



СПИК СЗМА

Программная реализация логико-вероятностного метода анализа надежности сложных технических систем

**ВНИИЖТ
9 августа 2018**

**Александр Владимирович Струков,
к.т.н, доцент, ведущий специалист
Ирина Александровна Можаяева,
к.т.н., старший инженер-программист
АО «СПИК СЗМА»**



Совместное заседание Учёного Совета АО «ВНИИЖТ» и
Научно-технического совета АО «ВНИКТИ»,
посвященное рассмотрению вопроса:

«Универсальная логико-вероятностная модель схемно-функциональной целостности локомотива ДЛЯ ЦЕЛИ РАСЧЕТНОЙ ВЕРИФИКАЦИИ В ЧАСТИ БЕЗОТКАЗНОСТИ»



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА»
(АО «ВНИИЖТ»)



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ И
КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ПОДВИЖНОГО СОСТАВА»
(АО «ВНИКТИ»)





	СПИК СЗМА	БИК СЗМА
Расположение	г. Санкт-Петербург, Россия	г. Минск, Республика Беларусь
Выполняемые работы	<ul style="list-style-type: none">✓ Проектирование✓ Разработка специальных программных средств✓ Разработка и внедрение научно-технической продукции✓ Комплектные поставки систем управления✓ Строительно-монтажные работы	Полный комплекс инженеринговых услуг по автоматизации технологических процессов и производств (КИП и А, АСУТП и АСУП) на предприятиях Беларуси
Количество сотрудников	150	19
Дочерние офисы	<ul style="list-style-type: none">✓ г. Кириши, Россия✓ г. Мозырь, Республика Беларусь	

С 2001 г. выполняем работы
по проектной оценке надежности АСУ и систем ПАЗ



СПИК СЗМА - одна из ведущих инжиниринговых Компаний Северо-Западного региона России. На протяжении своей 56-летней истории СПИК СЗМА выполняет полный комплекс инжиниринговых услуг по автоматизации технологических процессов (КИПиА, АСУТП) и производства.

**В компании СПИК СЗМА разработан и применяется
Программный комплекс АРБИТР**



ПК АРБИТР зарегистрирован в едином реестре российских программ для ЭВМ и баз данных (Приказ Минкомсвязи России от 09.03.2017 №103)



Реестр

Реестр содержит сведения обо всем программном обеспечении, которое официально признано происходящим из Российской Федерации



История создания ПК АРБИТР (ПК АСМ СЗМА)

- 30 апреля 2002г. Утверждено техническое задание на разработку ПК АСМ СЗМА для проведения автоматизированного расчета надежности и безопасности АСУТП на стадии проектирования;
- 2004-2005 гг. ОАО "СПИК СЗМА" совместно с СПБАЭП и ИПУ РАН проведена научно-исследовательская работа "Технология 2004" ;
- с 2005 по 2007 годы "ПК АСМ СЗМА, базовая версия 1.0" прошел процедуру аттестации в Совете по аттестации программных средств НТЦ ЯРБ. Получен Аттестационный паспорт Ростехнадзора РФ № 222 от 21.02. 2007 г.

В ходе аттестации предложено сокращенное название – ПК АРБИТР – Автоматизированный Расчет Безопасности И Технического Риска.



- **ПК АРБИТР (версия 1.0.1) аттестован для применения на объектах Ростехнадзора РФ (АП ПС №424 от 15.06.2017г.)**
- **ПК АРБИТР является программным средством обеспечения проектных и исследовательских работ, учебной деятельности, а также надзорных функций в области анализа надежности и безопасности структурно-сложных технических систем.**
- **На ПК АРБИТР получено Свидетельство Федеральной службы по интеллектуальной собственности (Роспатент) о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017660507 от 22.09.2017 г.**





Теоретические основы ПК АБРИТР

Логико-вероятностный метод (ЛВМ)

расчета надежности систем:

- описание структуры системы средствами математической логики (булевой алгебры);
- получение количественной оценки показателей
- надежности с помощью теории вероятностей.



И.А. Рябинин

Общий логико-вероятностный метод (ОЛВМ)

моделирования и расчета надежности:

- графическая формализация структуры системы – СФЦ ;
- построение логической системы уравнений;
- нахождение кратчайших путей функционирования и/или минимальных сечений отказов
- формирование вероятностных функций для количественной оценки свойств системы.



А.С. Можяев ⁷

Дж. Буль «Исследование законов мышления, на которых основывается математические теории логики и вероятностей».

1854г.

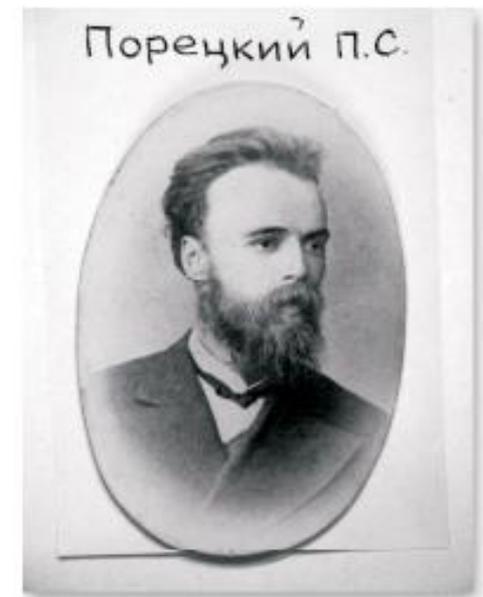
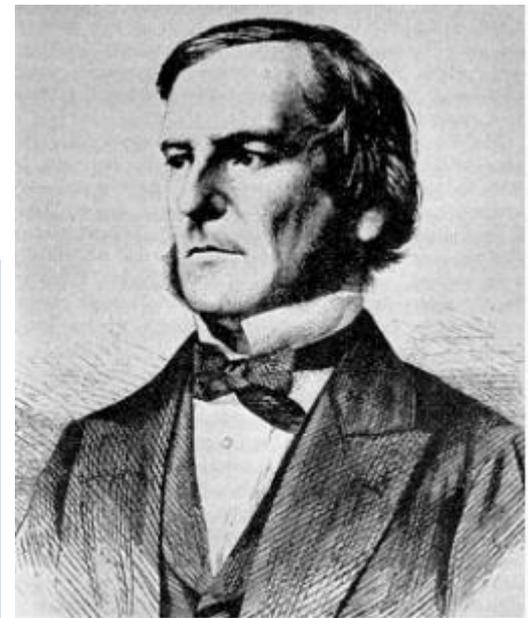
(1-20) Замыслом работы является исследование основных законов тех операций разума, с помощью которых выполняются рассуждения и выразить их с помощью символического языка и на этом основании **создать науку логику** и ее метод, чтобы сделать сам метод базисом основного метода для **применения математической теории вероятностей**, и, наконец, из различных элементов истины составить некоторые вероятные намеки о природе и конституции разума.

Математическая логика – «... Логика по предмету, а по методу – математика» .

П.С.Порецкий

«О способах решения логических равенств и обратном способе математической логики».

Казань. 1884г.





«Решение общей задачи теории вероятностей при помощи математической логики»

Казань. 1887г

«Здесь я предполагаю применить эту теорию {математическую логику} к решению общей задачи Теории Вероятностей:.. ».

«: определить вероятность сложного события ...{надежность системы}
с помощью вероятностей всех или нескольких простых событий,...
{надежность элементов}

предполагая, что данные события подчинены произвольному числу каких бы то ни было условий»

{логика структурных и
функциональных зависимостей}

Решение этой задачи, данной Булем в его сочинении An investigation of the laws of thought, нельзя считать научным, как потому что оно основано на произвольной и чисто эмпирической теории логических равенств, так и потому, что самая идея о переходе от логических равенств к алгебраическим разработана у Буля неудачно. Таким образом, главная цель настоящей статьи – дать научную форму глубоко, но смутной и бездоказательной, идеи Буля о применимости Математич. Логике к Теории Вероятностей.



«Отсюда открывается следующий общий путь для определения вероятностей: найти логическую связь между событием, которого вероятность ищется, и другими событиями, вероятности которых даны, а затем сделать *переход* от логического равенства между событиями к алгебраическому равенству между их вероятностями».

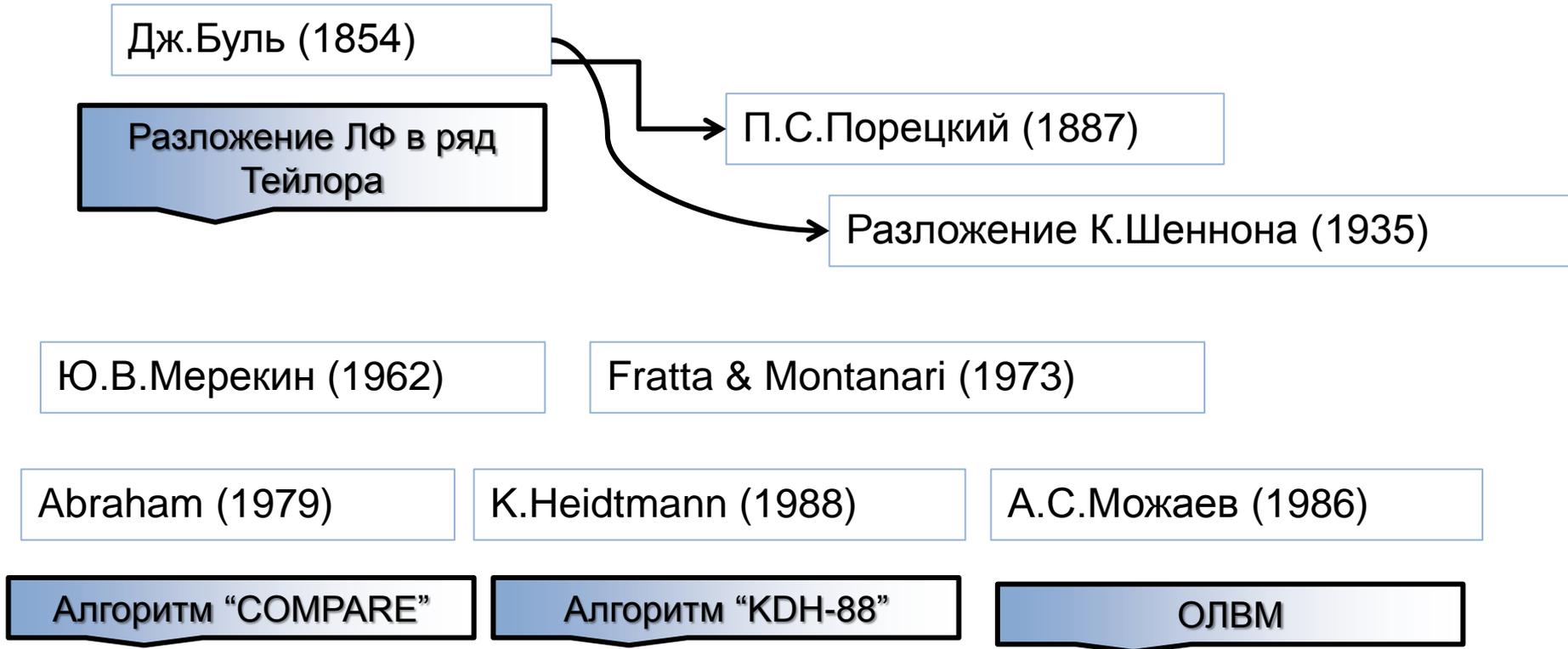
$$f(x) = f(1)x + f(0)(1 - x)$$

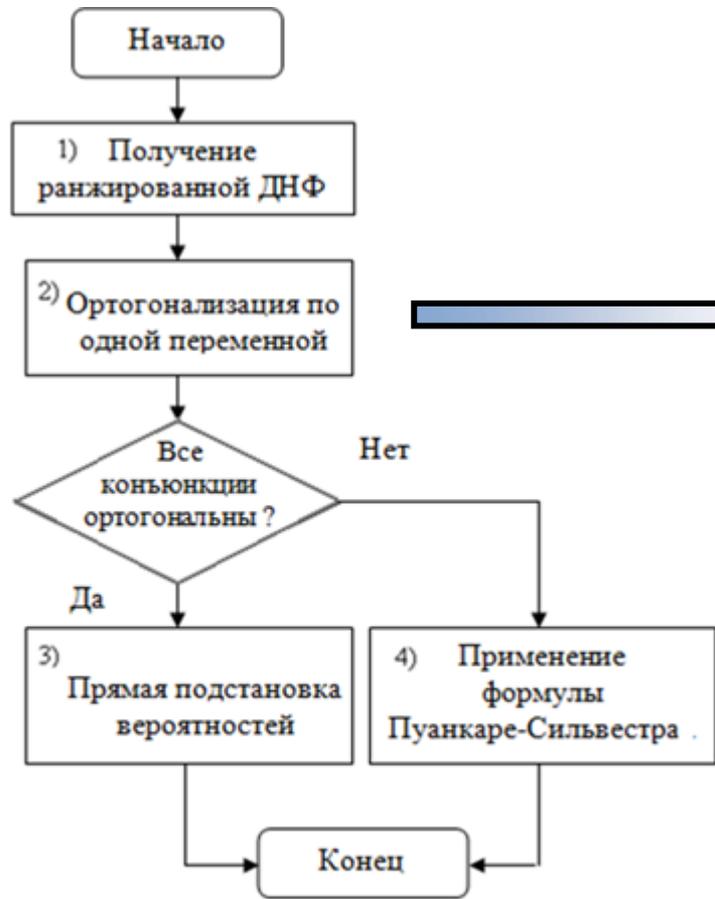
= формула Буля (1854);
= Разложение Шеннона (1935)

Это преобразование логической функции позволяет заменить логические переменные вероятностями их истинности, логические операции булевой суммы \vee и логического произведения \wedge арифметическими операция сложения $+$ и умножения \cdot .



Теоретические основы и технология алгоритмов ортогонализации логических функций





$$y_{oc} = \begin{vmatrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \\ K_4 \\ K_5 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \overline{K_1} \\ \overline{K_1}K_2 \\ \overline{K_1}K_3 \\ \overline{K_1}K_4 \\ \overline{K_1}K_5 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \overline{K_1} \\ \overline{K_1}K_2 \\ \overline{K_1}K_2K_3 \\ \overline{K_1}K_2K_4 \\ \overline{K_1}K_2K_5 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \overline{K_1} \\ \overline{K_1}K_2 \\ \overline{K_1}K_2K_3 \\ \overline{K_1}K_2K_3K_4 \\ \overline{K_1}K_2K_3K_5 \end{vmatrix}$$

$$P\left(\sum_{i=1}^n A_i\right) = \sum_i P(A_i) - \sum_{i,j} P(A_i A_j) + \sum_{i,j,k} P(A_i A_j A_k) - \dots + (-1)^{n-1} P(A_1 A_2 \dots A_n)$$

Алгоритм комбинированного метода получения вероятностной функции



Международная электротехническая комиссия – МЭК (**International Electrotechnical Commission - IEC**)

Международная организация по стандартизации (**ISO - International Organization for Standardization**)

Качество (ГОСТ 15467-79) – совокупность свойств продукции, обуславливающих ее пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии с ее назначением.



верификация (verification): Подтверждение на основе представления объективных свидетельств того, что установленные требования были выполнены.

ГОСТ 33432-2015. Безопасность функциональная. Политика, программа обеспечения безопасности. Доказательство безопасности объектов железнодорожного транспорта.

5 Политика обеспечения безопасности ... должна

... соответствовать требованиям законодательства и нормативных документов в области надежности и функциональной безопасности...

5.2.7 Основанием для пересмотра Политики могут служить:...

... неудовлетворительные результаты оценки достигнутого уровня надежности и (или) функциональной безопасности ...

7.4 Требования к содержанию разделов доказательства безопасности...

В подразделе "Выполнение спецификации требований к объекту ЖТ" должно быть продемонстрировано, каким образом в проекте выполнены ... требования надежности... приведены результаты испытаний и результаты расчета соответствующих показателей...



МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ СОВЕТ ПО СТАНДАРТИЗАЦИИ, МЕТРОЛОГИИ И СЕРТИФИКАЦИИ
(МГС)

INTERSTATE COUNCIL FOR STANDARDIZATION, METROLOGY AND CERTIFICATION
(ISC)

МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ
СТАНДАРТ

ГОСТ
32192—
2013

НАДЕЖНОСТЬ В ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ТЕХНИКЕ

Основные понятия. Термины и определения

Издание официальное

Анализ дерева неисправностей (АДН)

(в железнодорожной технике):

Метод, основанный на построении и анализе логической диаграммы, отражающей состояния составных частей, внешние события или их комбинации, приводящие к рассматриваемой неисправности железнодорожной техники

Анализ дерева событий (АДС)

(в железнодорожной технике):

Метод, основанный на построении и анализе логической диаграммы, отражающей возможные результаты, которые могут последовать от данного инициирующего события и состава предусматриваемых контрмер.

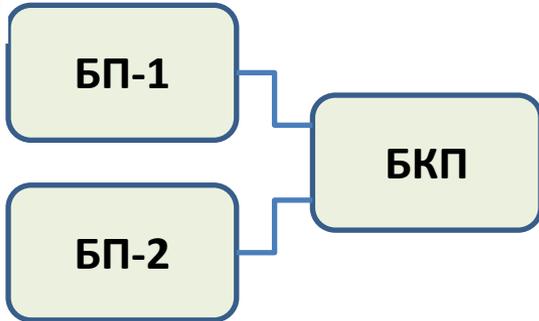
Структурная схема надежности (СШ)

(железнодорожной техники):

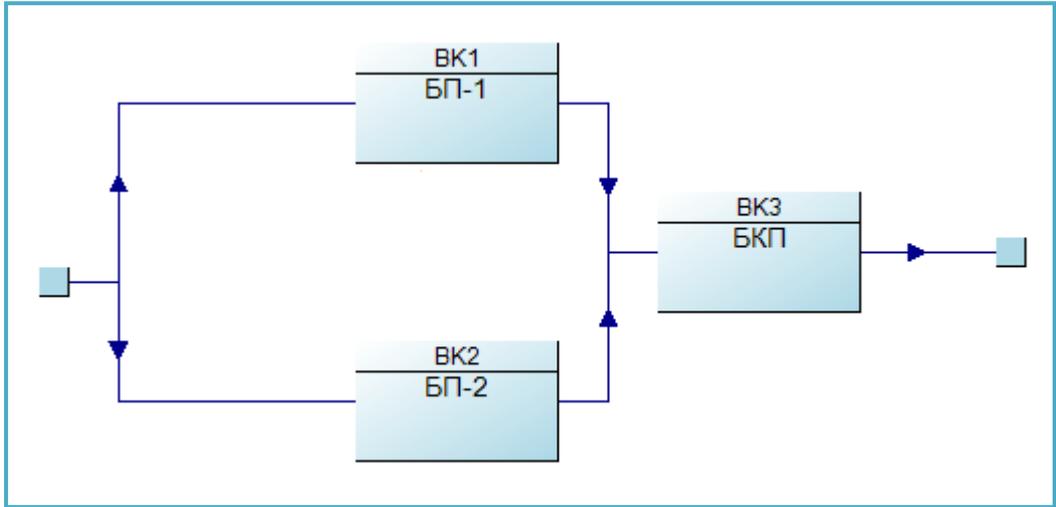
Графическое представление железнодорожной техники в виде блоков, показывающее, как неисправности составных частей и их комбинации влияют на состояние железнодорожной техники.



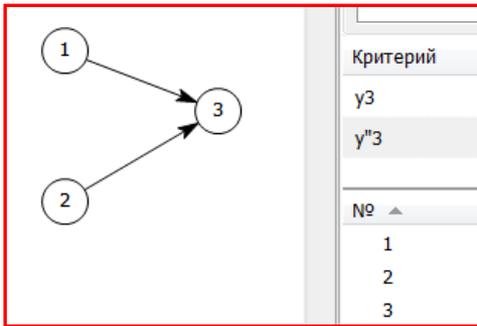
Классический пример: Анализ последовательно-параллельной системы



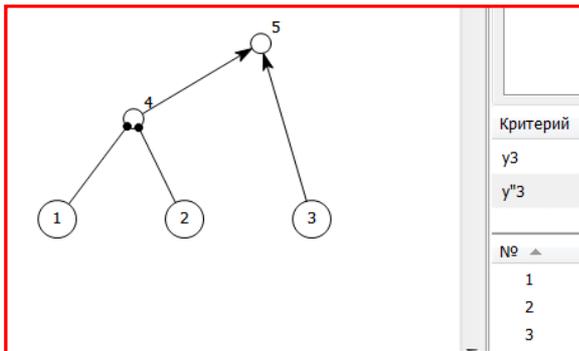
Структурная схема



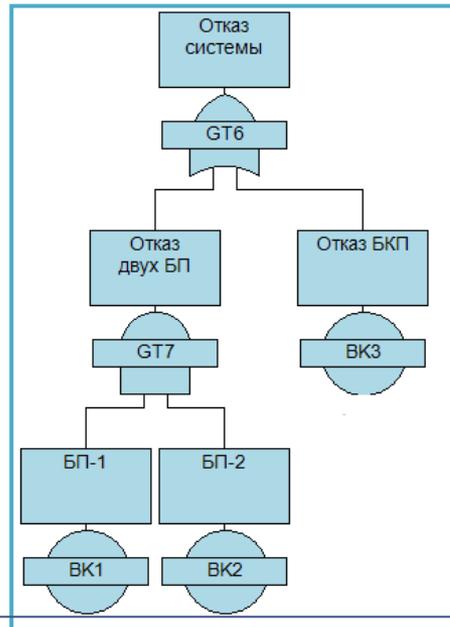
Структурная схема надежности (ПП Isofgraph)



ССН (ПК АРБИТР)



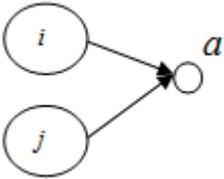
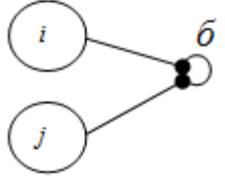
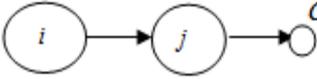
ДН (ПК АРБИТР)



Дерево неисправностей



В результате разработки СФЦ формируется система логических уравнений (СЛУ), которая решается относительно заданного логического критерия

Вид логической связи	СФЦ	СЛУ
а) дизъюнктивная связь		$\begin{cases} y_k = 1 \cdot \{y_i \vee y_j\} \\ y_i = x_i \\ y_j = x_j \end{cases} \Rightarrow y_a = x_i \vee x_j$
б) конъюнктивная связь		$\begin{cases} y_k = 1 \cdot \{y_j\} \\ y_i = x_i \cdot \{y_j\} \\ y_i = x_i \end{cases} \Rightarrow y_b = x_i \cdot x_j$
в) конъюнктивная связь		$\begin{cases} y_k = 1 \cdot \{y_i \cdot y_j\} \\ y_i = x_i \\ y_j = x_j \end{cases} \Rightarrow y_c = x_i \cdot x_j$
		

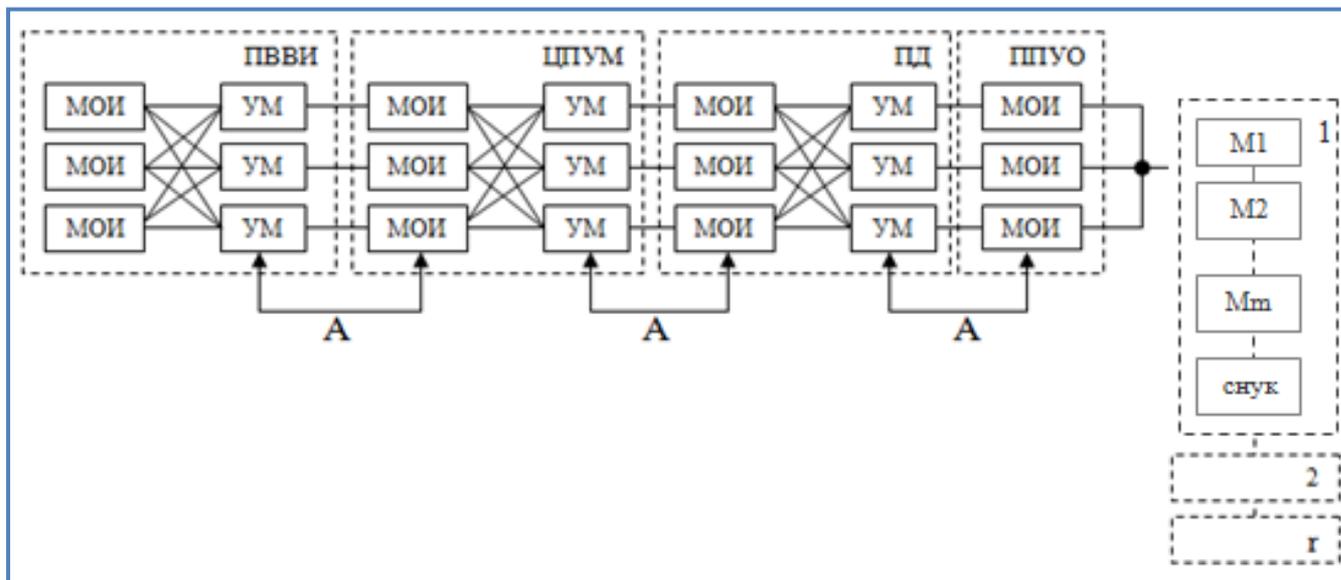


Особенности решения задач анализа надежности сложных систем:

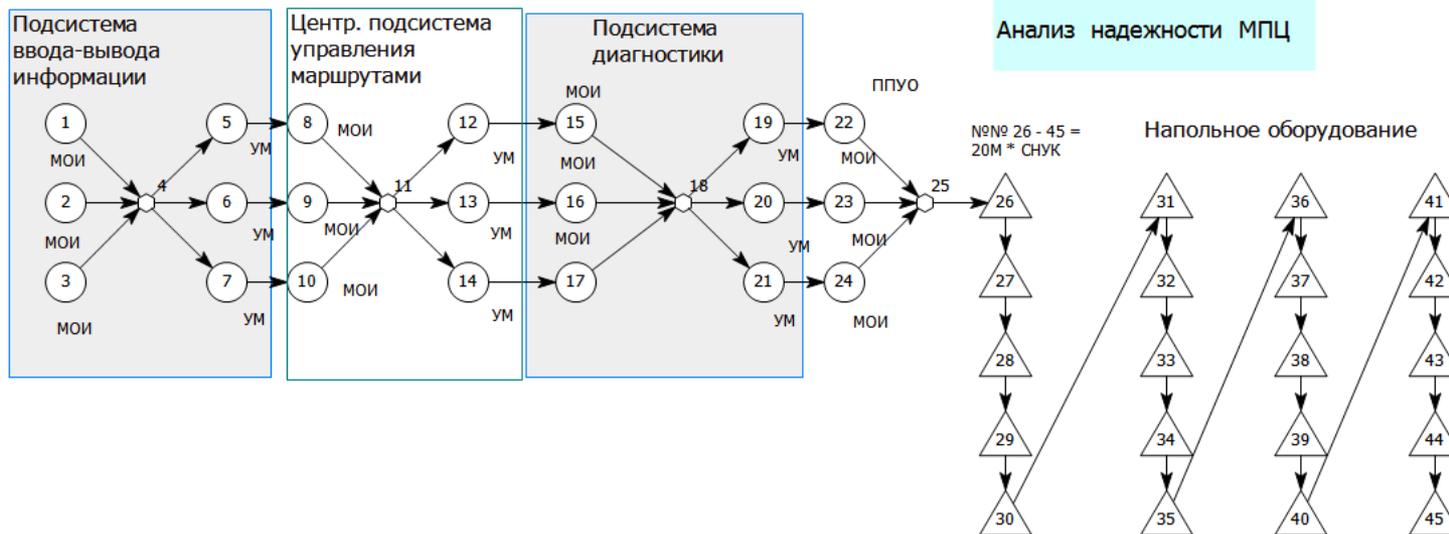
- большая размерность;
- учет наработки отдельных элементов;
- учет типа отказов элементов;
- учет отказов по общим причинам (ООП)

Методы снижения размерности:

- редуцирование (эквивалентированные вершины, кратности элементов);
- применение режима приближенного расчета и упрощенного преобразования ЛФ (метод минимальных путей и сечений);
- Использование логико-статистического расчета (без решения СЛУ и получения ВФ)



Структурная схема микропроцессорной централизации





Новая СФЦ | Открыть | Сохранить | Инструкция пользователя | Выход

1 → 2
М СЧУК
(20)

Изменение параметров

Общие | Вероятностные

Вероятность события: 0.9999000049999833

Вид закона распределения: экспоненциальный

Ср. наработка до отказа: 0 год

Тип отказа элемента: явный отказ

Ср. время восстановления (час): -1

Время работы элемента (час): -1

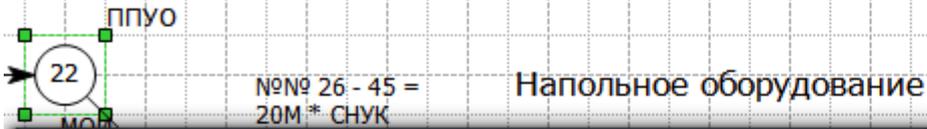
Кратность элементов: 20

OK | Отмена

Параметр элемента – кратность.



Анализ надежности МПЦ



Изменение параметров

Общие **Вероятностные**

Вероятность события: 0.970445533548508

Вид закона распределения: экспоненциальный

Ср. наработка до отказа: 0 год

Тип отказа элемента: явный отказ

Ср. время восстановления (час): -1

Время работы элемента (час): 100

Кратность элементов: 0

OK Отмена

Учет наработки элемента

- Признак полных вычислений
- Учет детерминированных состояний
- Вывод ЛФ Вывод имен
- Вывод ВФ
- Расчет полной ЛФ
- Расчет эффективности/риска

Размер ЛФ и ВФ 50000

Вероятностно-временной расчет

- Учет времени работы элементов
- Учет времени восстановления

Наработка системы 8760.00

Критерий

y45

y"45

№	Pi	Наименован
22	0.9704455335...	
23	0.9704455335...	
24	0.9704455335...	
26	0	
27	0	
28	0	

Вероятностно-временной режим



Приближенный расчет

Приближенный расчет

Учет типов отказов

Отсечка: Меньше 0.0001

❖ метод минимальных сечений и режим отсечки незначимых событий

❖ учет типа отказов (на требование, в режиме ожидания, в режиме работы)

ппуо
22
№№ 26 - 45 = Напольное оборудование
20М * ЧУК

Изменение параметров

Общие Вероятностные

Вероятность события: 0.970445533548508

Вид закона распределения: экспоненциальный

Ср. наработка до отказа: 0 год

Тип отказа элемента: явный отказ

Ср. время восстановления (час): отказ на требование
отказ в режиме работы
отказ в режиме ожидания

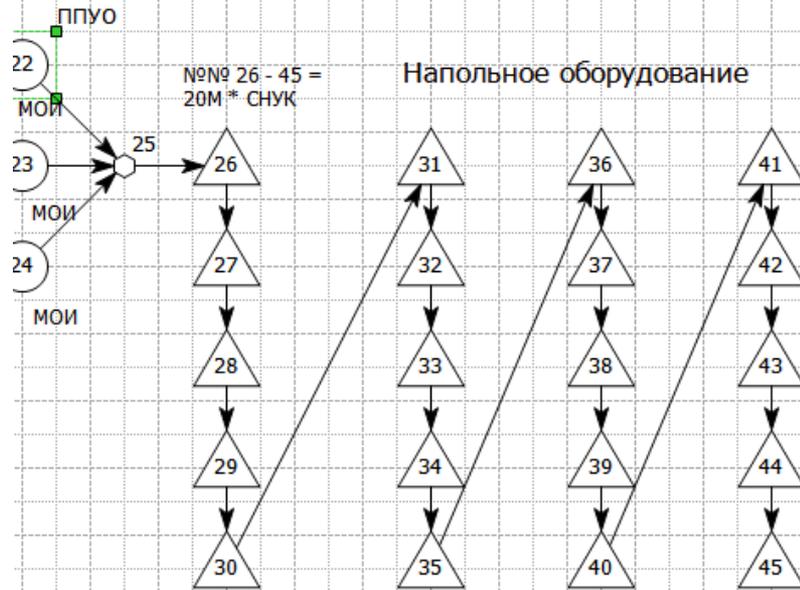
Время работы элемента (час):

Кратность элементов: 0

OK Отмена



Анализ надежности МПЦ



параметры моделирования и расчетов

- Признак полных вычислений
- Учет детерминированных состояний
- Вывод ЛФ
- Вывод ВФ
- Расчет полной ЛФ
- Расчет эффективности/риска

Размер ЛФ и ВФ: 50000

Логико-статистический

- Расчет всех критериев

Число испытаний: 1E005

Критерий

y45

y25

№	Pi	Наименован
---	----	------------

❖ расчет по нескольким критериям одновременно!

Логико-статистическое моделирование:

$P_{y45} = 0.9300017578125$ - вероятность реализации критерия;

Доверительный интервал: = +/- **0.00265449156519969**

$P_{y25} = 0.96882578125$ - вероятность реализации критерия;

Доверительный интервал: = +/- **0.00180807537272168**



Методика оценки надежности системы, состоящей из элементов с тремя состояниями

1. Построение эквивалентированной схемы №1 для оценки вероятности отказа системы по «обрыву».

2. Построение эквивалентированной схемы №2 для оценки вероятности отказа системы по «замыканию».

Критерий	у3
Схема 1	
1	0.8
2	0.8

P= 0.36 - вероятность реализации критерия

Критерий	у3
Схема 2	
1	0.1
2	0.1

P= 0.01 - вероятность реализации критерия

3. Эквивалентированные схемы соединяются как конъюнкция отрицаний двух несовместных событий

Критерий	у3
Схема 1	
1	0.8
2	0.8
Схема 2	
1	0.1
2	0.1
Группа 1 (НС)	
1	0.36
2	0.01

P= 0.63 - вероятность реализации критерия



Методика решения задач по оценки надежности систем, состоящих из элементов с тремя состояниями, с использованием ПК АРБИТР позволяет решать задачи для тех случаев, когда число состояний элементов больше двух, причем изменения состояний элементов являются стохастически зависимыми событиями.

266 *Int. J. Risk Assessment and Management, Vol. 18, Nos. 3/4, 2015*

Reliability assessment for three-state element systems using ARBITR software

Alexander V. Strukov

JSC Specialized Engineering Company
'SEVZAPMONTAGEAUTOMATICA' (JSC SPIK SZMA),
St. Petersburg, Russia
Email: alexander_strukov@szma.com

Abstract: The article deals with reliability assessment methods for systems with three-state elements. It is shown that further development of conventional logic-and-probabilistic methods (LPM) eliminates the LPM deficiencies such



Стандарт
ОАО «РЖД»

СТО РЖД
02.044 –
2011

Управление ресурсами, рисками
и надежностью на этапах жизненного цикла
(УРРАН)

Изменить группу элемента № 1

Группа: Новая группа

Тип: ГНС

- ГНС
- ООП (Альфа модель)
- ООП (Бета модель)
- Иск ООП (МГБ Модель)

Модели отказов по общей
причине

63. Отказ по общей причине:
Отказ объекта, вызванный
единичным событием в
случаях, когда отказ не
является следствием другого
отказа

(common cause failure)

Группа 1 (ООП Альфа модель)

Число элементов группы ООП n= 2

Полная вероятность отказа
одного элемента группы ООП среднее

Альфа-параметры Г

α1	α2	наименьшее
0.95	0.05	среднее
		геометр. ср.

Фактор 1.05

OK

№	Pi	Toi
Группа 1 (ООП Альфа модель)		
1	0	0
2	0	0

Параметры альфа-модели
отказов по общей причине



Заказчики проектной оценки надежности

ОАО "СУРГУТНЕФТЕГАЗ"



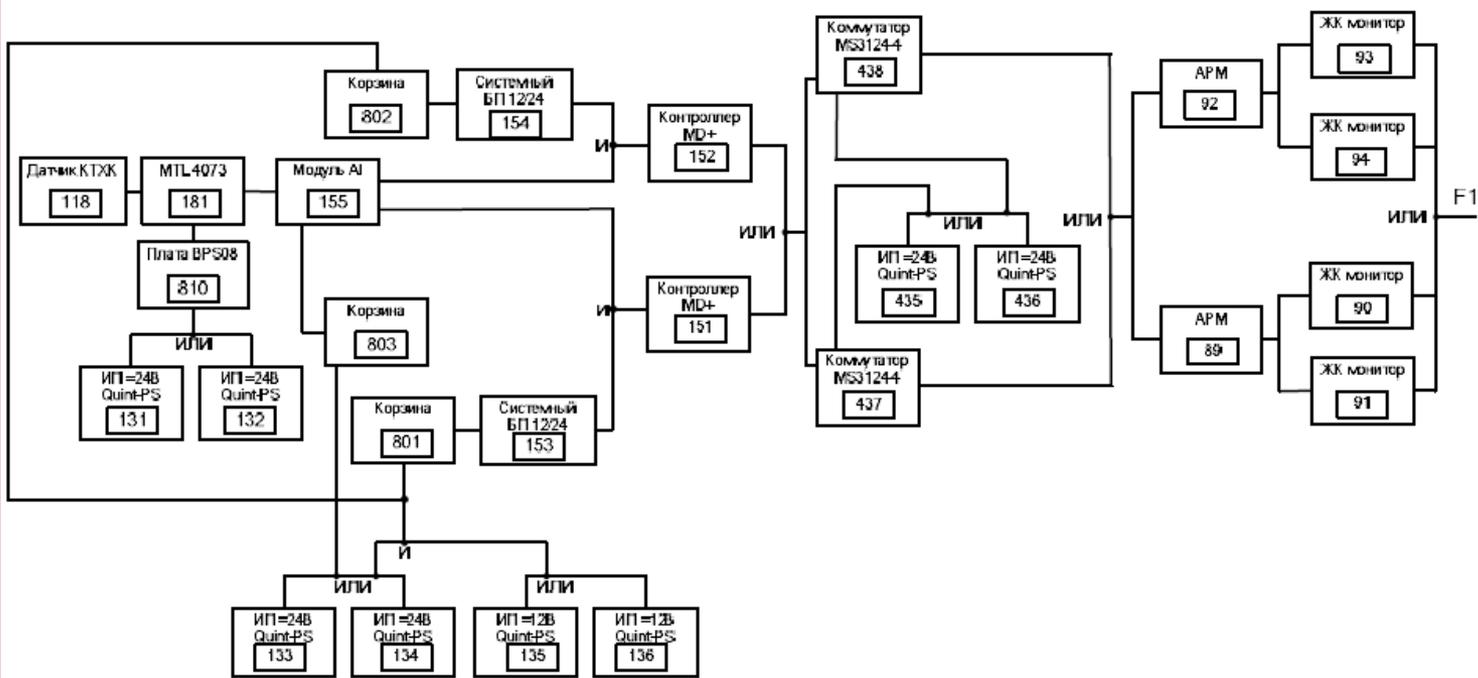


Рисунок 3 – Схема реализации функции F-1

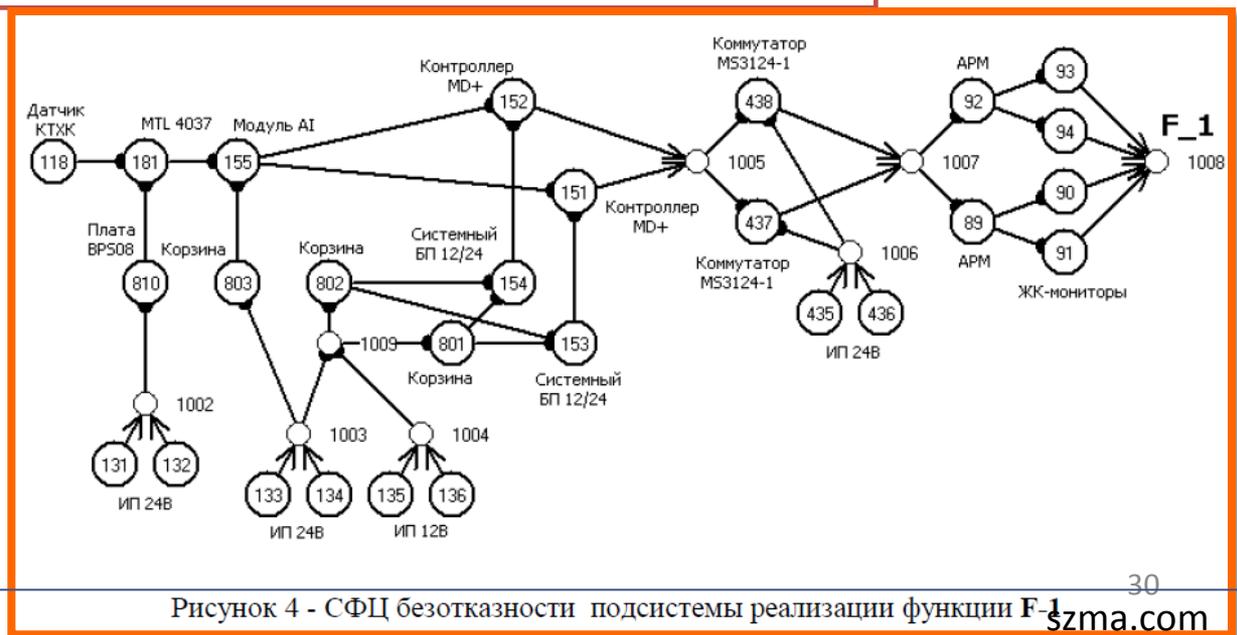


Рисунок 4 - СФЦ безотказности подсистемы реализации функции F-1



5. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОЕКТНОГО РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ

5.1. Сводная таблица показателей надежности АСУТП по функциям

Таблица 11 - Результаты расчетов нормативных показателей надежности

Функции АСУТП	Показатели надежности реализации функций АСУТП	Нормативные требования
F1	0.999982186597 – коэффициент готовности	≥ 0.999
F2	0.973571 – вероятность безотказной работы с учетом восстановлений. 0.972531 – вероятность безотказной работы без учета восстановлений.	≥ 0.92



	Версия ПК АРБИТР			
	базовая 1.0	1.0.1	2.0	Лайт
Функциональные отличия:				
Режим «Статический расчет»	+	+	+	+
Режим «Вероятностно-временной расчет»	+	+	+	-
Режим «Приближенный расчет»	+	+	+	+
<i>Режим «Логико-статистический расчет»</i>	-	-	+	+
Количество уровней декомпозиции	2	2	не огр.	не огр.
Логический элемент «K из N»	-	+	+	+
<i>Учет детерминированных состояний</i>	-	-	+	+
Учет отказов по общим причинам (ООП)	+	+	+	-
Расчет ООП для разнонадежных элементов	-	+	+	-
<i>Расчет эффективности/риска (средневзвешенного эффекта/ущерба)</i>	-	-	+	+
Учет групп несовместных событий (ГНС)	+	+	+	+
Утилиты:				
Расчет PFDavg	-	-	*	-
Расчет ЗИП	-	-	*	-



В планах работ по расширению функциональных возможностей ПК АРБИТР

- создание базы данных о безотказности ЭРИ на основе международного стандарта IEC/TR 62380 (2004-08) и ее сопряжение с ПК;
- разработка расчетной методики расчета и оптимизации ЗИП согласно рекомендациям ГОСТ 27.507-2015;
- согласование (синхронизация) терминов и математических моделей с международным стандартом IEC 61703 (2001-09);
- расширение свойств кратности до возможности учета ненагруженного облегченного резервирования;
- разработки методик расчета надежности систем со многими состояниями и циклическими связями;
- разработка шаблона-модели для преобразования входных и выходных xml-подобных файлов ПК АРБИТР при создании Пользователем индивидуальных интерфейсов и генераторов отчета.



Спасибо за внимание!

Вопросы?

**Александр Владимирович Струков,
Ирина Александровна Можяева**



СВЯЗАННОМОНТАЖАВТОМАТИКА

WWW.SZMA.COM WWW.TOSMA.RU

СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ИНЖИНИРИНГОВАЯ КОМПАНИЯ
АО «СПИК СЗМА», Россия, 199106, Санкт-Петербург, В.О., 26-я линия, 15, корп. 2, Бизнес центр «Биржа»
Тел./факс: +7(812)610-78-79 info@szma.com