

**МОДЕЛИ И МЕТОДЫ
ПРОЕКТНОГО
АНАЛИЗА
НАДЕЖНОСТИ
ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Особенности высоконадежных технических систем сложной структуры

- разнообразные способы резервирования и восстановления
- многоуровневое функционирование
- алгоритмические методы обработки неисправностей
- встроенный контроль
- отказы на системном уровне различаются по критичности

ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ

- Коэффициент готовности
- Коэффициент простоя
- Вероятность безотказной работы
- Вероятность отказа
- Стационарный коэффициент готовности
- Стационарный коэффициент простоя
- Средняя наработка до отказа
- Средняя наработка между отказами
- Среднее время восстановления
- Параметр потока отказов
- Стационарный параметр потока отказов
- Интенсивность отказов
- Коэффициент оперативной готовности
- Стационарный коэффициент оперативной готовности
- MTBF

- Распределение готовности по классам состояний
- Параметр потока переходов в класс состояний
- Среднее значение эффективности в момент времени
- Коэффициент сохранения эффективности в момент времени
- Стационарное распределение готовности по классам состояний
- Стационарный параметр потока переходов в класс состояний
- Стационарное среднее время пребывания в классе состояний
- Стационарная средняя эффективность
- Стационарный коэффициент сохранения эффективности

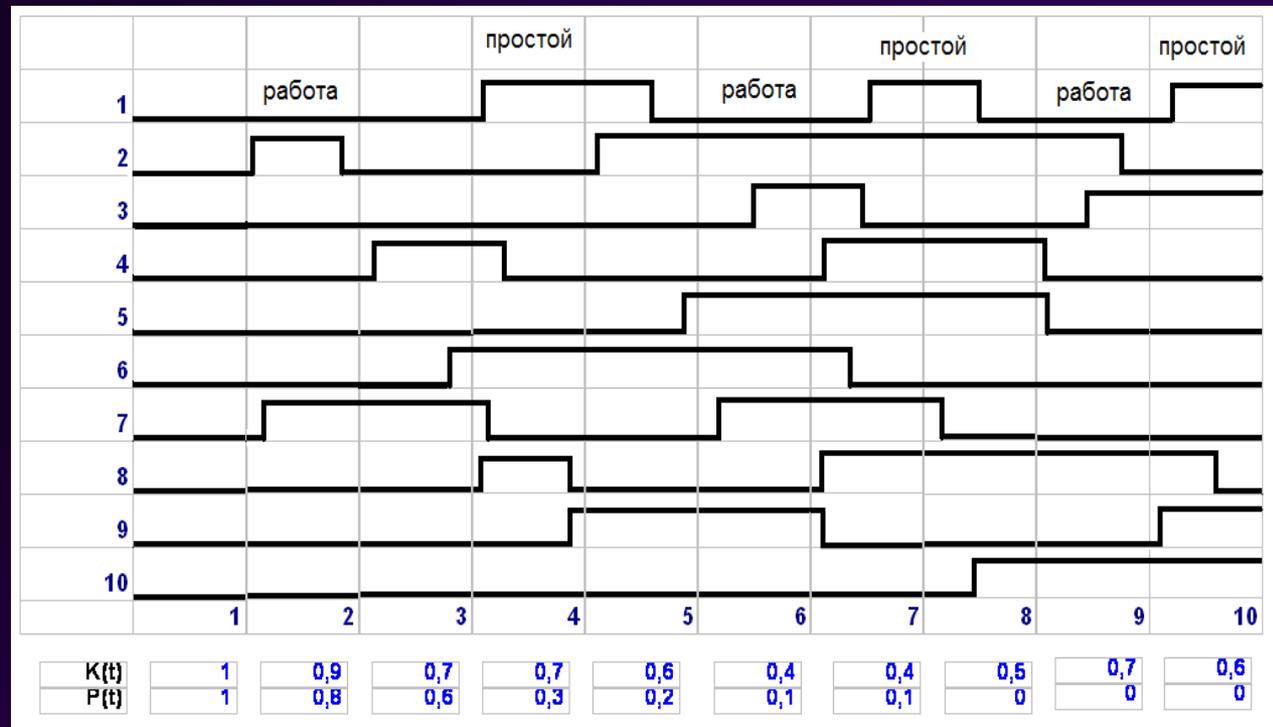
**Показатели
безотказности**

$$P(t) = P(0, t) = \text{Prob}(\xi_1 \geq t) = 1 - F_1(t)$$

$$\lambda(t) = \frac{1}{1 - F(t)} \frac{d}{dt} F(t) = \frac{f(t)}{P(t)}$$

$$T_1 = M[\xi_1] = \int_0^{\infty} \tau f(\tau) dx = \int_0^{\infty} \tau dQ(\tau) = \int_0^{\infty} P(\tau) d\tau$$

Показатели ГОТОВНОСТИ



- коэффициент готовности $K(t)$
- стационарный коэффициент готовности K
- коэффициент оперативной готовности $A_{op}(t, t_0)$

$$K^*(t) = \frac{N_t}{N_0} \neq P^*(t) = \frac{N(t)}{N_0}$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} K(t) = T / (T + \tau_e)$$

$$K \cdot P\{\tau \geq t_0\}$$

Основные направления АН

Подготовка исходных данных

Прогнозирование безотказности,
ремонтпригодности

Анализ видов и последствий отказов

Автоматизация анализа надежности

Современная тенденция – создание
интегрированных программных
продуктов

Разработка моделей и методов анализа надежности

Статические (основные формулы теории вероятностей
событий и комбинаторики, ЛВМ)

Динамические (случайные процессы, интегральные
соотношения, статистическое моделирование)

Акулова Л.Г., Бусленко Н.П., Вишневский В.М., Волик Б.Г., Гнеденко Б.В., Дружинин Г.В.,
Калашников В.В., Лубков Н.В., Можаяев А.С., Петрухин Б.П., Половко А.М., Рыков В.В.,
Рябинин И.А., Соловьев А.Д., Степанянц А.С., Ушаков И.А., Филин Б.П., Черкесов Г.Н.,
Шубинский И.Б., R. Barlow, J. Dugan, H. Kumamoto, K. Trivedi, F. Proschan.

Отечественное ПО АН

| <i>Название программы</i> | <i>Разработчики</i> |
|---|--|
| (АРБИТР) ПК АСМ СЗМА – программный комплекс автоматизированного структурно-логического моделирования и расчета надежности и безопасности систем | Специализированная Инжиниринговая Компания СЕВЗАПМОНТАЖАВТОМАТИКА (ОАО СПИК СЗМА) |
| Автоматизированная система расчета надежности (АСРН) | ОАО "РНИИ "ЭЛЕКТРОНСТАНДАРТ" |
| АСОНИКА-К | МИЭМ |
| УНИВЕРСАЛ | Российский научно-исследовательский институт управления на железнодорожном транспорте (ВНИИУП МПС) |

Зарубежное ПО АН

| <i>Название программы</i> | <i>Разработчики</i> |
|-----------------------------|--|
| Isograph | Isograph Inc (США), Isograph Ltd (Англия) |
| MADe | PHM Technology (Австралия) |
| RAM Commander | Advanced Logistics Developments Ltd (A.L.D.) (Израиль) |
| Windchill Quality Solutions | PTC (США) |
| RiskSpectrum | RELCON AB (Швеция) |

Этапы АН

Объект Анализа

Комплексы, Системы,
Подсистемы, Функции:
авиационные, космические,
корабельные, в нефтехимии,
энергетике



Человек -
Исследователь

Частично
формально



Почти все
неформально и
эвристически

Формальная модель
(блок-схемы, алгебра
событий, алгебра
логики, деревья графы



Все формально

Методы: логико-
вероятностные,
марковские,
асимптотические,
статистическое
моделирование



Значение Показателей
Надежности

Все формально

Расчет надежности последовательно-параллельных структур и структур с перемычками



$$P_A = p_1 p_2 p_3$$



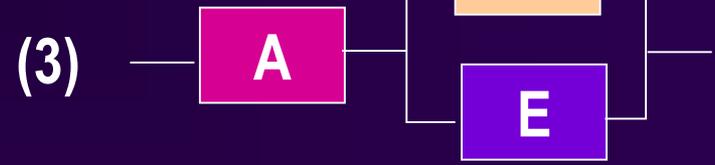
$$P_D = p_A p_B$$

$$P_E = p_7 p_C$$

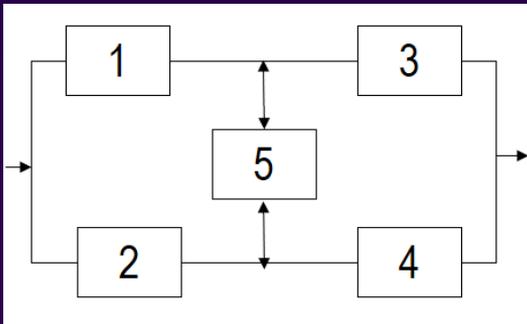


$$P_B = p_5 + p_6 - p_5 p_6$$

$$P_C = p_8 + p_9 - p_8 p_9$$

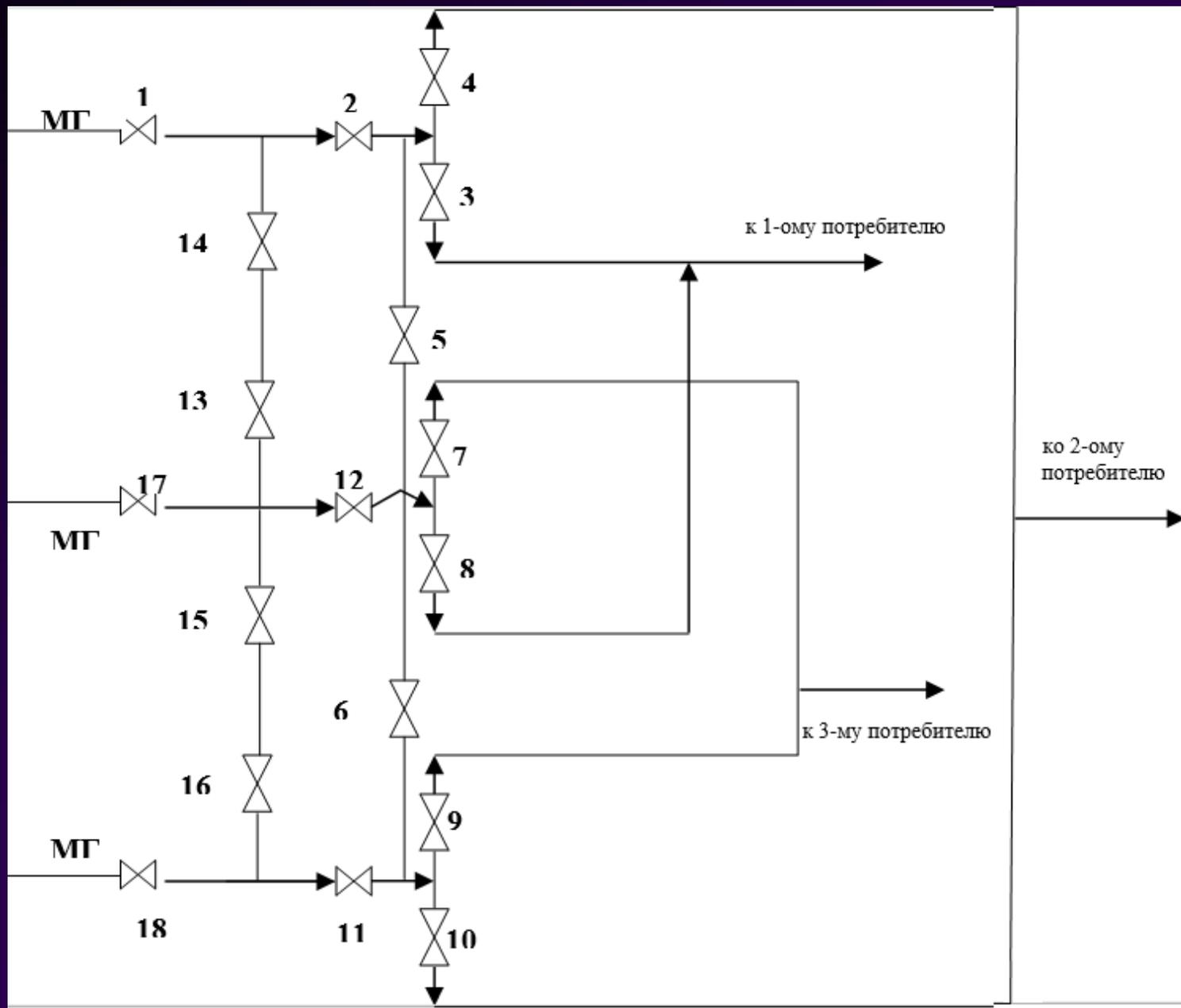


$$P_{\text{системы}} = p_A (p_D + p_E - p_D p_E)$$



$$\begin{aligned} \text{ВБР} &= p_5 [(p_1 + p_2 - p_1 p_2)(p_3 + p_4 - p_3 p_4)] \\ &+ (1 - p_5) [p_1 p_3 + p_2 p_4 - p_1 p_2 p_3 p_4] \end{aligned}$$

Система распределения газа трем потребителям



Логико-вероятностные методы

- конструирование логической функции работоспособности (отказа) системы

$$S(\mathbf{x}) = \begin{cases} 1, & \text{когда система работоспособна} \\ 0, & \text{когда система отказала.} \end{cases}$$

$$x_i = \begin{cases} 1, & \text{когда элемент } i \text{ работоспособен} \\ 0, & \text{когда элемент } i \text{ отказал} \end{cases}$$

$$s(x) = x_1 + x_2$$

- преобразование логической функции к форме перехода к замещению

$$s(x) = x_1 + \overline{x_1}x_2$$

- получение расчетной вероятностной формулы

$$p = p_1 + q_1p_2$$

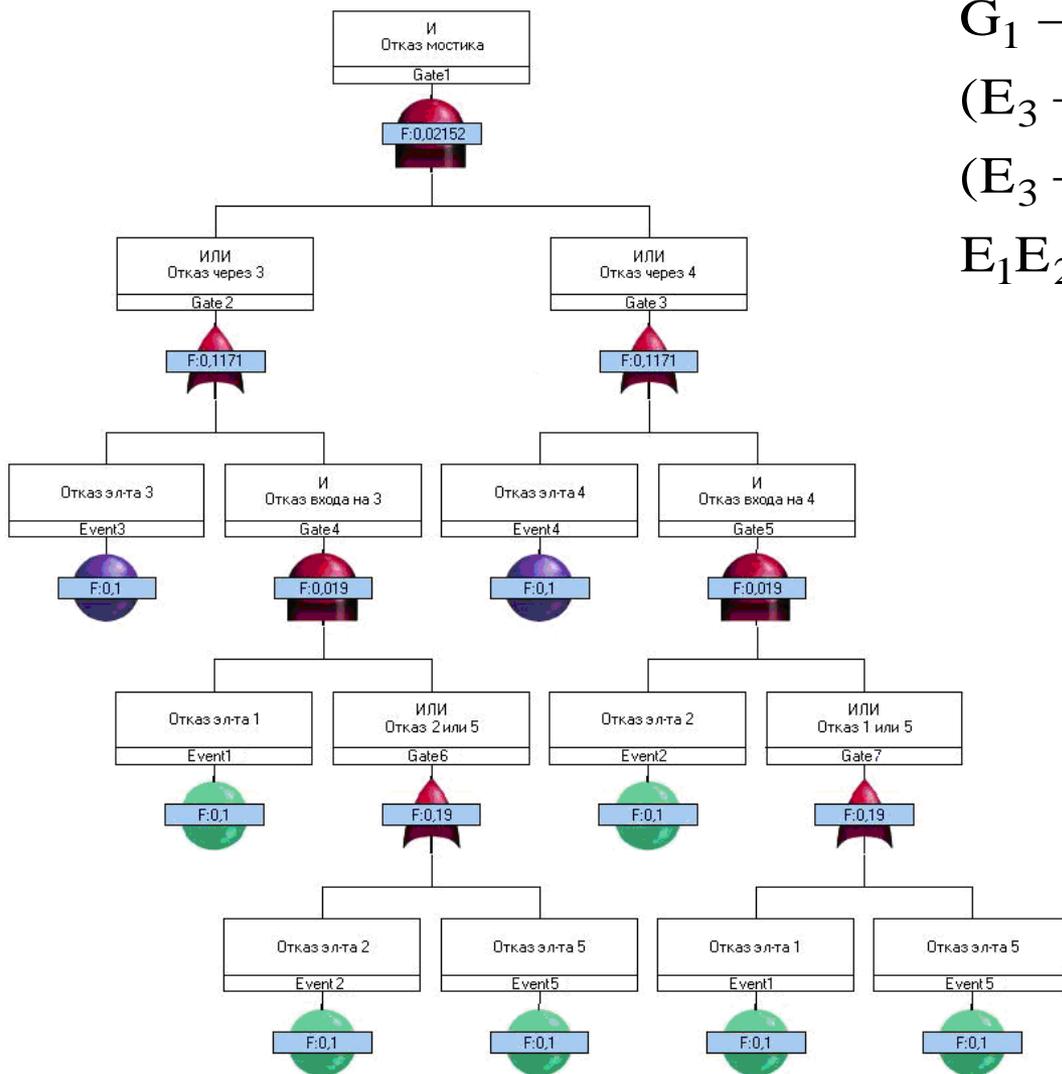
Деревья Отказов

События и Вершины Дерева

| | |
|---|---|
|  | логическое И |
|  | логическое ИЛИ |
|  | логическое И-НЕ |
|  | логическое ИЛИ-НЕ |
|  | логическое НЕ |
|  | m/n голосование (мажоритарный выбор) |
|  | логическое И с запрещающим входом (ингибиторное И) |
|  | исключающее ИЛИ |
|  | приоритетное И (динамический оператор) |
|  | зависимость между событиями и временной порядок (динамический оператор) |
|  | состояние резерва, в частности, нагруженности (динамический оператор) |
|  | последовательность возникновения событий (динамический оператор) |
|  | разбиения дерева на поддеревья, располагаемые на разных листах (вспомогательный оператор) |
|  | ввод комментариев (вспомогательный оператор) |
|  | улучшение топологии дерева (вспомогательный оператор) |

| | |
|---|--|
|  | БАЗОВОЕ |
|  | НЕРАЗВИВАЕМОЕ, аналогично базовому, за исключением того, что его можно было бы представить совокупностью других событий, однако это не существенно для анализа |
|  | ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЬ - принимает значения ИСТИНА или ЛОЖЬ, что включает или исключает из рассмотрения входящие в него ветви дерева |
|  | ПОВТОРЯЮЩЕЕСЯ - позволяет задавать общие элементы в разных ветвях дерева |
|  | РЕЗЕРВ - специальное событие для расчета резервированных систем |

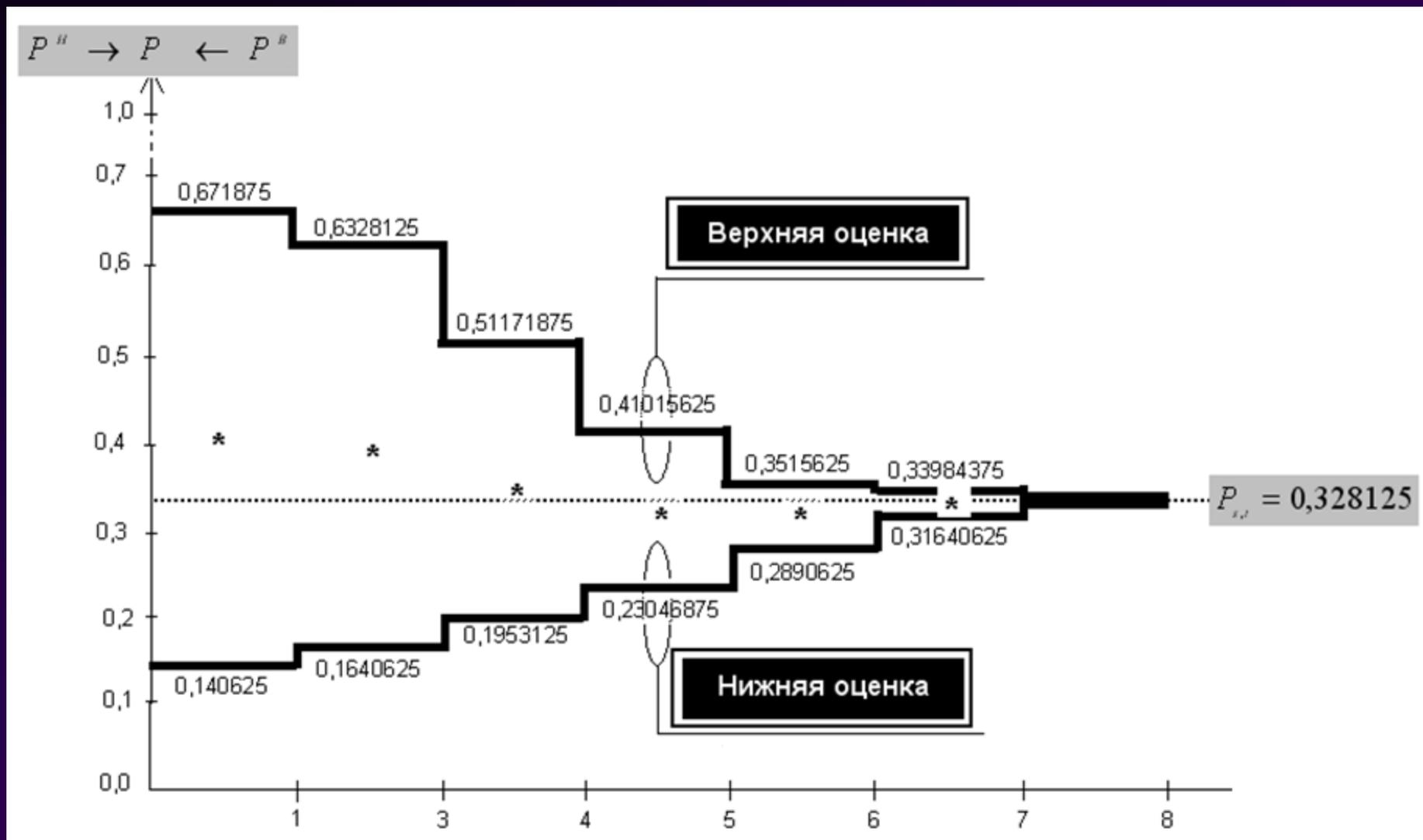
Качественный (MOCUS и MICSU) и количественный анализ FT



$$\begin{aligned}
 G_1 &\rightarrow G_2 G_3 \rightarrow (E_3 + G_4)(E_4 + G_5) \rightarrow \\
 &(E_3 + E_1 G_6)(E_4 + E_2 G_7) \rightarrow \\
 &(E_3 + E_1(E_2 + E_5))(E_4 + E_2(E_1 + E_5)) = \\
 &E_1 E_2 + E_3 E_4 + E_1 E_4 E_5 + E_2 E_3 E_5
 \end{aligned}$$

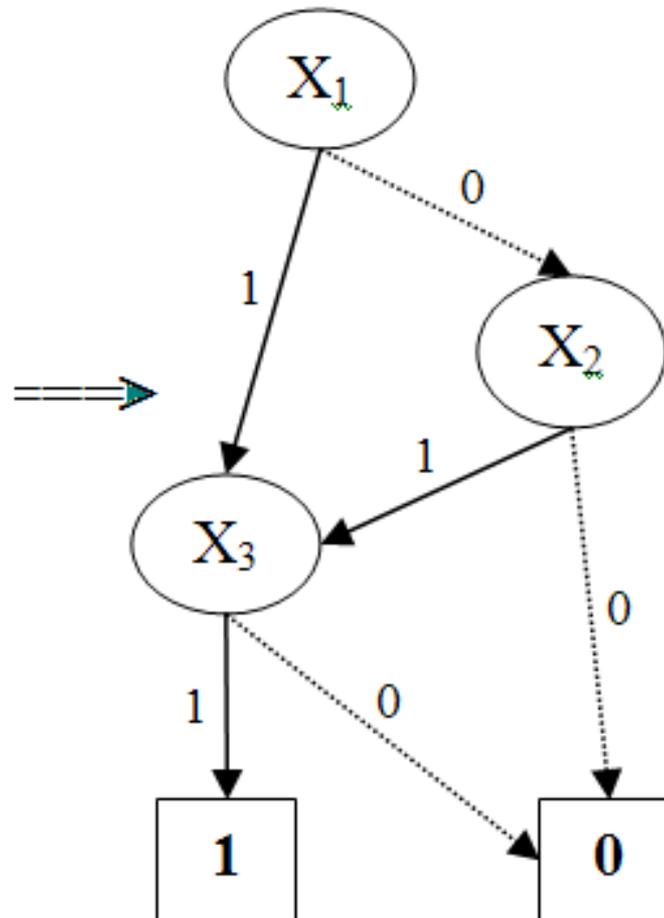
$$\begin{aligned}
 Q(t) &= \sum_{i=1}^n P_r\{C_{i_1}\} - \sum_{i_1=1}^{n-1} \sum_{i_2>i_1}^n P_r\{\bigcap_{j=1}^2 C_{i_j}\} + \\
 &(-1)^2 \sum_{i_1=1}^{n-2} \sum_{i_2>i_1}^{n-1} \sum_{i_3>i_2}^n P_r\{\bigcap_{j=1}^3 C_{i_j}\} + \dots \\
 &+ (-1)^{n-2} \sum_{1 \leq i_1 < i_2 < i_3 < \dots < i_{n-1} \leq n} P_r\{\bigcap_{j=1}^{n-1} C_{i_j}\} + \\
 &(-1)^{n-1} P_r\{\bigcap_{i=1}^n C_i\}
 \end{aligned}$$

Аддитивное накопление результата по путям



Диаграммы двоичных решений

| x_1 | x_2 | x_3 | f |
|-------|-------|-------|-----|
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 0 |
| 1 | 1 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 1 | 1 |
| 0 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 |



Алгоритм преобразования FT \rightarrow BDD

- Упорядочить базовые события дерева: $x_1 < x_2 < \dots < x_n$
- Каждому i -му базовому событию поставить в соответствие тройку $(x_i, 1, 0)$
- Каждой вершине дерева отказов соотнести оператор $F_i(x_j, f_{i1}, f_{i0})$, определяемый по правилам:

$$F_i * F_j = \begin{cases} \text{if } (x < y) \Rightarrow (x, f_{i1} * F_j, f_{i0} * F_j) & \text{где } F_i = (x, f_{i1}, f_{i0}); \quad F_j = (y, f_{j1}, f_{j0}) \\ \text{if } (x = y) \Rightarrow (x, f_{i1} * f_{j1}, f_{i0} * f_{j0}) & \text{если } \begin{cases} * = \text{AND, то } 1 * F_j = F_j; 0 * F_j = 0 \\ * = \text{OR, то } 1 * F_i = 1; 0 * F_i = F_j \end{cases} \end{cases}$$

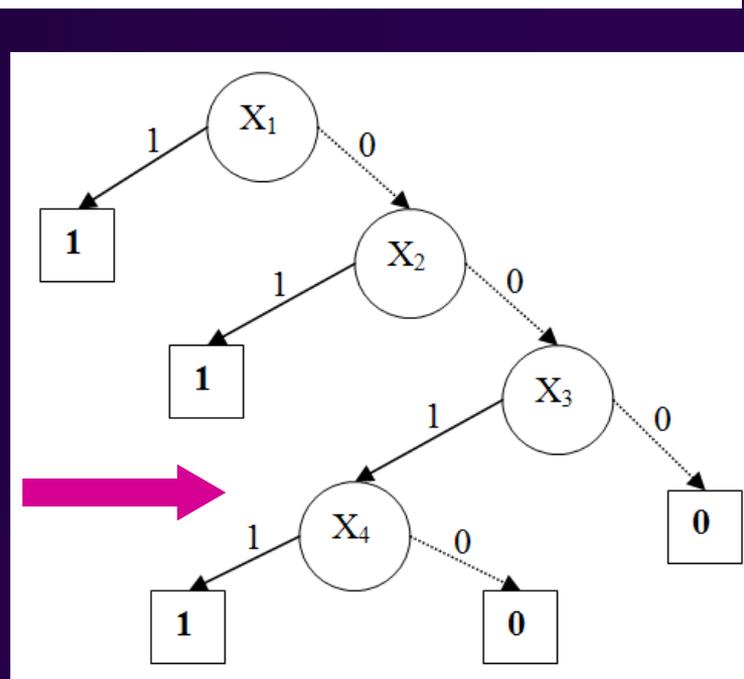
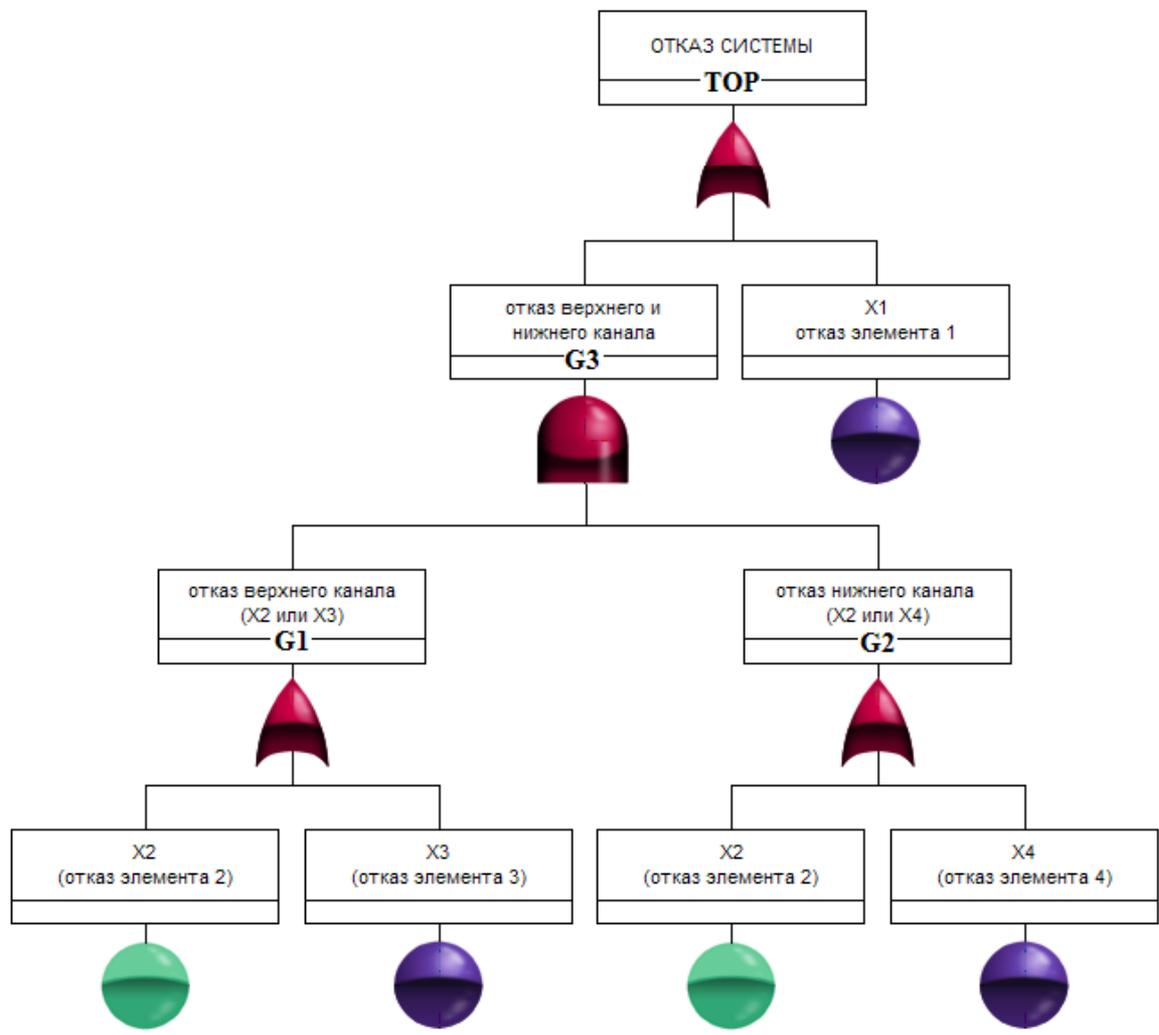
$$\text{TOP} = G_1 \left(\underbrace{x_1}_{\text{корень}}, \underbrace{(x_k, g_{j1}, g_{i0})}_{\text{ветвь при } x_1 = 1}, \underbrace{(y_k, h_{j1}, h_{i0})}_{\text{ветвь при } x_1 = 0} \right)$$

- Последовательно раскрывая “единичные” и “нулевые” составляющие, сформировать двоичное дерево
- Вычислить вероятность реализации вершинного события исходного дерева отказов как сумму вероятностей путей, ведущих от корня двоичного дерева до терминальной вершины “1”

$$G_1 = x_2 + x_4 = (x_2, 1, 0) + (x_4, 1, 0) = (x_2, 1, (x_4, 1, 0)) \quad G_2 = x_2 + x_3 = (x_2, 1, 0) + (x_3, 1, 0) = (x_2, 1, (x_3, 1, 0))$$

$$G_3 = G_1 \cdot G_2 = (x_2, 1, (x_4, 1, 0)) \cdot (x_2, 1, (x_3, 1, 0)) = (x_2, 1, (x_3, 1, 0) \cdot (x_4, 1, 0)) = (x_2, 1, (x_3, (x_4, 1, 0), 0))$$

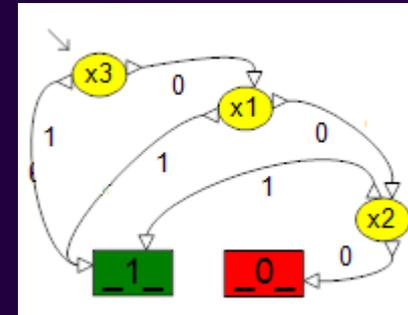
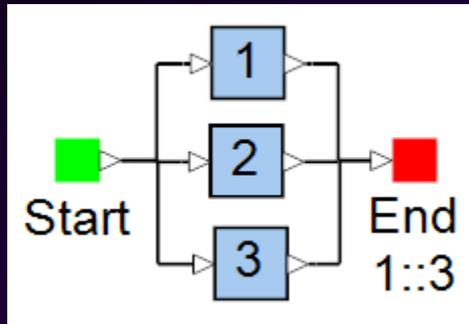
$$TOP = x_1 + G_3 = (x_1, 1, 0) + (x_2, 1, (x_3, (x_4, 1, 0), 0)) = (\underbrace{x_1}_{\text{корень}}, \underbrace{1}_1, \underbrace{(x_2, \underbrace{1}_1, \underbrace{(x_3, (x_4, 1, 0), 0)}_0)}_0))$$



$$Y(x_1, \dots, x_4) = \bar{x}_1 + x_1 \bar{x}_2 + x_1 x_2 \bar{x}_3 \bar{x}_4$$

$$Q = q_1 + p_1 q_2 + p_1 p_2 q_3 q_4$$

“Интеллект”



View Calculation Results

- RBD Results
 - General
 - Costs
 - Spares
 - Optimizations
 - Equation**

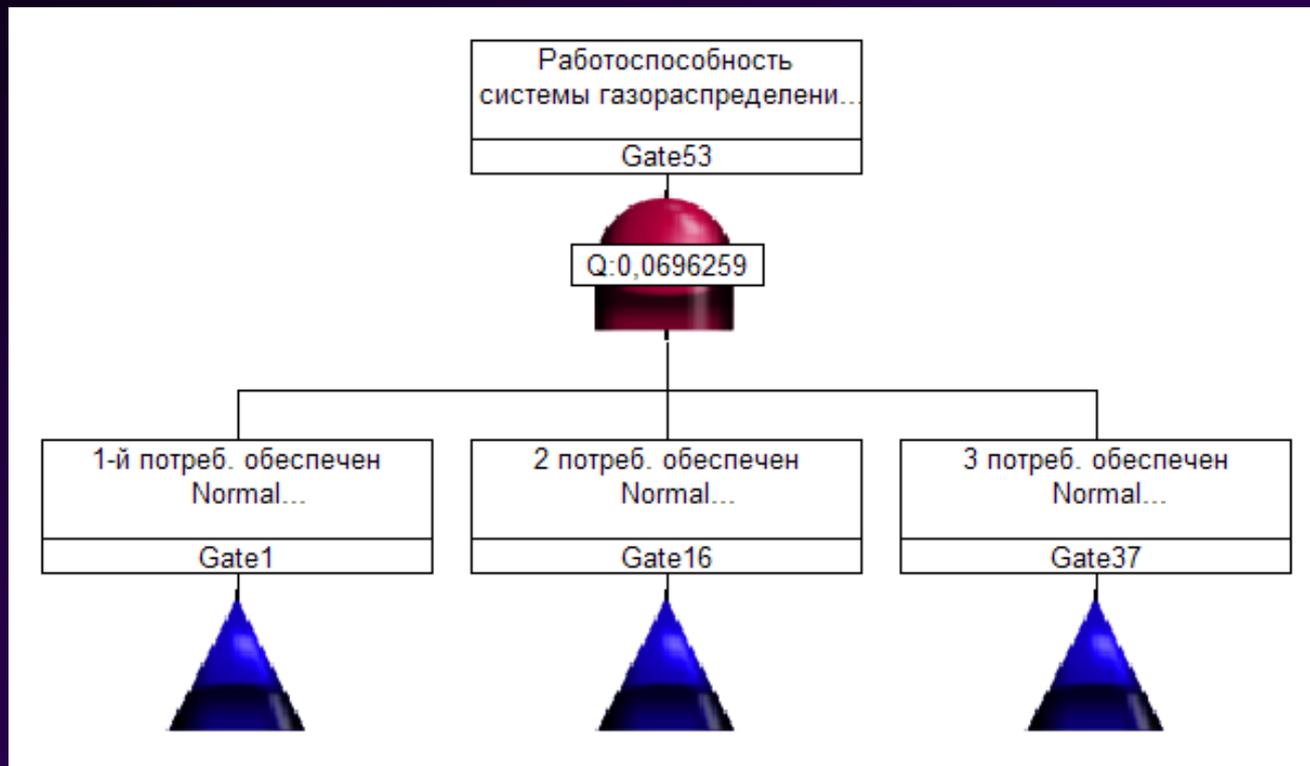
Calculated Reliability Equation

$$R_{Block\ Diagram11} = R_{x3} + F_{x3} \cdot R_{x1} + F_{x3} \cdot F_{x1} \cdot R_{x2}$$

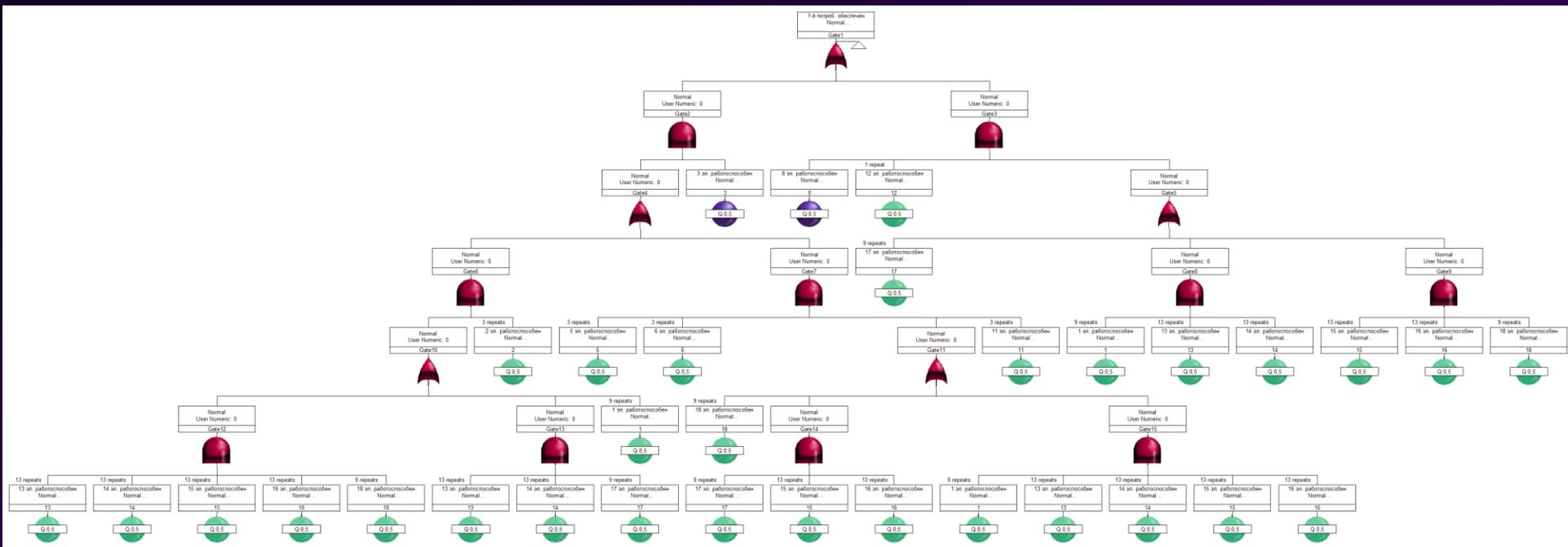
Save As... Print

Close Справка

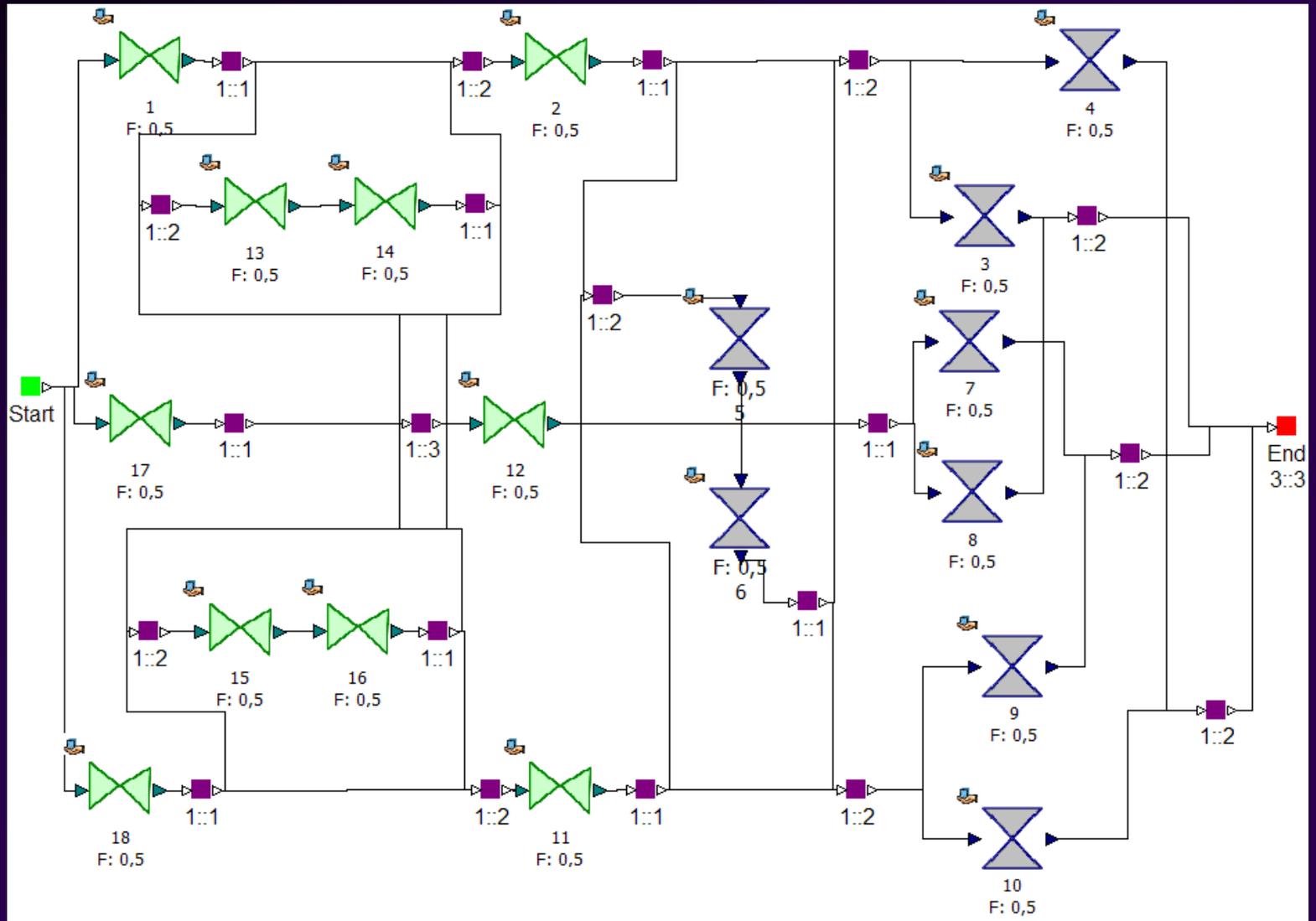
FT СРГ



FT 1 –го ПОТРЕБИТЕЛЯ



RBD CPF



МНОЖЕСТВО МП СРГ

Path Sets

| | Availability | | | | | | | | | | | | | |
|----|--------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|--|--|--|--|
| 1 | 0,993021 | 1 | 17 | 2 | 12 | 8 | 7 | 4 | | | | | | |
| 2 | 0,993021 | 1 | 18 | 2 | 11 | 3 | 9 | 10 | | | | | | |
| 3 | 0,993021 | 18 | 6 | 11 | 3 | 9 | 4 | 5 | | | | | | |
| 4 | 0,993021 | 1 | 2 | 6 | 3 | 9 | 10 | 5 | | | | | | |
| 5 | 0,993021 | 1 | 17 | 2 | 12 | 3 | 7 | 4 | | | | | | |
| 6 | 0,993021 | 18 | 6 | 11 | 3 | 9 | 10 | 5 | | | | | | |
| 7 | 0,993021 | 17 | 18 | 11 | 12 | 8 | 9 | 10 | | | | | | |
| 8 | 0,993021 | 17 | 18 | 11 | 12 | 8 | 7 | 10 | | | | | | |
| 9 | 0,993021 | 1 | 18 | 2 | 11 | 3 | 9 | 4 | | | | | | |
| 10 | 0,993021 | 1 | 2 | 6 | 3 | 9 | 4 | 5 | | | | | | |
| 11 | 0,992028 | 1 | 2 | 12 | 8 | 7 | 4 | 14 | 13 | | | | | |
| 12 | 0,992028 | 18 | 16 | 11 | 12 | 8 | 7 | 10 | 15 | | | | | |
| 13 | 0,992028 | 18 | 16 | 11 | 12 | 8 | 9 | 10 | 15 | | | | | |
| 14 | 0,992028 | 1 | 2 | 12 | 3 | 7 | 4 | 14 | 13 | | | | | |
| 15 | 0,992028 | 17 | 2 | 12 | 3 | 7 | 4 | 14 | 13 | | | | | |
| 16 | 0,992028 | 17 | 16 | 11 | 12 | 8 | 9 | 10 | 15 | | | | | |
| 17 | 0,992028 | 17 | 16 | 11 | 12 | 8 | 7 | 10 | 15 | | | | | |
| 18 | 0,992028 | 17 | 2 | 12 | 8 | 7 | 4 | 14 | 13 | | | | | |
| 19 | 0,991036 | 1 | 18 | 11 | 12 | 8 | 9 | 10 | 14 | 13 | | | | |
| 20 | 0,991036 | 17 | 18 | 6 | 11 | 12 | 8 | 9 | 4 | 5 | | | | |
| 21 | 0,991036 | 1 | 17 | 18 | 2 | 11 | 12 | 8 | 9 | 4 | | | | |
| 22 | 0,991036 | 17 | 18 | 2 | 11 | 3 | 9 | 10 | 14 | 13 | | | | |
| 23 | 0,991036 | 1 | 18 | 16 | 2 | 12 | 8 | 7 | 4 | 15 | | | | |
| 24 | 0,991036 | 1 | 17 | 2 | 6 | 12 | 8 | 7 | 10 | 5 | | | | |
| 25 | 0,991036 | 17 | 18 | 2 | 11 | 3 | 9 | 4 | 14 | 13 | | | | |
| 26 | 0,991036 | 17 | 18 | 6 | 11 | 12 | 8 | 7 | 4 | 5 | | | | |
| 27 | 0,991036 | 17 | 18 | 6 | 11 | 12 | 3 | 7 | 4 | 5 | | | | |
| 28 | 0,991036 | 1 | 17 | 2 | 6 | 12 | 3 | 7 | 10 | 5 | | | | |
| 29 | 0,991036 | 1 | 17 | 18 | 2 | 11 | 12 | 3 | 7 | 10 | | | | |
| 30 | 0,991036 | 17 | 18 | 6 | 11 | 12 | 3 | 7 | 10 | 5 | | | | |
| 31 | 0,991036 | 1 | 18 | 16 | 2 | 12 | 3 | 7 | 4 | 15 | | | | |
| 32 | 0,991036 | 17 | 16 | 6 | 11 | 3 | 9 | 10 | 15 | 5 | | | | |
| 33 | 0,991036 | 17 | 2 | 6 | 3 | 9 | 10 | 14 | 13 | 5 | | | | |
| 34 | 0,991036 | 1 | 18 | 11 | 12 | 8 | 7 | 10 | 14 | 13 | | | | |
| 35 | 0,991036 | 17 | 2 | 6 | 3 | 9 | 4 | 14 | 13 | 5 | | | | |
| 36 | 0,991036 | 1 | 17 | 2 | 6 | 12 | 8 | 9 | 10 | 5 | | | | |
| 37 | 0,991036 | 1 | 17 | 2 | 6 | 12 | 8 | 9 | 4 | 5 | | | | |
| 38 | 0,991036 | 17 | 16 | 6 | 11 | 3 | 9 | 4 | 15 | 5 | | | | |
| 39 | 0,991036 | 1 | 17 | 16 | 2 | 11 | 3 | 9 | 10 | 15 | | | | |
| 40 | 0,991036 | 1 | 17 | 16 | 2 | 11 | 3 | 9 | 4 | 15 | | | | |

МНОЖЕСТВО МП СРГ

Path Sets

| | Availability | | | | | | | | | | | | | |
|----|--------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|--|--|
| 41 | 0,990045 | 1 | 18 | 16 | 2 | 11 | 12 | 3 | 7 | 10 | 15 | | | |
| 42 | 0,990045 | 17 | 2 | 6 | 12 | 8 | 9 | 10 | 14 | 13 | 5 | | | |
| 43 | 0,990045 | 18 | 16 | 6 | 11 | 12 | 8 | 7 | 4 | 15 | 5 | | | |
| 44 | 0,990045 | 18 | 16 | 2 | 12 | 8 | 7 | 4 | 14 | 13 | 15 | | | |
| 45 | 0,990045 | 18 | 16 | 6 | 11 | 12 | 3 | 7 | 10 | 15 | 5 | | | |
| 46 | 0,990045 | 18 | 16 | 6 | 11 | 12 | 3 | 7 | 4 | 15 | 5 | | | |
| 47 | 0,990045 | 17 | 16 | 2 | 11 | 3 | 9 | 4 | 14 | 13 | 15 | | | |
| 48 | 0,990045 | 17 | 16 | 2 | 11 | 3 | 9 | 10 | 14 | 13 | 15 | | | |
| 49 | 0,990045 | 18 | 16 | 2 | 12 | 3 | 7 | 4 | 14 | 13 | 15 | | | |
| 50 | 0,990045 | 17 | 18 | 2 | 11 | 12 | 3 | 7 | 10 | 14 | 13 | | | |
| 51 | 0,990045 | 1 | 2 | 6 | 12 | 8 | 7 | 10 | 14 | 13 | 5 | | | |
| 52 | 0,990045 | 1 | 16 | 11 | 12 | 8 | 7 | 10 | 14 | 13 | 15 | | | |
| 53 | 0,990045 | 18 | 16 | 6 | 11 | 12 | 8 | 9 | 4 | 15 | 5 | | | |
| 54 | 0,990045 | 1 | 18 | 16 | 2 | 11 | 12 | 8 | 9 | 4 | 15 | | | |
| 55 | 0,990045 | 1 | 2 | 6 | 12 | 8 | 9 | 10 | 14 | 13 | 5 | | | |
| 56 | 0,990045 | 1 | 2 | 6 | 12 | 3 | 7 | 10 | 14 | 13 | 5 | | | |
| 57 | 0,990045 | 1 | 2 | 6 | 12 | 8 | 9 | 4 | 14 | 13 | 5 | | | |
| 58 | 0,990045 | 17 | 18 | 2 | 11 | 12 | 8 | 9 | 4 | 14 | 13 | | | |
| 59 | 0,990045 | 17 | 2 | 6 | 12 | 8 | 9 | 4 | 14 | 13 | 5 | | | |
| 60 | 0,990045 | 17 | 16 | 6 | 11 | 12 | 3 | 7 | 4 | 15 | 5 | | | |
| 61 | 0,990045 | 1 | 18 | 2 | 11 | 12 | 3 | 7 | 10 | 14 | 13 | | | |
| 62 | 0,990045 | 17 | 2 | 6 | 12 | 8 | 7 | 10 | 14 | 13 | 5 | | | |
| 63 | 0,990045 | 17 | 16 | 6 | 11 | 12 | 8 | 7 | 4 | 15 | 5 | | | |
| 64 | 0,990045 | 1 | 16 | 2 | 11 | 3 | 9 | 4 | 14 | 13 | 15 | | | |
| 65 | 0,990045 | 1 | 16 | 11 | 12 | 8 | 9 | 10 | 14 | 13 | 15 | | | |
| 66 | 0,990045 | 18 | 16 | 2 | 11 | 3 | 9 | 10 | 14 | 13 | 15 | | | |
| 67 | 0,990045 | 18 | 16 | 2 | 11 | 3 | 9 | 4 | 14 | 13 | 15 | | | |
| 68 | 0,990045 | 17 | 16 | 6 | 11 | 12 | 3 | 7 | 10 | 15 | 5 | | | |
| 69 | 0,990045 | 1 | 18 | 2 | 11 | 12 | 8 | 9 | 4 | 14 | 13 | | | |
| 70 | 0,990045 | 1 | 16 | 2 | 11 | 3 | 9 | 10 | 14 | 13 | 15 | | | |
| 71 | 0,990045 | 17 | 2 | 6 | 12 | 3 | 7 | 10 | 14 | 13 | 5 | | | |
| 72 | 0,990045 | 17 | 16 | 6 | 11 | 12 | 8 | 9 | 4 | 15 | 5 | | | |
| 73 | 0,990045 | 1 | 17 | 16 | 2 | 11 | 12 | 8 | 9 | 4 | 15 | | | |
| 74 | 0,990045 | 1 | 17 | 16 | 2 | 11 | 12 | 3 | 7 | 10 | 15 | | | |
| 75 | 0,989055 | 1 | 18 | 16 | 2 | 6 | 12 | 8 | 7 | 10 | 15 | 5 | | |
| 76 | 0,989055 | 1 | 18 | 16 | 2 | 6 | 12 | 3 | 7 | 10 | 15 | 5 | | |
| 77 | 0,989055 | 1 | 18 | 6 | 11 | 12 | 8 | 7 | 4 | 14 | 13 | 5 | | |
| 78 | 0,989055 | 1 | 18 | 6 | 11 | 12 | 3 | 7 | 10 | 14 | 13 | 5 | | |
| 79 | 0,989055 | 1 | 18 | 6 | 11 | 12 | 3 | 7 | 4 | 14 | 13 | 5 | | |
| 80 | 0,989055 | 1 | 16 | 2 | 11 | 12 | 3 | 7 | 10 | 14 | 13 | 15 | | |

МНОЖЕСТВО МП СРГ

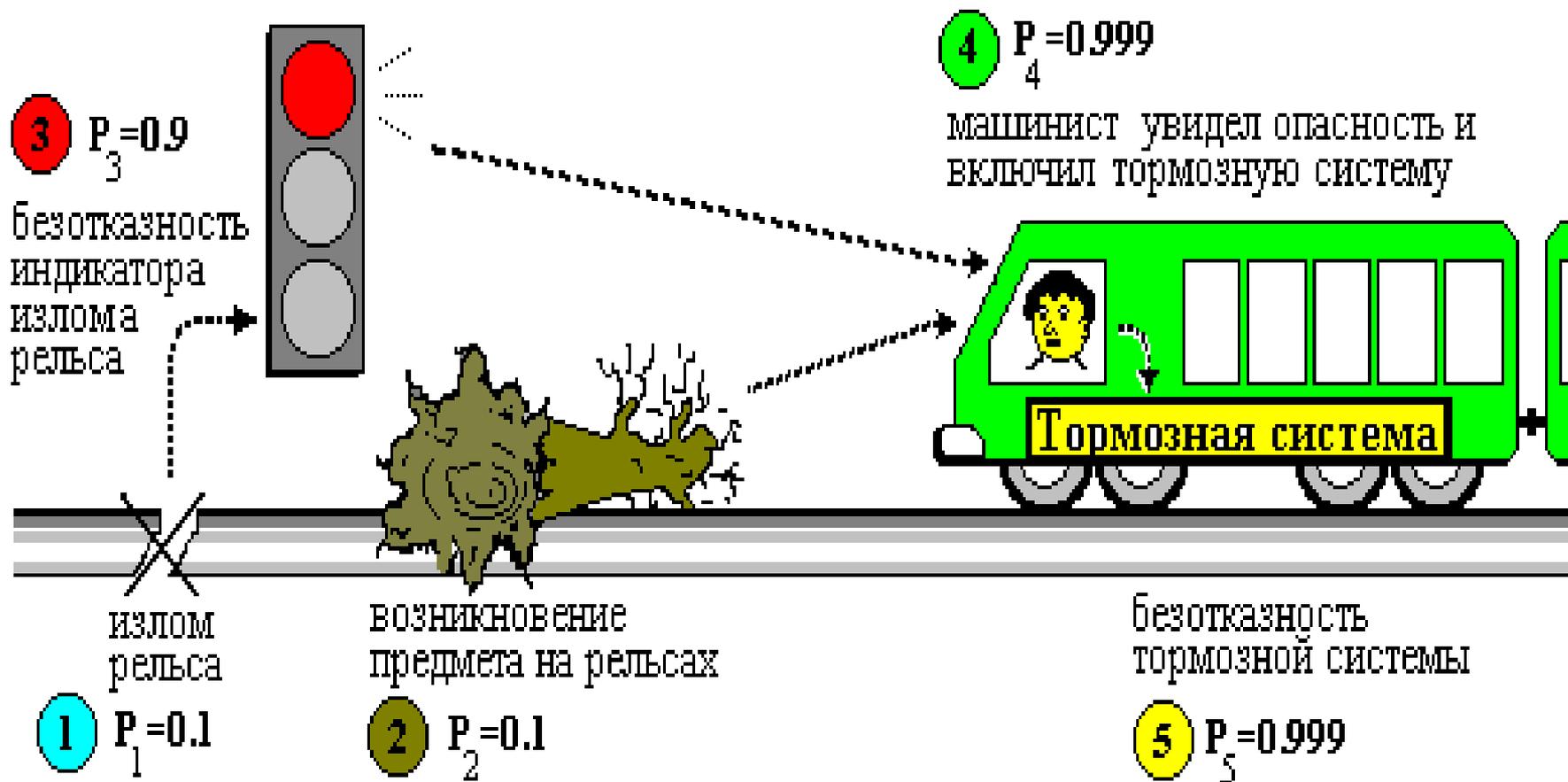
| | | | | | | | | | | | | | |
|-----|----------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---|
| 81 | 0,989055 | 1 | 16 | 2 | 11 | 12 | 8 | 9 | 4 | 14 | 13 | 15 | |
| 82 | 0,989055 | 1 | 16 | 6 | 11 | 3 | 9 | 10 | 14 | 13 | 15 | 5 | |
| 83 | 0,989055 | 1 | 16 | 6 | 11 | 3 | 9 | 4 | 14 | 13 | 15 | 5 | |
| 84 | 0,989055 | 18 | 16 | 2 | 11 | 12 | 8 | 9 | 4 | 14 | 13 | 15 | |
| 85 | 0,989055 | 18 | 16 | 2 | 11 | 12 | 3 | 7 | 10 | 14 | 13 | 15 | |
| 86 | 0,989055 | 17 | 16 | 2 | 11 | 12 | 8 | 9 | 4 | 14 | 13 | 15 | |
| 87 | 0,989055 | 1 | 18 | 16 | 2 | 6 | 12 | 8 | 9 | 10 | 15 | 5 | |
| 88 | 0,989055 | 1 | 18 | 6 | 11 | 12 | 8 | 9 | 4 | 14 | 13 | 5 | |
| 89 | 0,989055 | 18 | 16 | 2 | 6 | 3 | 9 | 4 | 14 | 13 | 15 | 5 | |
| 90 | 0,989055 | 18 | 16 | 2 | 6 | 3 | 9 | 10 | 14 | 13 | 15 | 5 | |
| 91 | 0,989055 | 1 | 18 | 16 | 2 | 6 | 12 | 8 | 9 | 4 | 15 | 5 | |
| 92 | 0,989055 | 17 | 16 | 2 | 11 | 12 | 3 | 7 | 10 | 14 | 13 | 15 | |
| 93 | 0,988066 | 18 | 16 | 2 | 6 | 12 | 3 | 7 | 10 | 14 | 13 | 15 | 5 |
| 94 | 0,988066 | 1 | 16 | 6 | 11 | 12 | 8 | 7 | 4 | 14 | 13 | 15 | 5 |
| 95 | 0,988066 | 1 | 16 | 6 | 11 | 12 | 3 | 7 | 10 | 14 | 13 | 15 | 5 |
| 96 | 0,988066 | 1 | 16 | 6 | 11 | 12 | 3 | 7 | 4 | 14 | 13 | 15 | 5 |
| 97 | 0,988066 | 18 | 16 | 2 | 6 | 12 | 8 | 7 | 10 | 14 | 13 | 15 | 5 |
| 98 | 0,988066 | 1 | 16 | 6 | 11 | 12 | 8 | 9 | 4 | 14 | 13 | 15 | 5 |
| 99 | 0,988066 | 18 | 16 | 2 | 6 | 12 | 8 | 9 | 10 | 14 | 13 | 15 | 5 |
| 100 | 0,988066 | 18 | 16 | 2 | 6 | 12 | 8 | 9 | 4 | 14 | 13 | 15 | 5 |

Close

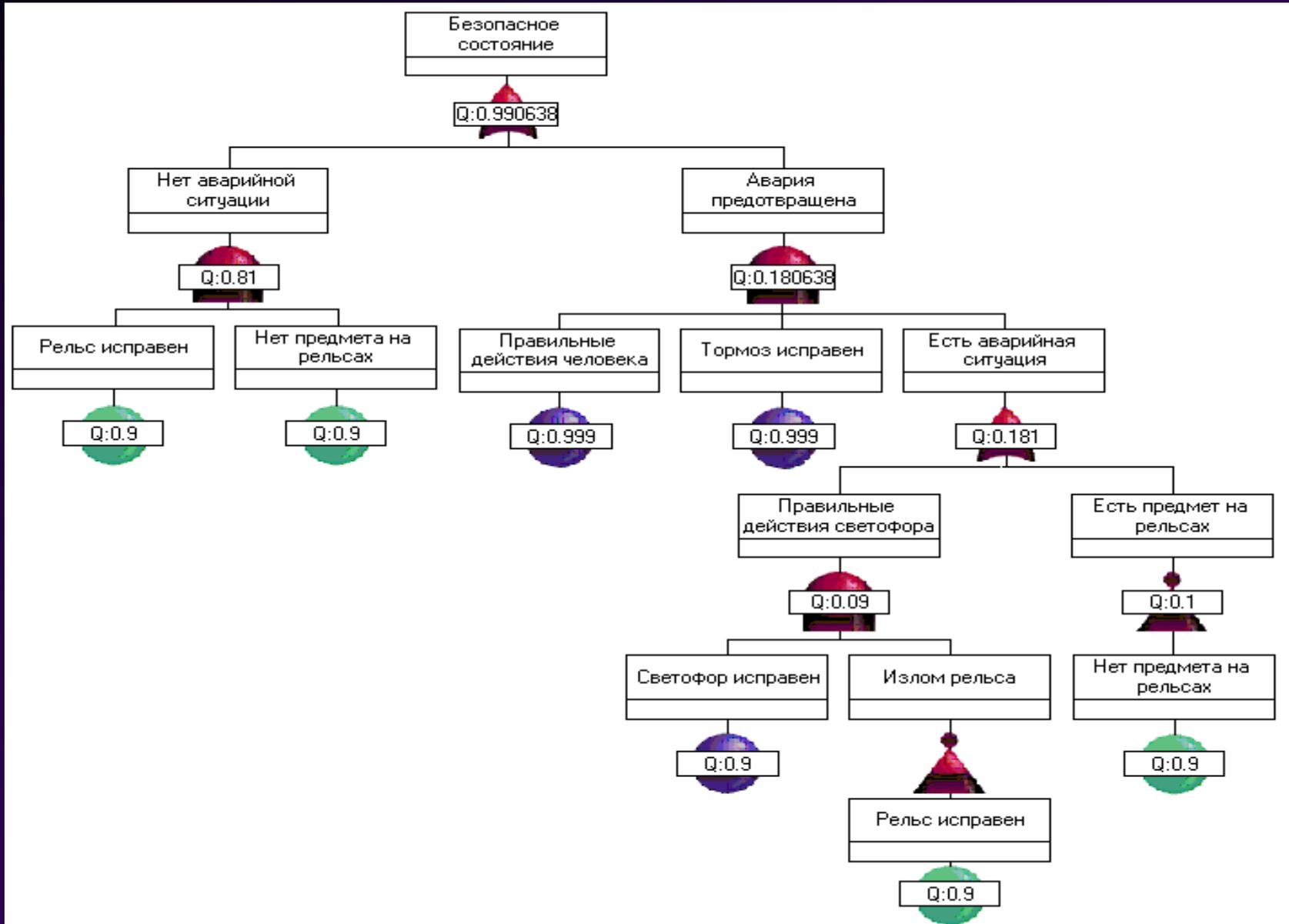
Help

Пример немонотонной ФАЛ А.С. Можяева

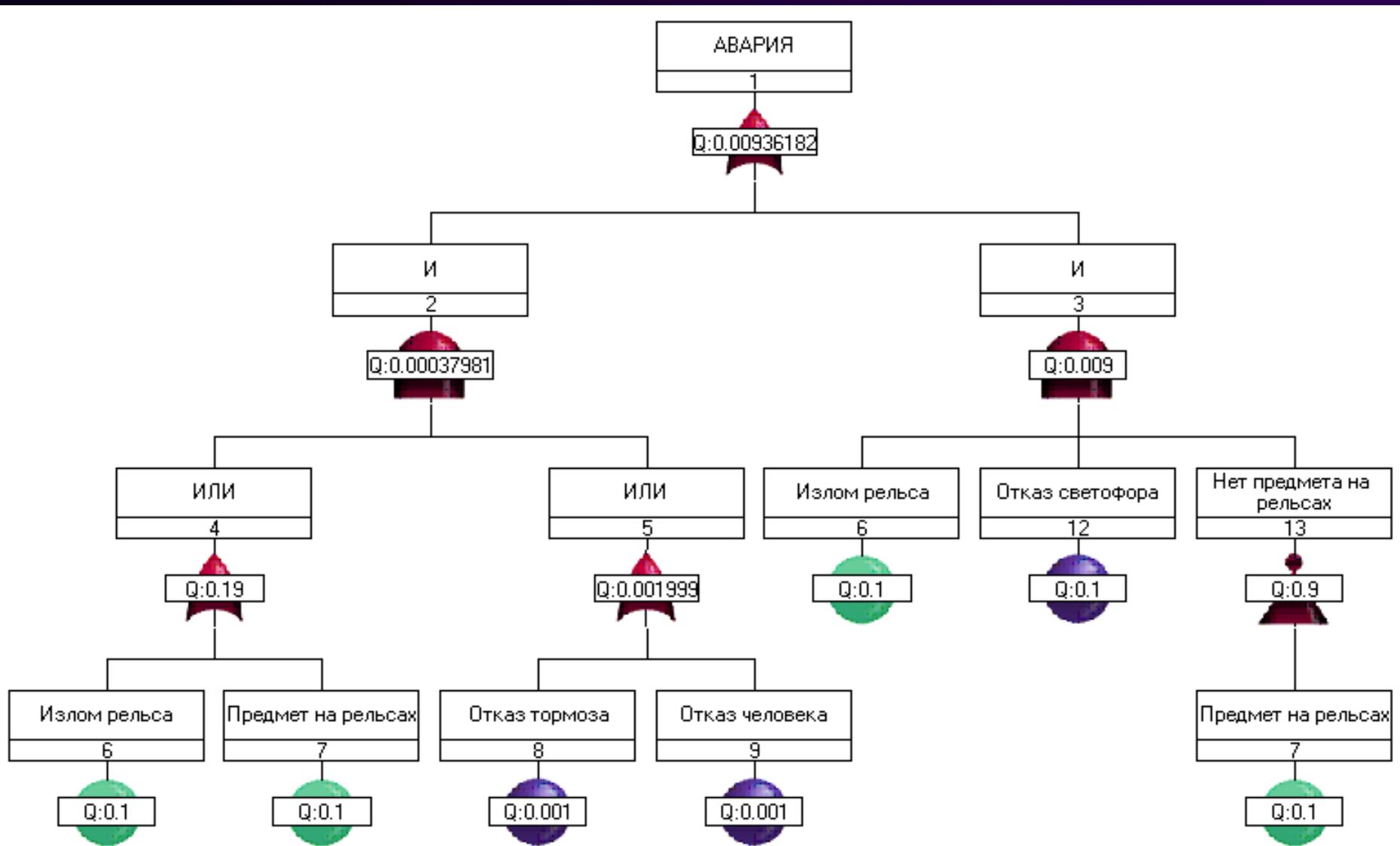
Вероятностный анализ безопасности участка железной дороги



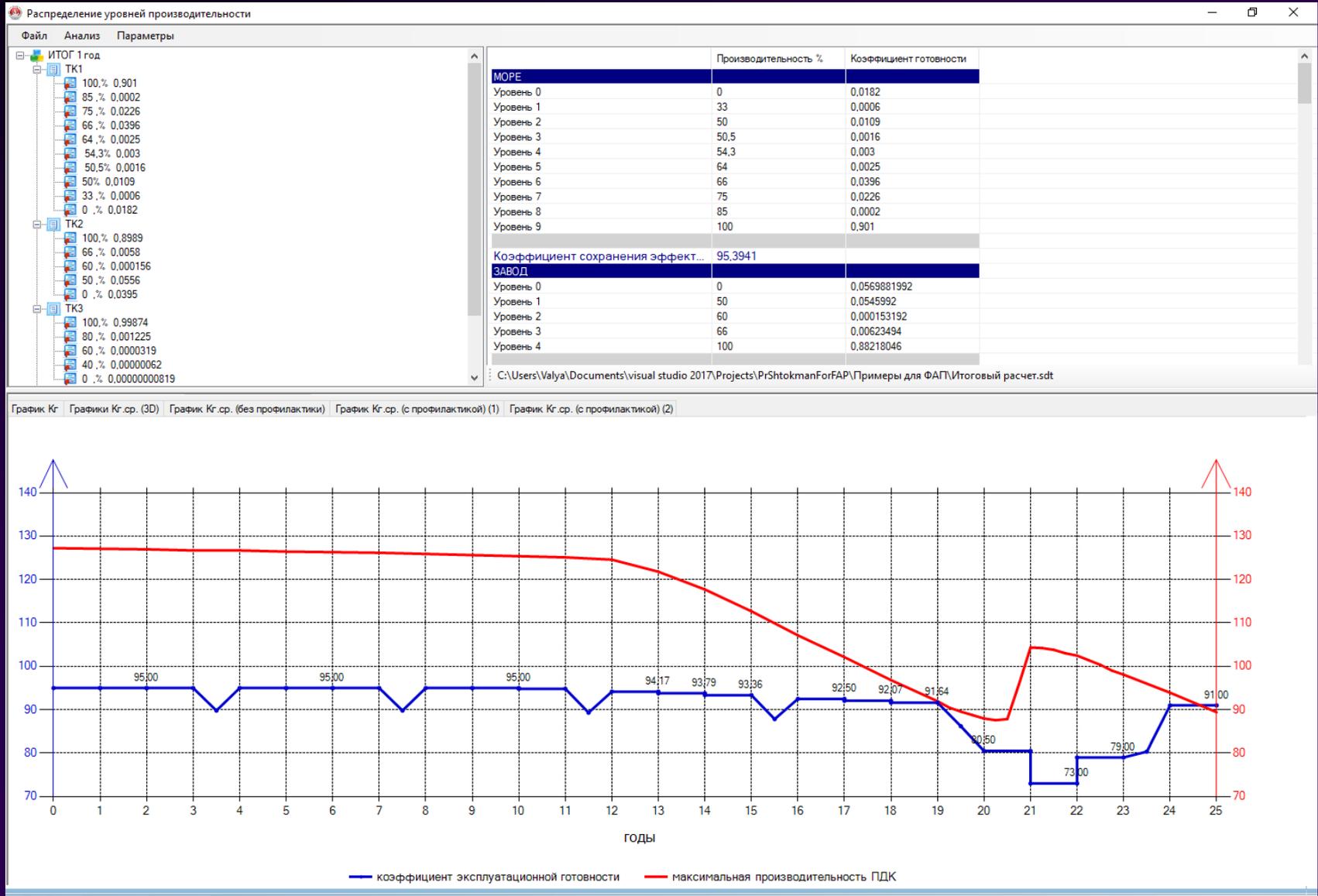
Дерево Безопасности Участка Железной Дороги



Дерево Аварии Участка Железной Дороги



Некогерентные деревья - многоуровневые модели



Для вероятностного моделирования безопасности обязательен

- Учет зависимости видов отказов
- Учет функционального несовершенства и ненадежности СК
- Учет последовательности возникновения отказов
- Учет общих причин отказов
- Вычисление вероятности опасностей (безопасности) на интервале времени

Марковские модели надежности

$$dP(t)/dt = P(t)\Lambda, \quad P(0) = P_0$$

$$dY(t) / dt = \Lambda Y(t) + R, \quad Y(0) = 0,$$

$$\Lambda = \|\lambda_{ij}\|$$

$$R_i = W_{ii} + \sum_{i,j \neq i} \lambda_{ij} W_{ij}, \quad i = \overline{1, N}$$

$$P\Lambda = 0.$$

$$\Lambda Y + R = 0.$$

$$Y(t) = e^{\Lambda t} \cdot Y_0 + \int_0^t e^{\Lambda \tau} d\tau \cdot R$$

$$e^{\Lambda t} = \sum_{s=0}^{\infty} \frac{\Lambda^s t^s}{s!}, \quad \Lambda^0 = E$$

$$\int_0^t e^{\Lambda \tau} d\tau = \sum_{s=0}^{\infty} \frac{\Lambda^s t^{s+1}}{(s+1)!}$$

МПД метод вычисления ПН

Q(t), N(t) :

Ω_f - absorb.

$$w_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{if } i \in \Omega_g, j \in \Omega_f \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\omega(t) = \Lambda \cdot N(t) + \begin{pmatrix} \lambda_{\Sigma}^1 \\ \dots \\ \lambda_{\Sigma}^N \end{pmatrix}$$

MTTF, T_{Σ} :

Ω_f - absorb.

$$w_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{if } i = j; i, j \in \Omega_g \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

E(0,t) -

интегральный

доход

(эффективность):

W – общий вид

К-Т ГОТОВНОСТИ:

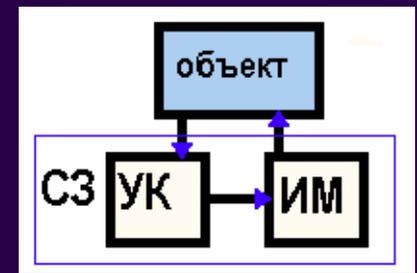
$$A(t) = \Lambda \cdot T_{\Sigma}(t) + R$$

$$A_{av}(t) = \frac{1}{t} \int_0^t A(\tau) d\tau.$$

$$w_{ij} = \begin{cases} 1/t, & \text{if } i = j; i, j \in \Omega_g \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$E_{av}(t) = \Lambda \cdot E_T(0, t) + R$$

МПД модель ТО



Параметры МПД модели:

W_{ii} – доход в работоспособных состояниях объекта (линейный рост за время пребывания);

W_{ij} – потери от переходов в состояния отказа, аварии;

$W_{отк.}$ – потери в состояниях отказа;

β - “покрытие” - доля распознаваемых аварийных ситуаций работоспособной СЗ;

α - доля скрытых отказов СЗ типа “несрабатывание”;

η_1, η_2 – доля аварийных отказов I и II рода ТО;

λ, μ - интенсивности отказов и восстановления СЗ, ТО.

4 подмножества состояний:

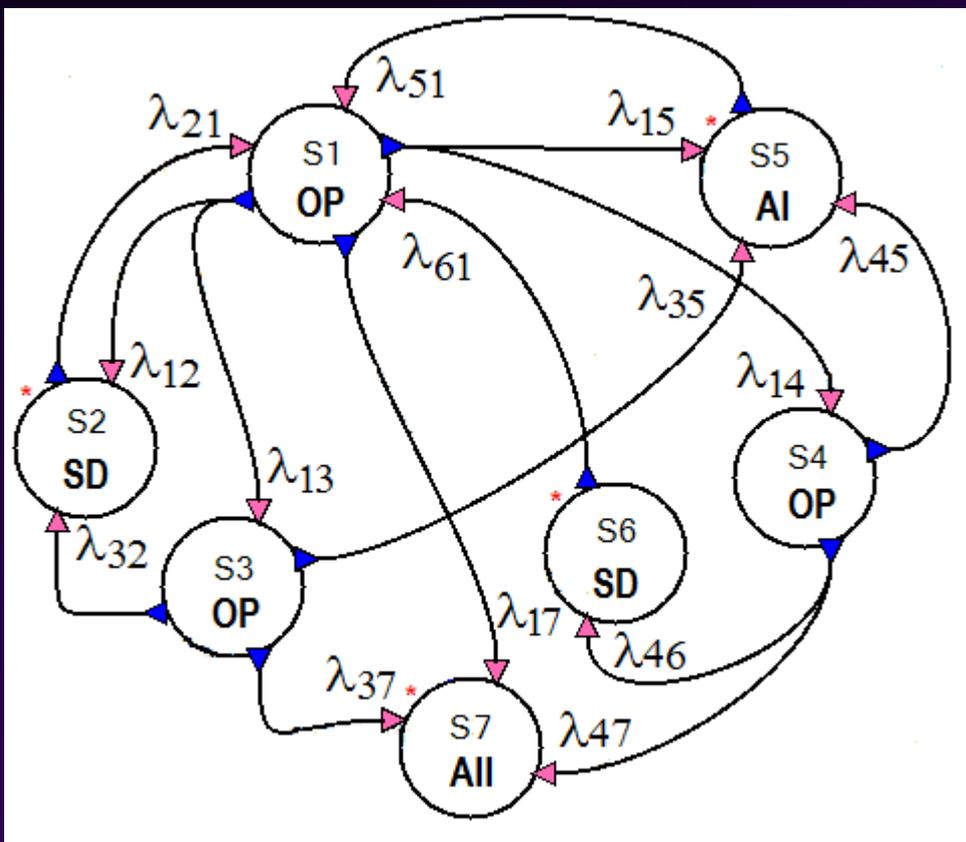
нормальное функционирование

останов (безаварийный)

авария I

авария II

МПД моделирование эффективности ТО



$$\lambda_{12} = [1 - (1 - \beta) \cdot (\eta_1 + \eta_2)] \cdot \lambda_{TO} + (1 - \alpha_K) \cdot \lambda_K + (1 - \alpha_{ИМ}) \cdot \lambda_{ИМ};$$

$$\lambda_{13} = \alpha_K \cdot \lambda_K;$$

$$\lambda_{14} = \alpha_{ИМ} \cdot \lambda_{ИМ};$$

$$\lambda_{15} = (1 - \beta) \cdot \eta_1 \cdot \lambda_{TO};$$

$$\lambda_{17} = (1 - \beta) \cdot \eta_2 \cdot \lambda_{TO};$$

$$\lambda_{21} = \lambda_{61} = \mu;$$

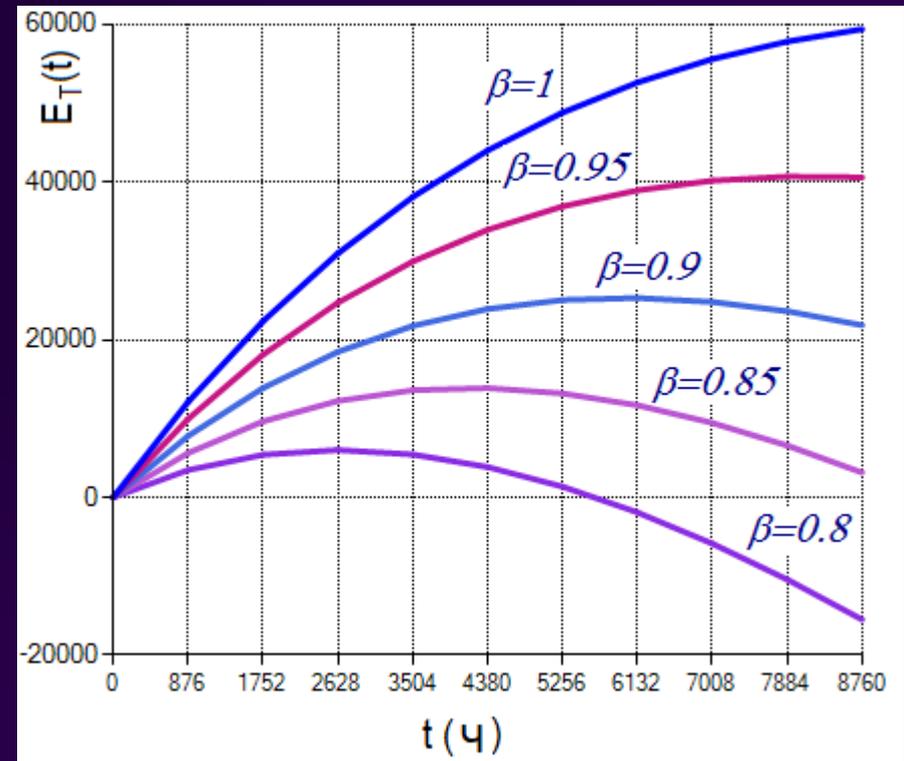
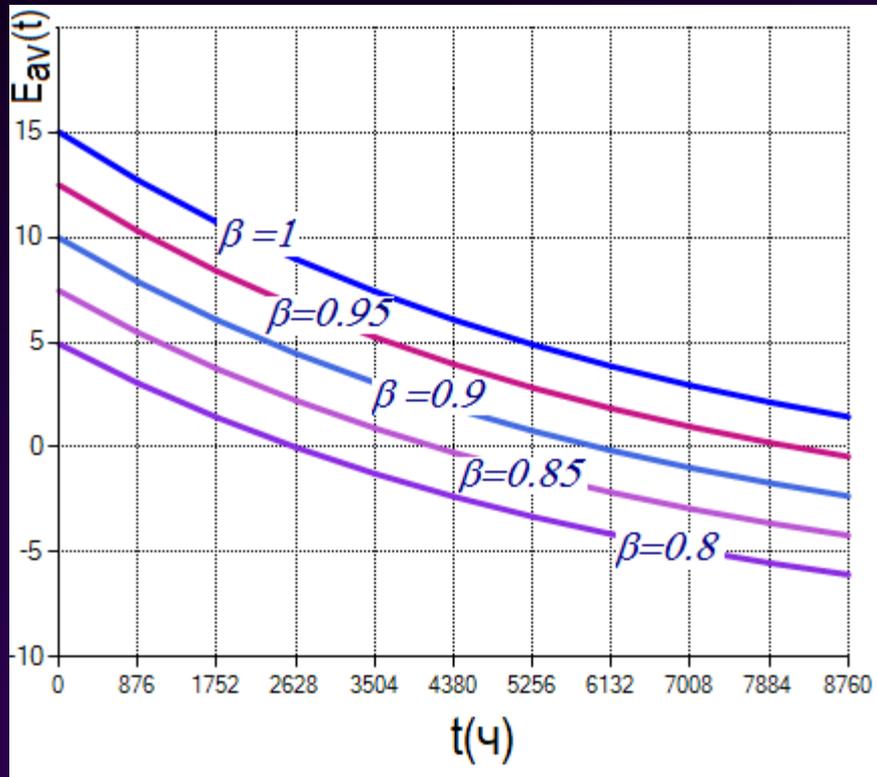
$$\lambda_{32} = (1 - \eta_1 - \eta_2) \cdot \lambda_{TO} + (1 - \alpha_{ИМ}) \cdot \lambda_{ИМ};$$

$$\lambda_{37} = \lambda_{47} = \eta_2 \cdot \lambda_{TO};$$

$$\lambda_{35} = \lambda_{45} = \eta_1 \cdot \lambda_{TO};$$

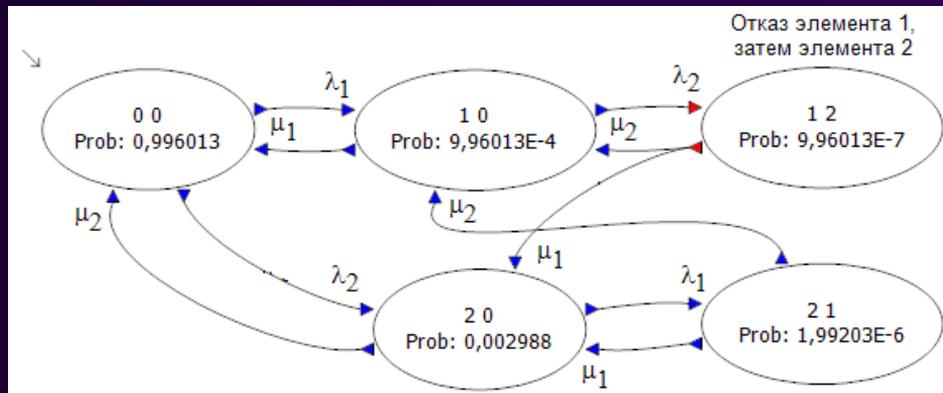
$$\lambda_{46} = (1 - \eta_1 - \eta_2) \cdot \lambda_{TO};$$

Анализ эффективности функционирования ТО

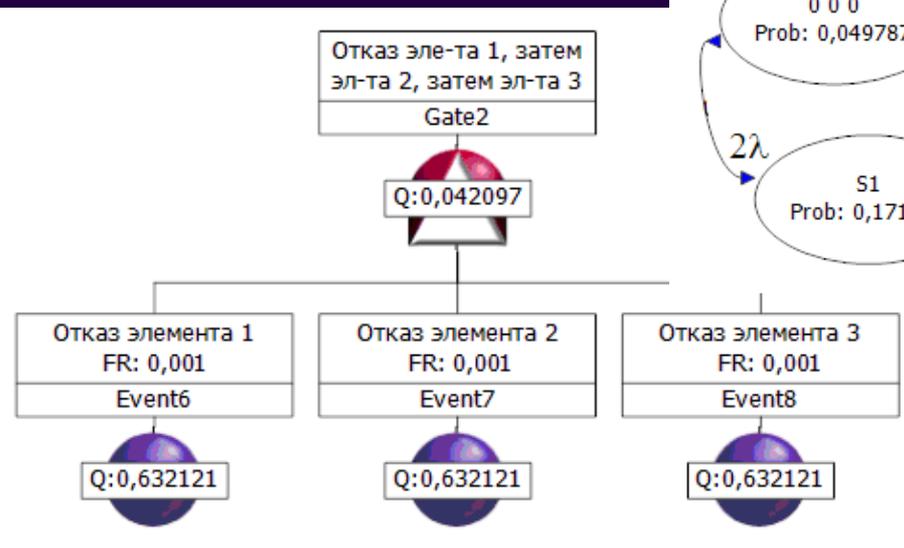
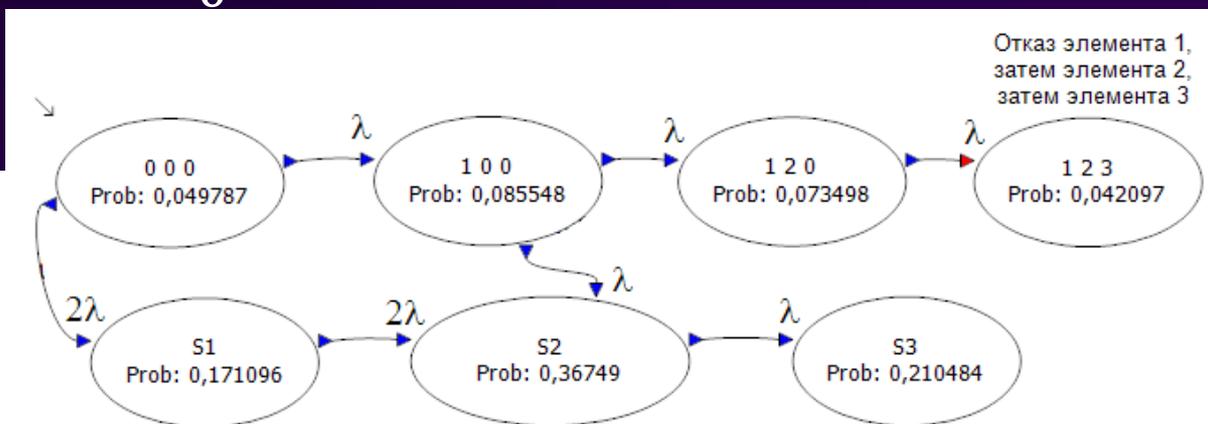
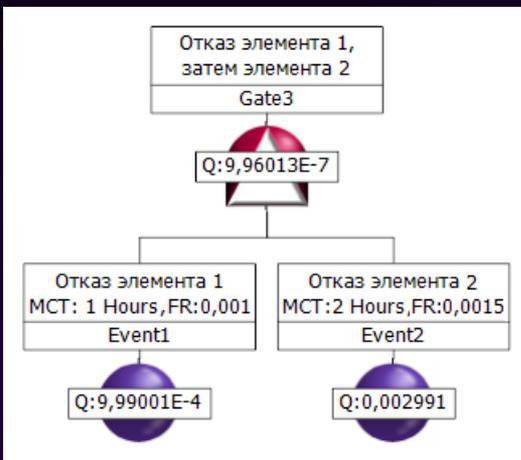


ДИНАМИЧЕСКИЕ ДЕРЕВЬЯ ОТКАЗОВ

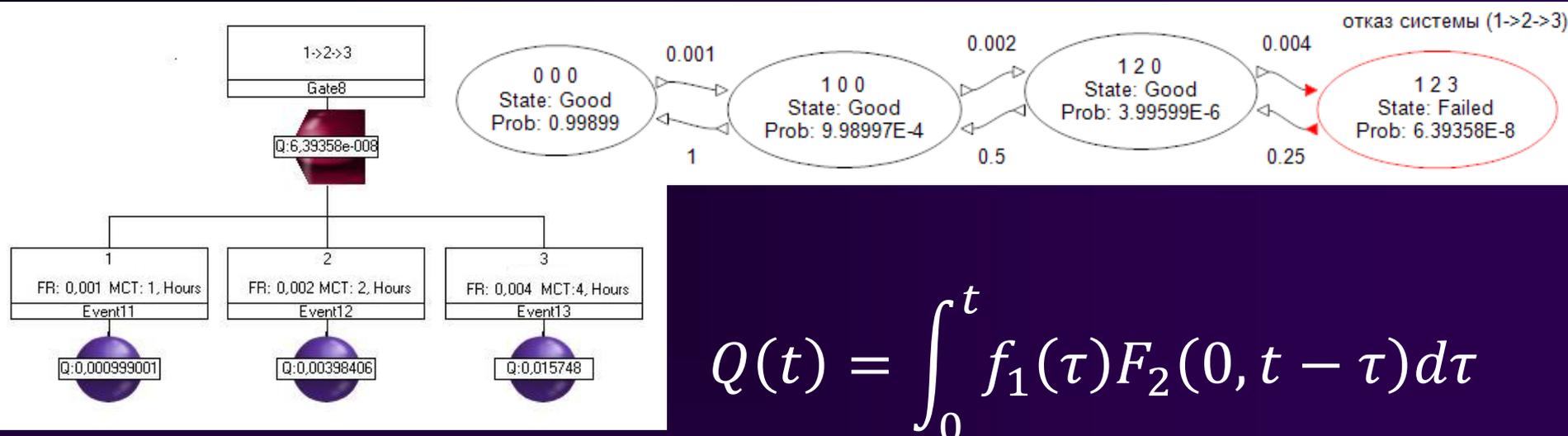
Динамическая вершина PAND



$$Q(t) = \int_0^t f_1(\tau)(1 - F_2(0, \tau))F_2(\tau, t)d\tau$$



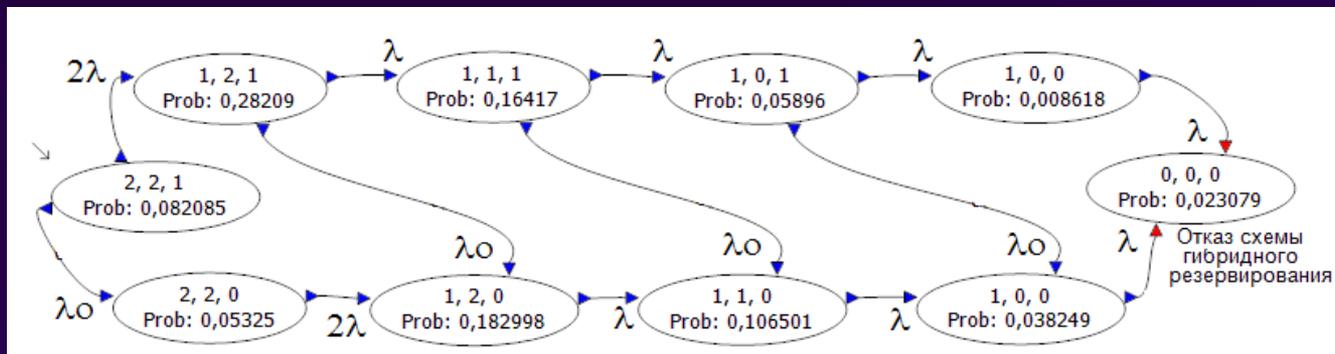
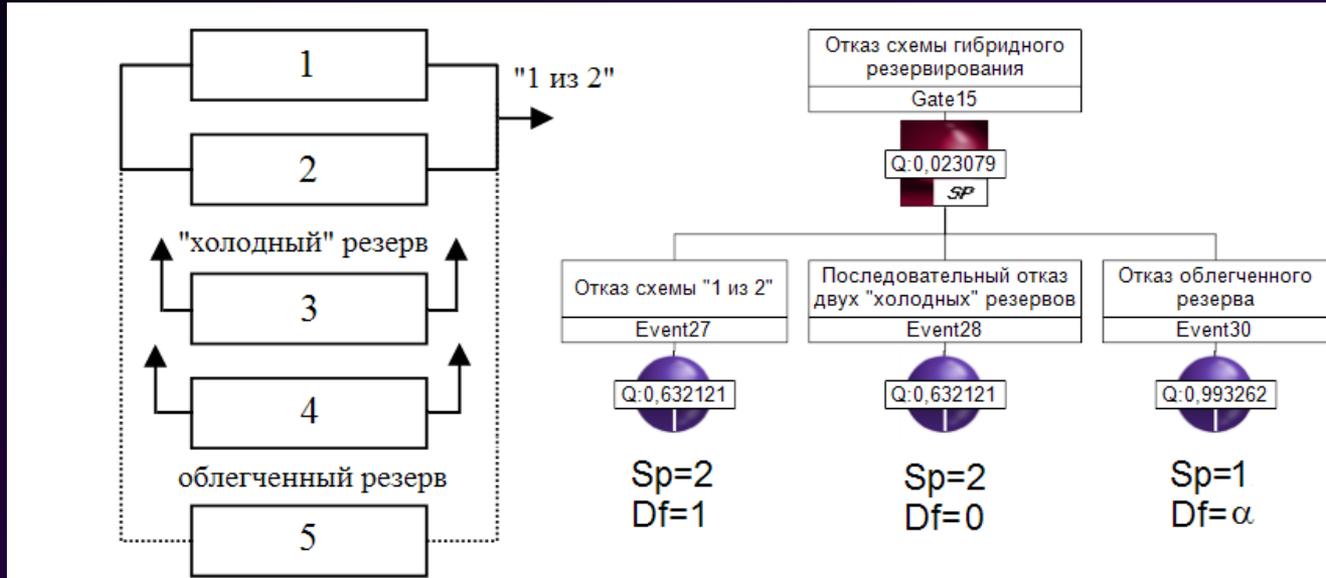
Динамическая вершина SEQ



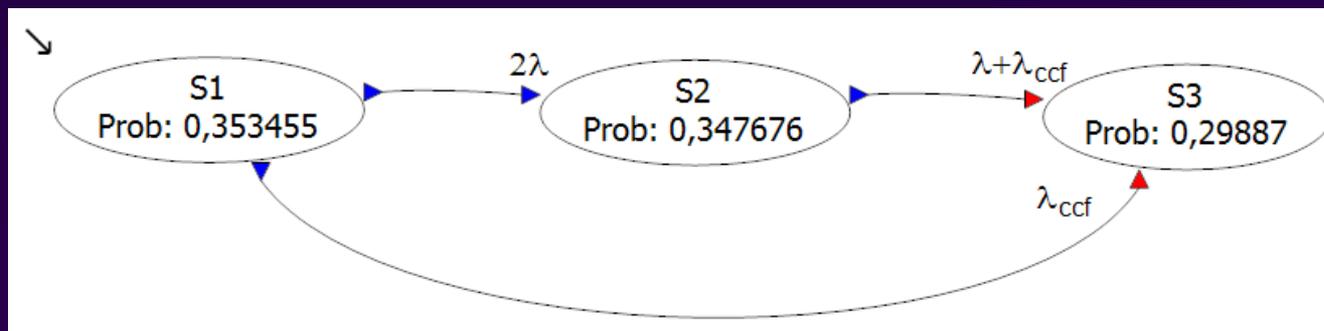
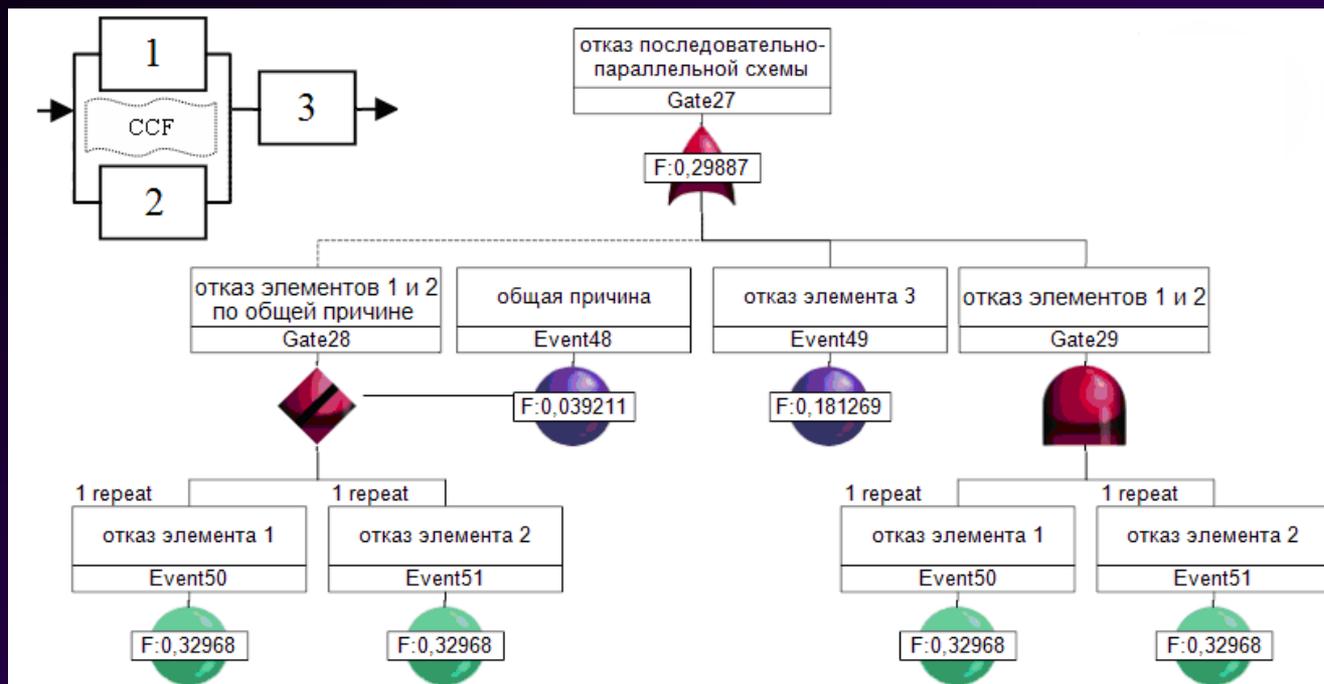
$$Q(t) = \int_0^t f_1(\tau) F_2(0, t - \tau) d\tau$$

| Моделируемая система или ситуация | Вход 1 | Вход 2 | Вход 3 | Вершинное событие SEQ |
|---|---|---|---|-------------------------------------|
| Ненагруженное резервирование (идентичные элементы). Один элемент рабочий, два в холодном резерве. | Отказ рабочего элемента | Отказ первого резервного элемента, после подключения на место рабочего. | Отказ второго резервного элемента, после подключения на место рабочего. | Отказ резервированной схемы. |
| Устройство циркулярной пилы | Минимальная степень затупления пилящего диска | Средняя степень затупления пилящего диска | Максимальная степень затупления пилящего диска | Полное затупление циркулярной пилы |
| Установка первичной переработки нефти | Выброс нефти | Появление источника воспламенения | Воспламенение пролива | Авария (пожар и (или) взрыв облака) |

Динамическая вершина SPARE



Динамическая вершина FDEP



Сложные DFT

