

УДК 621.382

Логико-вероятностное моделирование надежности систем из элементов с тремя состояниями с использованием программного комплекса «АРБИТР»

А.В. Струков

ОАО «Специализированная инжиниринговая компания «Севзапмонтажавтоматика», Санкт-Петербург

Аннотация

В статье рассматриваются методики решения задач оценки надежности систем, состоящих из элементов с тремя состояниями. Для определенных моделей влияния отказов элементов на состояние системы существует возможность и необходимость отдельного вычисления вероятностей отказы системы по «Обрыву» и по «Замыканию». Программная реализация алгоритмов учета свойств группы несовместности событий позволяет осуществлять автоматизированное моделирование надежности систем из элементов с тремя состояниями с использованием программного комплекса «АРБИТР». На примере анализа надежности энергетической системы показано, что в моделях, не допускающих наличия отказов типа «Замыкание» в структуре пути успешного функционирования, учет несовместности событий осуществляется на этапе формирования логической функции и перехода к вероятностному многочлену. Развитие классических логико-вероятностных методов на базе разработки алгебры несовместных событий в рамках общего логико-вероятностного метода позволяет устранить такие ограничения метода, как допущения о бинарности и независимости состояний элементов системы.

Ключевые слова: Надежность, отказ типа «Обрыв», отказ типа «Замыкание», алгебра группы несовместных событий, схема функциональной целостности, программный комплекс «АРБИТР», логико-вероятностный метод.

Содержание

Введение

1. Первая модель влияния типа отказа элемента
2. Вторая модель влияния типа отказа элемента

Заключение

Литература

Приложение 1

Приложение 2

Logical Probabilistic Modeling System Reliability of Three-State Element Systems Using ARBITR Software

Alexander V. Strukov*

*JSC SPIK SZMA, St.Petersburg, Russia

Abstract: The article deals with reliability assessment methods for systems with three-state elements. For certain models of influence component failures on the state of the possibility and necessity of separate calculating the probabilities of system failures on the "open" and "closed". Software implementation of algorithms based on the properties of group of disjoint events allows automated modeling reliability of a three-state element systems using ARBITR software. An analysis of reliability of energy systems shows that in models that do not allow the presence of failures such as "closure" in the structure of the successful operation, the account disjoint events carried out at the stage of logical functions and transition to probabilistic polynomial. Development of classical logical and probabilistic methods based on the development of algebra exclusive events within the overall logic and probabilistic method eliminates such limitations of the method, as the assumption of a binary nature and independence of states of elements.

Keywords: Reliability, "fail-closed" mode, "fail-open" mode, algebra of group of disjoint events, functional integrity schemes, ARBITR software, logical probabilistic methods.

Content

Introduction

1. The first model of the influence of the type of fault element
2. The second model of the type of fault element

Conclusion

Literature

Appendix 1

Appendix 2

Введение

Задачи анализа надежности сложных систем с элементами, которые могут находиться более чем в двух состояниях, вызывают значительный интерес. И, хотя существует множество методов, которые могут быть использованы для формализации математической модели функционирования таких систем, метод с использованием алгебры групп несовместных событий (ГНС) является точным, строгим и относительно легко реализуемым в компьютерных программах, по сравнению, например, с методами многозначной логики. Особенностью решения одного класса задач оценки надежности анализируемых систем является возможность и необходимость раздельного вычисления вероятностей отказа систем по «Обрыву» и по «Замыканию». Для другого класса задач логико-вероятностные преобразования должны осуществляться с учетом правил алгебры ГНС. Доказательства некоторых правил алгебры ГНС приведены в Приложении А, сводные таблицы правил преобразования логических и вероятностных функций для групп несовместных событий – в Приложении В.

1. ПЕРВАЯ МОДЕЛЬ ВЛИЯНИЯ ТИПА ОТКАЗА ЭЛЕМЕНТА

1.1 Описание модели

В работе Б.Диллона и Ч.Сингха [1] предложена следующая модель влияния вида отказов элементов на состояние системы:

а) для последовательного соединения -

отказ хотя бы одного из элементов типа «Обрыв» приводит к отказу всей системы;

отказ всех элементов типа «Замыкание» приводит к отказу системы;

отказ нескольких элементов типа «Замыкание» при наличии хотя бы одного работоспособного элемента не приводит к отказу системы.

б) для параллельного соединения -

отказ хотя бы одного из элементов типа «Замыкание» приводит к отказу всей системы.

На основе анализа безотказности последовательных и параллельных систем получена общая формула для оценки системной вероятности безотказной работы [2]. Так как функция работоспособности системы (ФРС) состоит из параллельных кратчайших путей успешного функционирования (КПУФ), а каждый КПУФ - есть последовательное соединение элементов, то эта формула может быть применена к любой монотонной структуре (последовательной, параллельной, мостиковой и др.) с указанной выше моделью влияния вида отказов элементов на состояние системы.

Например, выражение для оценки вероятности R_b безотказной работы мостиковой (bridge) схемы с учетом отказов элементов двух типов – типа «Обрыв» и типа «Замыкание», имеет вид [1]:

$$R_b = 1 - \sum_{k=1}^2 Q_{OK} = 1 - Q_{01} - Q_{02}, \quad (1)$$

где Q_{01} , Q_{02} - вероятности появления системного отказа типа «Обрыв» ($k=1$) и типа «Замыкание» ($k=2$). Вероятности Q_{01} и Q_{02} рассчитываются путем подстановки в выражение

для вероятности безотказной работы системы соответственно вероятностей отказов элементов типа «Обрыв» (q_{oi}) и «Замыкание» (q_{si}).

1.2 Решение задачи на ПК АРБИТР

Основной особенностью анализа надежности систем элементов с тремя состояниями является учет *несовместности* событий отказов элементов типа «Замыкание» и «Обрыв» [1]. Перепишем уравнение (1) в следующем виде

$$R_b = R_{co} - Q_{cs} = 1 - (Q_{co} - Q_{cs}), \quad (2)$$

Правая часть выражения (2) соответствует вероятности события, логическая функция которого представлена конъюнкцией отрицаний двух несовместных событий [3]. Событиями являются отказы системы по причине «Обрыва» и «Замыкания». Доказательство этого свойства ГНС приведено в Приложении А3.

Для решения поставленной задачи в ПК АРБИТР используется аппарат групп несовместных событий (ГНС) общего логико-вероятностного метода (ОЛВМ) [3] который может быть применен не только к отдельным событиям, но и к событиям, объединенным в эквивалентные схемы. Графическим инструментом для формализованной постановки задачи и построения системы логических уравнений в ПК АРБИТР используются схемы функциональной целостности (СФЦ).

Методика решения на ПК АРБИТР включает в себя следующие этапы.

I. Построение эквивалентированной СФЦ (схемы для элемента №1) для оценки вероятности отказа системы по «Обрыву».

Структура СФЦ совпадает со структурой заданной системы, а в качестве исходных данных используются вероятности безотказной работы элементов с учетом *только* отказов типа «обрыв», то есть $p_i=1-q_{oi}$.

II. Построение эквивалентированной СФЦ (схемы для элемента №2) для оценки вероятности отказа системы по «Замыканию».

Структура СФЦ совпадает со структурой заданной системы, а в качестве исходных данных используются вероятности отказов элементов типа «Замыкание» (q_{si}).

III. Эквивалентированные СФЦ соединяются как конъюнкция отрицаний двух несовместных событий.

На рис.1÷3 показаны фрагменты экранного интерфейса ПК АРБИТР для расчета вероятности отказа мостиковой структуры, элементы которой могут находиться в трех состояниях. Рисунки показывают последовательность применения описанной выше методики по этапам. Исходные данные для количественной оценки вероятности безотказной системы аналогичны исходным данным, приведенным в [1], то есть вероятности появления отказов типа «Обрыв» и типа «Замыкание» составляют соответственно 0.2 и 0.1.

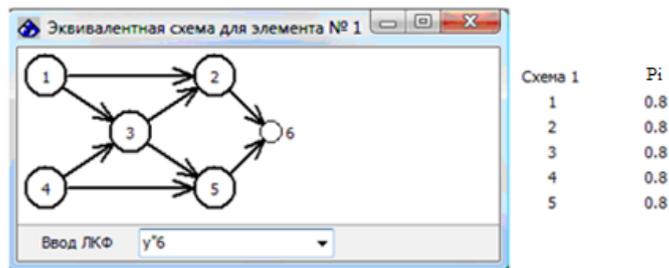


Рисунок 1 – Мостиковая структура. Первый этап решения

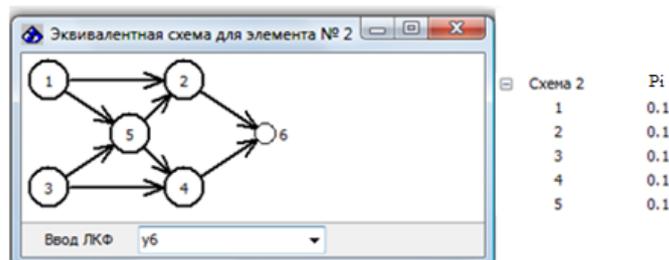


Рисунок 2 – Мостиковая структура. Второй этап решения

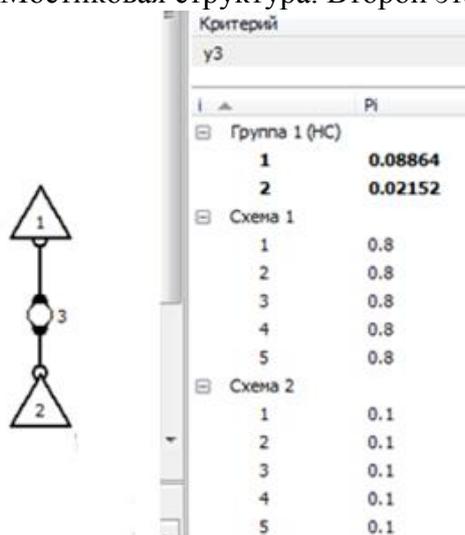


Рисунок 3 – Мостиковая структура. Третий этап решения

Окончательный результат оценки вероятности безотказной работы мостиковой структуры $R_b = 0.88984$ совпадает с результатом, приведенном в [2].

2. ВТОРАЯ МОДЕЛЬ ВЛИЯНИЯ ТИПА ОТКАЗА ЭЛЕМЕНТА

2.1 Описание модели

Профессор Рябинин И.А., подводя итоги анализа возможности ЛВМ для анализа надежности элементов с тремя состояниями, справедливо заметил, что «... реальных систем, у которых все элементы могут находиться в трех состояниях, практически не существует» [2, с.193].

В этой связи рассмотрим пример энергетической системы, состоящей из двух генераторов (G_1 и G_2) и двух линий электропередачи (ЛЭП3 и ЛЭП4) [3]. Они обеспечивают

дублированное питание общей нагрузки. Генераторы могут находиться в двух состояниях – работоспособном (состояния X_1 и X_2) и неработоспособном (\bar{X}_1 и \bar{X}_2). ЛЭПЗ и ЛЭП4 являются элементами с тремя состояниями – работоспособными (X_3 и X_4) и неработоспособными. Отказы ЛЭП могут быть двух типов – обрыв (для ЛЭПЗ – состояние X_5 , для ЛЭП4 – состояние X_6) и замыкание (для ЛЭПЗ – состояние X_7 , для ЛЭП4 – состояние X_8). В случае отказа хотя бы одной ЛЭП по «замыканию» происходит отказ всей системы.

2.2 Решение задачи на ПК АРБИТР

Для оценки безотказности энергетической системы с использованием ПК АРБИТР составляется соответствующая СФЦ (рис.4).

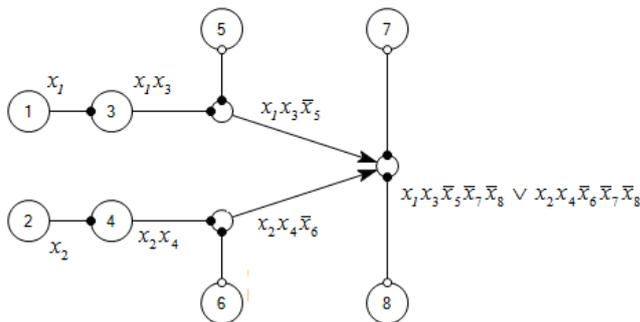


Рисунок 4– СФЦ энергетической системы

Система логических уравнений содержит логические переменные x_i и \bar{x}_i , $i = \overline{1, 8}$, которые показывают, что событие i (переход в состояние i) произошло или не произошло соответственно и записывается в виде дизъюнктивной нормальной формы:

$$x_1x_3\bar{x}_5\bar{x}_7\bar{x}_8 \vee x_2x_4\bar{x}_6\bar{x}_7\bar{x}_8 . \quad (3)$$

При решении задачи учитывается тот факт, что все три состояния ЛЭПЗ и ЛЭП4 (состояния $X_3, \bar{X}_5, \bar{X}_7$ и $X_4, \bar{X}_6, \bar{X}_8$) образуют полные группы несовместных событий, вероятность реализации каждой из них равна единице.

Применяя к (3) формулу Пуанкаре [4], получаем следующую вероятностную функцию для оценки вероятности безотказной работы энергетической системы:

$$R_c = P_1P_3Q_5Q_7Q_8 + P_2P_4Q_6Q_7Q_8 - P_1P_2P_3P_4Q_5Q_6Q_7Q_8 , \quad (4)$$

где R_c – вероятность безотказной работы системы;

P_i – вероятность реализации i -го события;

$Q_i = 1 - P_i$.

В соответствии с правилом вычисления вероятностей произведений двух или более несовместных событий – правилом сокращения конъюнкции [Приложение А2] при учете ГНС (состояния X_3, X_5, X_7 и X_4, X_6, X_8) имеем

$$\begin{aligned} P_3Q_5Q_7 &\Rightarrow P_3, \\ P_4Q_6Q_8 &\Rightarrow P_4. \end{aligned} \quad (5)$$

Тогда выражение (4) с учетом преобразований (5) примет вид

$$R_c = P_1 P_3 Q_8 + P_2 P_4 Q_7 - P_1 P_2 P_3 P_4. \quad (6)$$

Для количественной оценки безотказности используем следующие исходные данные [3]: $P_1=0.6$; $P_2=0.4$; $P_3=0.5$; $P_4=0.7$; $P_7=0.2$; $P_8=0.2$; $P_5=1-P_3-P_7=0.3$; $P_6=1-P_4-P_8=0.1$.

Тогда согласно (6) вероятность безотказной работы энергетической системы с учетом ГНС составит $R_c=0.38$.

Вероятность безотказной работы данной системы без учета ГНС согласно (4) составит $R_c=0.2618112$.

Как видно из сравнения полученных количественных оценок безотказности энергетической системы для данной модели влияния отказов элементов на отказы системы учет несовместности отказов типа «обрыв» и «замыкание» в данной задаче приводит к уменьшению численного значения вероятности безотказной работы системы.

4. Выводы

На основе развития классических ЛВМ разработаны методики решения задач по оценке надежности систем, состоящих из элементов с тремя состояниями. Теоретической основой методики является реализованный в ПК АРБИТР аппарат алгебры групп несовместных событий [3,5,6]. Таким образом, показано, что общий логико-вероятностный метод позволяет решать задачи для тех случаев, когда число состояний элементов больше двух, причем изменения состояний элементов являются зависимыми событиями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Диллон Б., Сингх Ч. Инженерные методы обеспечения надежности систем. М.: Мир, 1984.
2. Рябинин И.А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем. СПбГУ, 2007.
3. Черкесов Г.Н., Можаяев А.С. Логико-вероятностные методы расчета надежности структурно-сложных систем. М.: Знание, 1991.
4. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Наука, 1969.
5. Нозик А.А. Оценка надежности и безопасности структурно-сложных технических систем. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. С-Петербург-2005.
6. Поленин В.И., Рябинин И.А., Свиринов С.К., Гладкова И.А. Применение общего логико-вероятностного метода для анализа технических, военных организационно-функциональных систем и вооруженного противоборства/ Под научным редактированием Можаяева А.С. СПб.: НИКА, 2011.

Приложение А. Преобразования логических и вероятностных функций

В Приложении представлено несколько доказательств корректности преобразований логических (ЛФ) и вероятностных функций (ВФ). Доказательства корректности всех 24 преобразований ЛФ и ВФ можно найти на сайте <http://www.szma.com/pub.shtml>.

А1. Конъюнкции несовместных событий

Преобразования для данной группы конъюнкций приведены в строках № 1.1, 2.2, и 3.4 сводных таблиц В.1÷В.3. Доказательство корректности преобразования приводится для случая несовместности прямых событий а и б. В таблице А1 показано преобразование ЛФ для рассматриваемого варианта ГНС.

Табл. А1 Таблица истинности конъюнкции $a \wedge b$

a	b	a b	Tr	TLF
0	0	0		0
0	1	0		0
1	0	0		0
1	1	1	$1 \Rightarrow 0$	0

В табл. А1 в столбце «ab» приведен результат операции логического умножения без учета несовместности событий a и b . Если в последней строке этого столбца, соответствующей условиям несовместности прямых событий, заменить 1 на 0 (столбец «Tr» - преобразование), то в последнем столбце «TLF» (преобразованная ЛФ) логическая функция с учетом ГНС является логическим 0. Обоснованием указанного преобразования является *определение* несовместности событий a и b .

Таким образом, логическое преобразование для рассматриваемой конъюнкции можно записать в виде

$$a \wedge b \Rightarrow 0, \quad (A1)$$

вероятностное преобразование в виде

$$P(ab) = 0. \quad (A2)$$

A2. Сокращение конъюнкции

Преобразования для данной группы конъюнкций приведены в строках № 1.2, 1.3, 2.1, 2.4, 3.2, и 3.3 табл. В.1÷В.3 .

Доказательство корректности преобразования приведено для случая несовместности прямых событий a и b применительно к конъюнкции событий \bar{a} и b .

События \bar{a} и b не являются несовместными, но для вычисления вероятности $P(\bar{a}b)$ произведения этих событий необходимо учитывать несовместность их прямых исходов.

На рис. А2 приведены диаграммы Венна для рассматриваемого случая. На рис.А2 видно, что пересечением множеств (событий) $\bar{a} \cap b$ является множество (событие) b .

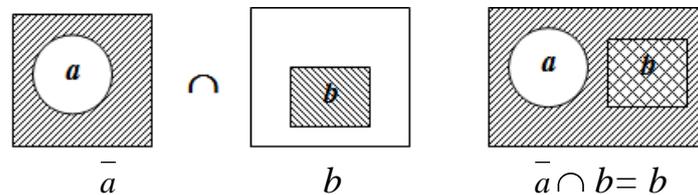


Рисунок А2 – Диаграммы Венна. Пересечение событий $\bar{a} \cap b = b$ (случай несовместных прямых событий)

Следовательно, с учетом несовместности прямых событий ЛФ для рассматриваемой конъюнкции преобразуется следующим образом

$$\bar{a} \wedge b \Rightarrow b, \quad (A3)$$

что соответствует преобразованию ВФ

$$P(\bar{a}b) = P(b). \quad (A4)$$

В таблице A2 показано преобразование ЛФ для рассматриваемого варианта ГНС.

Таблица A2 - Таблица истинности для конъюнкции $\bar{a} \wedge b$

a	b	\bar{a}	$\bar{a}b$	Tr	TLF
0	0	1	0		0
0	1	1	1		1
1	0	0	0		0
1	1	0	0	$0 \Rightarrow 1$	1

В табл. A2 также как и в табл. A1 в столбце «Tr» осуществляется преобразование значения произведения событий в последней строке, соответствующей условиям несовместности прямых событий. ЛФ с учетом несовместности, представленная в столбце «TLF», совпадает с ЛФ события b .

A3. Преобразование конъюнкции с использованием теоремы де Моргана

Преобразования для данной группы конъюнкций приведены в строках № 1.4, 2.3, и 3.1 табл. В.1÷В.3. Доказательство корректности преобразования приведено для случая несовместности прямых событий \bar{a} и b применительно к конъюнкции событий a и \bar{b} .

С учетом несовместности событий \bar{a} и b ЛФ для конъюнкции $a \wedge \bar{b}$ можно записать в виде

$$a \wedge \bar{b} \Rightarrow \overline{\bar{a} \vee b}, \quad (A5)$$

вероятностную функцию в виде

$$P(a \wedge \bar{b}) = 1 - [P(\bar{a}) + P(b)]. \quad (A6)$$

A4. Сокращение дизъюнкции

Преобразования для данной группы дизъюнкций приведены в строках № 1.6, 1.7, 2.5, 2.8, 3.6, и 3.7. табл. В.1÷В.3.

Доказательство корректности преобразования приведено для случая несовместности прямых событий \bar{a} и b применительно к дизъюнкции событий a и b .

На рис. A4 приведена диаграмма Венна для рассматриваемого случая.

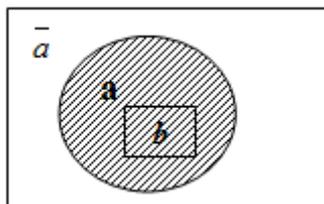


Рисунок A4 – Диаграмма Венна. Объединение событий $a \sqcup b$.

Диаграммы на рис. А4 показывают, что с учетом несовместности событий \bar{a} и b ЛФ для рассматриваемой дизъюнкции преобразуется следующим образом:

$$a \vee b \Rightarrow a, \quad (A7)$$

что соответствует преобразованию ВФ вида

$$P(a \vee b) = P(a). \quad (A8)$$

Табл. А4 представляет таблицу истинности для рассматриваемого варианта ГНС.

Таблица А4 – Таблица истинности для дизъюнкции $a \square b$

a	b	$a \square b$	Tr	TLF
0	0	0		0
0	1	1	$1 \Rightarrow 0$	0
1	0	1		1
1	1	1		1

В табл. А4 осуществляется преобразование произведения событий во 2-й строке, соответствующей условиям несовместности событий \bar{a} и b . Как видно из данных столбца «TLF», ЛФ дизъюнкции $a \vee b$ с учетом несовместности событий \bar{a} и b совпадает с ЛФ события a .

Преобразования групп 2 и 4 получили название закона несовместных поглощений.

А5. Преобразование дизъюнкции событий в универсум

Преобразования для данной группы дизъюнкций приведены в строках № 1.8, 2.7, и 3.5 табл. В.1÷В.3. Доказательство корректности преобразования приведено для случая несовместности инверсных событий \bar{a} и \bar{b} применительно к дизъюнкции событий a и b .

В таблице А5 показано преобразование ЛФ для рассматриваемого варианта ГНС.

Таблица А5 – Таблица истинности для дизъюнкции $a \vee b$

a	b	$a \vee b$	Tr	TLF
0	0	0	$0 \Rightarrow 1$	1
0	1	1		1
1	0	1		1
1	1	1		1

Из табл. А5 видно, что логическое преобразование для рассматриваемой дизъюнкции можно записать в виде

$$a \vee b \Rightarrow 1, \quad (A9)$$

вероятностное преобразование - в виде

$$P(a \vee b) = 1. \quad (A10)$$

Преобразования этой группы ЛФ получили название закона истинности дизъюнкций.

А6. Дизъюнкции несовместных событий

Преобразования для данной группы дизъюнкций приведены в строках № 1.5, 2.6 и 3.8 табл. В.1÷В.3. ЛФ в этом случае не преобразуется, а вероятностная функция по определению равна вероятности суммы несовместных событий.

Приложение В. Сводные таблицы правил преобразований логических и вероятностных функций

Сводные таблицы В.1 ÷ В.3 представляют правила преобразования логических функций (ЛФ) и вероятностных функций (ВФ), относящиеся к различным комбинациям случаев несовместных событий - прямых и обратных. Преобразованные логические функции (ТЛФ) и преобразованные вероятностные функции (ТВФ) учитывают вид несовместности событий, указанный в заголовке каждой таблицы.

Таблица В.1 – Несовместные прямые события a и b

№ правила	ЛФ	ТЛФ	ВФ	ТВФ
Конъюнкции				
1.1	ab	0	$P(a \ b)$	0
1.2	$\bar{a}b$	b	$P(\bar{a}b)$	$P(b)$
1.3	$a\bar{b}$	a	$P(a\bar{b})$	$P(a)$
1.4	$\bar{a}\bar{b}$	$\overline{a \vee b}$	$P(\bar{a}\bar{b})$	$1-[P(a)+P(b)]$
Дизъюнкции				
1.5	$a \square b$	$a \square b$	$P(a \square b)$	$P(a)+P(b)$
1.6	$\bar{a} \vee b$	\bar{a}	$P(\bar{a} \vee b)$	$P(\bar{a})$
1.7	$a \vee \bar{b}$	\bar{b}	$P(a \vee \bar{b})$	$P(\bar{b})$
1.8	$\bar{a} \square \bar{b}$	1	$P(\bar{a} \square \bar{b})$	1

Таблица В.2 – Несовместные события \bar{a} и b

№ правила	ЛФ	ТЛФ	ВФ	ТВФ
Конъюнкции				
2.1	ab	b	$P(a \ b)$	$P(b)$
2.2	$\bar{a}b$	0	$P(\bar{a}b)$	0
2.3	$a\bar{b}$	$\bar{a} \vee \bar{b}$	$P(a\bar{b})$	$1-[P(\bar{a})+P(b)]$
2.4	$\bar{a} \bar{b}$	\bar{a}	$P(\bar{a}\bar{b})$	$P(\bar{a})$
Дизъюнкции				
2.5	$a \square b$	a	$P(a \square b)$	$P(a)$
2.6	$\bar{a} \vee b$	$\bar{a} \vee b$	$P(\bar{a} \vee b)$	$P(\bar{a})+P(b)$
2.7	$a \vee \bar{b}$	1	$P(a \vee \bar{b})$	1
2.8	$\bar{a} \vee \bar{b}$	\bar{b}	$P(\bar{a} \vee \bar{b})$	$P(\bar{b})$

Таблица В.3 – Несовместные инверсные события \bar{a} и \bar{b}

№ правила	LF	TLF	PF	TPF
Конъюнкции				
3.1	$a b$	$\overline{\bar{a} \vee \bar{b}}$	$P(a b)$	$1 - [P(\bar{a}) + P(\bar{b})]$
3.2	$\bar{a} b$	\bar{a}	$P(\bar{a} b)$	$P(\bar{a})$
3.3	$a \bar{b}$	\bar{b}	$P(a \bar{b})$	$P(\bar{b})$
3.4	$\bar{a} \bar{b}$	0	$P(\bar{a} \bar{b})$	0
Дизъюнкции				
3.5	$a \square b$	1	$P(a \square b)$	1
3.6	$\bar{a} \square b$	b	$P(\bar{a} \square b)$	$P(b)$
3.7	$a \square \bar{b}$	a	$P(a \square \bar{b})$	$P(a)$
3.8	$\bar{a} \square \bar{b}$	$\bar{a} \square \bar{b}$	$P(\bar{a} \square \bar{b})$	$P(\bar{a}) + P(\bar{b})$

Сведения об авторах

Струков Александр Владимирович — к.т.н., доцент; ведущий инженер исследовательского отдела ОАО Специализированная инжиниринговая компания «Севзапмонтажавтоматика» (СПИК СЗМА). Область научных интересов: анализ данных, системный анализ, теория надежности, модели и методы принятия решения в сложных организационно-технических системах. Число научных публикаций — 69. alexander_strukov@szma.com, www.szma.com; СПИК СЗМА, пер.Каховского, д. 10, лит. А, стр. 2Н, г. Санкт-Петербург, 199155, РФ; р.т. +7(812)350-5885, факс +7 (812)350-1113.

Strukov Alexander Vladimirovich — PhD, Assistant Professor, senior engineer, Research Department, public corporation Specialized engineering company "Sevzapmontageautomatica" (SPIK SZMA). Research interests: data analysis, analysis of systems, reliability theory, mathematical models and methods of decision-making support in complex technical-organizational systems. The number of publications — 69. alexander_strukov@szma.com, www.szma.com; SPIK SZMA, 10, Lit. A, Office block 2N, Kakhovskogo Lane, St.Petersburg 199155, Russia, phone +7(812)350-5885, fax +7 (812)350-1113.