерять риском (вероятностями) $P_y = P\{Y = 0\}$ и $Q_y = 1 - P_y = P\{Y = 1\}$. Точно так же невалидность и валидность производных Y_1, Y_2, Y_3, …, Y_6 и инициирующих событий Z будем измерять вероятностями, например $P_{Zi} = P\{Z_i = 0\}$ и $Q_{Zi} = 1 - P_{Zi} = P\{Z_i = 1\}$. При оценке невалидности систем и процессов безразлично, что рассматривать: риск невалидности или вероятность валидности системы, так как их сумма равна 1. То или иное предпочтение выбирают из-за удобства сценарного понимания валидности или невалидности исследуемой системы. Ниже будем записывать Л- и В-функции для невалидности.

Определим невалидность событий для рассмотренной системы. Итоговое событие яв-

ляется невалидным $Y = 0$, если система имеет невалидные значения каких-либо параметров; $Y = 1$, если система работает и имеет валидные параметры Z и Y. Производные невалидные события в системе: $Y_1 = 0$, если состояние невалидно; $Y_1 = 1$, если состояние валидно; $Y_2 = 0$, если состояние невалидно; $Y_2 = 1$, если состояние валидно и т. д. Невалидность инициирующих параметров выявляют по их измерениям или вычислениям. Инициирующие параметры как Л-переменные принимают значения 1 или 0. Инициирующие события невалидны $Z_1 = Z_2 = \ldots = Z_{11} = 0$, если соответствующие им параметры $Z_1, Z_2, \ldots, Z_{11}$ находятся вне областей своих допустимых значений $\Omega_{Z1}, \Omega_{Z2}, \ldots, \Omega_{Z11}$.

ЛВ-модель риска невалидности процесса или системы. По табл. 2 связей событий невалидности системы построена модель невалидности в виде схемы функциональной целостности (рис. 2) на ПК АСМ 2001 [5]. В нем вершины 18 и 19 являются фиктивными.

Большей простотой и наглядностью отличается модель невалидности в виде «дерева невалидности» (рис. 3), построенная на ПК ROCS 2 (см. Аттестационный паспорт программного средства ROCS 2 № 270 (автор В. А. Проурзин), выданный 18.02.2010 г. Федеральной службой по экологическому и атомному надзору).

Л-модель риска невалидности системы Y, исходя из табл. 3 и рис. 2 и 3, следующая:

$$Y = Y_1 \vee Y_2 \vee Y_3 \vee Y_4 \vee Y_5 \vee Y_6. \qquad (3)$$

Здесь: Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5, Y_6 — логические переменные для производных событий невалидности.

По табл. 2 запишем Л-модели риска невалидности событий Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5, Y_6 (знак $\wedge$ в коньюнкциях опущен):

$$\begin{aligned} Y_1 &= Z_3 Z_8 Z_9 Z_{10}; \\ Y_2 &= Z_1 Z_5 Z_6 Z_{11}; \\ Y_3 &= Z_1 Z_4 Z_5 Z_{10}; \\ Y_4 &= Z_2 Z_3 Z_5 Z_{11}; \\ Y_5 &= Z_4 Z_7 Z_9 Z_{10}; \\ Y_6 &= Z_2 Z_6 Z_8 Z_{11}; \end{aligned} \qquad (4)$$

Здесь $Z_1, Z_2, \ldots, Z_{10}, Z_{11}$ — Л-переменные для невалидных инициирующих параметров, вызывающих невалидность производных событий Y_1, Y_2, Y_3, Y_4,Y_5, Y_6.

Л-переменные $Z_1, Z_2, \ldots, Z_{10}, Z_{11}$ входят повторно (несколько раз) в Л-модели Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5, Y_6. Например, Z_1 входит в Y_2, Y_3, а Z_4 входит в Y_3, Y_5. Л-модель для итогового события Y имеет повторные элементы. Чтобы перейти от Л-модели к В-модели риска невалидности, необходимо преобразовать Y к бесповторной ортогональной форме.

Приведенные описания моделей невалидности могут быть использованы при другом числе производных и инициирующих событий и большей детализации сценариев событий. Преобразование Л-модели риска невалидности системы Y в В-модель риска невалидности имеет высокую вычислительную сложность и невозможно без компьютера.

Оценка и анализ риска невалидности. Выполнены расчетные исследования риска невалидности системы при $P_1 = P_2 = \ldots = P_{11} = 0{,}5$ для контроля правильности вычислений и оценки структурной значимости инициирующих событий. Риск невалидности рассматриваемой системы $P_y = 0{,}268066$. Характеристики невалидности инициирующих событий Z_i приведены в табл. 4: риск невалидности P_i событий, их значимости, вклады на минус и вклады на плюс в вероятность невалидности системы.

Значимость — изменение риска невалидности системы при изменении невалидности инициирующего параметра от 0 до 1; вклад на минус — изменение риска невалидности системы при изменении вероятности инициирующего параметра от P_i до 0; вклад на плюс — изменение риска невалидности системы при изменении вероятности инициирующего события от P_i до 1. Чем в большее число дизъюнкций Л-модели риска невалидности входит инициирующее событие, тем больше его структурная значимость (табл. 4).

Таблица 4

Характеристики невалидности инициирующих событий

События	Риск невалидности, P_i	Значимость события	Вклад события на «–»	Вклад события на «+»	Число повторов события в ДНФ
Z_1	0,5	+0,1298	–0,0649	+0,0649	2
Z_2	0,5	+0,1416	–0,0708	+0,0708	2
Z_3	0,5	+0,1357	–0,0678	+0,0678	2
Z_4	0,5	+0,1416	–0,0708	+0,0708	2
Z_5	0,5	+0,2119	–0,1059	+0,1059	3
Z_6	0,5	+0,1357	–0,0678	+0,0678	2
Z_7	0,5	+0,0654	–0,0327	+0,0327	1
Z_8	0,5	+0,1416	–0,0708	+0,0708	2
Z_9	0,5	+0,1533	–0,0766	+0,0766	2
Z_{10}	0,5	+0,2392	–0,1196	+0,1196	3
Z_{11}	0,5	+0,2314	–0,1157	+0,1157	3

Общая значимость инициирующего события (с учетом структуры и значения риска) и его вклады в риск невалидности системы подсчитываются по этой же приведенной схеме при задании реальных вероятностей инициирующих событий.

Структурный и вероятностный анализ по вкладам инициирующих событий в риск невалидности системы используются для управления невалидностью системы и оценки корректности самой Л-модели риска невалидности. Результаты исследования риска невалидности этой системы приведены в работе [9], где рассмотрено также управление риском невалидности системы на этапах развития системы и для всего процесса.

3. Модель валидности системы электроснабжения предприятия

Рассмотрим ЛВ-модель валидности (надежности) системы электроснабжения сложного предприятия — титано-магниевого комбината. Эта модель строится на реальной физической схеме электроснабжения. При полном отключении питания на три часа и более комбинат останавливается полностью с разрушением основного оборудования (электролизеры, печи, хлораторы и др.) без возможности восстановления. В связи с этим представляется актуальным анализ надежности (валидности) системы электроснабжения.

Схема электроснабжения предприятия. Схема системы электроснабжения, как модель валидности, представлена на рис. 4. Каждому элементу, для которого учитывается надежность, поставлена в соответствие вершина, которая имеет свой идентификатор. Вершины соединяются направленными дугами. Квадратами обозначены воздушные и кабельные линии электропередач, кругами — источники электроснабжения, шестиугольниками — подстанции. Итоговой вершиной Y является система коммутационных подстанций с подключенным к ней технологическим оборудованием. Для учета источника энергии и в качестве подстанции, ему сопоставлено две вершины X_1 и X_{11}, X_4 и X_{41}.

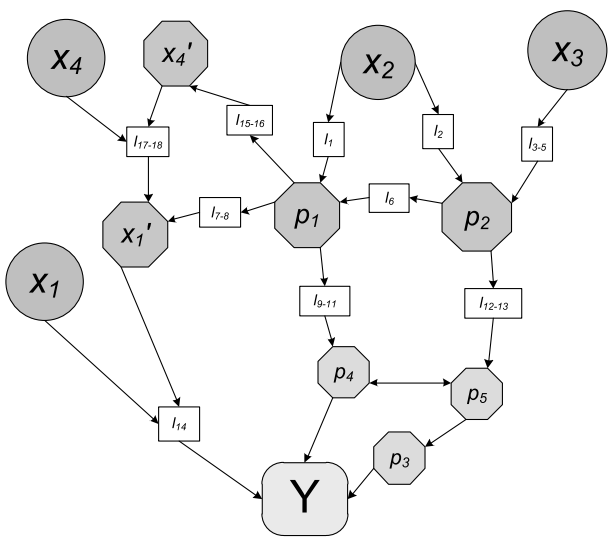


Рис. 4. *Схема (модель) электроснабжения комбината*

Обозначения элементов системы:

источники электроэнергии: X_1, X_2, X_3, X_4;

подстанции: X_{11}, X_{41}, P_1, P_2, P_3, P_4, P_5;

воздушные и кабельные линии: L_1, L_2, $L_{3–5}$, L_6, $L_{7–8}$, $L_{9–11}$, $L_{12–13}$, L_{14}, $L_{15–16}$, $L_{17–18}$.

В модели на рис. 4 параллельные линии электропередач сведены в одну вершину. Так, например, идентификатор $L_{3–5}$ означает сведение линий L_1, L_2 и L_3 в одну вершину. Уменьшение числа вершин сокращает число возможных состояний системы и упрощает расчеты. При этом надежность двух или трех параллельных линий выше, чем одной.

Кратчайшие пути валидности системы. В Л-модели риска для объекта, заданного электрической (физической) схемой, каждой вершине граф-модели ставится в соответствие логическая переменная. Она может принимать два значения: 0 — если элемент неисправен (невалиден), и 1 — если он находится в рабочем состоянии (валиден). Логическая функция валидности системы представляется в дизъюнктивной нормальной форме (ДНФ). Строки связаны логическим сложением — дизъюнкцией (ИЛИ), а элементы строки — логическим умножением — конъюнкцией (И).

По схеме (рис. 4) установлены КПВС системы (табл. 5). Общее их число равно 15, и они вызываются 21 инициирующим событием из векторов X, P, L.

Л-модель вероятности валидности системы запишется так:

$$Y = Y_1 \vee Y_2 \vee Y_3 \vee Y_4, \quad (5)$$

где: Y_1 — Л-модель валидности системы от источника X_1; Y_2 — Л-модель валидности системы от источника X_2; Y_3 — Л-модель валидности системы от источника X_3; Y_4 — Л-модель валидности системы от источника X_4.

Вероятностная модель валидности системы. Л-модель валидности системы Y получают логическим объединением Л-моделей для

Таблица 5

Кратчайшие пути валидности системы

№	Источник	Кратчайшие пути валидности системы	Л-модели с КПВС
1	КПВС с X_1	$X_1 L_{14}$	Y_1
2	КПВС с X_2	$X_2 X_{11} P_1 L_1 L_{7-8} L_{14}$	Y_2
3		$X_2 X_{11} P_1 P_2 L_2 L_6 L_{7-8} L_{14}$	
4		$X_2 X_{11} X_{41} P_1 L_1 L_{14} L_{15-16} L_{17-18}$	
5		$X_2 X_{11} X_{41} P_1 P_2 L_{3-5} L_6 L_{14} L_{15-16} L_{17-18}$	
6		$X_2 P_1 P_4 L_1 L_{9-11}$	
7		$X_2 P_1 P_2 P_4 L_2 L_6 L_{9-11}$	
8		$X_2 P_2 P_4 P_5 L_2 L_{12-13}$	
9		$X_2 P_2 P_3 P_5 L_2 L_{12-13}$	
10	КПВС с X_3	$X_3 X_{11} P_1 P_2 L_{3-5} L_6 L_{7-8} L_{14}$	Y_3
11		$X_3 X_{11} X_{41} P_1 P_2 L_{3-5} L_6 L_{14} L_{15-16} L_{17-18}$	
12		$X_3 P_1 P_2 P_4 L_{3-5} L_6 L_{9-11}$	
13		$X_3 P_2 P_4 P_5 L_2 L_{12-13}$	
14		$X3 P_2 P_3 P_5 L_{3-5} L_{12-13}$	
15	КПВС с X_4	$X_4 X_{11} L_{14} L_{17-18}$	Y_4

Y_1, Y_2, Y_3, Y_4. Л-модель валидности системы не может непосредственно использоваться для расчетов надежности, так как содержит повторные элементы. Используя программный комплекс, она переводится к ортогональной форме и далее вместо логических переменных подставляют вероятности их валидности и получают В-модель валидности системы.

Для исследуемой системы В-модель валидности содержит 171 слагаемое, каждое из которых есть произведение до 16 сомножителей (вероятностей). Учитывая ее громоздкость, она здесь, естественно, не приведена. Все вычисления выполняются на В-модели. Подставив в эту модель вероятности событий, можно получить надежность всей системы. Если элемент необходимо исключить из рассмотрения (например один из источников питания, подстанцию или линию электропередач), то достаточно в качестве вероятности его валидности подставить 0.

Вероятности валидности элементов системы рассчитывают на основе числа отказов в год при выбранном законе распределения наработки на отказ. Для воздушных и кабельных линий число отказов задают с использованием статистических данных из [8], для источников электроэнергии и подстанций — вероятности отказов определяют по экспертной информации [7].

При заданных вероятностях можно получить результаты для различных схем подключения с помощью обнуления вероятности валидности исключаемых элементов.

Кроме расчета надежности (валидности) системы электроснабжения, с использованием В-модели рассчитывались также вклады различных элементов в надежность (валидность) всей системы [5, 6]. Определялась также структурная значимость всех элементов, включая источники электроэнергии, для валидности системы. Рассчитывается она таким же образом, как и вклады в надежность, при этом вероятность валидности всех элементов системы задавалась равной 0,5. Таким образом, выделяются наиболее значимые элементы с точки зрения структуры. Увеличение надежности (валидности) этих элементов дает наибольший прирост надежности для всей системы.

Для полной прозрачности и осмысливания валидности рассматриваемой системы энергоснабжения можно также построить таблицу связей параметров (табл. 1), схему функциональной целостности (рис. 2), дерево валидности (рис. 3), систему кортежей (2), машинное табличное представление модели в виде файла [5].

4. Модель невалидности системы предотвращения взрыва склада боеприпасов

Ассоциативная ЛВ-модель риска невалидности системы строится по сценарию событий. Будем также использовать рис. 1 для представления верхнего уровня событий, ведущих к итоговому событию Y — взрыву склада боеприпасов.

Задача впервые была рассмотрена Г. Антоновым и описана в книге И. Рябинина [6]. Постановка задачи описывалась с помощью 3 «художественных» рисунков. Приведем простое и «стандартное» описание этой модели риска невалидности системы, введя таблицу связей событий.

По официальной статистике с 1990 по 1994 гг. произошло около 5000 чрезвычайных ситуаций на складах боеприпасов в Вооруженных силах РФ. Военные пытаются убедить общественность в том, что причиной происшествий стали роковые случайности. По их словам, склады удовлетворяли всем необходимым требованиям. Мнение же ученых таково: нельзя двигаться в сторону безопасности только методом проб и ошибок, от одной аварии и катастрофы к другой. Необходимы

упреждающие действия, а аппаратом выработки их стратегии должны стать ЛВ-модели риска.

Сценарии событий. Из анализа событий, произошедших при взрывах многих артиллерийских складов, выявлено, что для взрыва всего склада, состоящего из площадок открытого хранения, достаточно взрыва одного из снарядов в штабеле. Далее начинается процесс термического и динамического поражения осколками соседних штабелей и площадок, приводящих к их подрыву. Причем тушение возгорания на складе возможно только до первого взрыва.

В свою очередь, возгорание штабеля боеприпасов на площадке открытого хранения возможно от источника открытого огня, возникшего на территории склада, вследствие следующих инициирующих событий:

Z_1 — возгорание травы,

Z_2 — удар молнии,

Z_3 — умышленный поджог (диверсия),

Z_4 — взрыв снаряда рядом со штабелем при нарушении правил.

Для тушения источника огня, возникшего на технической территории, склад имеет первичные средства тушения (огнетушители, бочки с водой, ящики с песком), централизованную пожарную команду, а также средства тушения, которые может выделить соседняя воинская часть.

Кроме того, территория склада оборудована молниезащитой, имеется достаточное количество воды в пожарных водоемах, а охрана осуществляется штатным караулом, на который возложена функция противопожарного наблюдения.

Для оценки вероятности взрыва склада необходимо прежде всего составить сценарий состояний опасности системы. Названные ранее события Z_1–Z_4 являются не чем иным, как инициирующими событиями, а собственно инициирующими условиями, приводящими склад в опасное состояние, являются следующие:

Z_5 — неготовность штатной пожарной команды;

Z_6 — отсутствие первичных средств тушения пожара;

Z_7 — небдительное несение службы караулом;

Z_8 — временная неисправность подъездных дорог;

Z_9 — неисправность молниезащиты;

Z_{10} — неготовность взаимодействующей команды;

Z_{11} — отказ телефонной связи.

На основе инициирующих событий и условий составлены сценарии возникновения невалидных событий (возникновения взрыва), записанные в виде таблицы связей инициирующих событий и условий с событиями возникновения взрыва снаряда (табл. 6). В этой таблице связи невалидных событий системы с невалидными инициирующими событиями и условиями отмечены в клетках: 1 — наличие связи.

По табл. 6 составлена табл. 7 для кратчайших путей возникновения взрыва. Всего выявлено 14

Таблица 6

Связи инициирующих событий с событиями взрыва снаряда

КПНС	Инициирующие события										
	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5	Z_6	Z_7	Z_8	Z_9	Z_{10}	Z_{11}
1	1				1	1				1	
2	1					1		1			1
3	1					1		1			
4	1						1				
5		1					1		1		
6		1			1				1	1	
7		1			1				1		1
8		1						1	1		
9			1					1			
10			1				1				
11			1		1					1	
12			1		1						1
13				1	1	1					
14				1		1		1			

Таблица 7

Кратчайшие пути возникновения невалидного события

№	Источник пожара	Кратчайшие пути возникновения невалидного события (взрыва)	Л-модели с КПНС
1	КПНС с Z_1	$Z_1Z_5Z_6Z_{10}$	Y_1
2		$Z_1Z_6Z_8Z_{11}$	
3		$Z_1Z_6Z_6$	
4		Z_1Z_7	
5	КПНС с Z_2	$Z_2Z_7Z_9$	Y_2
6		$Z_2Z_5Z_9Z_{10}$	
7		$Z_2Z_5Z_9Z_{11}$	
8		$Z_2Z_8Z_9$	
9	КПНС с Z_3	Z_3Z_8	Y_3
10		Z_3Z_7	
11		$Z_3Z_5Z_{10}$	
12		$Z_3Z_5Z_{11}$	
13	КПНС с Z_4	$Z_4Z_5Z_6$	Y_4
14		$Z_4Z_6Z_8$	

таких путей, которые упорядочены по источникам пожара Z_1, Z_2, Z_3, Z_4.

Л-модель риска невалидности системы запишется так (рис. 1, табл. 6):

$$Y = Y_1 \vee Y_2 \vee Y_3 \vee Y_4. \quad (6)$$

Здесь Y_1 — Л-модель риска возникновения взрыва от источника пожара Z_1; Y_2 — Л-модель риска возникновения взрыва от источника пожара Z_2; Y_3 — Л-модель риска возникновения взрыва от источника пожара Z_3; Y_4 — Л-модель риска возникновения взрыва от источника пожара Z_4.

Запишем Л-модель риска невалидности для Y_1, Y_2. Y_3, Y_4:

$$\begin{gathered} Y_1 = Z_1Z_5Z_6Z_{10} \vee Z_1Z_6Z_8Z_{11} \vee Z_1Z_6Z_8 \vee Z_1Z_7; \\ Y_2 = Z_2Z_7Z_9 \vee Z_2Z_5Z_9Z_{10} \vee Z_2Z_5Z_9Z_{11} \vee Z_2Z_8Z_9; \quad (7) \\ Y_3 = Z_3Z_8 \vee Z_3Z_7 \vee Z_3Z_5Z_{10} \vee Z_3Z_5Z_{11}; \\ Y_4 = Z_4Z_5Z_6 \vee Z_4Z_6Z_8. \end{gathered}$$

Вероятностная модель риска невалидности системы. Л-модель риска невалидности системы не может непосредственно использоваться для расчетов надежности, т. к. содержит повторные элементы. Используя программный комплекс [8][1], ее приводят к ортогональной форме и далее вместо Л-переменных подставляют вероятности инициирующих и условных событий, получая вероятностную модель (В-модель) риска невалидности системы. Результаты исследований на ЛВ-модели риска взрыва склада боеприпасов подробно изложены в работе [6].

Для прозрачности и осмысливания невалидности рассматриваемой системы противодействия пожару и взрыву склада боеприпасов можно также построить схему функциональной целостности (рис. 2), дерево невалидности (рис. 3), структурную модель невалидности (рис. 4), системы кортежей (2), машинное табличное представление модели в виде файла [6].

5. Программные средства для ЛВ-моделей риска невалидности

Переход от Л-модели риска к В-модели риска невалидности на основе ортогонализации Л-модели возможен только при наличии специальных программных средств. Такие сертифицированные программные средства уже имеются: ПК АСМ 2001 [5] и ROCS 2[2].

В работе построение ЛВ-моделей риска невалидности и все вычисления выполнялись на программном комплексе, разработанном в ООО «Городской центр экспертиз» (г. Санкт-Петербург) (автор И. Петухов). Однако так как этот комплекс не имел сертификата, то результаты его работы контролировались вычислениями на программных комплексах А. Можаева [5] и В. Проурзина[3].

В ПК АСМ для построения ЛВ-модели риска невалидности системы задают: N_1 — число вершин графа; N_2 — максимальное число заходящих дуг в вершину (до 8); N_3 — число инициирующих вершин (событий); N_4 — максимальное число слагаемых в В-модели (до 600); N_5 — ранг максимального числа сомножителей в одном конъюнкте (до 20). Информацию о модели риска и вероятностях задают таблично файлами Gb.dat и Harel.dat.

Работа осуществляется в стандартном диалоге: установить исследуемые логические функции, ввести вид моделирования, ввести признак необходимости учета эффективности за Л-функциями, ввести значения показателей эффективности. Так как Л-модель и В-полином могут содержать большое число слагаемых и не помещаться в оперативной памяти компьютера, то в режиме диалога задают:

— ранг точности построения Л-моделей риска, для несложных сценариев задать 5, а для сложных — 20;

— признак полноты вывода Л-моделей риска (нужно ли обрезать хвосты);

— признак полноты вывода В-моделей риска;

— признак полноты вычислений.

После вычислений появляется экран с результатами: число слагаемых в Л-модели и в В-модели, вероятность (риск) невалидности системы. Полные результаты моделирования и анализа находятся в файле Rezasm: Л- и В-модели риска, таблицы вкладов инициирующих событий в риск системы для всех заданных Л-моделей Y, Y_1, Y_2, Y_3.

В программном средстве ROCS 2 реализованы специальные методы сокращения требуемых объемов памяти и снижения объема вычислений при работе с большими системами. Ввод и вывод данных и выбор методов направлены в первую очередь на удобство их использования при компьютерной реализации. Задание данных осуществляется с помощью графического ин-

[1] См. также Аттестационный паспорт программного средства ROCS 2 [автор В. А. Проурзин] №270, выданный 18.02.2010 г. Федеральной службой по экологическому и атомному надзору.

[2] Там же.

[3] Там же.

терфейса, осуществляющего построение дерева событий на основе множества кратчайших путей функционирования. ПК ROCS 2 имеет приемлемую стоимость.

Названные программные комплексы предназначены для оценки надежности в технике. Однако для построения ЛВ-моделей риска невалидности организационных и экономических систем и процессов и их исследований они имеют следующие недостатки:

1. Задачи ЛВ-моделирования и анализа риска изложены в необычных для экономики терминах: надежность, безопасность, устойчивость, схема функциональной целостности, общий логико-вероятностный метод и др.

2. Пакеты содержат много функций, которые не нужны при анализе риска в экономике (безотказность, восстанавливаемость, средняя наработка на отказ и др.).

3. Высокая стоимость сертифицированных программных комплексов для их приобретения для учебных целей и использования тысячами экономистов и менеджеров.

Поэтому необходима разработка дешевых программных комплексов для широкого круга задач, в том числе построения ЛВ-моделей риска невалидности систем и процессов.

Заключение

По результатам работы сделан ряд выводов.

1. Проблема построения моделей невалидности систем и процессов является актуальной, так как оценка риска невалидности систем и процессов есть обязательное требование стандарта ИСО 2000-9001 при вступлении страны в ВТО.

2. ЛВ-модели позволяют эффективно решать задачи оценки и анализа риска невалидности систем и процессов.

3. Проблема невалидности шире, чем надежность, и потребовала введения определений и понятий валидности и невалидности, кратчайших путей валидности и невалидности системы, представления модели невалидности в виде таблицы связей состояний системы и инициирующих событий и др.

4. Модели невалидности относятся к классу ЛВ-моделирование и используют компоненты информационных инновационных интеллектуальных технологий ($И^3$-технологий): процедуры (построение ЛВ-моделей риска, ЛВ-анализ риска, ЛВ-управление риском, ЛВ-прогнозирование риска), программные средства для ЛВ-моделирования, программные средства для оценки вероятностей событий по неточной нечисловой неполной экспертной информации.

5. Сделанные обобщения и систематизации по построению ЛВ-моделей риска невалидности касаются:

— инженерного, методологического, логического и вычислительного аспектов построения Л-моделей риска невалидности систем и процессов;

— учета повторности элементов и событий в ЛВ-моделях риска невалидности в сложных системах и процессах;

— учета особенностей ЛВ-модели риска невалидности, построенных на основе технической документации и по сценариям событий;

— технологии построения ЛВ-моделей риска невалидности с выделением моделей верхнего уровня в структуре модели и использованием десяти разных представлений ЛВ-моделей риска невалидности системы (табл. 1).

6. Предложена типовая схема построения ЛВ-моделей невалидности экономических, технических и организационных систем, включающая в себя:

— формулировку сценария модели риска невалидности;

— составление таблицы связей событий;

— построение ЛВ-модели риска невалидности на основе КПВС и КПНС;

— оценку корректности ЛВ-модели риска невалидности системы по вкладам событий (табл. 4).

7. Рассмотрена технология построения ЛВ-модели валидности системы электроснабжения предприятия, которая включает в себя следующие основные этапы: построение схемы функционирования системы электроснабжения, выделение кратчайших путей валидности системы, построение Л- и В-моделей валидности системы по КПВС.

8. Рассмотрена технология построения ЛВ-модели невалидности системы предотвращения взрыва склада боеприпасов, которая включает в себя этапы; составление сценария событий, составление таблицы связей событий и выделение КПНС, построение ЛВ-модели риска невалидности на основе КПНС, анализ корректности ЛВ-модели риска невалидности системы по вкладам событий.

9. Необходима разработка специальных программных комплексов для построения и анализа

ЛВ-моделей риска невалидности систем и процессов.

Список источников

1. *Богословский С. В.* Логико-вероятностные методы в экономике / Санкт-Петербургская академия межотраслевых наук (АМОН). — СПб. : 2007. — 196 с.

2. ГОСТ Р. ИСО 9001-2001. Системы менеджмента качества. Требования. Госстандарт России. — М. : Изд-во стандартов, 2001. — 30 с.

3. *Гринберг Р. С., Татаркин А. И.* Оценка социально-экономических последствий присоединения России к ВТО. — М.: Экономика, 2007. — 534 с.

4. Колесов Д. Н., Михайлов М. В., Хованов Н. В. Оценка сложных финансово-экономических объектов с использованием системы поддержки принятия решения АСПИД-3W: учеб. пособие. — СПб.: ОЦЭиМ, 2004. — 64 с.

5. Применение общего логико-вероятностного метода анализа технических, военных, организационно-функциональных систем и вооруженного противоборства / В. И. Поленин, И. А. Рябинин, С. К. Свирин, И. А. Гладкова / Под ред. А. С. Можаева. — СПб. : Санкт-Петербургское региональное отд. РАЕН, 2011. — 416 с.

6. *Рябинин И. А.* Надежность и безопасность структурно-сложных систем. — 2-е изд. — СПб. : Изд-во С-Петерб. ун-та, 2007. — 276 с.

7. *Савоськин Н. Е.* Надежность электрических систем. — Пенза: Изд. Пензенского государственного университета, 2003. — 101 с.

8. *Соложенцев Е. Д.* И³-технологии для экономики. — СПб. : Наука, 2011. — 400 с.

9. *Соложенцев Е. Д.* Логико-вероятностное управление риском невалидности доводочных испытаний машин, процессов и систем // Проблемы анализа риска. — 2010. — Т. 7. — №4. — С. 72-85.

УДК 330.101.5
ключевые слова: невалидность, система, процесс, риск, логика, вероятность, модель