

РЯБИНИН И.А., СТРУКОВ А.В.
(alexander_strukov@szma.com)

КРАТКО АННОТИРОВАННЫЙ СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ЗАРУБЕЖНЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ИЗДАНИЙ ПО ВОПРОСАМ ОЦЕНИВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ СТРУКТУРНО-СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

Введение

Первоначальный замысел данной работы состоял в подборе зарубежных публикаций, которые позволяли бы осуществить сравнительный анализ исторического развития логико-вероятностного анализа (ЛВА) в нашей стране и за рубежом применительно к решению задач оценки надежности структурно-сложных систем (ССС). Поэтому был определен и формат работы – список.

Кроме того, первоначальный замысел определял и основной источник поиска публикаций – Библиотека Российской Академии наук, так как планировалось, что будут, в основном использоваться публикации 60-80-х годов, которые не всегда просто найти в Интернете.

По мере накопления информации, возникла необходимость создания электронного каталога первоисточников и их переводов, что и было реализовано силами и средствами сотрудников исследовательского отдела ОАО «СПИК СЗМА». Интерес к историческому обзору теоретических основ логико-вероятностных методов (ЛВМ) объясняется тем, что в исследовательском отделе идет постоянная работа по развитию и совершенствованию программного комплекса АРБИТР, одного из самых мощных программных инструментов в России для решения задач оценивания надежности и безопасности технических систем. В настоящее время в мире существует достаточно много программных продуктов, решающих указанные задачи, они развиваются, совершенствуются. И для того, чтобы отечественный программный комплекс АРБИТР был бы конкурентоспособным не только сегодня, что подтверждено в 2007г. в отчете о верификации программного средства, но и имел бы перспективу находится в числе передовых научно-технических разработок в области оценивания надежности и безопасности сложных технических систем, необходимо иметь достаточно полное представление о развитии теоретической базы современных зарубежных программных продуктов.

Учитывая все вышесказанное, данная работа имеет формат кратко аннотированного списка публикаций, изданных в зарубежной периодической печати в 60-80-х годах, с которыми можно ознакомиться в читальном зале Библиотеки Российской Академии наук или в электронном каталоге исследовательского отдела ОАО «СПИК СЗМА».

Прекрасно осознавая, что любой подобный список не может быть абсолютно полным, как и архивы любой библиотеки, надеемся, что современные возможности Интернета позволят продолжить данную работу как в сторону ретроспективного анализа публикаций, так и в сторону накопления сведений о современных публикациях.

При аннотировании не ставилась задача ранжирования публикаций по значимости в научном плане, скорее всего показывалась некоторая хронологическая последовательность. Каждый читатель при знакомстве с научными публикациями способен открыть такие достоинства той или иной работы, которые не заметили авторы обзора.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

№
общ
п/п

Авторы, название статьи, издание

До 1956 года

- 1 W.V.Quine, "The Problem of Simplifying Truth Functions," *American Math. Monthly*, October 1952, pp 521-531.
Используется понятие нормальной формы как аналог известного в литературе термина «дизъюнктивная нормальная форма», в которой литералы состоят как из букв, так и их отрицаний. Есть ссылка на работу С.Е.Shannon (1938).
- 2 W.V.Quine, "A Way to Simplify Truth Functions," *American Math. Monthly*, November 1955, pp 627-631.
Как и в предыдущей статье задача минимизации логической функции состоит в нахождении первичных импликант.
- 3 C.Y. Lee, "Analysis of Switching Networks," *The Bell System Technical Journal*, November 1955, pp 1287-1315.
Автор ссылается на пионерские работы А.К.Erlanga, Т.С.Fry, Т.С.Molina (1927-1928гг), где были поставлены задачи вероятностного анализа телефонного трафика. Подчеркивается, что эта сложная и многомерная задача может решаться с помощью вероятностных графов. Кроме анализа последовательно-параллельных схем, получен однопараметрический полином для мостиковой схемы, приводится выражение для вероятностной оценки сложной схемы с использованием формулы полной вероятности.
- 4 E.J.McCluskey, "Minimization of Boolean Functions," *The Bell System Technical Journal*, November 1956, pp 1417-1444.
Здесь булевы функции рассматриваются как инструмент разработки переключающих (дискретных) цепей для создания цифровых компьютеров, автоматических телефонных станций и цифровых систем контроля. Приведено одно из первых представлений логической функции в виде дерева. Автор ссылается и развивает W.L.Quine [1,2].

1957-1962

- 5 Z.W.Birnbaum, J.D.Esary, S.C. Saunders, "Multi-Component Systems and Structures and Their Reliability," *Technometrics*, vol. 3, No 1. February 1961, pp 55-77.
Ссылки на работы Moore, Shannon, von Neumann (1956). Исследуется класс двухполюсников, вводятся понятия надежностной функции, когерентной и полукогерентной структуры, анализируется S-образная функция надежности системы.

1963

- 6 J.D.Esary, F. Proshan, "Coherent Structures of Non-Identical Components," *Technometrics*, vol. 5, No 2. May 1963, pp 191-209.
Одна из первых работ, где вводятся понятия структурной и надежностной функции, минимальные пути и сечения используются для нахождения граничных оценок надежности когерентных структур.
- 7 A.F.Premo, "The Use of Boolean Algebra and Truth Table in the Formulation of a Mathematical Model of Success," *IEEE Trans. Reliability*, 1963 Sep, pp 45-49.
Ставится задача объединения методов Булевой алгебры и теории вероятностей для разработки модели надежности. Используется полная система логических функций И, ИЛИ, НЕ. Приводится численный пример решения задачи с тремя клапанами с учетом ГНС (элементы с тремя состояниями).
- 8 R.V.Hurley, "Probability Maps," *IEEE Trans. Reliability*, 1963 Sep, pp 39-44.
Статья развивает идеи диаграмм Вейтча, карт Карно как способа двумерного

представления логических переменных. Логические переменные в разных ячейках представляют несовместные события. Анализируется мостиковая схема.

1969

- 9 P.A.Jensen, M.Bellmore," An Algorithm to Determine the Reliability of a Complex System," *IEEE Trans. Reliability*, vol R-18, 1969 Nov, pp 169-174.
Описывается метод полного перебора. Трудности, вызванные размерностью такой задачи для сложных систем, предлагается решать аппроксимационными методами. Предложен алгоритм определения минимальных сечений сетевой структуры из 10 элементов.

1970

- 10 A.C.Nelson, J.J.R.Batts, R.L.Beadles," A Computer Program for Approximating System Reliability," *IEEE Trans. Reliability*, vol R-19, 1970 May, pp 61-65.
Представлена блок-схема компьютерной программы для приближенной оценки надежности сложных систем. Приводится численный результат оценки надежности сложной структуры из 16 элементов.
- 11 K.B.Misra, T.S.M.Rao," Reliability Analysis of Redundant Network Using Flow Graphs," *IEEE Trans. Reliability*, vol R-19, 1970 February, pp 19-24.
Описывается один из топологических методов - метод потокового графа для оценки надежности сети. Рассматривается сеть из 7 элементов, получен однопараметрический полином, приводится правило проверки корректности его построения. Приводится пример анализа сети с отказами двух типов – КЗ и обрыв.
- 12 W.R. Christiaanse," A Technique for the Analysis of Repairable Redundant Systems," *IEEE Trans. Reliability*, vol R-19, 1970 May, pp 53-60.
Анонсируется методика и программа оценки стационарных показателей надежности сложной восстанавливаемой электроэнергетической системы, состоящей из 50-100 элементов. Приводится пример для системы из 11 элементов и 7 узлов.
- 13 P.A.Jensen, M.Bellmore," An Implicit Enumeration Scheme for Proper Cut Generation," *Technometrics*, vol.12,No.4 November, 1970.
Приводится новый алгоритм поиска сечений линейного графа
- 14 K.B.Misra," An Algorithm for the Reliability of Redundant Networks," *IEEE Trans. Reliability*, vol R-19, 1970 November, pp 146-151.
Представляется алгоритм и Фортран-программа оценивания надежности сети с любым резервированием. Алгоритм основан на применении теоремы разложения в модифицированном виде.

1971

- 15 D.B. Brown," A Computerized Algorithm for Determining the Reliability of Redundant Configuration," *IEEE Trans. Reliability*, vol R-20, 1971 Aug, pp 121-124.
Введено понятие Transmission Function (ФАЛ), Reliability Function (ВФ), приведен пример пятиэлементного мостика и его точное решение с помощью совершенной дизъюнктивной нормальной формы.
- 16 J.L.Fleming, "Relcomp: A Computer Program for Calculating System Reliability and MTBF," *IEEE Trans. Reliability*, vol R-20, 1971 Aug, pp 102-107.
Публикуется листинг программы для оценки безотказности и средней наработки между отказами последовательно-параллельных систем с учетом нагруженного и ненагруженного резервирования с использованием RBD (блок диаграмм надежности).
- 17 M.O.Locks," The Maximum Error in System Reliability Calculations by Using a Subset of the Minimal States," *IEEE Trans. Reliability*, vol R-20, 1971 November, pp 231-234.
Показано, что при оценке надежности системы по минимальным путям методом включения-выключения (IE) ошибка зависит только от отношения учтенных при расчете минимальных состояний к общему числу минимальных состояний.

1972

- 18 Y.H.Kim, K.E.Case, P.M.Ghade,"A Method for Computing Complex System Reliability," *IEEE Trans. Reliability*, vol R-21, 1972 Nov, pp 215-219.
Для мостиковой схемы приводится вероятностное дерево в виде современных деревьев событий. Используется метод ИЕ.
- 19 E.Hänsler," A Fast Recursive Algorithm to Calculate the Reliability of a Communication Network," *IEEE Trans. Communicat.*, vol.com-20, No.3, June 1972, pp 637-640
- 20 E.V.Krishnamurthy, G.Komissar," Computer-Aided Reliability Analysis of Complicated Network," *IEEE Trans. Reliability*, vol R-21, 1972 May, pp 86-89.
- 21 R.S.Wilkov," Analyses and Design of Computer Networks," *IEEE Trans. Communications*, vol com-20, 1972 Nov, pp 660-678.
Описывается применение теории линейных графов для оценивания надежности сетей. Приводится список ссылок из 86 источников.

1973

- 22 L.Fratta, U.G.Montanari," A Boolean Algebra Method for Computing the Terminal Reliability in a Communication Network," *IEEE Trans. Circuit Theory*, vol CT-20, 1973 May, pp 203-211.
Первая работа из области ЛВА. Надежность сети рассчитывается символическим методом преобразованием Булевой суммы произведений совместных событий в эквивалентную форму, в которой все термы являются несовместными. Указывается на перспективность разработанного метода для точного и приближенного оценивания надежности. Приводится пример сети ARPA из 21 элемента.
- 23 K.K.Aggarwal, J.S.Gupta, R.B. Misra,"A New Method for System Reliability Evaluation," *Microelectronics and Reliability*, vol 12, 1973, pp 435-440.
Под новым методом независимо от работы [22] впервые формулируется ЛВМ.
- 24 C.Singh, R.Billinton," A New Method to Determine the Failure Frequency of a Complex System," *Microelectronics and Reliability*, vol 12, 1973, pp 459-465.

1974

- 25 B. V.Koen, A.Carnino," Reliability Calculations with a List Processing Technique," *IEEE Trans. Reliability*, vol R-23, 1974 April, pp 43-49.
Применяя методологию деревьев неисправностей (ДН), рассматривается метод оценки надежности с использованием особенностей компьютерного вычислительного процесса. Приводится таблица соответствия блок-диаграмм надежности и моделей ДН.
- 26 C.Singh, R.Billinton," A New Method to Determine the Failure Frequency of a Complex System," *IEEE Trans. Reliability*, vol R-23, 1974 October, pp 231-234.
С небольшими изменениями статья из *Microelectronics and Reliability*, vol 12, 1973 [24].
- 27 J.B.Fussel,G.J.Powers, R.G.Bennetts," Fault trees – a state of the art discussion," *IEEE Trans. Reliability*, vol R-23, 1974 April, pp 51-55.
Статья трех авторов, имеющие свой взгляд на технологию деревьев неисправностей (ДН). J.B.Fusell отмечает достоинства этой методологии, G.J.Powers обращает особое внимание на учет особенностей моделируемых процессов, их физических и химических свойств. R.G.Bennetts видит развитие методологии в использовании полной системы логических функций – И, ИЛИ, НЕТ, указывает на причины широкого распространения приближенных методов анализа ДН.

1975

- 28 K.K.Aggarwal, J.S.Gupta, R.B. Misra,"A Fast Algorithm for reliability evaluation," *IEEE Trans. Reliability*, vol R-24, 1975 Apr, pp 83-85.

- В неявном виде представлен метод ортогонализации логической функции, составленной из минимальных путей. Приводится пример сети из 7 элементов, для получения результирующего выражения. Ранее требовалось 118 действий, а новый алгоритм требует 32 действия.
- 29 К.К. Aggarwal, J.S. Gupta, R.B. Misra, "Reliability Evaluation: A Comparative Study of Different Techniques," *Microelectronics and Reliability*, vol 14, 1975 Feb, pp 49-56.
Сравнительное изучение различных методик оценивания надежности сложных систем охватывает применение теоремы Байеса для метода разложения, вероятностные карты, подобные картам Карно, а также получение несовместных термов алгебраическим методом, который, по мнению Ю.Мерекина, является следствием теоремы де Моргана.
- 30 R.G. Bennetts, "On the Analysis of Fault Trees," *IEEE Trans. Reliability*, vol R-24, 1975 Apr, pp 175-185.
Рассматриваются алгоритмы преобразования логической функции, описывающей условия отказа системы и представленной в виде суммы произведений (s-o-p), в эквивалентное логическое выражение s-o-p, от которого можно непосредственно перейти к вероятностной функции. С точки зрения компьютерной реализации этой задачи описываются достоинства использования польской обратной нотации, доказывается теорема об условии несовместности двух конъюнкций с иллюстрацией на картах Карно. Приводится пример получения эквивалентного логического выражения из первоначальной логической функции, заданной некогерентным деревом неисправностей.
- 31 К.К. Aggarwal, J.S. Gupta, R.B. Misra, "A Simple Method for Reliability Evaluation of a Communication System," *IEEE Trans. Commun.*, vol COM-23, 1975 May, pp 563-565.
Рассматривается задача оценки надежности сети с ненадежными узлами и каналами связи. Указывается, что для решения этой задачи используется алгоритм получения вероятностного выражения, описанный в [23,28], который по сути является следствием теоремы де Моргана, также использованный в работе Hansler [19].
- 32 S.Kamat, M.W.Riley, "Determination of Reliability Using Event-Based Monte Carlo Simulation," *IEEE Trans. Reliability*, vol R-24, 1975 Apr, pp 73-74.
- 33 B.L. Hulme, R.B.Worrell, "A Prime Implicant Algorithm with Factoring," *IEEE Trans. Computers*, November 1975, pp. 1129-1131.
Статья описывает алгоритм нахождения первичных импликант Булевой функции при любом способе ее задания – табличном, в виде дизъюнктивной или конъюнктивной нормальной форме. Приводится 7 примеров.
- 34 К.К. Aggarwal, J.S. Gupta, R.B. Misra, "Computational Time and Absolute Error Comparison for Reliability Expression Derived by Various Methods," *Microelectronics and Reliability*, vol 14, 1975, pp 465-467.
Сравниваются время вычислений и абсолютные ошибки оценки надежности сложных систем при использовании метода прямого перебора, байесового метода (разложения) и алгебраического метода. Абсолютные ошибки оценки надежности системы вычисляются через абсолютные ошибки оценки надежности отдельных элементов.
- 35 T.W. Yellman, G.J.Powers, J.B.Fussell, H.S.Kuwamoto, "Comments on "Fault Trees – A State of the Art Discussion," *IEEE Trans. Reliability*, vol R-24, 1975 December, pp 344-347.
Со стороны разработчика метода учета последовательности событий T.W.Yellman приведен серьезный анализ недостатков методологии ДН, особенно выделяя невозможность анализа несовместных событий, статистически зависимых и отказов по общим причинам. Намечены пути развития этой методологии. G.J.Powers, отвечая на эту критику указал, что разработанный метод учета последовательности событий является по сути методом перебора и для больших

систем весьма трудоемкий. По его мнению, необходимо значительное усилие для преодоления указанных недостатков методологии ДН. J.V.Fussell, соглашаясь во многом с T.W.Yellman, призывает «не прыгать со сковороды в огонь», пытаясь устранить сразу все недостатки методологии ДН, и желает ему сохранить все достоинства его метода после жестокой проверки практикой.

1976

- 36 F.A. Tillman, C.L. Hwang, C.H.Lie," Analysis of Pseudo-Reliability of a Combat Tank System and its Optimal Design," *IEEE Trans. Reliability*, vol R-25, October 1976, pp 239-242.
- 37 K.K.Aggarwal," Comments and authors's reply on "On the Analysis of Fault Trees"," *IEEE Trans. Reliability*, vol R-25, October 1976, pp 126-127.
Профессор K.K.Aggarwal, давая высокую оценку учебной статье R.G. Bennetts [30], предложил вместо польской обратной нотации (ПОН) использовать алгоритм ортогонализации [28]. В своем ответе R.G. Bennetts объяснил свою позицию опытом применения ПОН при разработке логических устройств. Применение ПОН позволяет получать эквивалентное логическое выражение по размеру совпадающее с первоначальным выражением.
- 38 P.M.Lin, B.J.Leon, T.C.Huang," A New Algorithm for Symbolic System Reliability Analysis," *IEEE Trans. Reliability*, vol R-25, 1976 April, pp 2-15.
Дана классификация методов оценки надежности сложных систем. Приведено доказательство свойств алгоритма, реализованного в программе SYMRAP, разработанного для МО Италии не позднее 1974г. Показаны примеры применения алгоритма на сетях с 4 и 9 узлами и 9 и 12 каналами связи, а также на системе безопасности бойлера.
- 39 J. deMercado, N.Spyratos, B.A.Bowen," A method for calculation of network reliability system," *IEEE Trans. Reliability*, vol R-25, 1976 June, pp 71-76.
Метод может быть использован для декомпозиции графа сети на ряд субграфов с использованием процедуры сечения.
- 40 H.Nakazawa," Bayesian Decomposition Method for Computing the Reliability of a Oriented Network," *IEEE Trans. Reliability*, vol R-25, 1976 June, pp 77-80.
Описывается методика выбора ключевого элемента для Байесовой декомпозиции для случая ориентированного графа, в дополнении методика апробирована на сети из 21 каналов, приведенная в работе Fratta, Montanari [22].
- 41 S.S.Tung," Reliability of a Tree Network," *IEEE Trans. Reliability*, vol R-26, No5, December 1976, pp 333-336.
- 42 J.Sharma," Algorithm for Reliability evaluation of a Reducible Network," *IEEE Trans. Reliability*, vol R-25, 1976 Dec, pp 337-339.
- 43 E.J.Henley," Systems Analysis by Sequential Fault Tree," *Microelectronics and Reliability*, vol 15, 1976 Feb, pp 247-248.
Сообщается, что для учета последовательности событий в программе MOCUS-A разработан конвертор для преобразования диаграммы событий в дерево неисправностей.

1977

- 44 S.Lapp, G.Powers," Computer-aided Synthesis of Fault Trees"," *IEEE Trans. Reliability*, vol R-26, April 1977, pp 2-13
Представлен алгоритм для синтеза дерева неисправностей непосредственно из диграфа (направленного графа). Компьютерная программа иллюстрирована на примере системы охлаждения азотной кислоты с температурной обратной связью и насосом упреждающего отключения. Проводится сравнительный анализ с существовавшими ранее аналогичными программами.
- 45 K. Gopal, J.S.Gupta," Comments and author's reply on "On the Analysis of Fault Trees"," *IEEE Trans. Reliability*, vol R-26, April 1977, pp 14-15

- Выражая восхищение весьма хорошо написанной учебной статьей R.G. Bennetts [30], авторы предлагают проводить анализ дерева неисправностей сверху вниз, корректируя и модифицируя один из алгоритмов ортогонализации.
- 46 W.G.Schneewies," Calculating the probability of Boolean Expression Being 1," *IEEE Trans. Reliability*, vol R-26,no1, 1977 Apr, pp 16-22.
Предлагается «концептуально очень простой» способ оценки вероятности истинности Булева выражения, основанный на применении теоремы сложения вероятностей и не требующий нахождения несовместных событий. В приложении приведен удобно реализуемый на компьютере алгоритм Enzmann для получения «канонической мультилинейной формы Булевой функции». Весьма интересны комментарии R.G. Bennetts и D.W.Brown.
- 47 G.D.M. Pearson," Computer Program for Approximating the Reliability characteristics acyclic directed graphs," *IEEE Trans. Reliability*, vol R-26, April 1977, pp 32-37.
- 48 J.E.Biegel ," Determination of Tie Sets and Cut Sets for a System Without Feedback," *IEEE Trans. Reliability*, vol R-26, 1977 Apr, pp 39-42.
- 49 H.Kumamoto, K.Tanaka, K.Inoue," Efficient Evaluation of System Reliability by Monte Carlo Method," *IEEE Trans. Reliability*, vol R-26, 1977 April, pp 311-315.
- 50 T.Case," A reduction Technique for Obtaining a Simplified Expression," *IEEE Trans. Reliability*, vol R-26, 1977 Oct, pp 248-249.
Описана методика редуцирования и получения ортогональной дизъюнктивной нормальной формы, при этом требуется полный набор состояний анализируемой системы.
- 51 H.Nakazawa," A decomposition Method for Computing System Reliability by a Boolean Expression," *IEEE Trans. Reliability*, vol R-26, no4, 1976 Oct, pp 250-252.
Статья является небольшим дополнением к [40].
- 52 B.S.Dhillon," Literature Survey on Three-State Device Reliability Systems," *Microelectronics and Reliability*, vol 16, 1977, pp 601-602.
Приводятся ссылки на 31 публикацию по вопросам надежности систем, элементы которых могут находиться в 3-х состояниях.
- 53 E.Henley, H.Kumamoto," Comment on: Computer-aided Synthesis of Fault-trees," *IEEE Trans. Reliability*, vol R-26, 1977 Dec, pp 316-317.
Первая статья в дискуссии по работе [44].
- 54 A.Shogan," A Recursive Algorithm for Bounding Network Reliability," *IEEE Trans. Reliability*, vol R-26, 1977 Dec, pp 322-327.
Получение более точных, чем известные оценки Esary-Proshan, граничных значений показателей надежности сети достигается применением алгоритма «включения-выключения». Алгоритм реализован в программе REBOUND.
- 1978**
- 55 M.O. Locks," Minimization of Boolean Polynomials, Truth Functions, and Lattices," *Notre Dame Journal of Formal Logic*, Volume XIX, Number 2, April 1978, pp 264-270.
Приводится теоретико-множественное объяснение процессов минимизации Булевых полиномов, описан алгоритм минимизации, который проще алгоритма Quine-McCluskey.
- 56 K.K.Aggarwal, S.Rai," Symbolic Reliability Evaluation Using Logical Signal Relations," *IEEE Trans. Reliability*, vol R-27, 1978 Aug, pp. 202-206.
Метод оценки надежности сети, заданной графом, не требует определения путей и сечений. Концепция логических сигнальных отношений предполагает формирование несовместных термов логического выражения, что позволяет непосредственно переходить к символическому вероятностному выражению. Ссылка на работу [21].
- 57 M.O.Lockes," Inverting and Minimalizing Path Sets and Cut Sets," *IEEE Trans. Reliability*, vol R-27, 1978 June, pp 107-109.

- Описано применение правила поглощения для минимизации логической функции, полученной при инвертировании минимальных путей или сечений.
- 58 M.O.Locks," System Reliability Analysis: A Tutorial," *Microelectronics and Reliability*, vol 18, 1978, pp 335-345.
Учебная статья состоит из двух частей: Логическое формулирование и вероятностные расчеты. Упомянуты программы SCOPE, MAPS и SPARCS, разработанные в начале 70-х годов.
- 59 S.Rai, K.K.Aggarwal," An Efficient Method for Reliability Evaluation of a General Network," *IEEE Trans. Reliability*, vol R-27, 1978 Aug, pp 206-211.
Метод состоит из двух этапов: на первом из матрицы связей элементов составляется логическая диаграмма системы, на втором – на основе метода «включение-выключение» она преобразуется в эквивалентную (несовместную) форму, из которой получается выражение для оценки надежности. Приводится Fortran-программа для перечисления путей.
- 60 S.Rai, K.K.Aggarwal," Fault Detection in Combinational Circuits Using Boolean Matrices," *Microelectronics and Reliability*, vol 18, 1978, pp 323-324.
- 61 A.Satyanarayana, A.Prabhakar," New Topological Formula and Rapid Algorithm for Reliability Analysis of Complex Network," *IEEE Trans. Reliability*, vol R-27, 1978 June, pp 82-100.
На основе понятия нейтральной последовательности в ациклическом графе разработан быстрый алгоритм формирования вероятностного выражения из множества определенным образом полученных субграфов. На примерах показано, что предложенный алгоритм работает быстрее ранее известных.
- 62 R.Thakur," Comments on "Algorithm for Reliability evaluation of a Reducible Network"," *IEEE Trans. Reliability*, vol R-27, 1978 April, p 23.
Комментарий к работе [42].
- 63 M.O.Locks," Relationship Between Minimal Path and Cut Sets," *IEEE Trans. Reliability*, vol R-27, 1978 June, p 106.
- 64 H.Kumamoto, E.J.Henley," Top-down Algorithm for Obtaining Prime Implicant Sets of Non-Coherent Fault Trees," *IEEE Trans. Reliability*, vol R-27, 1978 October, pp 242-247.
Представлен и подробно проиллюстрирован примером из [30] алгоритм определения первичных импликант для случая некогерентных деревьев неисправностей, что дает возможность вручную повторить всю последовательность действий. Первичной процедурой является формирование дуального дерева.
- 65 L.Fratta, U.G.Montanari," A Recursive Method Based on Case Analysis for Computing Network Terminal Reliability," *IEEE Trans. Commun.*, vol COM-26, 1978 August, pp 1166-1177.
Предлагается единый подход к применению рекурсивных методов оценки надежности сетей, основанных на методологии «Анализ случая». Эта методология в противовес методам перебора состояний основана на алгоритмах рекурсивного редуцирования графов. Проводятся несколько численные примеры оценки надежности сетей, в которых число узлов от 9 до 24, а число каналов связи – от 26 до 90. Описывается разработанная авторами программа, которая нашла хороший компромисс между эффективностью и простотой.
- 66 S.V.Akers," Binary Decision Diagrams," *IEEE Trans. Computers*, vol. c-27, No.6 June 1976, pp 509-516.
Одна из первых, если не первая, статья, описывающая методы определения, тестирования и анализа больших логических функций, которые получили название «диаграммы бинарных решений» (BDD). Описаны диаграммы основных комбинаторных функций, показан способ реализации операции инверсии.

- 67 S.Arnborg,” Reduced State Enumeration – Another Algorithm for Reliability evaluation,” *IEEE Trans. Reliability*, vol R-27, 1978 June, p 101-105.
В статье специалиста Исследовательского института МО Швеции описан новый алгоритм, позволяющий улучшить методы перебора состояний для больших деревьев неисправностей, реализуя различные подходы к различным участкам ДН.
- 1979**
- 68 M.O.Locks,” Synthesis of Fault Trees: An example of Noncoherence,” *IEEE Trans. Reliability*, vol R-28, 1978 April, pp 2-5.
Обсуждаются материалы работ Lapp&Powers [55,70] с точки зрения влияния операций «исключающее ИЛИ» и «НЕТ» на функцию надежности подсистемы, которая принимает U-образную форму, в то время, как функция надежности системы имеет J-образную форму. Высказывается мнение, что некогерентность модели приводит к s-зависимости элементов. Автор отмечает, что дискуссия по работе [55] является первой детальной дискуссией по вопросу s-некогерентности. После этого необходимо обсудить влияние последовательности событий и отказов по общим причинам на работу систем безопасности как в теоретическом, так и в практическом аспектах.
- 69 T.W.Yellman,” Comment on “Comment on computer-aided synthesis of fault-trees”,” *IEEE Trans. Reliability*, vol R-28, 1978 April, pp 10-11.
Еще один участник дискуссии по работе [55], автор методики учета последовательности событий, обращающий внимание на корректное использование операции «Исключающее ИЛИ» не с философской, а с логической точки зрения.
- 70 S.A.Lapp, G.J.Powers,” Update of Lapp-Powers Fault-Tree Synthesis Algorithm,” *IEEE Trans. Reliability*, vol R-28, 1978 April, pp 12-14.
В ответ на многочисленные комментарии к работе [55], авторы уточняют свою позицию относительно использования операции «Исключающее ИЛИ» для моделирования отрицательной обратной связи.
- 71 J.A.Abraham,” An Improved Algorithm for Network Reliability,” *IEEE Trans. Reliability*, vol R-28, 1979 Apr, pp 58-61.
Весьма содержательная статья, содержащая теорему об ортогонализации Булевой суммы, текст программы, реализующий этот алгоритм, пример решения задачи получения ортогональной ДНФ для сети из 8 элементов, сравнение по времени счета с другими известными подобными алгоритмами. Указывается на первенство разработки логико-вероятностного метода итальянскими учеными Fratta&Montanari [22] в 1973г. и в том же году независимо от итальянских ученых индийскими учеными К.К.Аггарвал, J.S.Gupta, R.B.Misra [23]. Наиболее близким к предложенному алгоритму является алгоритм Bennetts [30].
- 72 K.Gopal , S.Rai,” Discussion on “A reduction Technique for Obtaining a Simplified Expression,” *IEEE Trans. Reliability*, vol R-28, 1979 Apr, p 66.
Комментарии в работе Т. Case [50]. Приводится ссылка на алгоритмы, позволяющие получать таблицы истинности, состоящие только из успешных путей, что значительно сокращает число вычислений.
- 73 Devamanoharam S.,” A Note on ‘Determination of Tiesets and Cutsets for a System without Feedback,” *IEEE Trans. Reliability*, vol R-28, 1979 Apr, pp 67-69.
- 74 A. Satyanarayana, A.Prabhakar,” Comments on “New Topological Formula and Rapid Algorithm for Reliability Analysis of Complex Network,” *IEEE Trans. Reliability*, vol R-28, 1979 August, p 264.
В дополнение к статье [61] приводится Лемма и доказывается Теорема, позволяющая получить выражение «один к одному» для анализа надежности сети. Работа выполнена по рекомендации проф. R.Barlow.
- 75 M.O. Ball.” Computing Network Reliability,” *Operations Research*, Vol.27, No.4, July-

August 1979, pp 823-838

В статье представлен алгоритм расчета показателей надежности стохастической сети ARPANET, в которой отказывают как узлы, так и каналы связи. Исходные данные задаются в виде показателей надежности и стоимости узлов (миникомпьютеров) и каналов связи (телефонных линий). Находится решение с минимальной стоимостью и заданной надежностью. Алгоритм является частью общей программы разработки сети с пакетной передачей информации. Алгоритм использует схему декомпозиции с неявным заданием отказа узлов и с неявным редуцированием параллельных участков.

- 76 K.Nakashima," Some properties of Logic-Trees Containing Mutually-Exclusive Primary-Events," *IEEE Trans. Reliability*, vol R-28, 1979 October, pp 303-308.

Анализируются логические деревья, в которых первичные события являются взаимно несовместными. Логические деревья подобны деревьям неисправностей, но включают в себя как отказы, так и работоспособные состояния. Вершинное событие представляется Булевой структурной функцией от первичных событий. Примером несовместности может быть анализ многорежимных отказов, например КЗ и обрыв, как в [30]. Даны определения позитивной структурной функции, когерентных и некогерентных функций. Приведена оригинальная схема Fussell, несколько измененная в [30].

- 77 M.O.Locke," Evaluating the KTI Monte Carlo Method for System Reliability Calculations," *IEEE Trans. Reliability*, vol R-28, 1978 Dec, pp 368-372.

Описан и анализируется метод Монте-Карло [49] оценки надежности систем в виде промежуточной средневзвешенной оценки между нижней и верхней границей показателя. Приводится пример системы «2 из 3» и системы, состоящей из 18 элементов.

- 78 M.O.Locke," Inverting and Minimizing Boolean Functions, Minimal Paths and Minimal Cuts: Noncoherent System Analysis," *IEEE Trans. Reliability*, vol R-28, 1979 Dec, pp 373-375.

Представляется эффективная методика для инвертирования минимальных путей и сечений для когерентных и некогерентных систем. Для некогерентных систем инвертирование более сложное, так как минимальная форма не является единственной. Результатом инверсии являются первичные импликанты. Методика иллюстрируется на примере схемы из [44].

- 79 T.V.Boffey, R.J.M.Waters Calculation of System Reliability by Algebraic Manipulation of Probability Expressions," *IEEE Trans. Reliability*, vol R-28, 1979 Dec, pp 358-363.

- 80 K.Nakashima, Y.Hattori, "An efficient Bottom-Up Algorithm for Enumerating Minimal Cut Sets of Fault Tree," *IEEE Trans. Reliability*, vol R-28, 1979 Dec, pp 353-357.

Описано улучшение обычного восходящего алгоритма (снизу вверх) перебора минимальных сечений дерева неисправностей. Подчеркивается, что для некогерентных Булевых функций редуцированная форма может быть и не минимальной. Программная реализация алгоритма улучшает программу, описанную в [30].

1980

- 81 N.K.Nanda," Application of Boolean Identity for Fault Tree," *IEEE Trans. Reliability*, vol R-29, NO.1 April 1980, p 70.

Обсуждаются условия применения правил редуцирования логических выражений, описанные Bennetts [30].

- 82 S.H.Lee," Reliability Evaluation of a Flow Network," *IEEE Trans. Reliability*, vol R-29, NO.1 April 1980, pp 24-26.

Статья представляет метод оценивания надежности потоковой сети с использованием концепции лексикографического упорядочивания. Каждый канал связи описывается пропускной способностью и вероятностью реализации этого

- свойства. На каждой итерации алгоритм находит множество «хороших» состояний, определяются вероятности и обновляются индексы надежности таким образом, чтобы не требовалась «история» выполнения программы.
- 83 М.С.Еaston, С.К.Wong, "Sequential Destruction Method for Monte Carlo Evaluation of System Reliability," *IEEE Trans. Reliability*, vol R-29, NO.1 April 1980, pp 27-32.
Обсуждаются обстоятельства в пользу применения методов Монте Карло для оценивания надежности больших систем. Приводится новый метод последовательного разрушения. Метод основан на применении простейшей процедуры метода Монте Карло – имитации (симуляции), когда на каждом шаге программы рассчитывается вероятностный показатель системы. Иллюстрация метода проведена на системе, содержащей более 100 элементов.
- 84 Н.Кumamoto, К.Tanaka, К.Inoue, Е.Henley, "Dagger-Sampling Monte Carlo for System Unavailability Evaluation," *IEEE Trans. Reliability*, vol R-29, 1980 Jun, pp 122-125.
Рассматривается задача оценивания показателей надежности системы в условиях редких событий отказов элементов, то есть для вероятности появления отказа менее 0.01. Для сокращения времени имитационного моделирования предлагается метод «кинжальной выборки», который позволяет сократить число необходимых генераций случайных чисел на два порядка по сравнению с обычным Монте Карло.
- 85 М.О. Locks, "Fault Trees, Prime Implicants, and Noncoherence," *IEEE Trans. Reliability*, vol R-29, 1980 Jun, pp 130-135.
Автор считает, что алгоритм Henley-Kumamoto [64] нахождения первичных импликант для некогерентной структуры является весьма громоздким и сложным. Показывается альтернативный подход на примере схемы из [30]. В комментарии Е.І.Ogunbiyi указывается, что предложенный метод не всегда корректен. В ответе на эту статью Henley-Kumamoto приводят пример большой структуры, где предложенный подход имеет ограничения.
- 86 R.K.Tiwari, M.Verma, "An Algebraic Technique for Reliability Evaluation," *IEEE Trans. Reliability*, vol R-29, 1980 Oct, pp 311-313.
Описывается двух шаговая процедура определения выражения для оценки надежности сложной системы. На первом формируется множество путей успешного функционирования в виде их объединения. На втором шаге получается эквивалентное выражение в виде суммы произведений, в котором все термы являются взаимно непересекающимися (ортогональными). В статье описана новая методика выполнения 2-го шага, состоящая из процедуры ортогонализации ДНФ и процедуры получения инверсного выражения для логического произведения как следствия теоремы де Моргана. Первая процедура известна как формула Порецкого. Указывается, что эти процедуры легко реализуются программно и являются проще всех известных программных реализаций.
- 87 J.M.Kontoleon, "An Algorithm for Evaluating Overall Reliability of Special Tree-Networks," *IEEE Trans. Reliability*, vol R-29, 1980 Oct, p 314.
Представляется алгоритм оценивания надежности сетей, имеющие в своей структуре циклы и полуциклы.
- 88 W.G.Schneeweiss, K.D.Heidtmann, "Synthesis and Number of all Series-Parallel Structures with n Components," *IEEE Trans. Reliability*, vol R-29, 1980 Oct, pp 315-319.
Рассматривается задача синтеза последовательно-параллельных структур, сравниваются графические способы их представления - блок диаграммы, деревья неисправностей и корневые деревья.
- 89 М.О. Locks, "Recursive Disjoint Products, Inclusion-Exclusion, and Min-Cut Approximations," *IEEE Trans. Reliability*, vol R-29, December 1980, pp 368-371.
Сравниваются три способа оценивания надежности когерентных систем:

рекурсивный метод получения ортогональных произведений (DP), метод «включения-выключения» (IE) и приближенный метод минимальных сечений. Два точных метода (DP, IE) сравниваются по числу термов в вероятностном выражении. Отмечается, что метод DP, описанный Abraham [71], позволяет получать более компактные вероятностные выражения, чем метод IE, названный J.Riordan (1958) теоремой Пуанкаре. Описывается возможность применения приближенных методов для высоконадежных систем.

- 90 T.L.Chu, G.Apostolakis, "Methods for Probabilistic Analysis of Noncoherent Fault Trees," *IEEE Trans. Reliability*, vol R-29, December 1980, pp 354-360.

В статье исследуется применимость нескольких хорошо известных методов анализа когерентных деревьев неисправностей для анализа некогерентных ДН. Если точная формула «включения-выключения» не может применяться для больших систем из-за проблем размерности, используются минимаксные оценки или оценки минимальных сечений.

- 91 T.Inagaki, E.J.Henley, "Probabilistic Evaluation of Prime Implicants and Top-Events for Non-Coherent Systems," *IEEE Trans. Reliability*, vol R-29, December 1980, pp 361-367.

Статья развивает строгие методы получения вероятности функционирования (неготовности), безусловной интенсивности первичных импликант и вершинных событий. Показано на примере технической системы, что для некогерентных систем должна быть строго определена стратегия ремонта и обслуживания, чтобы ремонт некоторого элемента не привел к отказу системы. Иногда подход, основанный на минимизации логических выражений, приводит к потере важной информации за счет удаления некоторых первичных импликант. Указывается на ограничения теоремы 1 Bennetts [30] об ортогональных термах без учета несоместности анализируемых событий.

1981

- 92 W.A.Thompson, "On the Foundations of Reliability," *Technometrics*, vol 23, NO.1, February 1981, pp 10-13.

Заслуживает внимание такое замечание: даже если читатель освоил теорию анализа надежности, важно знать, что делать, после того как анализ надежности выполнен.

- 93 R.B.Worrell, D.W.Stack, B.L.Hulme, "Prime Implicants of Noncoherent Fault Trees," *IEEE Trans. Reliability*, vol R- 30, NO.2 June 1981, pp 98-100.

Анализируется дискуссия, вызванная статьей Kumamoto&Henley [64], и, в частности, работой M.O.Locks [85]. Упоминается программа SETS для анализа деревьев неисправностей. Показан класс некогерентных ДН, к которым может быть применена стандартная процедура анализа когерентных ДН.

- 94 H.Kumamoto, E.J. Henley, K.Inoue, "Signal-Flow-Based Graphs for Failure-Mode Analysis of Systems with Control Loops," *IEEE Trans. Reliability*, vol R- 30, NO.2 June 1981, pp 110-115.

Указывается, что проводить анализ отказов для систем с контурами управления с помощью ДН весьма трудно. Предлагается новый подход к решению таких задач. Применяется правило Mason для анализа результатов действия контура управления. Вершинное событие определяется неравенством для переменных узла сигнального поточного графа.

- 95 K.K.Lee, "A Compilation Technique for Exact System Reliability," *IEEE Trans. Reliability*, vol R- 30, NO.3 August 1981, pp 110-115.

- 96 A.Satyanarayana, J.N.Hagstrom, "A New Algorithm for the Reliability Analysis of Multi-Terminal Networks," *IEEE Trans. Reliability*, vol R- 30, NO.4 October 1981, pp 325-333.

Приводится новая топологическая формула для многополюсной надежности сети (источник – несколько вершин). Рассматривается обобщенная надежность сети как

- вероятность того, что любая вершина сети связана с любой другой вершиной.
- 97 W.G.Schneewies," Computing failure frequency, MTBF & MTTR via mixed product of availabilities and unavailabilities," *IEEE Trans. Reliability*, vol R- 30, NO.4 October 1981, pp 362-363.
Приводится простое правило получения частоты отказов из полинома, состоящего из термов готовности или неготовности.
- 98 C.L.Hwang,F.A.Tillman, M.H.Lee," System-Reliability Evaluation Techniques for Complex/Large Systems - A Review," *IEEE Trans. Reliability*, vol R- 30, NO.5 December 1981, pp 416-423.
Статья представляет обзор литературы, относящейся к методикам оценивания надежности малых и больших сложных систем. Проведена классификация методов относительно моделей систем, даны рекомендации к применению тех или иных методов. Список литературы включает 97 источников. Работа выполнена при поддержке ВМС США.
- 99 Ding-Hua Shi," General Formulas for Calculating the Steady-State Frequency of System Failure," *IEEE Trans. Reliability*, vol R- 30, NO.5 December 1981, pp 444-447.
Получены две новые формулы для оценки частоты отказов системы для стационарного режима. Подход основан на быстром алгоритме AGM [28].
- 1982**
- 100 A.Satyanaarayana," A Unified Formula for Analysis of Some Network Reliability Problem," *IEEE Trans. Reliability*, vol R-31, NO.1 April 1982, pp 23-32.
В статье описана топологическая формула для направленного вероятностного графа- решения 6 задач по надежности сети. Формула включает в себя «несокращаемые термы» и применяется для графов с направленными и ненаправленными каналами связи.
- 101 M.O.Locks," Recursive Disjoint Products: A Review of Three Algorithms," *IEEE Trans. Reliability*, vol R-31, NO.1 April 1982, pp 33-35.
В статье описана теоретическая база всех трех алгоритмов [22,28,71]. Доказана теорема для процедуры внешнего цикла – ортогонализации логической суммы минимальных путей. Процедура внутреннего цикла связана с инвертированием термов логической суммы. Abraham [71] комбинирует последовательности реализации процедур внешнего и внутреннего циклов. Обсуждаются преимущества этих алгоритмов относительно метода «включения-выключения».
- 102 S.H.Ahmad," A Simple Technique for Computing Network Reliability," *IEEE Trans. Reliability*, vol R-31, NO.1 April 1982, pp 41-44.
Разработаны три методические конструкции для получения вероятностного выражения надежности сети, которое получается за счет формирования несовместных дуг графа. Надежность сети при этом может быть рассчитана как сумма надежности дуг. Метод не требует априорного знания минимальных путей и сечений.
- 103 A.Laviron, A.Carnino, B.Koen," Comment on "A Compilation Technique for Exact System Reliability"," *IEEE Trans. Reliability*, vol R-31, NO.1 April 1982, p 51.
В комментарии к работе K.Lee [95] указаны ограничения применения польской обратной нотации к деревьям неисправностей с повторяющимися событиями.
- 104 R.G.Bennetts," Analysis of Reliability Block Diagrams by Boolean Techniques," *IEEE Trans. Reliability*, vol R-31, NO.2 June 1982, pp 159-165.
Еще одна учебная статья R.G.Bennetts, посвященная общему методу получения вероятностного выражения на основе анализа путей структуры, заданной в RBD (блок-диаграммой). Обсуждаются вопросы компьютерной реализации метода.
- 105 K.K.Aggarwal, Y.C.Chopra, J.S.BajwaCapacity Consideration in Reliability Analysis of Communication Systems," *IEEE Trans. Reliability*, vol R-31, NO.4 October 1982, pp 177-181.

Описан алгоритм оценивания надежности сети, заданной вероятностным графом, с учетом пропускной способности каналов связи. В отличие от работы Lee [82] метод может быть применен и для неориентированных графов. Приведен текст FORTRAN-программы.

- 106 B.L.Deuermeyer, "A New Approach for Network Reliability Analysis," *IEEE Trans. Reliability*, vol R-31, NO.4 October 1982, pp 350-354.
Статья представляет новый подход для анализа надежности сети, основанный на сетевой функции. Если такая функция получена, то нет трудностей для ее анализа. Сетевая функция учитывает пропускные способности каналов.
- 107 K.K.Aggarwal, Y.C.Chopra, J.S.Bajwa, "Reliability Evaluation by Network Decomposition," *IEEE Trans. Reliability*, vol R-31, NO.4 October 1982, pp 355-358.
Описан метод оценивания надежности больших коммуникационных систем на основе неоднократной декомпозиции вероятностного графа на две части с использованием соответствующего сечения. Представлен алгоритм декомпозиции ABC.
- 108 K.D.Heidtmann, "Bounds on Reliability of a Noncoherent System Using its Length & Width," *IEEE Trans. Reliability*, vol R-31, NO.5 December 1982, pp 424-427.
Рассматривается класс некогерентных систем «от k до K из N». Оценка граничных значений надежности осуществляется с учетом длины и ширины системы.
- 109 K.Hwang, T-P. Chang, "Combinatorial Reliability Analysis of Multiprocessor Computers," *IEEE Trans. Reliability*, vol R-31, NO.5 December 1982, pp 469-473.
Авторы рассматривают комбинаторный метод оценивания надежности мультипроцессорных компьютеров. Мультипроцессорные структуры характеризуются перекрестными коммутаторами, временной избыточностью и мультипортовой памятью.

1983

- 110 A.M.Rushdi, "Symbolic Reliability Analysis with the Aid of Variable-Entered Karnaugh Maps," *IEEE Trans. Reliability*, vol R-32, NO.2 June 1983, pp 134-139.
Представлен метод символического оценивания надежности умеренно сложных систем на основе байесовой декомпозиции и приведения их к последовательно-параллельным структурам. Проведен обширный качественный сравнительный анализ различных методов оценивания надежности сложных структур.
- 111 H.Tanaka, L.T.Fan, F.S.Lai, K.Toguchi, "Fault-Tree Analysis by Fuzzy Probability," *IEEE Trans. Reliability*, vol R-32, NO.5 December 1983, pp 453-457.
- 112 P.P.Gupta, S.C.Agarwal, "A Boolean Algebra Method for Reliability Calculations," *Microelectronics and Reliability*, vol 23, No. 5, 1983, pp 863-865.
Рассматривается система из 3 подсистем и 6 коммутаторов. Символьное выражение для оценки надежности получено методом Булевой алгебры. Первое обнаружение монографии И.А.Рябина [«Reliability of Engineering Systems. Principles and Analysis», М.: Mir, 1976] без ссылки на нее.
- 113 F.Lombardi, "Parallel/Series dependency and equivalence in generalized Markov's chains," *Microelectronics and Reliability*, vol 23, No. 3, 1983, pp 501-507.
Первое обнаружение ссылки на монографию И.А.Рябина на английском языке.
- 114 F.Lombardi, S.Ratheal, "Analysis of series deviance in a parallel state transition Diagram and application to fault tolerant computing," *Microelectronics and Reliability*, vol 23, No. 5, 1983, pp 963-980.
- 115 A.M.Rushdi, "How to Hand-Check a Symbolic Reliability Expression," *IEEE Trans. Reliability*, vol R-32, NO.5 December 1983, pp 402-408.
Символьное выражение для оценки надежности системы может быть получено ручным способом или программной. Различные методы позволяют получить не идентичные по форме, но эквивалентные по результатам вычислений выражения. Описаны три алгоритма проверки корректности вероятностных выражений для

когерентных и некогерентных систем. Автор – египтянин, работающий в Саудовской Аравии.

1984

- 116 R.E.Barlow ,” Mathematical Theory of Reliability: A Historical Perspective,” *IEEE Trans. Reliability*, vol R-33, NO.1, April 1984, pp 16-20.
Описываются исторические моменты зарождения математической теории надежности в США, инициированные запросами ведомств Министерства обороны. Формирование математической теории надежности к концу 60-х годов завершилось как в США, так и в СССР (выходом книги Гнеденко, Беляева, Соловьева). 70-е годы характеризуются бурным ростом применения технологии деревьев неисправностей. 80-е годы получили название эры сетевой надежности, благодаря возросшей важности компьютерных сетей и их надежности. В списке ссылок указано 80 источников.
- 117 W.G.Schneewies,” Disjoint Boolean Products via Shannon’s Expansion,” *IEEE Trans. Reliability*, vol R-33, NO.4, October 1984, pp 329-332.
Утверждается, что применение теоремы разложения логической функции Шеннона (Лагранжа) может стать ядром мощного и чрезвычайно простого метода получения короткого выражения ортогональной ДНФ. На тривиальном примере показан переход от теоремы Шеннона к алгоритму ортогонализации Порецкого (внешний цикл по M.O.Locke). На простом примере показано совпадение с алгоритмом Abraham [71]. Для более сложного примера с помощью теоремы Шеннона получена более короткая форма ОДНФ по сравнению с алгоритмом Abraham. С точки зрения компьютерной реализации использование разложения Шеннона позволяет применять параллельные вычисления.
- 118 A.Vojadjiev,” FTANS – A Computer Program for Probabilistic Analysis of Non-Coherent Structures,” *IEEE Trans. Reliability*, vol R-33, NO.5, December 1984, pp 397-398.
Описывается код программы FTANS – анализ некогерентных структур с использованием ДН. Получение первичных импликант осуществлено с помощью подпрограммы KADON (алгоритм Bennetts [30]), обработка логической функции – SEARAY(библиотека подпрограмм ICO1AS, ICO1BS), вычисление вероятностного полинома – SYSREL (алгоритм Bennetts). Тестирование выполнено на примере Kumamoto&Henley [64]. Автор обучался в Московском энергетическом институте, работает в Болгарии в Институте атомных исследований и атомной энергии.
- 119 A.M.Rushdi,” On Reliability Evaluation by Network Decomposition,” *IEEE Trans. Reliability*, vol R-33, NO.5 December 1984, pp 379-384.
Представляется простой метод декомпозиции (разделения) системы на более простые подсистемы в задачах символьного оценивания надежности. Метод использует подходы deMercado и др.[39] и Aggarwal и др. [107]. Получен модифицированный алгоритм декомпозиции R-ABC.
- 120 B.M.E.Moret, M.G.Thomason,” Boolean Difference Techniques for Time-Sequence and Common-Cause of Fault-Trees,” *IEEE Trans. Reliability*, vol R-33, NO.5 December 1984, pp 399-405.
Рассматриваются методики анализа Булевых разностей, зависящих от времени, для когерентных систем, состоящих из статистически независимых элементов. Для описания систем, поведение которых зависит от времени, используется термин поэтапная задача (или в терминах фирмы RELEX – фазовые блок диаграммы). Частные Булевы разности рассматриваются для случая отказов по общей причине. Концепция Булевых разностей, зависящих от времени, используется для разработки методов анализа последовательных, а не только комбинаторных, структурных функций.
- 121 A.Zabludovski,” A Recursive Method for Network Reliability Measures Evaluation,”

Microelectronics and Reliability, vol 24, No. 3, 1984, pp 445-451.

В статье дан новый рекурсивный алгоритм оценки надежности, основная идея которого основана на получении агрегированных сетей, состоящих из отдельных подсистем и узлов. Если найдены показатели надежности для подсистем, надежность системы определяется простым суммированием вероятностных показателей подсистем. В качестве примера рассматривается мостиковая схема.

- 122 A.Agrawal, R.E.Barlow," A Survey of Network Reliability and Domination Theory," *Operations Research*, vol 32, No. 3, May-June 1984, pp 478-492.

Обзор дает ссылки на 26 источников, отражающих текущее состояние решения задач оценивания надежности сетей. Данная задача отнесена к NP-сложным задачам. Все методы подразделены на три основные класса: метод «включения-выключения» (IE), метод суммы несовместных произведений (DP), метод декомпозиции или факторизации. Работа A.Satyanaarayana, A.Prabhakar [61] названа «теоретическом прорывом» в задачах сетевой надежности, хотя вероятностный анализ сетей, представленный в известной литературе, назван весьма упрощенным и нереалистичным с точки зрения практики.

1986

- 123 P.P.Gupta, A.Kumar," Evaluation of MTTF and Reliability of a Power Plant by BF Technique," *Microelectronics and Reliability*, vol 26, No. 3, 1986, pp 423-428.

Резервированная система, состоящая из генератора (G1), потребителя (G2), 4-х коммутаторов и кабеля-перемычки, анализируется с помощью аппарата Булевой алгебры. На первом этапе составляется матрица успешных путей, осуществляется их ортогонализация, раскрытие инверсий и получение вероятностного полинома. Средняя наработка до отказа рассчитывается для случая экспоненциального распределения времени безотказной работы элементов системы.

- 124 P.P.Gupta, R.K.Gupta," Evaluation of Reliability and MTTF of a Complex System by Boolean Function Technique," *Microelectronics and Reliability*, vol 26, No. 4, 1986, pp 627-631.

Система состоит из генератора, потребителя, 4-х кабелей и 3-х коммутаторов. Методика оценки показателей надежности аналогична [123].

- 125 P.P.Gupta, R.K.Gupta," Operational Behaviour of a Power Plant consisting of three Generators by B.F. Technique," *Microelectronics and Reliability*, vol 26, No. 4, 1986, pp 633-640.

Система состоит из 3-х генераторов, 3-х трансформаторов, распределительного щита и 4-х кабелей-перемычек. Действия по анализу надежности схемы аналогичны [123,124].

- 126 P.P.Gupta, R.K.Sharma," Reliability and MTTF of Power Plant consisting of three Generators System by Boolean Function Technique," *Microelectronics and Reliability*, vol 26, No. 4, 1986, pp 641-645.

Система состоит из 3-х генераторов, двух распределительных щитов, одного силового щита и 6 кабелей. Действия по анализу надежности схемы аналогичны [123,124,125].

- 127 P.P.Gupta, A.Kumar," Reliability Evaluation of a Power Plant Consisting with the Aid by BF Expansion Algorithm Technique," *Microelectronics and Reliability*, vol 26, No. 6, 1986, pp 1055-1059.

Система состоит из 2-х генераторов, 3-х распределительных щитов, одного силового щита и 5 кабелей. Действия по анализу надежности схемы аналогичны [123,124,125,126].

- 128 P.P.Gupta, R.K.Gupta, R.K.Sharma," Reliability and MTTF Analysis of a Power Plant Consisting of four Generators by Boolean Function Technique," *Microelectronics and Reliability*, vol 26, No. 6, 1986, pp 1061-1065.

Система состоит из 4-х генераторов, 3-х распределительных щитов и 4-х кабелей.

Действия по анализу надежности схемы аналогичны [123,124,125,126,127].

В шести статьях Р.Р.Gupta и К^о активно используется монография И.А.Рябинина на английском языке.

- 129 R.E.Bryant, "Graph-Based Algorithm for Boolean Function Manipulation," *IEEE Trans. Computers*, vol C-35, NO.8 August 1986, pp 677-691.

Работа выполнена в рамках НИР МО США и посвящена новой структуре представления Булевых функций и алгоритмам их обработки. Начало разработок диаграмм бинарных решений (BDD) относится к работам С.У.Lee (1958) и Akers (1978) [66]. Аппарат Булевой алгебры назван краугольным камнем компьютерной науки и разработки дискретных устройств. Утверждается, что существующие способы представления Булевой функции (таблицы истинности, карты Карно, каноническая ДНФ) не являются строго каноническими формами, так как получают логическую функцию в различных представлениях, что весьма затрудняет их тестирование. Представляемые ориентированные ациклические графы напоминают BDD, но вводятся дополнительные ограничения на порядок логических переменных в вершинах. Даны фрагменты компьютерных процедур на PASCAL.

- 130 N.J.Nilsson, "Probabilistic Logic," *Artificial Intelligence* **28**, pp 71-87.

Первое строго математическое изложение сути вероятностной логики.

1987

- 131 S.Hariri, C.S.Ragnavendra, "SYREL: A Symbolic Reliability Algorithm Based on Path and Cutset Methods," *IEEE Trans. Computers*, vol C-36, NO.10 October 1987, pp 1224-1232.

Представлен алгоритм, развивающий идеи применения Булевой Алгебры в задачах оценки надежности компьютерных сетей [15,22,28,38,71]. Отличительной чертой алгоритма является применения аппарата условных вероятностей на каждой итерации для значительного сокращения времени получения ортогональных логических выражений.

1990

- 132 J.M.Wilson, "An Improved Minimizing Algorithm for Sum of Disjoint Products," *IEEE Trans. Reliability*, vol R-39, NO.1 April 1990, pp 42-45.

Незначительное улучшение алгоритма Abraham-Locks [71,101] за счет лексикографического упорядочивания логических переменных, при котором рядом располагаются термы, содержащие наибольшее число общих переменных.

- 133 J.Liu, Z.Pan, "A new Method to Calculate the Failure Frequency of Noncoherent Systems," *IEEE Trans. Reliability*, vol R-39, NO.3 August 1990, pp 287-289.

1991

- 134 S.Soh, S.Rai, "CAREL: Computer Aided Reliability Evaluator for Distributed Networks," *IEEE Trans. On Parallel and Distributed Systems*, vol. 2, NO.2 April 1991, pp 199-212.

Представлена компьютерная реализация метода оценки надежности больших распределенных вычислительных систем (до 730 путей и 7300 сечений и более). Алгоритм использует концепцию Булевой алгебры и имеет модульную структуру. Как и в программе SYREL [131], дизъюнктивным логическим выражением считается выражение, которое один к одному (1:1) преобразуется в вероятностное выражение. Приводится весьма подробное описание компьютерной реализации алгоритмов булевой алгебры, дается сравнение с другими методиками.

- 135 M.Veeraraghavan, K.S.Trivedi, "An Improved Algorithm for Symbolic Reliability Analysis," *IEEE Trans. Reliability*, vol R-40, NO.3 August 1991, pp 347-358.

- 136 S.Soh, S.Rai, "A Computer Approach for Reliability Evaluation of Telecommunication Networks with Heterogeneous Link-Capacities," *IEEE Trans. Reliability*, vol R-40, NO.4 October 1991, pp 441-451.

- 137 D.Li, Y.Y.Haimes, "A Decomposition Method for Optimization of Large-System

- Reliabilities ,” *IEEE Trans. Reliability*, vol R-41, NO.2 June 1992, pp 183-188.
- 138 M.Vujošević, M.Šučur, A.Šenborn,” Reliability Analyses for a Tree-Structured Hierarchic Control System ,” *IEEE Trans. Reliability*, vol R-41, NO.2 June 1992, pp 190-191.
- 139 C.Kim, H.K.Lee,” A Monte Carlo Simulation Algorithm for Finding MTBF,” *IEEE Trans. Reliability*, vol R-41, NO.2 June 1992, pp 192-195.
- 140 W.G.Schneewies,” Usefulness of MTTF of s-Independent Case in Other Case,” *IEEE Trans. Reliability*, vol R-41, NO.2 June 1992, pp 196-197.
- 141 M. Hikita, Y.Nakagawa, K.Nakashima, H.Narihisa,” Reliability Optimization of Systems by a Surrogate-Constraints Algorithm,” *IEEE Trans. Reliability*, vol R-41, NO.3 September 1992, pp 473-480.
- 142 R.E.Bryant,” Symbolic Boolean Manipulation with Ordered Binary-Decision Diagrams,” *ACM Computing Surveys*, vol 24, NO.3 September 1992, pp 1-26.
- 143 W.G.Schneewies,” Reliability Theory for Large Linear Systems with Helping Neighbors,” *IEEE Trans. Reliability*, vol R-41, NO.3 September 1992, pp 343-351.
- 144 S.Rai, M.Veeraraghavan, K.Trivedi,” A Survey of Efficient Reliability Computation Using Disjoint Products Approach,” *Networks*, Vol.25, 1995, pp 147-165.
- 145 K. Kyandoghere,” A simple and new algorithm for Capacity related reliability analysis of ATM transport networks,” *IEEE*, 1998, pp 1-6.
- 2001-2003**
- 146 B. Anrig , F. Beichelt,” Disjoint Sum Forms in Reliability Theory,” *ORiON*, Vol. 16, No. 1, pp. 75-86, 2001.
- 147 T.Jin, D.W.Coit,” Approximating network reliability estimates using linear and quadratic unreliability of minimal cuts,” *Reliability Engineering and System Safety*, 82 (2003), pp 41-48.
- 147 A.O. Balan, “An Enhanced Approach to Network Reliability Using Boolean Algebra,” An Honors Thesis presented to the Departments of Computer Science and Mathematics of Lafayette College on May 16, 2003.
Первая попытка проанализировать достижения в области решения задач оценки надежности сетей с использованием Булевой алгебры. Перечислено 26 публикаций, 13 из которых более подробно проанализированы в статье И.А.Рябинина.
- 148 A.O. Balan, L.Traldi,” Preprocessing Minpath for Sum of Products,” *IEEE Trans. Reliability*, vol R-52, NO.3 September 2003, pp 289-294.
- 149 Mubayi D., Turan G., Yi Zhao,” The DNF Exception Problem,” Report 2003, pp 1-16.

2009

- 150 Bjorkman K.” Digital Automation System Reliability Analysis – Literature survey,” VTT –R-08153-09.

Заключение

Начиная с 1985 года, поступления иностранной периодической литературы в библиотеки СССР стали значительно сокращаться, некоторые издания перестали поступать или поступали с большими пропусками. Поэтому цельной и полной картины развития теоретических и практических сторон логико-вероятностного анализа составить пока не удалось. По этой причине список публикаций после 1986 года носит фрагментарный характер и имеет цель отметить только некоторые, имеющие, в основном, обзорный или познавательный характер.

С этой точки зрения весьма полезным может быть знакомство с работой 1995г. [144] индийских ученых S.Rai, M.Veeraraghavan, K.Trivedi, работающих в США. В ней подчеркивается, что среди точных методов в литературе чаще всего обсуждаются метод декомпозиции, факторизации (по-нашему, разрезания), метод IE «включения-

выключения» (формула вероятности суммы совместных событий) и метод SDP суммы дизъюнктивных произведений (ортогонализации ДНФ). Подробно обсуждаются способы предварительного упорядочивания термов в логическом выражении (по уменьшению расстояния Хэмминга, по лексикографическому признаку, по увеличению мощности термов). Среди методов ортогонализации описан метод инверсии в одну переменную. Дано краткое описание процедур GKG-VT, KDH88 и CAREL, реализующие различные процедуры преобразования ДНФ. Список ссылок составляют 37 публикаций.

Следует отметить, что с развитием Интернета появилась возможность доступа к некоторым работам бесплатно, и практически ко всем – за определенную плату. Поэтому некоторое первоначальное представление о современных тенденциях логико-вероятностного анализа все же удалось получить.

В первую очередь можно отметить работы J.V.Dugan (Университет шт. Виржиния), которая вместе со своими коллегами разработала один из первых компьютерных программ Galileo (www.cs.virginia.edu/~ftree), реализующий алгоритмы динамических деревьев неисправностей (DFT) с использованием Марковских моделей. Увеличение вычислительных возможностей методологии статических ДН происходило за счет добавления новых гейтов (операторов) – частично нагруженного резервирования (warm spare –WSP), обеспечение последовательностей событий (SEQ), вероятностной зависимости (PDEP) и приоритетное “И” (PAND).

Другим путем, обеспечивающим решение более широкого круга задач, чем позволяют решать статические ДН, является объединение возможностей DFT, деревьев событий (ET) и бинарных диаграмм решений (BDD). При этом предусматривается совмещение аналитических алгоритмов с алгоритмами имитационного моделирования (Монте-Карло). Модуляризация (декомпозиция) системы или процесса при постановке задачи должна позволить на некоторых уровнях использовать простые марковские модели.

В современных публикациях отмечается, что каждый из этих подходов – комбинаторный, марковский или имитационный – имеет свои недостатки и преимущества. Именно поэтому разработка методов комбинирования в настоящее время идет по пути создания программ по компиляции DFT в динамические байесовые сети.

В обзоре Центра технических исследований Финляндии (VTT) [150], размещенном на сайте компании в 2009г., приводится список 20 программных продуктов с указанием их основных свойств и интернетовских адресов, где можно получить более подробную информацию об использовании этих программ для оценивания надежности и риска технических систем.

P.S. Как и ожидалось, после окончательного формирования списка из 150 публикаций, стали обнаруживаться новые работы, относящиеся не только к периоду после 1985 года, но и более ранние работы. Полностью осознавая, что подобная работа обречена на неполное освещение всех работ, относящихся к логико-вероятностному анализу надежности сложных систем, хотелось бы принести извинения всем тем авторам, работы которых не попали в данный список только по одной причине – не попали в нужное время в руки авторов. Надеемся, что дальнейшая работа в этом направлении исправит эту несправедливость.

Тем не менее, хотелось бы здесь упоминать работу 1963 года, которая может заинтересовать специалистов в области надежности не только в историческом, но и методологическом плане. Речь идет о работе R.Dubes, “Two Algorithms for computing Reliability,” *IEEE Trans. Reliability*, 1963 Dec, pp 55-63. В данной работе, основанной на кандидатской диссертации автора, описываются алгоритмы расчета надежности сложных систем, не сводящихся к последовательно-параллельному соединению, элементы которых имеют отказы двух типов – обрыв и короткое замыкание. Алгоритмы основаны на анализе таблиц состояний и применении алгоритма Quine-McCluskey [2,4]. Статья интересна не

только своеобразной терминологией, но и подробными объяснениями методологических основ алгоритмов. Например, обращается внимание, что выражение Булевой алгебры вида $Y \vee Y' = 1$ имеет аналогичное вероятностное выражение $P(t, x=1) + P(t, x=0) = 1$. А выражение $Y \vee Y = Y$ не имеет аналогичного вероятностного выражения.

Мы уверены, что расширение номенклатуры периодических изданий выявит еще немало пропущенных нами работ и с точки зрения развития истории науки эта работа должна быть продолжена. И, естественно, такая работа должна осветить и вклад отечественных ученых в теорию и практику логико-вероятностного анализа надежности сложных систем.