

Применение методов логико-вероятностного исчисления профессора И.А.Рябина в программных комплексах

Теоретические разработки д.т.н. профессора **И.А.РЯБИНА**, представленные в данном электронном издании, применяются на практике специалистами ОАО «СПИК СЗМА» при выборе и обосновании структур сложных технических систем на основе сравнительного анализа надежности рассматриваемых вариантов.

ОАО «СПИК СЗМА» выполняет работы в области автоматизации технологических и производственных объектов на протяжении более 50 лет.

ОАО «СПИК СЗМА» с 1996 г. является базовой организацией Госстроя России по реализации научно-технической политики в области исследований, проектирования и наладки систем автоматизации технологических и производственных процессов и инженерного оборудования зданий и сооружений.

Начиная с 2001 г. в ОАО «СПИК СЗМА» ведутся работы по созданию, развитию и практическому применению «Программного комплекса автоматизированного структурно-логического моделирования и расчета надежности и безопасности систем «АРБИТР» Программный комплекс (ПК) «АРБИТР» разработан на основе общего логико-вероятностный метода (ОЛВМ) системного анализа, представляющего собой дальнейшее развитие логико-вероятностных методов оценки надежности структурно-сложных систем, основоположником которых является профессор **И.А.РЯБИН**.

ПК «АРБИТР» реализует новую информационную технологию автоматизированного структурно-логического моделирования и позволяет на основе заданной структурной схемы и вероятностных параметров элементов автоматически строить математические модели (логические и вероятностные) и выполнять расчеты различных показатели надежности, стойкости, живучести, устойчивости, технического риска, ожидаемого ущерба и реальной эффективности структурно-сложных высокоразмерных систем опасных производственных объектов. Логическая полнота ОЛВМ впервые позволила реализовать в одном ПК возможности существующих подходов (дереьев отказов и событий, блок-схем, графов связности и др.) к монотонному логико-вероятностному моделированию систем. Вместе с тем, ПК «АРБИТР» позволяет решать принципиально новый класс задач немонотонного логико-вероятностного моделирования структурно-сложных системных объектов и процессов.

В период с 2005 по 2007 год программный комплекс «АРБИТР» успешно прошел процедуру аттестации в "Совете по аттестации программных

средств" Научно-технического центра по ядерной и радиационной безопасности (НТЦ ЯРБ) Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор) РФ. На основании результатов экспертизы на программное средство "Программный комплекс АРБИТР (ПК АСМ СЗМА), базовая версия 1.0" выдан **Аттестационный паспорт Ростехнадзора РФ № 222 от 21 февраля 2007 г.** ПК «АРБИТР» стал первым аттестованным Ростехнадзором РФ отечественным программным средством анализа надежности и безопасности систем. ПК «АРБИТР» аттестован сроком на 10 лет и разрешен к применению на всех предприятиях, поднадзорных Ростехнадзору РФ

К настоящему времени накоплен значительный опыт практического применения ПК «АРБИТР» на предприятиях, в коммерческих и научно-исследовательских организациях, а также в высших учебных заведениях РФ. Работы по дальнейшему развитию теории ОЛВМ, технологии АСМ и совершенствованию ПК продолжаются.



АО «СПИК СЗМА» - производственно-инжиниринговая компания, основанная в 1961 г. Выполняет полный комплекс инжиниринговых услуг по автоматизации технологических процессов и производств, имеет собственное производство систем управления и электротехнического оборудования, центр продаж, сервисный и учебный центры.

Один из видов деятельности компании - **научная разработка методов и средств расчета надежности технически сложных систем на стадии проектирования, разработка специального программного обеспечения, обучение.**

Система менеджмента качества компании соответствует требованиям международного стандарта ISO 9001:2015

✉ **199106, 26-я линия В.О., дом 15, корп. 2, БЦ «Биржа»**

☎ **+7 (812)610-78-79**

@ **info@szma.com**

www.szma.com

И. А. Рябинин

**Надежность
и БЕЗОПАСНОСТЬ
структурно-
сложных
систем**

*Моей дорогой жене
Нине Даниловне Рябининой
посвящаю*



Рябинин Игорь Алексеевич (1925) — окончил Высшее военно-морское инженерное училище им. Ф. Э. Дзержинского, Военно-морскую академию кораблестроения и вооружения им. А. Н. Крылова; служил на кораблях Балтийского флота; доктор технических наук; контр-адмирал; профессор Военно-морской академии им. Н. Г. Кузнецова; действительный член Российской академии естественных наук.

Создал научную школу логико-вероятностных методов исследования надежности, живучести и безопасности структурно-сложных систем.

И. А. Рябинин

НАДЕЖНОСТЬ и БЕЗОПАСНОСТЬ структурно- сложных систем



**ПОЛИТЕХНИКА
ИЗДАТЕЛЬСТВО**

Санкт-Петербург, 2012

О Г Л А В Л Е Н И Е

Предисловие	8
Г л а в а 1. Структурно-сложные системы как объект исследования	11
1.1. Разнообразие существующих систем и выбор класса структурно-сложных систем для последующего исследования	11
1.2. Некоторые примеры структурно-сложных систем	13
1.3. Основные понятия и определения теории надежности и безопасности	18
Г л а в а 2. Основы логико-вероятностного исчисления	21
2.1. История возникновения логико-вероятностных методов	21
2.2. Некоторые сведения из алгебры логики	22
2.3. Основные логические операции	23
2.4. Основные определения и принятые обозначения	27
2.5. Некоторые теоремы алгебры логики и вероятностной логики	32
Г л а в а 3. Проблемы исходных данных	36
3.1. Проблемы получения исходных данных для моделей надежности и безопасности	36
3.2. Пути получения показателей надежности и безопасности	38
3.3. Доверительные интервалы для вероятности отказа	39
3.4. Допустимые интервалы и их роль в оценке надежности	45
3.5. Определение функций, характеризующих надежность восстанавливаемых изделий	50
3.6. Проверка гипотезы о законе распределения времени безотказной работы	74
Г л а в а 4. Логические модели надежности и безопасности	96
4.1. Общее представление о задачах, решаемых с помощью теории надежности и безопасности	96
4.2. Аналитические и графические формы представления условий работоспособности системы	101
4.3. Аналитические и графические формы представления опасного состояния системы	106
4.4. Булевы разности и их смысл	110
Г л а в а 5. Вероятностные модели надежности и безопасности	115
5.1. Общее представление о преобразовании функций алгебры логики в вероятностные функции	115
5.2. Алгоритм разрезания	118
5.3. Алгоритм ортогонализации	124
5.4. Рекуррентный алгоритм	128
5.5. Алгоритм наращивания путей	133
5.6. Схемно-логический метод	138
Г л а в а 6. Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно-сложных систем	148
6.1. Характеристики важности элементов	148
6.2. «Значимость» элемента в системе	154
6.3. «Вклад» и «ущерб» элемента	157
6.4. Двойные «веса» элементов	158
6.5. Двойные «значимости», «вклады» и «ущербы» элементов	164
6.6. О точности и достоверности оценки надежности структурно-сложных систем	166
6.7. Надежность систем, состоящих из элементов с тремя состояниями	173
6.8. Исследование надежности систем с кольцевой структурой	182
6.9. Анализ надежности корабельной электроэнергетической системы	185

Глава 7. Логико-вероятностные методы исследования безопасности структурно-сложных систем	195
7.1. О разработке основ теории безопасности	195
7.2. Возможные подходы к оценке риска как меры опасности	198
7.3. Опасность затопления подводной лодки	201
7.4. Оценка риска взрыва в отсеке подводной лодки	204
7.5. Оценка безопасности склада артбоеприпасов	208
7.6. Оценка безопасности участка железной дороги	215
7.7. Оценка риска поражения электрическим током	217
7.8. Риск как мера опасности в бизнесе	221
7.9. Факт как атрибут действительности	230
Заключение	233
Приложение 1. Процентные точки распределения χ^2	235
Приложение 2. Основные понятия безопасности	239
Приложение 3. Масштабы риска смерти в земных условиях (на человека в час)	241
Литература	243

CONTENTS

Introduction	8
Chapter 1. Structural-complex systems as an object of research	11
1.1. Variety of existing systems and the selection of the class of structural-complex systems for research	11
1.2. Examples of structural-complex systems	13
1.3. Main concepts and definitions of the theory of reliability and safety	18
Chapter 2. Main concepts of logical-probabilistic methods	21
2.1. History of origin logical-probabilistic methods	21
2.2. Some concepts of logical-mathematical calculus	22
2.3. Main logical operations	23
2.4. Main definitions and accepted designations	27
2.5. Some theorems of algebra of logics and probabilistic logics	32
Chapter 3. Problems of source data	36
3.1. Problems of receiving the source data for the models of reliability and safety	36
3.2. Ways for receiving the reliability indexes	38
3.3. Confidence intervals for probability of a refusal	39
3.4. Admissible intervals and their role in the estimation of reliability	45
3.5. Estimation of function describing the reliability of recovered products	50
3.6. Checking of a hypothesis about the distribution law of time of non failure work	74
Chapter 4. Logical models of reliability and safety	96
4.1. Main concept about the problems which may be solved by the theory of reliability and safety	96
4.2. Analytical and graphical forms of representing the conditions of system serviceability	101
4.3. Analytical and graphical forms of representing the dangerous state of the system	106
4.4. Boolean differences and their sense	110

ПРЕДИСЛОВИЕ

Феномен сложности современных технических систем (робототехнических комплексов, гибких производственных систем, атомных электростанций и ледоколов, пилотируемых орбитальных станций и космических кораблей, отраслевых и региональных информационно-вычислительных систем и др.), на наш взгляд, до конца не познан в научном плане и не решен удовлетворительно в прикладном смысле. Мощные гидростанции, газовые хранилища, химические комбинаты, шахты — все это крупные промышленные системы. Вероятность аварий на них меньше, чем у простых систем, но их последствия более масштабны и ликвидируются тяжелее. А ведь подчас работа таких больших систем зависит от нескольких операторов, от их квалификации и мастерства. В условиях дальнейшего развертывания научно-технического прогресса вопросы надежности и безопасности техники, вопросы дисциплины, порядка и организованности приобретают первостепенное и самостоятельное значение.

Повышая надежность элементов, вводя структурную и временную избыточность, применяя взаимозаменяемость и восстановление, а также иные меры повышения надежности систем, мы гарантируем так называемую отказоустойчивость системы, т. е. ее способность правильно функционировать при нескольких отказах ее элементов (двух, трех, иногда четырех).

Однако именно для сложных систем характерна возможность и весьма сложных (многократных) комбинаций событий, вероятность каждой из которых мала, а в сумме таких «невероятных» событий набирается немало. Усилия, направленные на повышение отказоустойчивости системы, необходимы, но они не обеспечивают ее безопасности. Даже специально создаваемые системы контроля и защиты, ориентированные на простой перебор возможных опасных ситуаций, не могут гарантировать защиты системы от произвольных комбинаций отказов, нарушений правил эксплуатации и иных неблагоприятных воздействий.

История возникновения, становления и развития теории надежности насчитывает уже более 40 лет, написаны сотни книг и десятки учебников, созданы разнообразные научные школы и получены новые знания. Однако успехи в области теории безопасности несравненно скромнее и менее известны.

Крупнейшие аварии и катастрофы в мире выявили существенную роль и значимость научных разработок теории безопасности. Понимая невозможность всеобъемлющего охвата феномена сложности современных технических систем, автор сознательно сузил область своих интересов только вопросами структурной сложности. Актуальность этой проблемы подтверждается хотя бы тем, что трудно привести не сотни книг, а всего одну-две, где бы научно решались задачи надежности и безопасности струк-

турно-сложных систем. Несмотря на солидный возраст теории надежности, и в ней остались «белые пятна», особенно связанные с проблемой получения объективных исходных данных о безотказности элементов, статистическая информация о которых принципиально не может быть достаточной для стандартной обработки (ввиду малого объема выборки).

Хотя, на первый взгляд, структурные проблемы и задачи могут представляться весьма сухой материей, тем не менее предлагаемый читателю комплекс задач-«загадок», как любое состязание, не лишен известной занимательности и интереса.

Как инженерные дисциплины теории надежности и безопасности тесно связаны с современной прикладной математикой, поскольку математика является тем средством, с помощью которого в большинстве случаев только и возможны корректная постановка задачи, а также четкая формулировка условий и допущений, в которых она решается. Интеллектуальным ядром научных исследований структурных проблем надежности и безопасности оказались логико-вероятностные методы (ЛВМ) — специальный раздел математики, связанный с логико-математическим исчислением и совершенно не представленный пока в математических учебниках.

История ЛВМ и их возможностей изложены в работах [119, 162, 165]. В 1981 г. была опубликована первая монография по ЛВМ [105], которая привлекла большое внимание специалистов как у нас в стране, так и за рубежом (была переведена в 1987 г. в Японии).

Привлекательность ЛВМ для инженеров заключается в основном в их исключительной четкости, однозначности и больших возможностях при анализе влияния любого элемента на надежность и безопасность всей системы. Однако существуют и трудности на пути активного овладения этими методами. Главная из них связана с необходимостью ознакомления с методами вероятностной логики, которая не входит в учебные программы по математике ни одного из вузов страны.

Автор надеется в некоторой степени восполнить пробел в этой области знаний и не только за счет определенной систематизации материала, но и с помощью большого числа примеров, доведенных до числа, понимая, что примеры учат иногда больше и быстрее, чем сухая теория.

В гл. 1 излагаются основные понятия и определения теории надежности и безопасности. В гл. 2 рассматриваются основы логико-вероятностного исчисления и приводятся некоторые сведения из алгебры логики и вероятностной логики. Гл. 3 посвящена основным методам получения объективной информации о надежности изделий по результатам наблюдения их отказов в условиях реальной эксплуатации. Особое внимание уделено малым объемам статистической информации, в том числе редко используемым допустимым (толерантным) пределам, критерию $\lambda_{\text{ц}}$ Кар-

ла Пирсона и др. В гл. 4 рассматриваются логические модели надежности и безопасности; аналитические и графические формы представления условий работоспособности и опасного состояния системы; булевы разности и их смысл. Гл. 5 посвящена вероятностным моделям надежности и безопасности; преобразованию функций алгебры логики (ФАЛ) в вероятностные функции (ВФ) с помощью пяти разных алгоритмов. В гл. 6 рассматривается применение ЛВМ для исследования надежности структурно-сложных систем, в том числе систем, состоящих из элементов с тремя состояниями, систем с кольцевой и мостиковой структурой. Гл. 7 содержит оригинальный материал по применению ЛВМ для исследования безопасности структурно-сложных систем. В качестве примеров рассмотрены оценки риска затопления подводной лодки, взрыва водорода, безопасности склада артобоеприпасов, участка железной дороги, риска поражения электрическим током и риска как меры опасности в бизнесе.

Инициатива написания этой монографии принадлежит Г. Ф. Мощенко, который знает автора по книгам, изданным в 1967, 1971 и 1974 годах. В январе 1999 г. Григорий Федорович убедил автора оставить другие дела и целиком переключиться на написание монографии по надежности и безопасности сложных систем. Сохраняя стиль учебника, автор все же отстоял определенную свободу творчества в разработке данной темы.

Большую помощь в компьютерном наборе книги оказали мне мои славные помощники Галина Алексеевна Христюченко, Николай Борисович Бабешко и Татьяна Игоревна Мигай. Спасибо им за этот непростой труд (из-за большого числа сложных формул и громоздких таблиц).

Автор с благодарностью примет все замечания и предложения, которые просит направлять по адресу: 191011, Санкт-Петербург, Инженерная ул., 6, издательство «Политехника».