



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.**



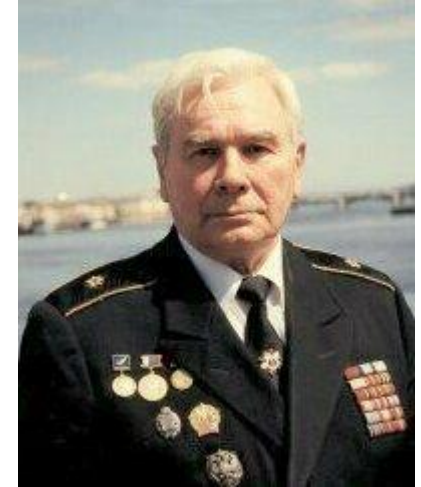


Теоретические основы ПК АБРИТР

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:

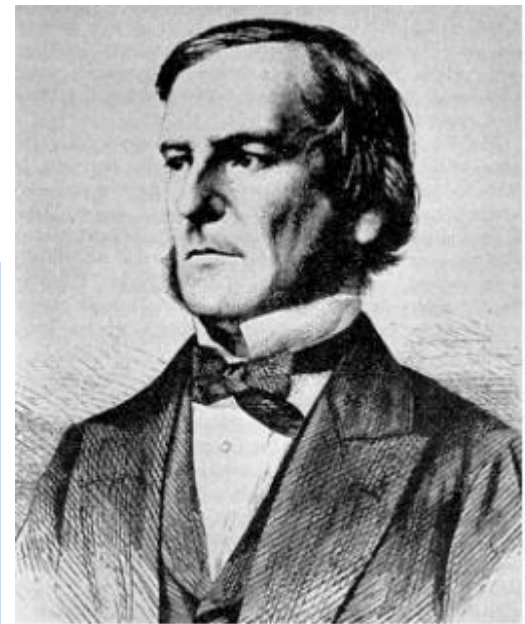
- графическая формализация структуры системы – СФЦ ;
- построение логической системы уравнений;
- нахождение кратчайших путей функционирования и/или минимальных сечений отказов
- формирование вероятностных функций для количественной оценки свойств системы.



А.С. Можяев ⁷

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

1854г.



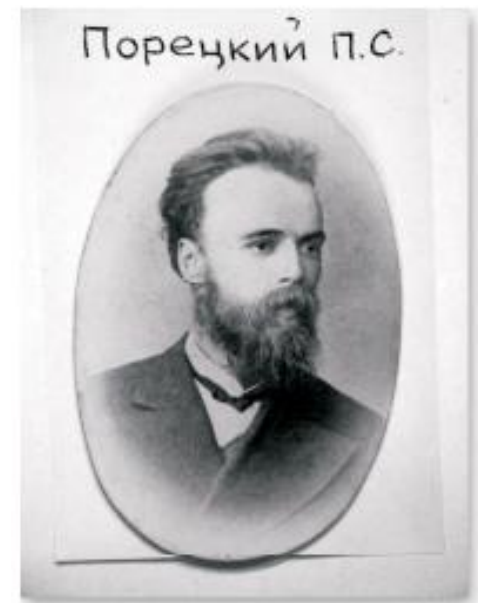
(1-20) Замыслом работы является исследование основных законов тех операций разума, с помощью которых выполняются рассуждения и выразить их с помощью символического языка и на этом основании **создать науку логику** и ее метод, чтобы сделать сам метод базисом основного метода для **применения математической 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. Логики 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».

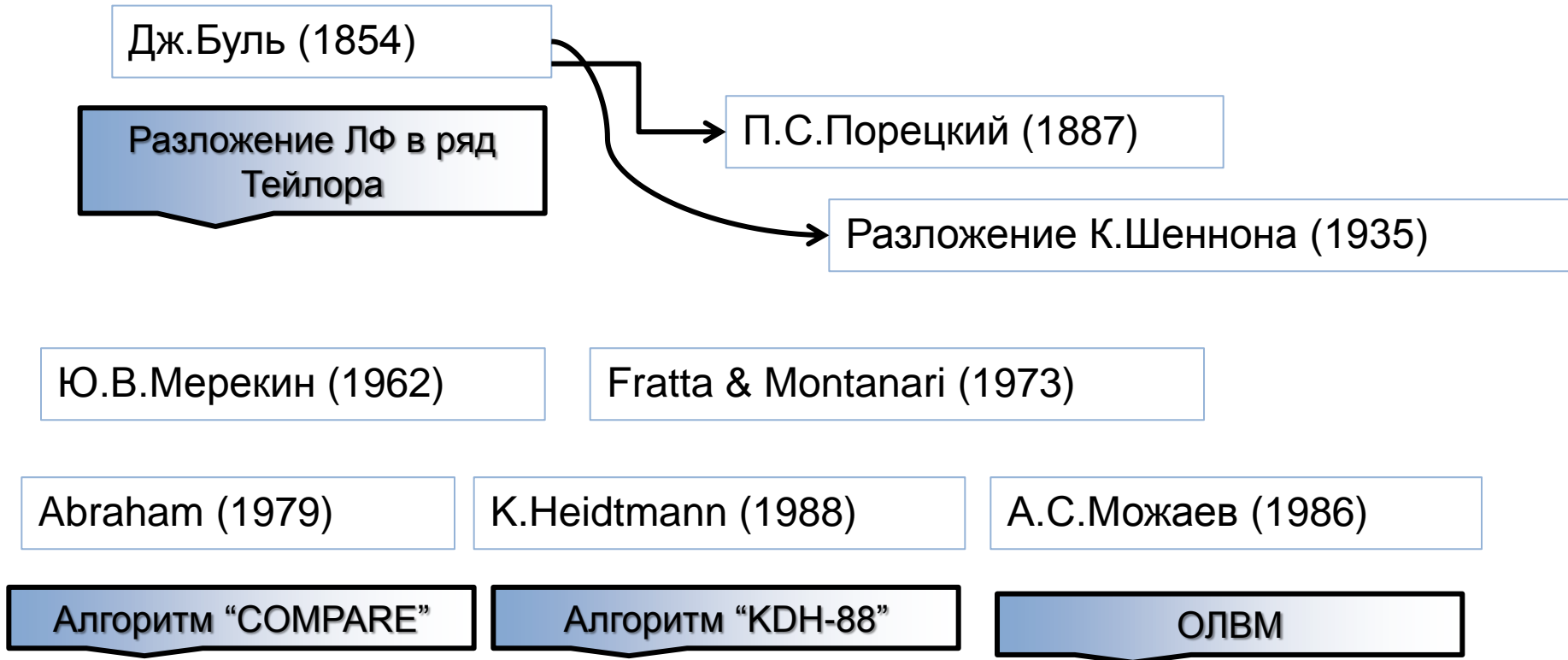
$$f(x) = f(1)x + f(0)(1 - x)$$

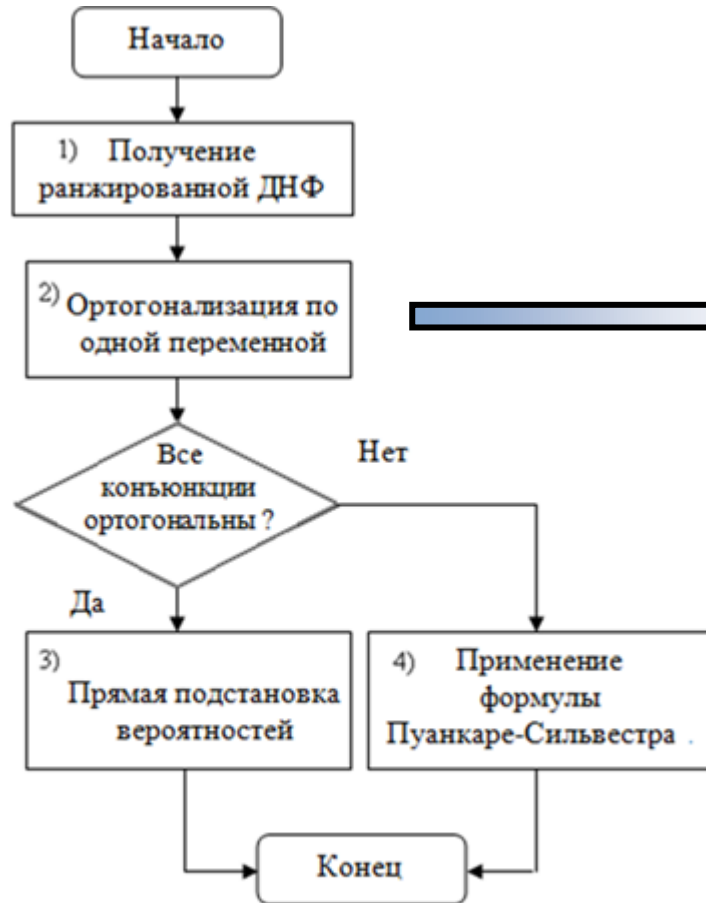
= формула Буля (1854);
= Разложение Шеннона (1935)

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.

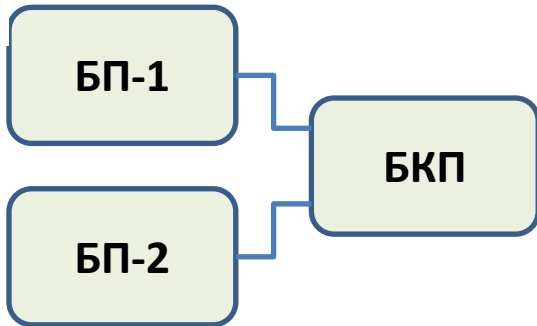
Структурная схема надежности (СШ)

(железнодорожной техники):

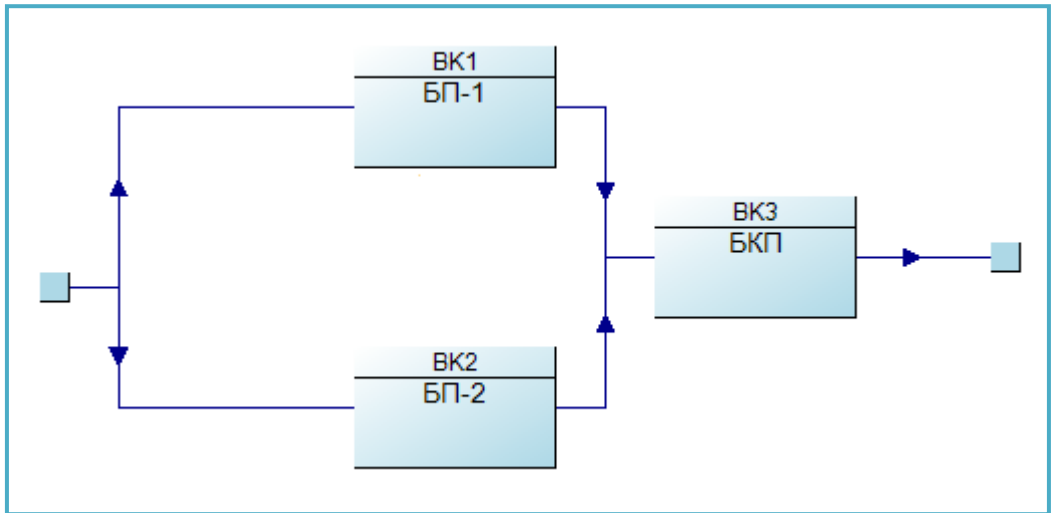
Графическое представление железнодорожной техники в виде блоков, показывающее, как неисправности составных частей и их комбинации влияют на состояние железнодорожной техники.



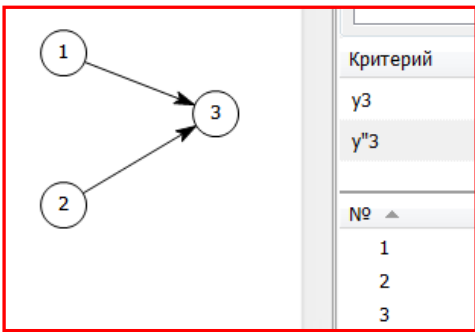
Классический пример: Анализ последовательно-параллельной системы



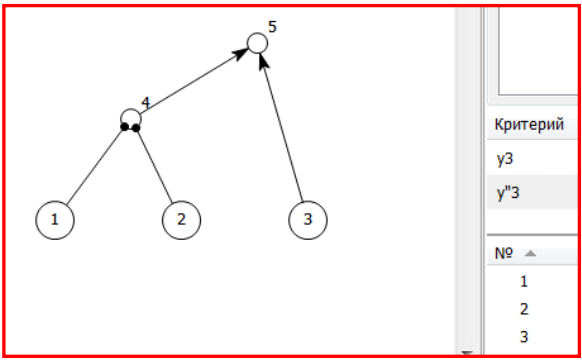
Структурная схема



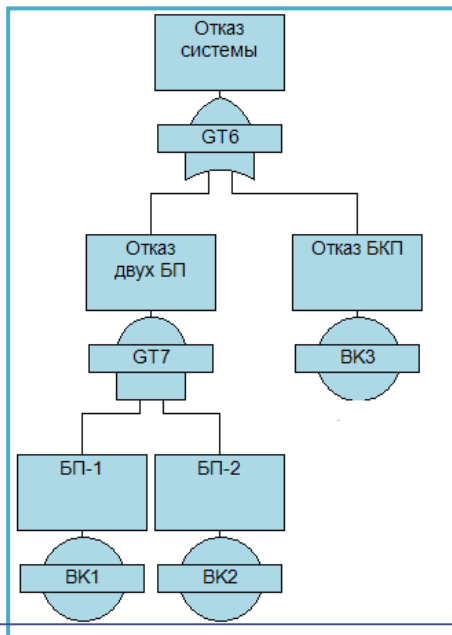
Структурная схема надежности (ПП Isofgraph)



ССН (ПК АРБИТР)



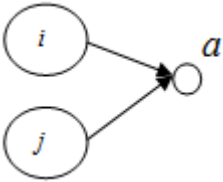
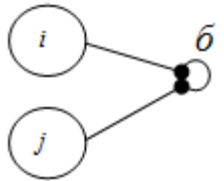

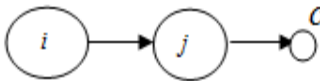
ДН (ПК АРБИТР)



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		$\begin{cases} y_k = 1 \cdot \{y_i \cdot y_j\} \\ y_i = x_i \\ y_j = x_j \end{cases} \Rightarrow y_c = x_i \cdot x_j$
		

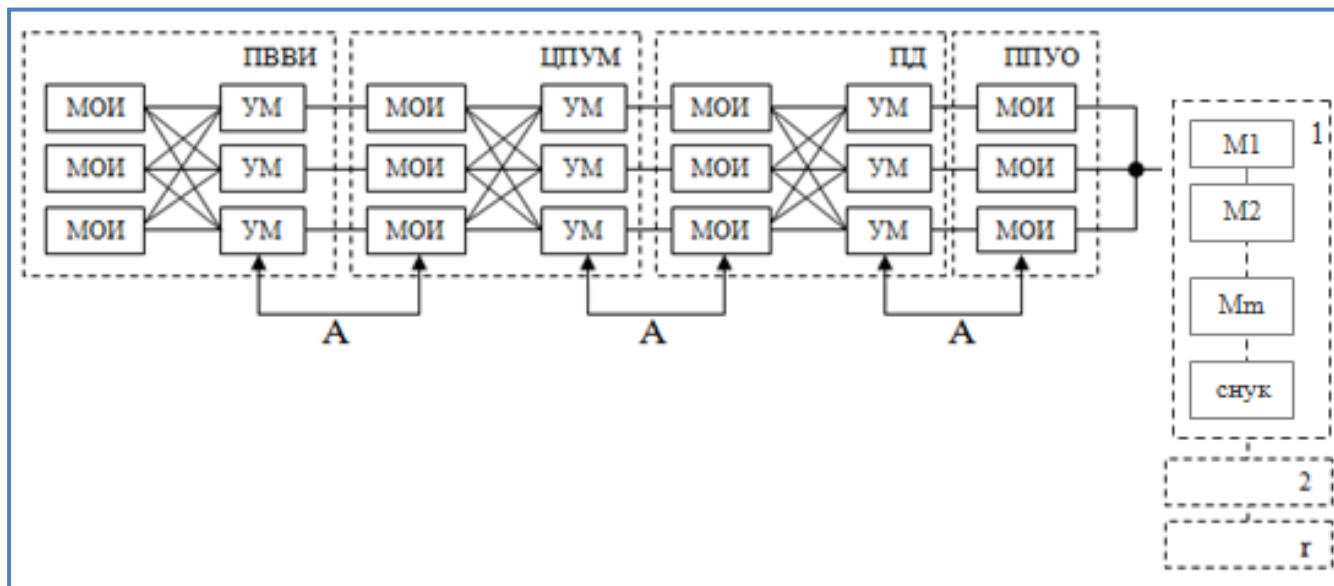


Особенности решения задач анализа надежности сложных систем:

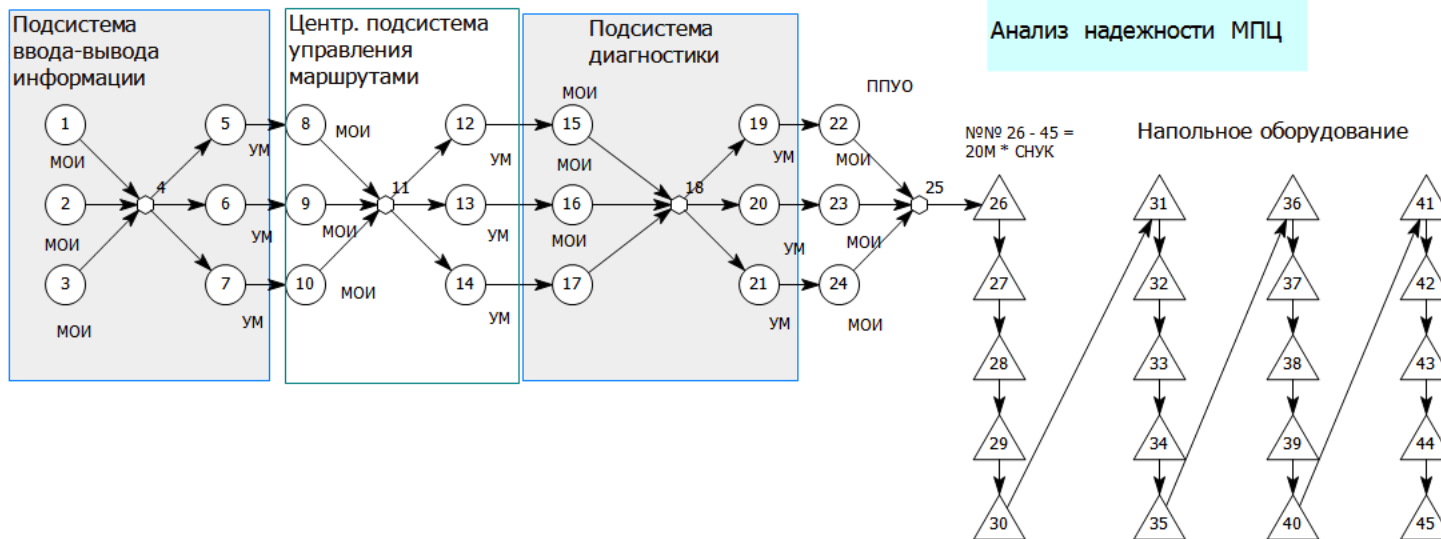
- большая размерность;
- учет наработки отдельных элементов;
- учет типа отказов элементов;
- учет отказов по общим причинам (ООП)

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 СЛУК
(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

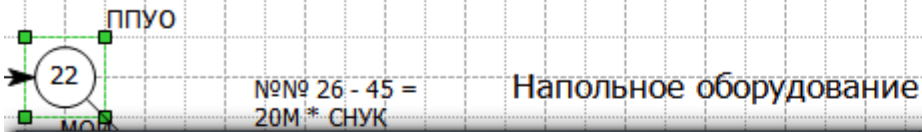
Кратность элементов: 20

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 =
20М * ЧУК
Напольное оборудование

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

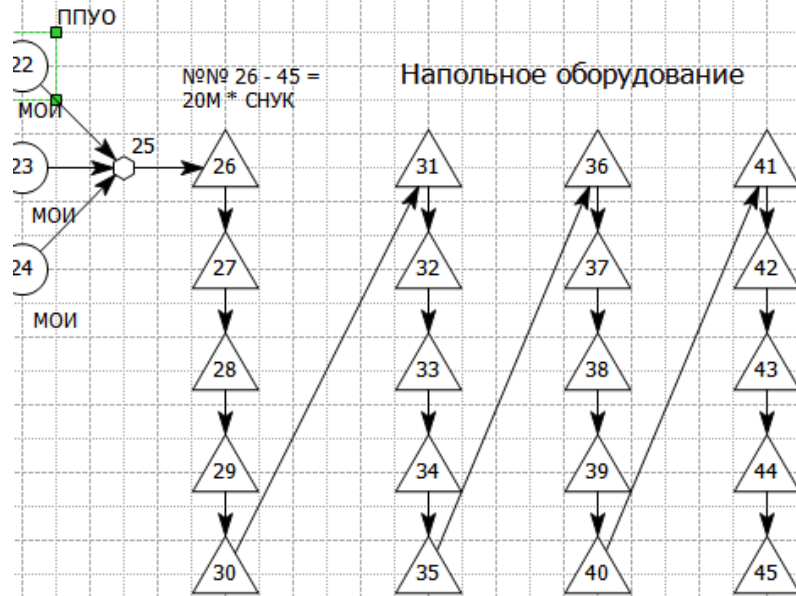
Время работы элемента (час):

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

Иск

- ГНС
- ООП (Альфа модель)
- ООП (Бета модель)
- 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

Альфа-параметры Г

α_1	α_2	среднее	<input checked="" type="checkbox"/>
0.95	0.05	наименьшее	
		среднее	
		геометр. ср.	

Фактор 1.05

OK

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

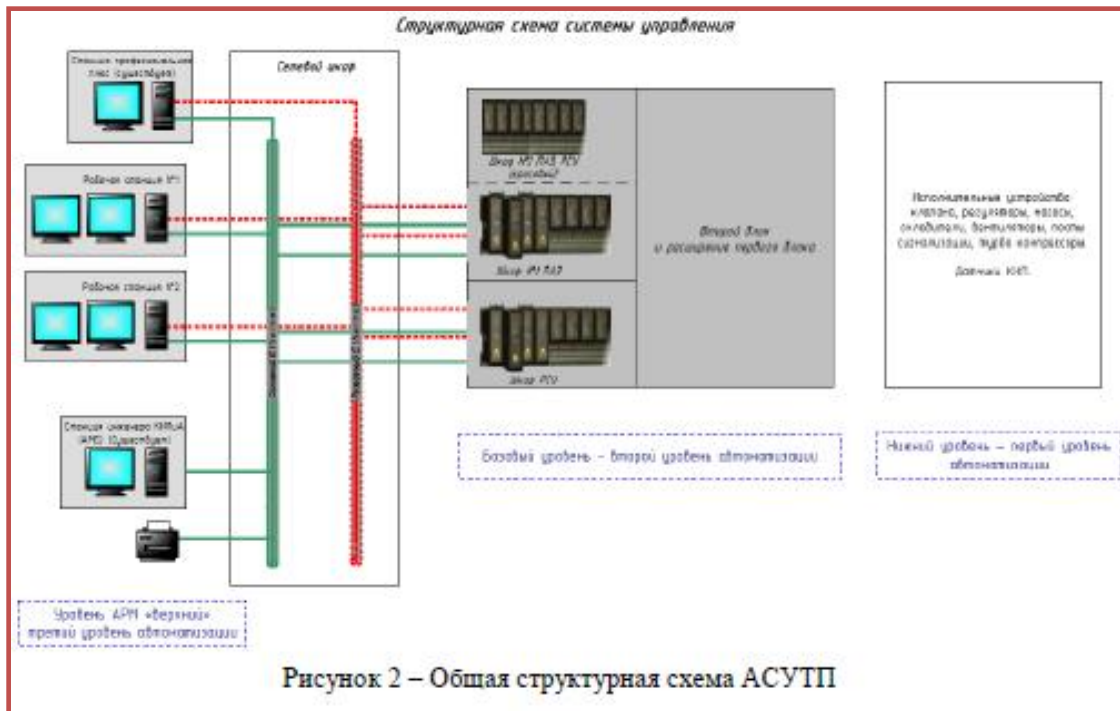
Параметры альфа-модели
отказов по общей причине



Заказчики проектной оценки надежности

ОАО "СУРГУТНЕФТЕГАЗ"





2.1 Данные о надежности элементов

Для вычисления показателей надежности Системы по отдельным функциям были использованы элементы, номенклатура и собственные вероятностные параметры которых указаны в выданных исходных данных и приведены в Таблице 1.

Таблица 1 – Состав элементов АСУТП и параметры их надежности

Наименование	Код продукта	Изготовитель	Количество	Показатель надежности mtbf (год)	Источник	Примечание
1	2	3	4	5	6	7
Источники питания						
Источник питания QUINT-PS-100-240AC/24DC/2.5	2938578	Phoenix Contact	2	57.1	Contact_PDFs/">http://eicom.ru/pdf/datasheet/Phoenix>Contact_PDFs/	
Источник питания QUINT-PS-100-240AC/12DC/10	2938811	Phoenix Contact	4	57.1	- " -	

Таблица 2 - Основные функции АСУТП

Подсистема	Обозначение функции	Название функции
PCU	F1	Представления данных от аналогового датчика на АРМ оператора
PCU	F2	Автоматическое регулирование
PCU	F3	Представление данных от дискретного датчика на АРМ оператора
PCU	F4	Дистанционное оперативное управление
PCU	F5	Представление данных от газоанализатора через последовательный интерфейс RS 485 на АРМ оператора
ПАЗ	F6	Противоаварийная защита по дублированному аналоговому параметру (сигналу)

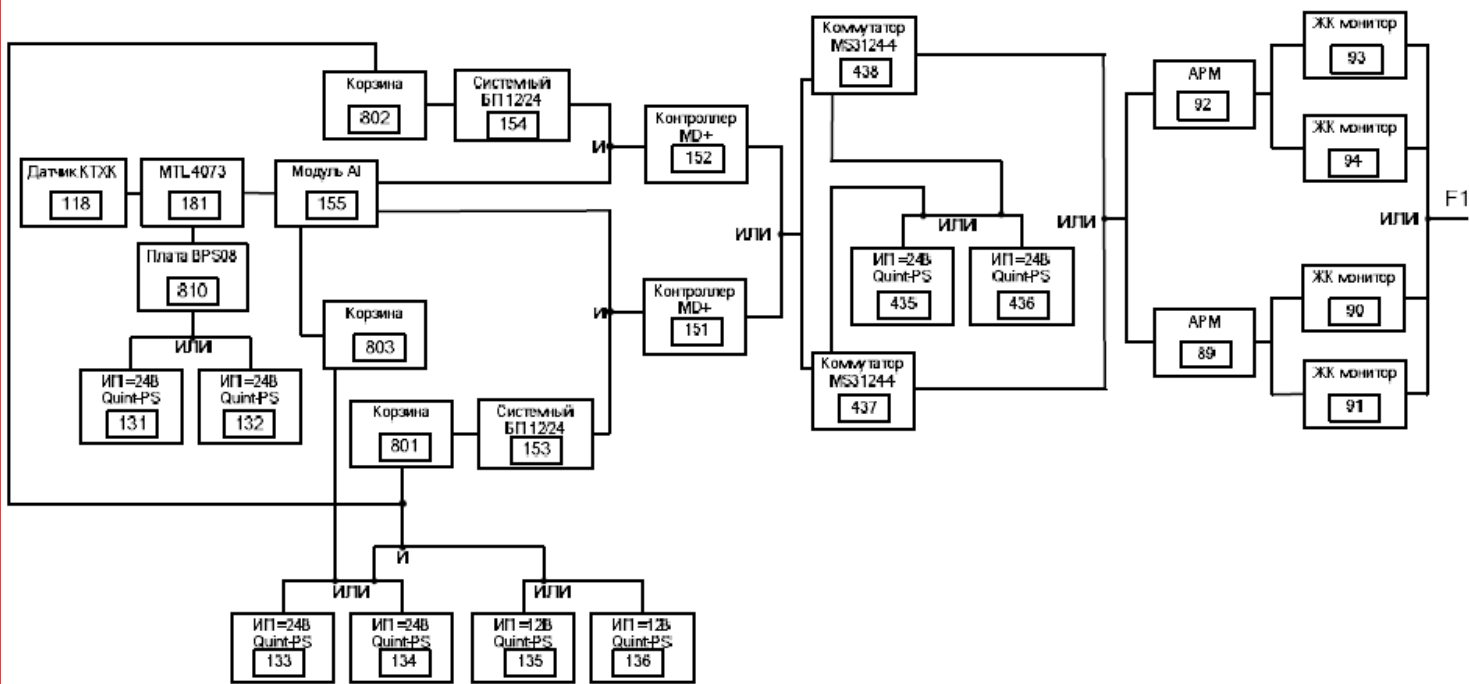


Рисунок 3 – Схема реализации функции F-1

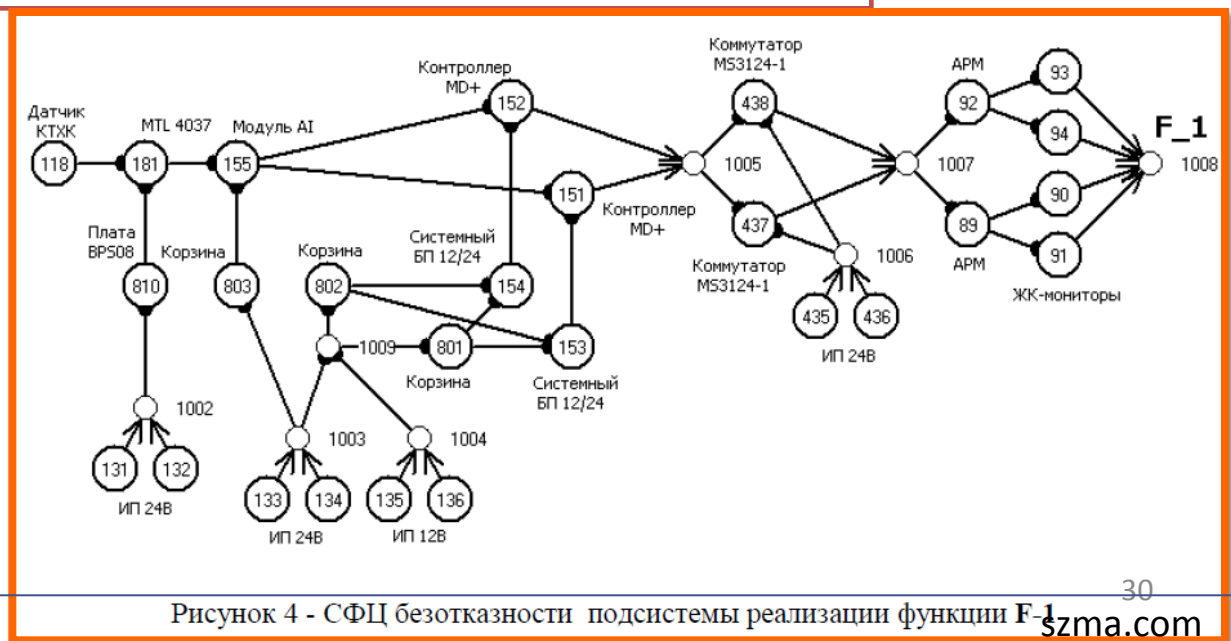


Рисунок 4 - СФЦ безотказности подсистемы реализации функции F-1



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