

К ЛЕКЦИИ

**АНАЛИЗ И СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПРИНЦИПОВ И МЕТОДОВ
ПОСТРОЕНИЯ ОТКАЗОУСТОЙЧИВЫХ И ВЫСОКОНАДЕЖНЫХ
УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ БЕЗОПАСНОСТИ И АВАРИЙНОЙ ЗАЩИТЫ**

**Санкт-Петербург
2017**

СУТЬ ПРОБЛЕМА

обеспечения надежности систем аварийной защиты и
безопасности самих систем безопасности

Особенно важен учет видов отказов в системах

- аварийной защиты,
- в УСБ атомных энергетических установок,
- в системах пожарной безопасности и в других.

В этих системах имеет место

- как накопление «скрытых отказов» в каналах управления, приводящих в конечном итоге или к несрабатыванию системы защиты,
- так и возникновение «явных отказов», приводящих к ее излишнему или «ложному» неправильному срабатыванию

Как несрабатывания, так и ложные срабатывание приводят к огромным потерям, трагическим последствиям и даже к техногенным катастрофам.

Нерешенные задачи

1. Разработка математических моделей и эффективных методов анализа надежности и отказоустойчивости невосстанавливаемых многоканальных управляющих систем безопасности (УСБ) и аварийной защиты (САЗ) как систем из элементов (каналов) с тремя несовместными состояниями и требующих учета всех возможных последовательностей возникновения различных видов отказов каналов, обеспечивающих возможность корректной количественной оценки

- вероятности нахождения системы в работоспособном состоянии,
- вероятностей ложного срабатывания,
- вероятности нахождения в состоянии скрытого отказа.

2. Исследование возможности преодоления так называемого «проклятия размерности» при расчете показателей надежности многоканальных резервированных УСБ с помощью алгоритма И.А. Рябинина, обеспечивающего, оставаясь в рамках бинарных моделей, возможность анализа надежности структурно-сложных систем из элементов с тремя несовместными состояниями (отказы типа «короткое замыкание» и «обрыв»), но не учитывающего возможных последовательностей возникновения отказов, характерных для управляющих систем типа УСБ и САЗ.

3. Исследование возможности получения для рассматриваемых типовых многоканальных резервированных структур УСБ - «2 из 3-х», «2 из 4-х» - зависимостей (в том числе аналитических выражений) вероятностей нахождения системы в работоспособном состоянии, состоянии ложного срабатывания и в состоянии скрытого отказа от характеристик отдельных каналов – вероятности отказа (как функции времени) и соотношения между явными и скрытыми отказами каналов.

4. Разработка и исследование характеристик надежности многоканальных УСБ и САЗ с динамическим резервированием с перестройкой алгоритмов работы восстанавливающих органов при накоплении числа отказавших каналов для обеспечения функционирования на последнем оставшемся в строю канале (принцип «каннибализации» или «элегантной деградации»). Сравнение структур «2 из 3-х» и «2 из 4-х» с постоянным и динамическим резервированием.

МЕСТО СИСТЕМ АВАРИЙНОЙ ЗАЩИТЫ В ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СТРУКТУРЕ ИУС типа АСУ ТП



Суть проблемы и «проклятие размерности»

Особенно важен учет видов отказов в системах аварийной защиты, в УСБ атомных энергетических установок, в системах пожарной безопасности и в других. В этих системах имеет место как накопление «скрытых отказов» в каналах управления, приводящих в конечном итоге или к несрабатыванию системы защиты, или к ее «ложному срабатыванию». Как несрабатывание, так и ложное срабатывание приводят к огромным потерям, трагическим последствиям и даже к техногенным катастрофам.

Для систем с бинарными элементами:

1. Выходной эффект зависит только от комбинации отказавших и работоспособных элементов

$$N \leq 2^n$$

2. Выходной эффект дополнительно зависит от порядка следования отказов

$$N \leq n! \sum_{i=0}^n \frac{1}{i!}$$

Для систем из элементов с тремя несовместными состояниями:

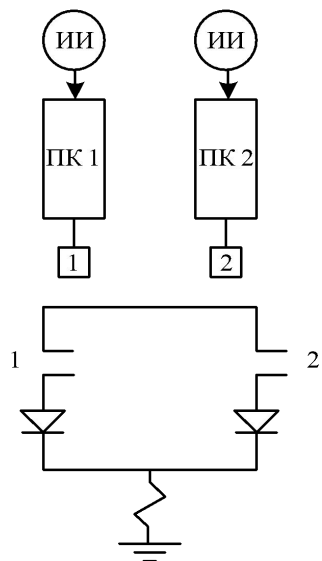
$$N \leq 3^n$$

1. Выходной эффект зависит только от комбинации отказавших и работоспособных элементов

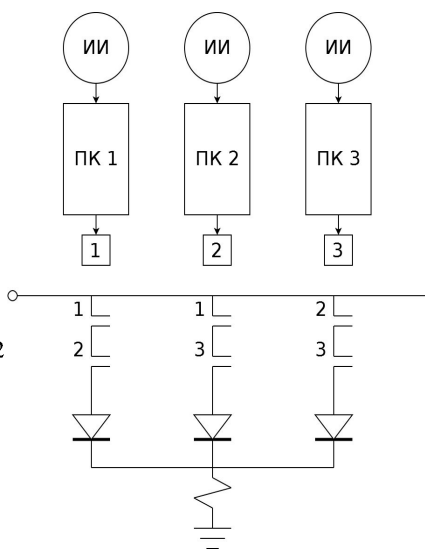
2. Выходной эффект дополнительно зависит от порядка следования отказов

$$N \leq 1 + 2n + 2n2(n-1) + +2n2(n-1)2(n-2) + 2n2(n-1)2(n-2)2(n-3) + \dots$$

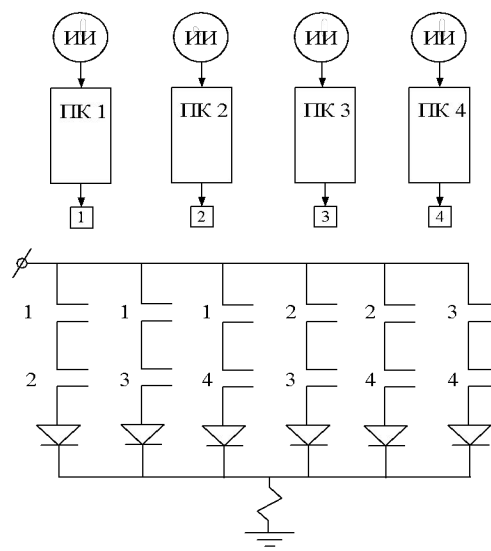
Типовые структуры резервированных управляющих систем безопасности (УСБ) и систем аварийной защиты (САЗ)



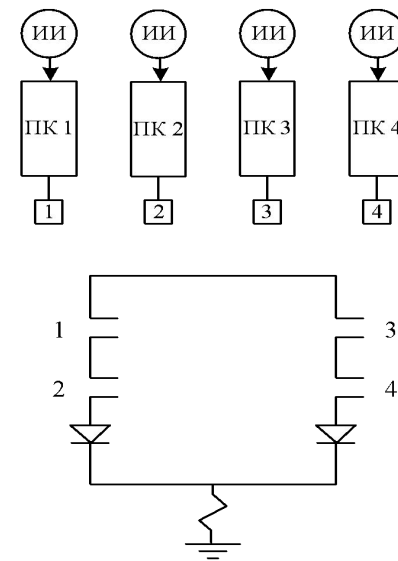
Дуплексная структура
УСБ с постоянным
резервированием
 $N \leq 13$



Трехканальная УСБ с
постоянным
резервированием по
схеме «2 из 3-х»
 $N \leq 79$



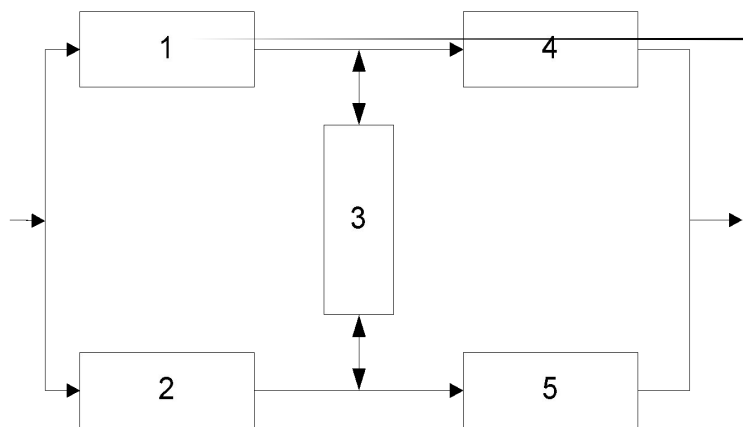
Четырехканальная
УСБ с постоянным
резервированием по
схеме «2 из 4-х»
 $N \leq 441$



Четырехканальная УСБ с
постоянным
резервированием по схеме
«2 из 4-х по и-или»
 $N \leq 441$

Алгоритм И.А. Рябина расчета надежности систем из элементов с тремя состояниями в рамках бинарной модели

Пример: схема мостика



Каждый элемент системы может находиться в трех несовместимых состояниях:

- 1 – работоспособен,
- 2 – отказ типа “обрыв”,
- 3 – отказ типа “замыкание”.

- Получение функции работоспособности системы (ФРС) системы:

$$Y(x_1, \dots, x_5) = x_1x_3 + x_2x_4 + x_1x_5x_4 + x_2x_5x_3 \quad (1)$$

- Ортогонализация ФРС:

$$Y_{opt} = x_1x_3 + \bar{x}_1x_2x_4 + x_1x_2\bar{x}_3x_4 + \bar{x}_1\bar{x}_2x_3x_4x_5 + \bar{x}_1x_2x_3\bar{x}_4x_5 \quad (2)$$

1. Нахождение вероятности безотказной работы на обрыв $R_{c.o.}$ необходимо в формулу (2) вместо x_i подставить $r_{oi} = p_i + q$, а вместо \bar{x}_i подставить q_{oi} с индексом «о» (обрыв).

$$R_{c.o.} = P\{Y_c(x_1, \dots, x_5) = 1\} = r_{o1} \cdot r_{o3} + q_{o1} \cdot r_{o2} \cdot r_{o4} + r_{o1} \cdot r_{o2} \cdot q_{o3} \cdot r_{o4} + r_{o1} \cdot q_{o2} \cdot q_{o3} \cdot r_{o4} \cdot r_{o5} + q_{o1} \cdot r_{o2} \cdot r_{o3} \cdot q_{o4} \cdot r_{o5} \quad (3)$$

Àâðî ÿòì î ñòüî òèàçà ñè ñòàì û í à î áðû â

$$Q_{c.o.} = 1 - R_{n.i.}$$

Алгоритм И.А. Рябина расчета надежности систем из элементов с тремя состояниями в рамках бинарной модели

2. $\hat{A} \hat{a} \hat{d} \hat{i} \hat{y} \hat{o} \hat{i} \hat{i} \hat{n} \hat{o} \hat{u} \hat{i} \hat{o} \hat{e} \hat{a} \hat{c} \hat{a} \hat{n} \hat{e} \hat{o} \hat{a} \hat{i} \hat{u} \hat{i} \hat{i} \hat{c} \hat{a} \hat{i} \hat{u} \hat{e} \hat{a} \hat{i} \hat{e} \text{p } Q_{\hat{n} \hat{c}} \hat{i} \hat{d} \hat{i} \hat{e} \hat{c} \hat{a} \hat{a} \hat{a} \hat{a} \hat{i} \hat{c} \hat{a} \hat{i} \hat{a} \hat{i} \hat{o} \hat{n} \hat{i} \hat{u} \hat{n} \hat{e} \hat{a} \hat{i} \hat{a} \hat{d} \hat{a} \hat{i} \hat{a} \hat{i} \hat{i} \hat{u} \hat{o}$

$$x_i = \begin{cases} 1 - \text{ãñèè i-é ýëàì áí ò "çàêî ðî ÷áí",} \\ 0 - \text{ãñèè i-é ýëàì áí ò ðàáí òì ñî ì ñî ááí.} \end{cases}$$

$$Q_{\hat{n} \hat{c}} = P\{Y_c(x_1, \dots, x_5) = 1\} = q_{\hat{c}1} \cdot q_{\hat{c}3} + r_{\hat{c}1} \cdot q_{\hat{c}2} \cdot q_{\hat{c}4} +$$

$$+ q_{\hat{c}1} \cdot q_{\hat{c}2} \cdot r_{\hat{c}3} \cdot q_{\hat{c}4} + q_{\hat{c}1} \cdot r_{\hat{c}2} \cdot r_{\hat{c}3} \cdot q_{\hat{c}4} \cdot q_{\hat{c}5} + r_{\hat{c}1} \cdot q_{\hat{c}2} \cdot q_{\hat{c}3} \cdot r_{\hat{c}4} \cdot q_{\hat{c}5} \quad (4)$$

3. $\hat{A} \hat{a} \hat{d} \hat{i} \hat{y} \hat{o} \hat{i} \hat{i} \hat{n} \hat{o} \hat{u} \hat{a} \hat{a} \hat{c} \hat{i} \hat{o} \hat{e} \hat{a} \hat{c} \hat{i} \hat{i} \hat{e} \hat{d} \hat{a} \hat{a} \hat{i} \hat{o} \hat{u} \hat{a} \hat{n} \hat{a} \hat{e} \hat{n} \hat{e} \hat{n} \hat{o} \hat{a} \hat{i} \hat{u}$

$$R = 1 - Q_{c.o.} - Q_{c.\hat{c}}$$

Построение графа переходов системы в пространстве технических состояний, составление и решение уравнений А.Н.Колмогорова для дуплексной структуры

Нѐñòàì à äèò ô ääáí òèàèüí û õ óäâáí áí èé Ì.Í .Êî èì î ãî ðî àà

$$\begin{cases} P_1' = -2\lambda P_1; & P_1(0) = 1; \\ P_2' = +2\lambda_y P_1; & P_2(0) = 0; \\ P_3' = +2\lambda_n P_1 - \lambda P_3; & P_3(0) = 0; \\ P_4' = \lambda_y P_3; & P_4(0) = 0; \\ P_5' = \lambda_n P_3; & P_5(0) = 0; \end{cases} \quad (5)$$

Àí àèèòè÷ãñêî à ðàø áí èãñèñòàì û óäâáí áí èé (5)

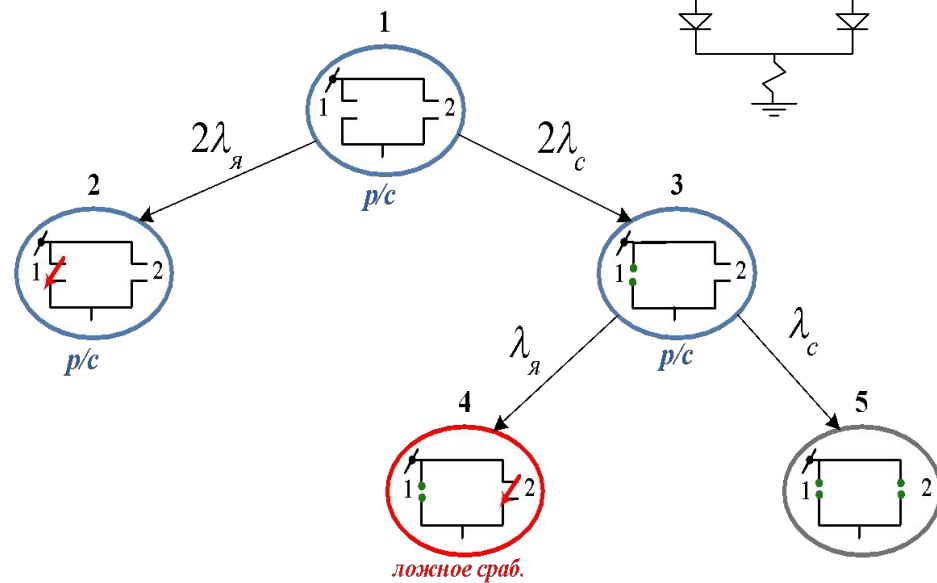
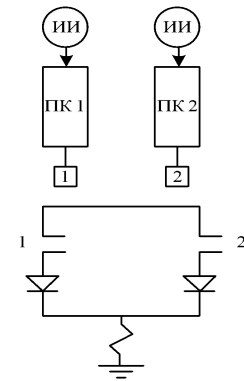
$$P_1(t) = e^{-2\lambda t},$$

$$P_2(t) = \frac{\lambda_y}{\lambda} (1 - e^{-2\lambda t}),$$

$$P_3(t) = 2 \frac{\lambda_c}{\lambda} e^{-\lambda t} (1 - e^{-\lambda t}),$$

$$P_4(t) = 2 \frac{\lambda_y}{\lambda} \frac{\lambda_c}{\lambda} \left[(1 - e^{-\lambda t}) - \frac{1}{2} (1 - e^{-2\lambda t}) \right],$$

$$P_5(t) = 2 \left(\frac{\lambda_c}{\lambda} \right)^2 \left[(1 - e^{-\lambda t}) - \frac{1}{2} (1 - e^{-2\lambda t}) \right].$$



λ_y – интенсивность явного отказа канала;

λ_c – интенсивность скрытого отказа канала;

$\lambda_y + \lambda_c = \lambda$ – общий коэффициент интенсивности отказа канала.

Аналитические решения уравнений А.Н.Колмогорова для дуплексной структуры

$$a = \frac{q_a(t)}{q(t)} = \frac{\lambda_c}{\lambda}; (1-a) = \frac{\lambda}{\lambda}, \quad (7)$$

где a - коэффициент определяющий соотношение между скрытыми и ложными отказами канала.

$$p(t) = e^{-\lambda t}, q(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (8)$$

Учитывая (7) и (8), полученные решения (6) можно привести к виду

$$\begin{aligned} P_1 &= p^2, \\ P_2 &= (1-a)(1-p^2), \\ P_3(t) &= 2ap(1-p), \\ P_4(t) &= 2a(1-a) \left((1-p) - \frac{1}{2}(1-p^2) \right), \\ P_5(t) &= 2a^2 \left((1-p) - \frac{1}{2}(1-p^2) \right). \end{aligned} \quad (9)$$

Очевидно, что:

$$\begin{aligned} R(t) &= P_1(t) + P_3(t); \\ Q_{\text{ложн срab}}(t) &= P_2(t) + P_4(t); \\ Q_{\text{врыт отк}}(t) &= P_5(t). \end{aligned} \quad (10)$$

Сравнение результатов по графу переходов системы и по алгоритму И.А.Р. для дуплексной структуры

Окончательные выражения

$$R = p^2 + 2apq = 1 - 2q(1 - a) + q^2(1 - 2a);$$

$$Q_{\text{ложн срб}} = (1 - a)(1 - p^2) + 2a(1 - a) \left((1 - p) - \frac{1}{2}(1 - p^2) \right) =$$

$$= (1 - a)q(1 - q(1 - a));$$

$$Q_{\text{вожн срб}} = 1 - R - Q$$

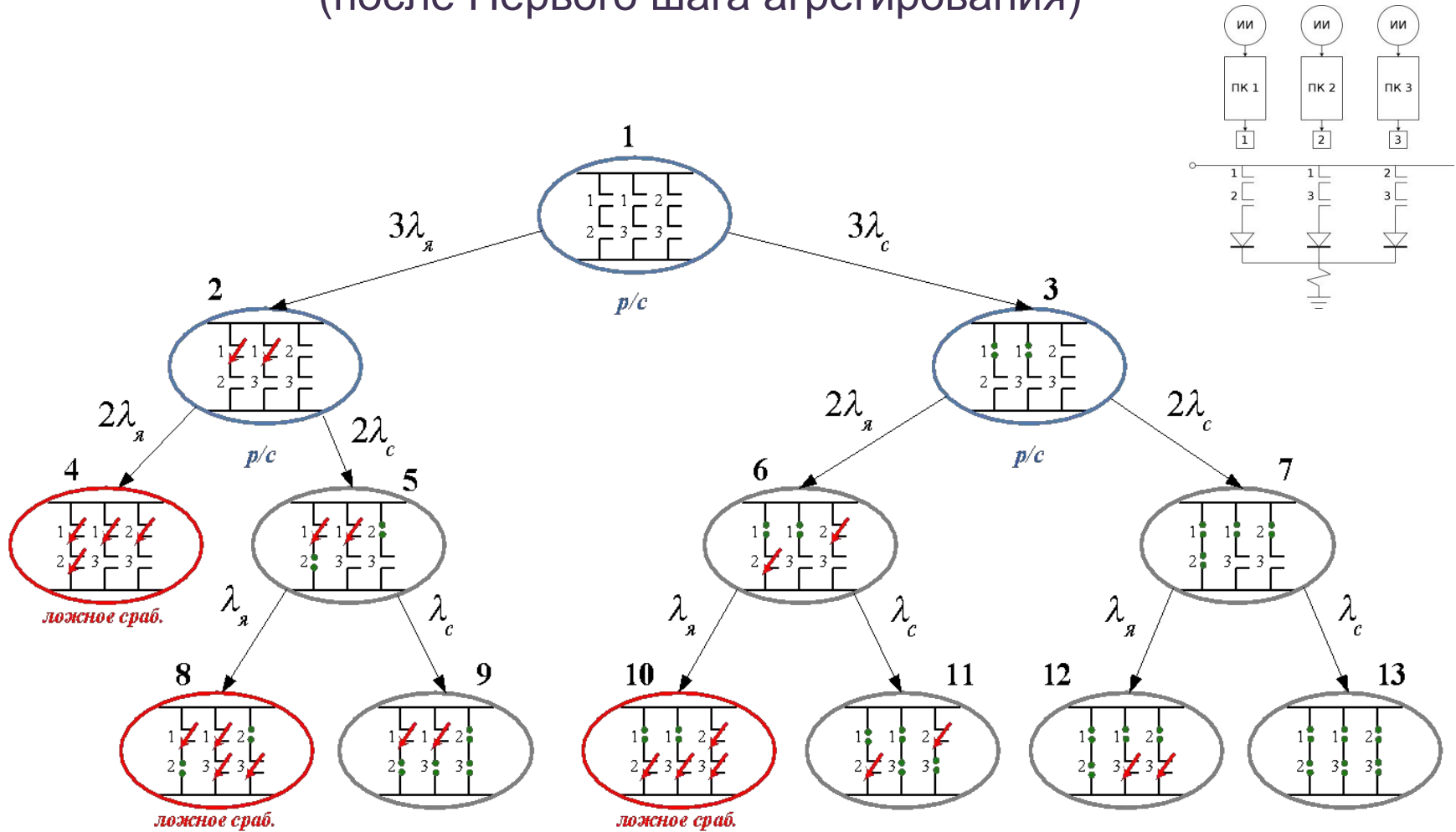
По алгоритму И.А.Рябинина

$$R = 1 - 2q(1 - a) + q^2(1 - 2a);$$

$$Q_{\text{ложн срб}} = (1 - a)q(1 - q(1 - a));$$

$$Q_{\text{вожн срб}} = 1 - R - Q$$

Граф переходов системы в пространстве технических состояний для схемы «2 из 3-х» с постоянным резервированием (после Первого шага агрегирования)



Уравнения А.Н. Колмогорова, составленные на основе графа
деградации для схемы «2 из 3-х» с постоянным
резервированием

$$\left\{ \begin{array}{ll}
 P_1' = -3(\lambda_a + \lambda_c)P_1; & P_1(0) = 1; \\
 P_2' = 3\lambda_a P_1 - 2(\lambda_a + \lambda_c)P_2; & P_2(0) = 0; \\
 P_3' = 3\lambda_a P_1 - 2(\lambda_a + \lambda_c)P_3; & P_3(0) = 0; \\
 P_4' = 2\lambda_a P_2; & P_4(0) = 0; \\
 P_5' = 2\lambda_a P_2 - (\lambda_a + \lambda_c)P_5; & P_5(0) = 0; \\
 P_6' = 2\lambda_a P_3 - (\lambda_a + \lambda_c)P_6; & P_6(0) = 0; \\
 P_7' = 2\lambda_a P_3 - (\lambda_a + \lambda_c)P_7; & P_7(0) = 0; \\
 P_8' = \lambda_a P_5; & P_8(0) = 0; \\
 P_9' = \lambda_c P_5; & P_9(0) = 0; \\
 P_{10}' = \lambda_a P_6; & P_{10}(0) = 0; \\
 P_{11}' = \lambda_c P_6; & P_{11}(0) = 0; \\
 P_{12}' = \lambda_a P_7; & P_{12}(0) = 0; \\
 P_{13}' = \lambda_c P_7; & P_{13}(0) = 0;
 \end{array} \right. \quad (11)$$

$$R(t) = P_1(t) + P_2(t) + P_3(t);$$

$$Q_{\text{лож_сраб}}(t) = P_4(t) + P_8(t) + P_{10}(t);$$

$$Q_{\text{скрыт_отк}}(t) = P_5(t) + P_6(t) + P_7(t) + P_9(t) + P_{11}(t) + P_{12}(t) + P_{13}(t);$$

Максимальное агрегирование графа переходов системы и составление уравнений А.Н.Колмогорова для расчета «R» по схеме «2 из 3-х» с постоянным резервированием

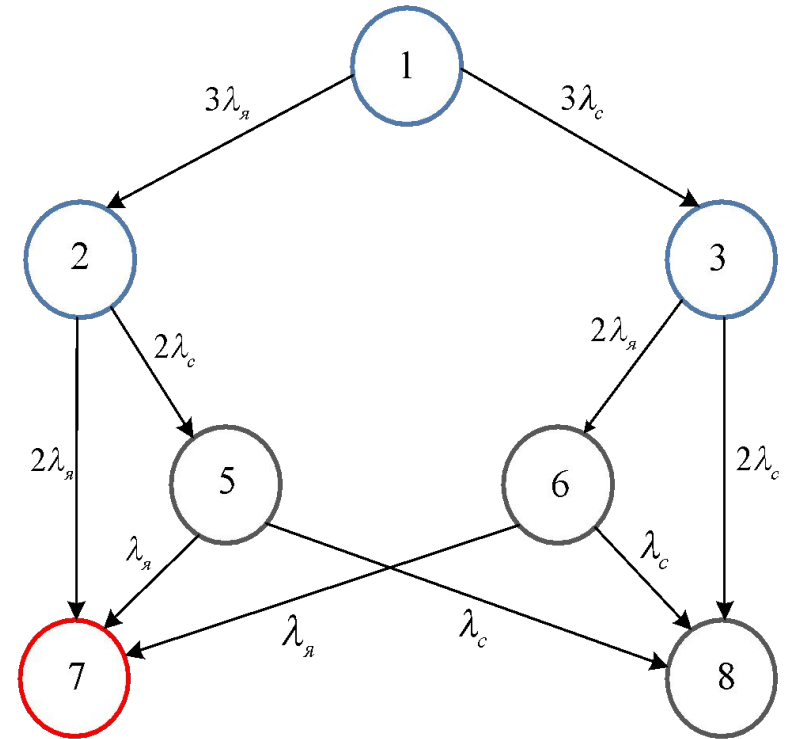
Составление уравнений А.Н.Колмогорова

$$\begin{cases}
 P_1' = -3\lambda P_1; & P_1(0) = 1; \\
 P_2' = 3\lambda_{\text{я}} P_1 - 2\lambda P_2; & P_2(0) = 0; \\
 P_3' = 3\lambda_{\text{с}} P_1 - 2\lambda P_3; & P_3(0) = 0; \\
 P_5' = 2\lambda_{\text{с}} P_2 - \lambda P_5; & P_5(0) = 0; \\
 P_6' = 2\lambda_{\text{я}} P_3 - \lambda P_6; & P_6(0) = 0; \\
 P_7' = 2\lambda_{\text{с}} P_3 + \lambda_{\text{с}} P_5 + \lambda P_6; & P_7(0) = 0; \\
 P_8' = 2\lambda_{\text{я}} P_2 + \lambda_{\text{я}} P_5 + \lambda_{\text{я}} P_6; & P_8(0) = 0;
 \end{cases}
 \quad (12)$$

$$R(t) = P_1(t) + P_2(t) + P_3(t);$$

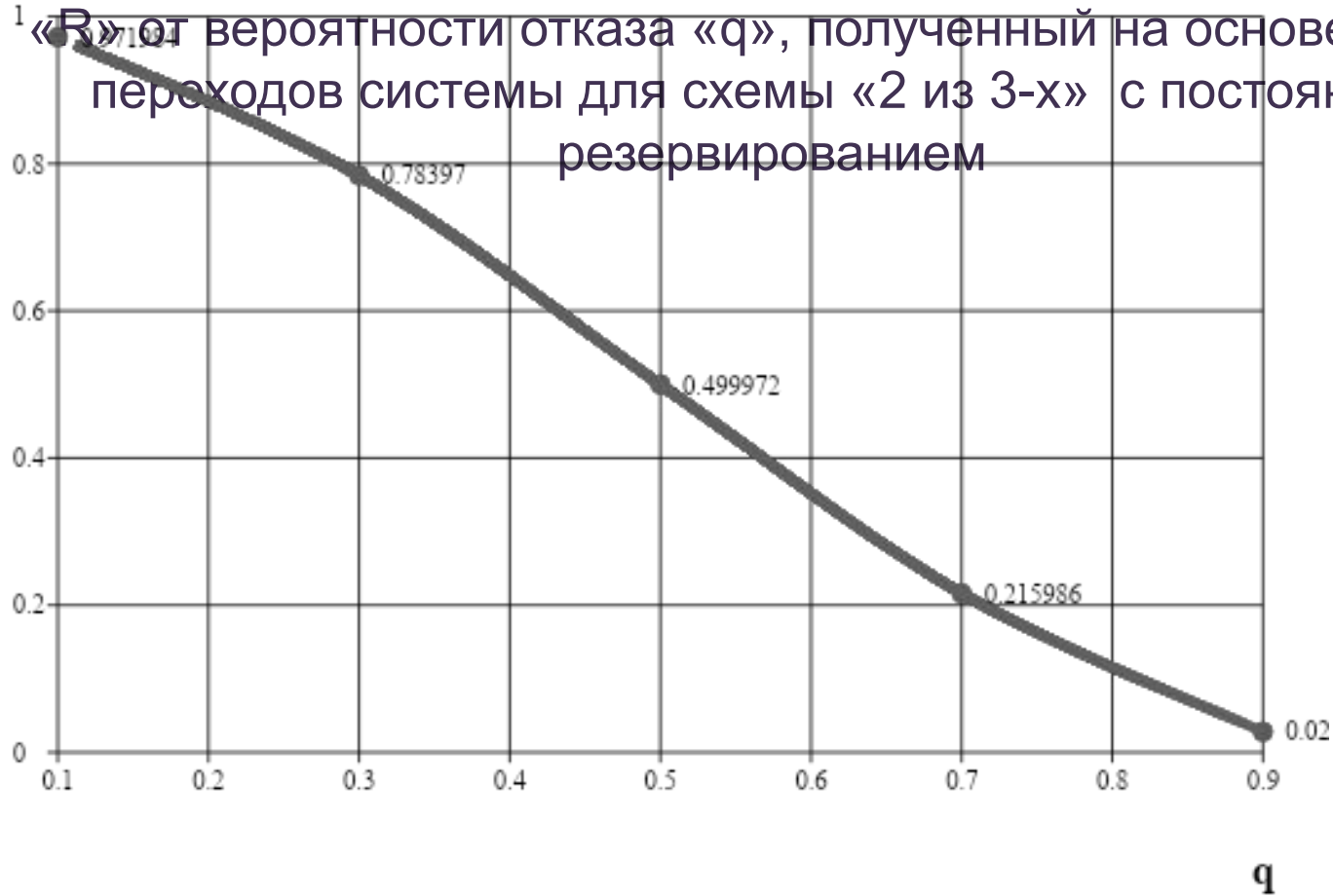
$$Q_{\text{лож_сраб}}(t) = P_7(t);$$

$$Q_{\text{скрыт_отк}}(t) = P_5(t) + P_6(t) + P_8(t).$$



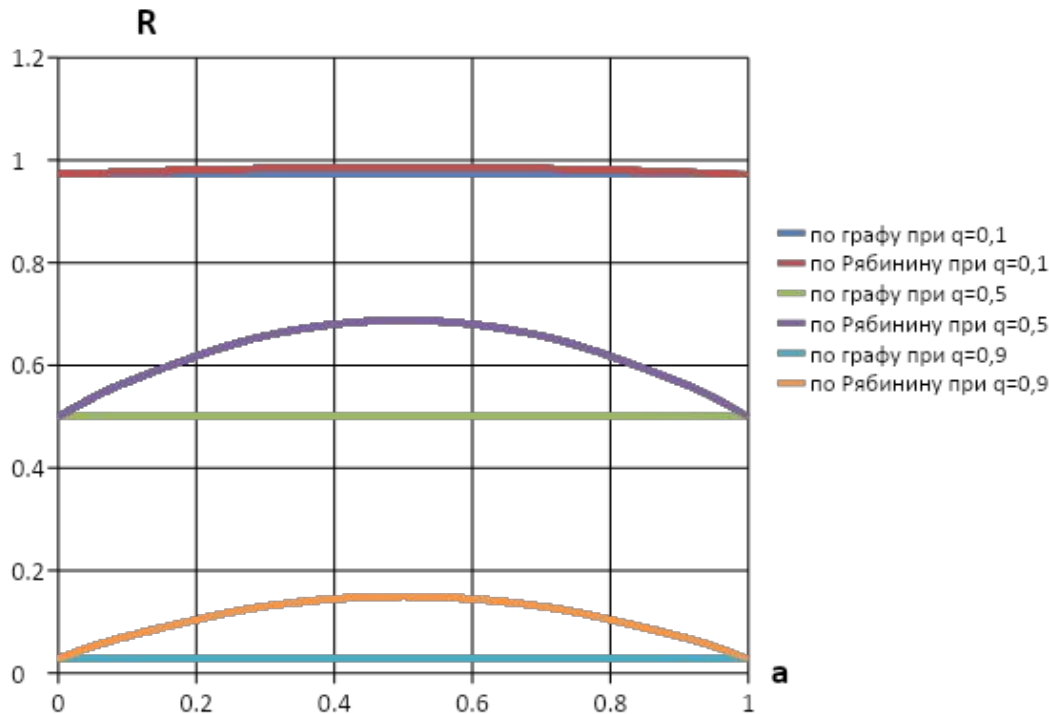
R

График Зависимости вероятности безотказной работы системы «R» от вероятности отказа «q», полученный на основе графа переходов системы для схемы «2 из 3-х» с постоянным резервированием



Вероятность безотказной работы «R» не зависит от «a», результат совпадает с полученным в 1952 году Джоном фон Нейманом.

Зависимости вероятности безотказной работы «R» от доли скрытых отказов «а» при различных значениях вероятности отказа «q» для результатов, полученных с использованием графа переходов и на основе алгоритма Рябинина и сравнение результатов для схемы «2 из 3-х»



По графу переходов системы

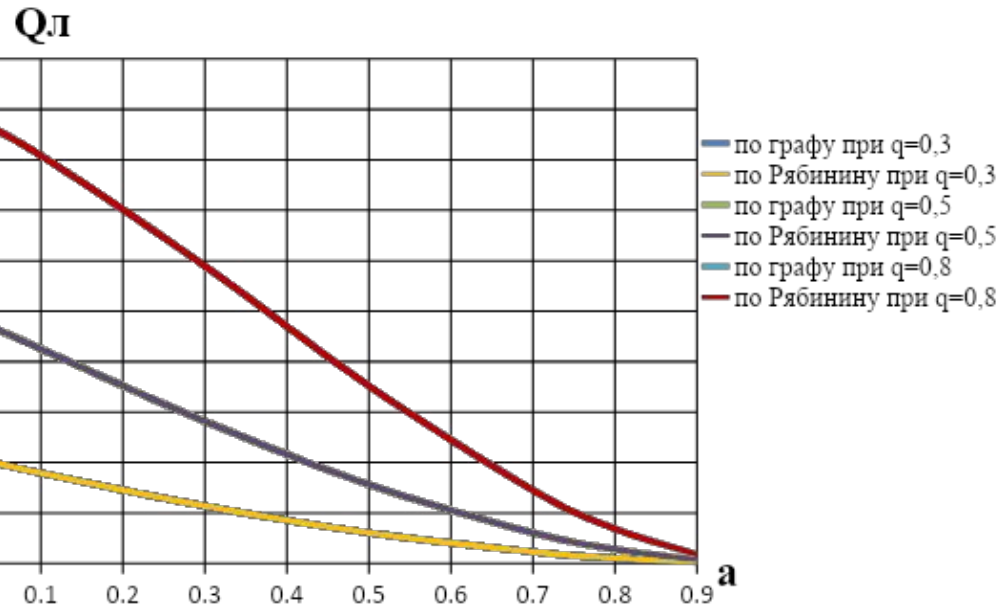
$$R = 3p^2 - 2p^3;$$

По алгоритму И.А.Р.

$$R = (1 - aq)^2(1 + 2aq) - q^2(1 - a)^2(3 - 2q(1 - a)).$$

Вероятность безотказной работы «R» по И.А.Р. зависит, как от «а», так и от «q», значит алгоритм И.А.Р. нельзя использовать для расчета «R» данного класса систем.

Зависимости вероятности ложного срабатывания «Qл» от доли скрытых отказов «а» при значениях вероятности отказа q=0,3, q=0,5, q=0,8, полученных на основе графа переходов и на основе алгоритма Рябинина и сравнение результатов для схемы «2 из 3-х»



По графу переходов системы

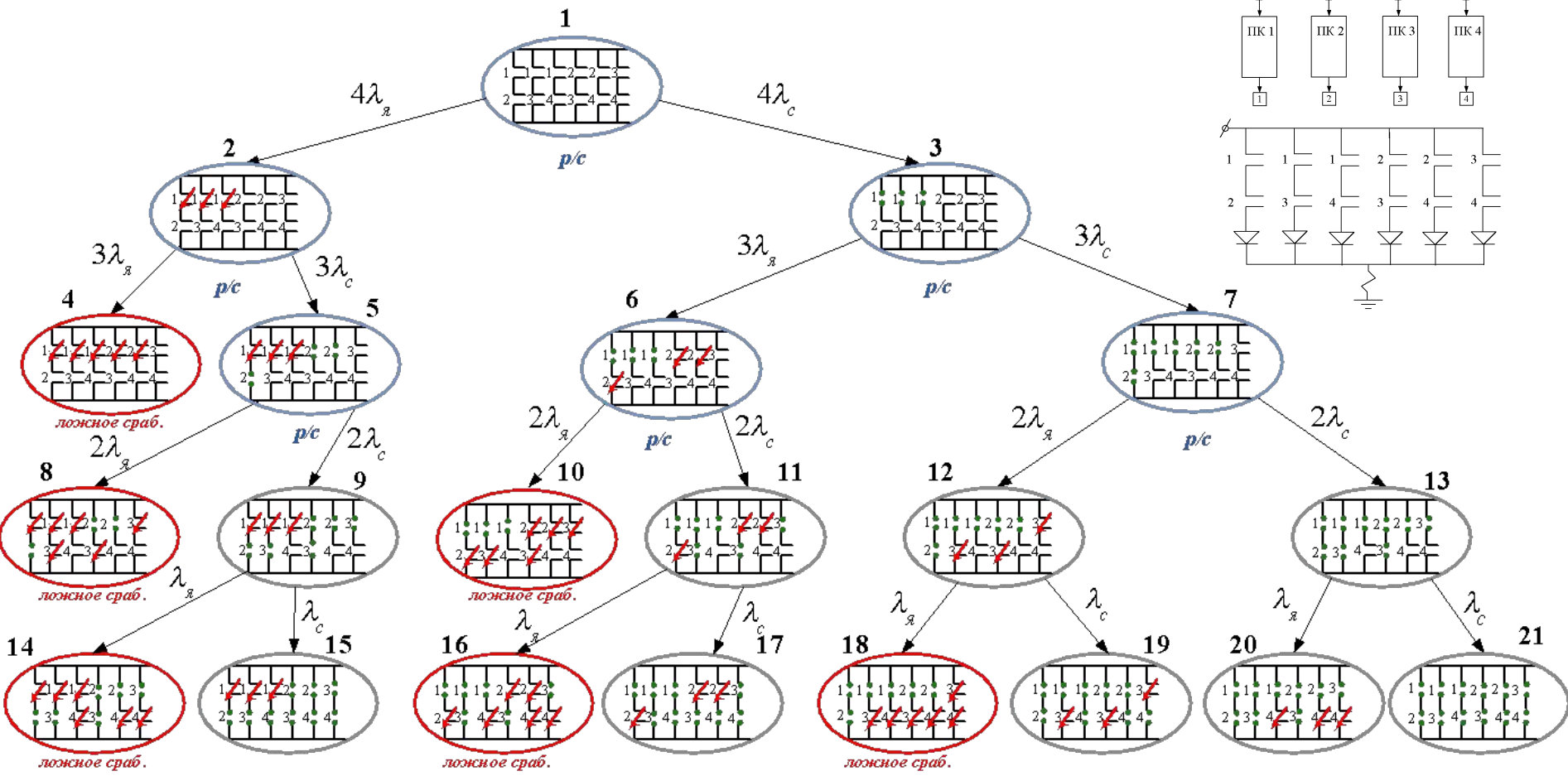
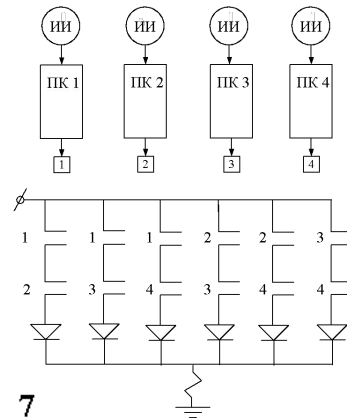
$$Q_{ложнсраб} = (1-a)^2 - 3(1-a)^2 p^2 + 2(1-a)^2 p^3 + 2a(1-a)^2 - 6a(1-a)^2 p + 6a(1-a)^2 p^2 - 2a(1-a)^2 p^3 = q^2(1-a)^2(3-2q(1-a));$$

По алгоритму И.А.Р.

$$Q_{л} = q^2(1-a)^2(3-2q(1-a)).$$

Вероятность ложного срабатывания «Qл» по графу переходов и по И.А.Р. зависит, как от «а», так и от «q» и результаты совпадают, значит алгоритм И.А.Р. можно использовать для расчета «Qл» данного класса систем.

Граф переходов системы в пространстве технических состояний для схемы «2 из 4-х» с постоянным резервированием (после Первого шага агрегирования)



Согласно графу уравнения А.Н. Колмогорова для схемы «2 из 4-х» с постоянным резервированием имеют вид

$$\begin{cases}
 P_1' = -4(\lambda_x + \lambda_c)P_1; & P_1(0) = 1; \\
 P_2' = 4\lambda_x P_1 - 3\lambda P_2; & P_2(0) = 0; \\
 P_3' = 4\lambda_c P_1 - 3\lambda P_3; & P_3(0) = 0; \\
 P_4' = 3\lambda_x P_2; & P_4(0) = 0; \\
 P_5' = 3\lambda_c P_2 - 2\lambda P_5; & P_5(0) = 0; \\
 P_6' = 3\lambda_x P_3 - 2\lambda P_6; & P_6(0) = 0; \\
 P_7' = 3\lambda_c P_3 - 2\lambda P_7; & P_7(0) = 0; \\
 P_8' = 2\lambda_x P_5; & P_8(0) = 0; \\
 P_9' = 2\lambda_c P_5 - \lambda P_9; & P_9(0) = 0; \\
 P_{10}' = 2\lambda_x P_6; & P_{10}(0) = 0; \\
 P_{11}' = 2\lambda_c P_6 - \lambda P_{11}; & P_{11}(0) = 0; \\
 P_{12}' = 2\lambda_x P_7 - \lambda P_{12}; & P_{12}(0) = 0; \\
 P_{13}' = 2\lambda_c P_7 - \lambda P_{13}; & P_{13}(0) = 0; \\
 P_{14}' = \lambda_x P_9; & P_{14}(0) = 0; \\
 P_{15}' = \lambda_c P_9; & P_{15}(0) = 0; \\
 P_{16}' = \lambda_x P_{11}; & P_{16}(0) = 0; \\
 P_{17}' = \lambda_c P_{11}; & P_{17}(0) = 0; \\
 P_{18}' = \lambda_x P_{12}; & P_{18}(0) = 0; \\
 P_{19}' = \lambda_c P_{12}; & P_{19}(0) = 0; \\
 P_{20}' = \lambda_x P_{13}; & P_{20}(0) = 0; \\
 P_{21}' = \lambda_c P_{13}; & P_{21}(0) = 0;
 \end{cases} \tag{13}$$

$$R(t) = P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) + P_5(t) + P_6(t) + P_7(t);$$

$$Q_{\text{лоос_срваб}}(t) = P_4(t) + P_8(t) + P_{10}(t) + P_{14}(t) + P_{16}(t) + P_{18}(t);$$

$$Q_{\text{скрыт_отказ}}(t) = P_9(t) + P_{11}(t) + P_{12}(t) + P_{13}(t) + P_{15}(t) + P_{17}(t) + P_{19}(t) + P_{20}(t) + P_{21}(t).$$

Максимальное агрегирование графа переходов системы для схемы «2 из 4-х» с постоянным резервированием

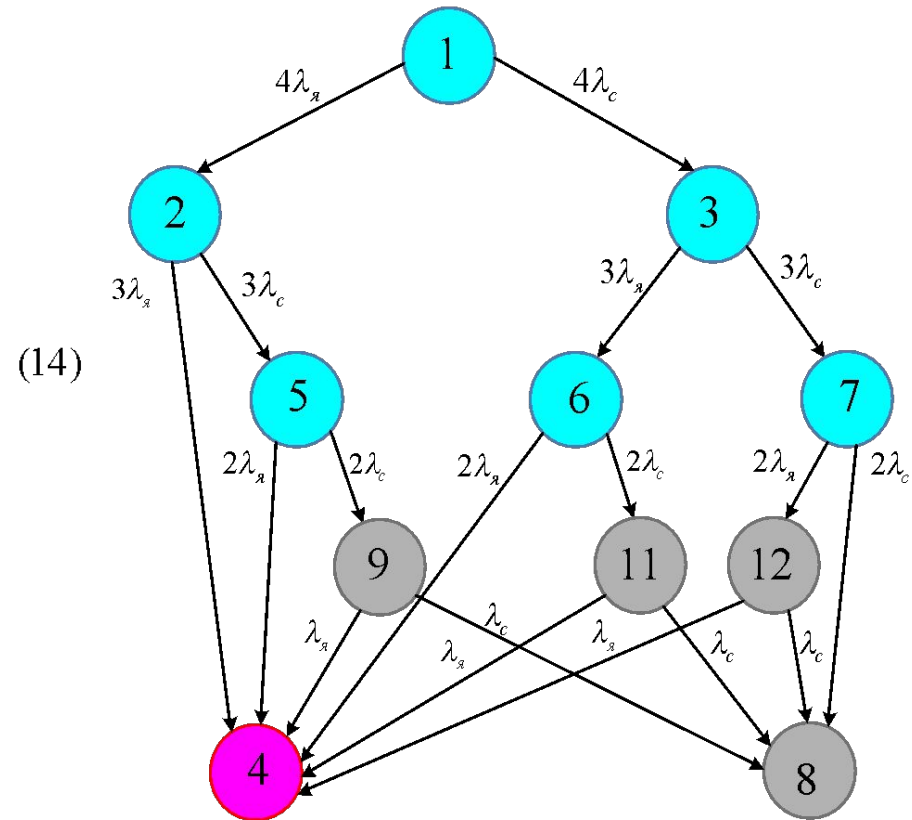
Система уравнений Колмогорова для максимально агрегированного графа

$$\begin{cases}
 P_1' = -4\lambda P_1; & P_1(0) = 1; \\
 P_2' = 4\lambda_x P_1 - 3\lambda P_2; & P_2(0) = 0; \\
 P_3' = 4\lambda_c P_1 - 3\lambda P_3; & P_3(0) = 0; \\
 P_4' = 3\lambda_x P_2 + 2\lambda_x P_5 + 2\lambda_x P_6 + \\
 + \lambda_x P_9 + \lambda_x P_{11} + \lambda_x P_{12}; & P_4(0) = 0; \\
 P_5' = 3\lambda_c P_2 - 2\lambda P_5; & P_5(0) = 0; \\
 P_6' = 3\lambda_x P_3 - 2\lambda P_6; & P_6(0) = 0; \\
 P_7' = 3\lambda_c P_3 - 2\lambda P_7; & P_7(0) = 0; \\
 P_8' = 3\lambda_c P_7 + \lambda_c P_9 + \lambda_c P_{11} + \lambda_c P_{12}; & P_8(0) = 0; \\
 P_9' = 2\lambda_c P_5 - \lambda P_9; & P_9(0) = 0; \\
 P_{11}' = 2\lambda_c P_6 - \lambda P_{11}; & P_{11}(0) = 0; \\
 P_{12}' = 2\lambda_x P_7 - \lambda P_{12}; & P_{12}(0) = 0;
 \end{cases}
 \tag{14}$$

$$R(t) = P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) + P_5(t) + P_6(t) + P_7(t);$$

$$Q_{\text{лож_сраб}}(t) = P_4(t);$$

$$Q_{\text{скрыт_отказ}}(t) = P_8(t) + P_9(t) + P_{11}(t) + P_{12}(t).$$



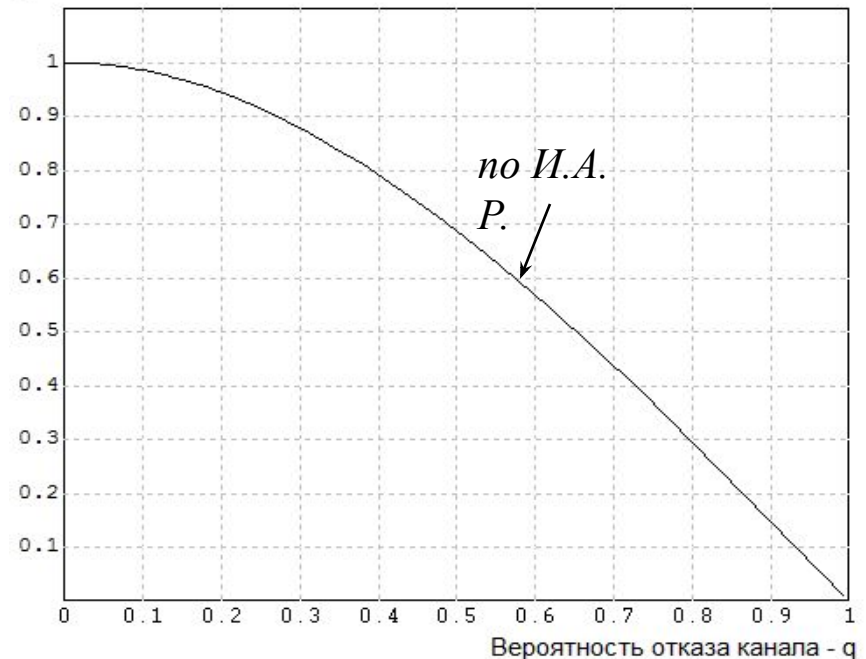
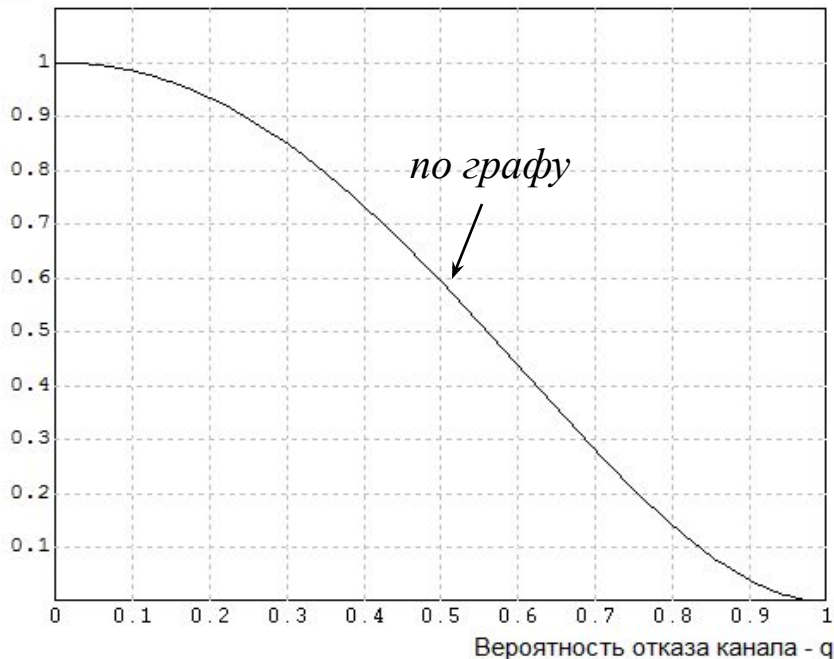
Зависимости вероятности безотказной работы «R» от вероятности отказа «q» для результатов, полученных на основе графа переходов и на основе алгоритма Рябина и сравнение результатов для схемы «2 из 4-х»

По графу переходов

$$R = (1 - q)^2(1 + 2q - 3q^2 + 12aq^2 + 6a^2q^2);$$

По И.А.Р.

$$R = q^2(a^3q(3aq - 4) - (1 - a)^2(6 - 8q + 3q^2 + 8aq - 6aq^2 + 3a^2q^2)).$$



Вероятность безотказной работы «R» в обоих случаях зависит, как от «a», так и от «q», но результаты не совпадают, а значит алгоритм И.А.Р. нельзя использовать для расчета «R» данного класса систем.

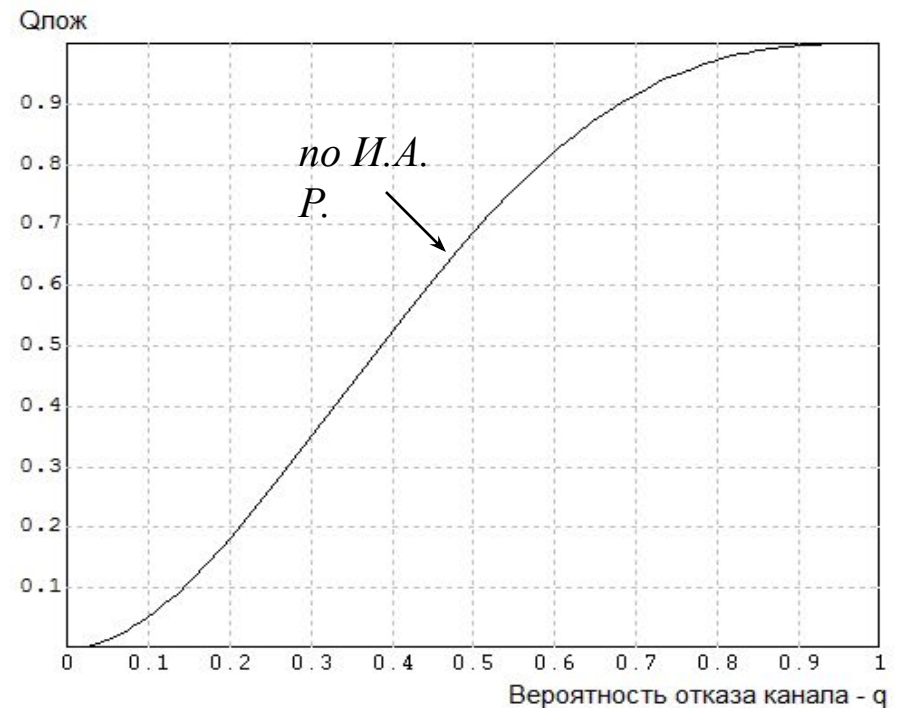
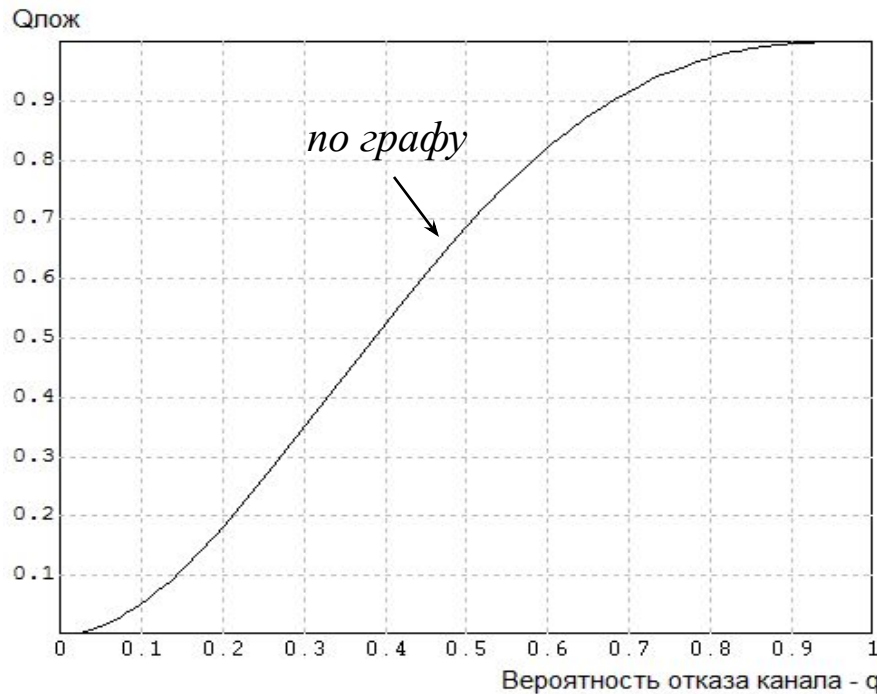
Получение Зависимостей вероятности безотказной работы «Qл» от вероятности отказа «q» для результатов, полученных на основе графа переходов и на основе алгоритма Рябинина и сравнение результатов для схемы «2 из 4-х»

По графу переходов

$$Q_{\text{ложнсраб}} = (1-a)^2 q^2 (6 - 8q + 3q^2 + 8aq - 6aq^2 + 3a^2 q^2);$$

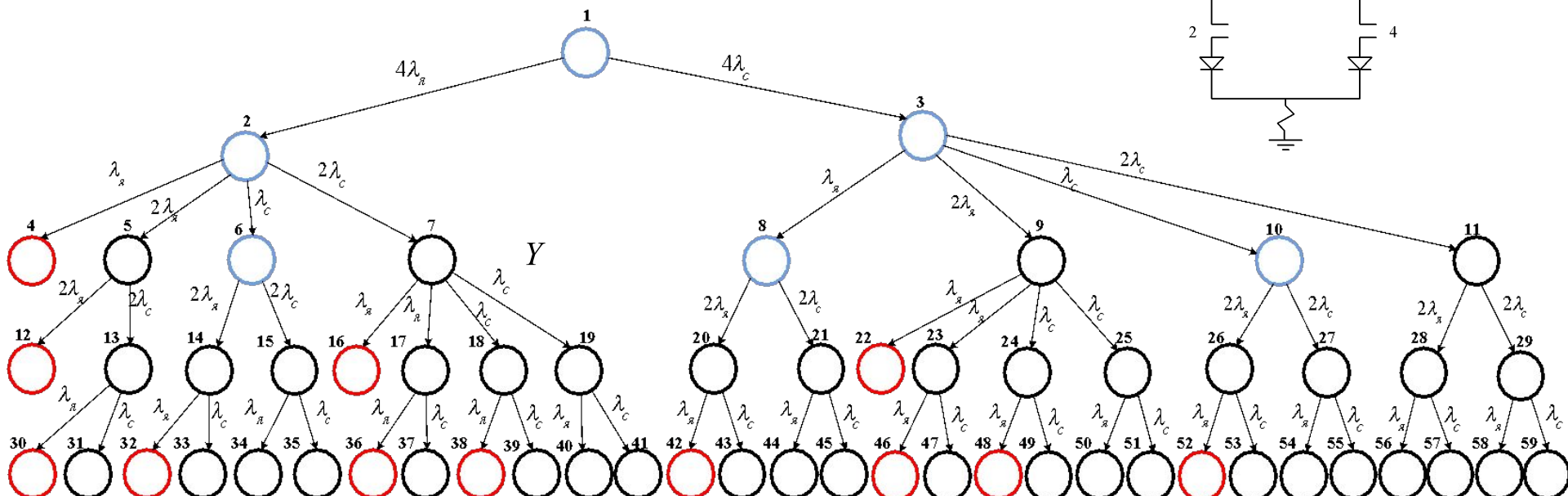
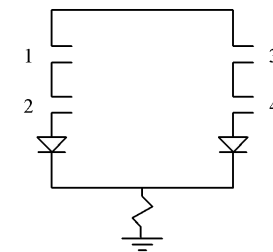
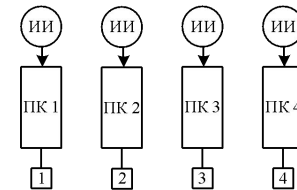
По И.А.Р.

$$Q_{\text{ложнсраб}} = (1-a)^2 q^2 (6 - 8q + 3q^2 + 8aq - 6aq^2 + 3a^2 q^2).$$

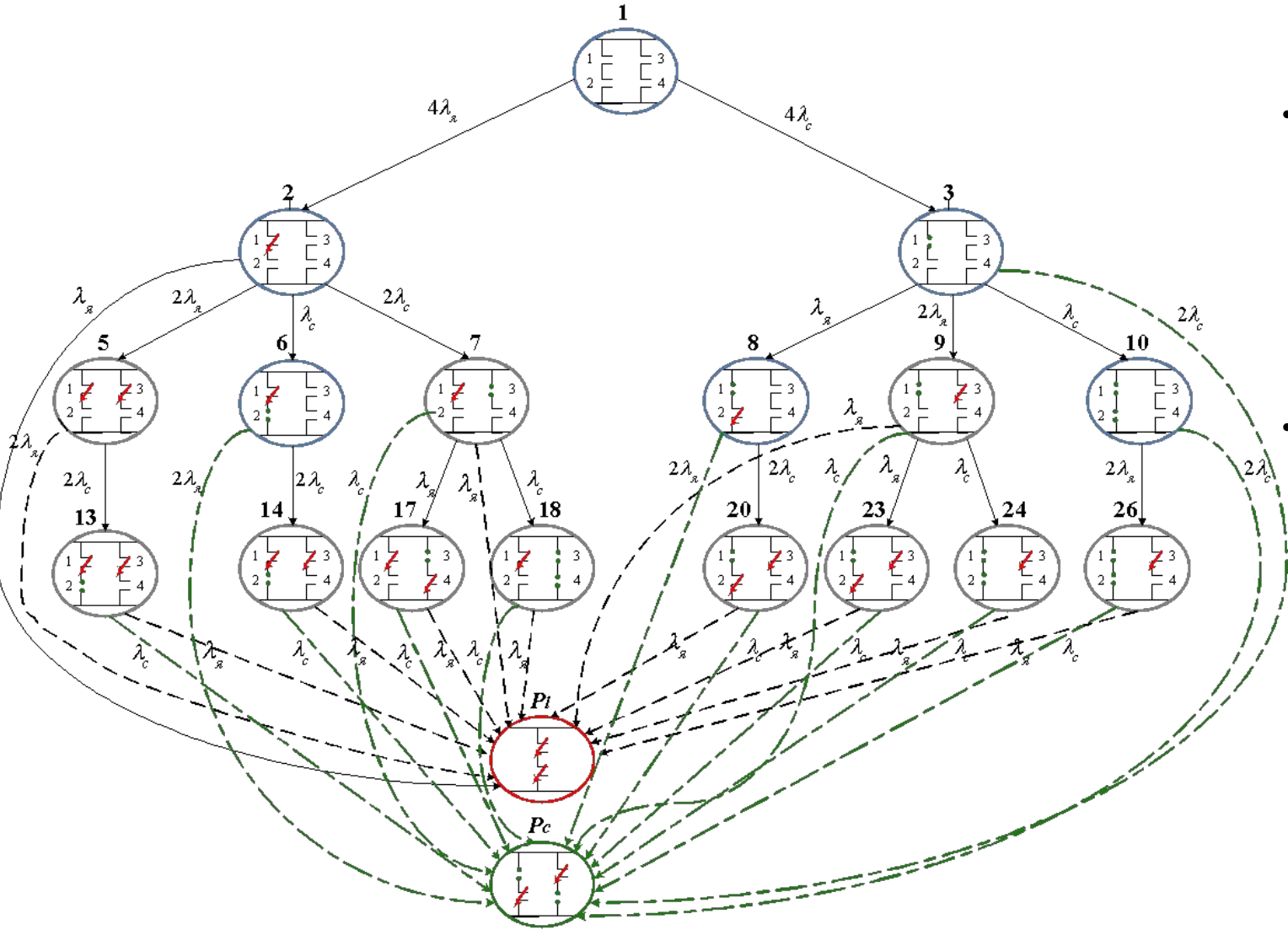


Вероятность ложного срабатывания «Qл» по графу переходов и по И.А.Р. зависит как от «а», так и от «q» и результаты совпадают, значит **алгоритм И.А.Р. можно использовать для расчета «Qл» данного класса систем !!!**

Граф переходов системы в пространстве технических состояний для схемы «2 канал по «И» каждый и объединение их по «ИЛИ»» (Первый шаг агрегирования)



Максимально агрегированный граф переходов системы в пространстве технических состояний для схемы «2 канал по «И» каждый и объединение их по «ИЛИ»»



- Агрегированное состояние « P_i » - состояние «ложного срабатывания» - произошел «явный» отказ двух каналов подряд;
- Агрегированное состояние « P_c » - состояние «скрытого отказа», несколько каналов отказали «скрыто», система не реагирует на аварийную ситуацию;

Уравнения А.Н. Колмогорова для схемы «2 канал по «И» каждый и объединение их по «ИЛИ»» с постоянным резервированием

$$\left\{ \begin{array}{ll}
 P_1' = -4(\lambda_a + \lambda_c)P_1; & P_1(0) = 1; \\
 P_2' = 4\lambda_a P_1 - 3(\lambda_a + \lambda_c)P_2; & P_2(0) = 0; \\
 P_3' = 4\lambda_a P_1 - 3(\lambda_a + \lambda_c)P_3; & P_3(0) = 0; \\
 P_5' = 2\lambda_a P_2 - 2(\lambda_a + \lambda_c)P_5; & P_5(0) = 0; \\
 P_6' = \lambda_c P_2 - 2(\lambda_a + \lambda_c)P_6; & P_6(0) = 0; \\
 P_7' = 2\lambda_a P_2 - 2(\lambda_a + \lambda_c)P_7; & P_7(0) = 0; \\
 P_8' = \lambda_a P_3 - 2(\lambda_a + \lambda_c)P_8; & P_8(0) = 0; \\
 P_9' = 2\lambda_a P_3 - 2(\lambda_a + \lambda_c)P_9; & P_9(0) = 0; \\
 P_{10}' = \lambda_c P_3 - 2(\lambda_a + \lambda_c)P_{10}; & P_{10}(0) = 0; \\
 P_{13}' = 2\lambda_c P_5 - (\lambda_a + \lambda_c)P_{13}; & P_{13}(0) = 0; \\
 P_{14}' = 2\lambda_a P_6 - (\lambda_a + \lambda_c)P_{14}; & P_{14}(0) = 0; \\
 P_{17}' = \lambda_a P_7 - (\lambda_a + \lambda_c)P_{17}; & P_{17}(0) = 0; \\
 P_{18}' = \lambda_c P_7 - (\lambda_a + \lambda_c)P_{18}; & P_{18}(0) = 0; \\
 P_{20}' = 2\lambda_a P_8 - (\lambda_a + \lambda_c)P_{20}; & P_{20}(0) = 0; \\
 P_{23}' = \lambda_a P_9 - (\lambda_a + \lambda_c)P_{23}; & P_{23}(0) = 0; \\
 P_{24}' = \lambda_c P_9 - (\lambda_a + \lambda_c)P_{24}; & P_{24}(0) = 0; \\
 P_{26}' = 2\lambda_a P_{10} - (\lambda_a + \lambda_c)P_{26}; & P_{26}(0) = 0; \\
 P_{\bar{a}}' = \lambda P_{\bar{a}} + 2\lambda P_{\bar{b}} + \lambda P_{\bar{a}} + \lambda P_{\bar{b}} + \lambda P_{13} + \\
 + \lambda_a P_{14} + \lambda_a P_{17} + \lambda_a P_{18} + \lambda_a P_{20} + \lambda_a P_{23} + \lambda_a P_{24} + \lambda_a P_{26}; & P_{\bar{a}}(0) = 0; \\
 P_c' = 2\lambda P_{\bar{a}} + 2\lambda P_{\bar{b}} + \lambda_c P_7 + 2\lambda_c P_8 + \lambda_c P_9 + 2\lambda_c P_{10} + \lambda_c P_{13} + \\
 + \lambda_c P_{14} + \lambda_c P_{17} + \lambda_c P_{20} + \lambda_c P_{23} + \lambda_c P_{24} + \lambda_c P_{26}; & P_c(0) = 0;
 \end{array} \right. \quad (15)$$

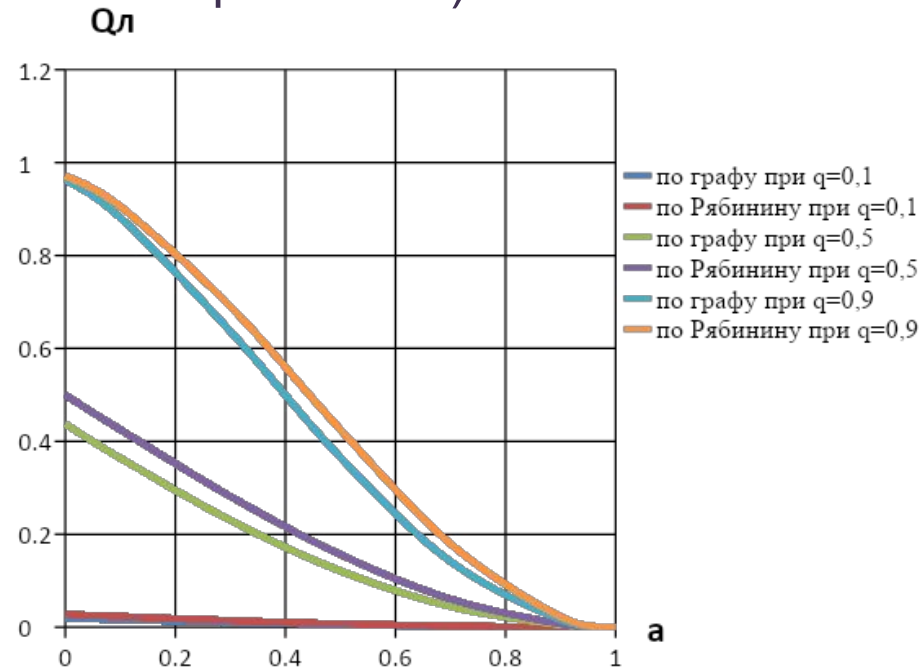
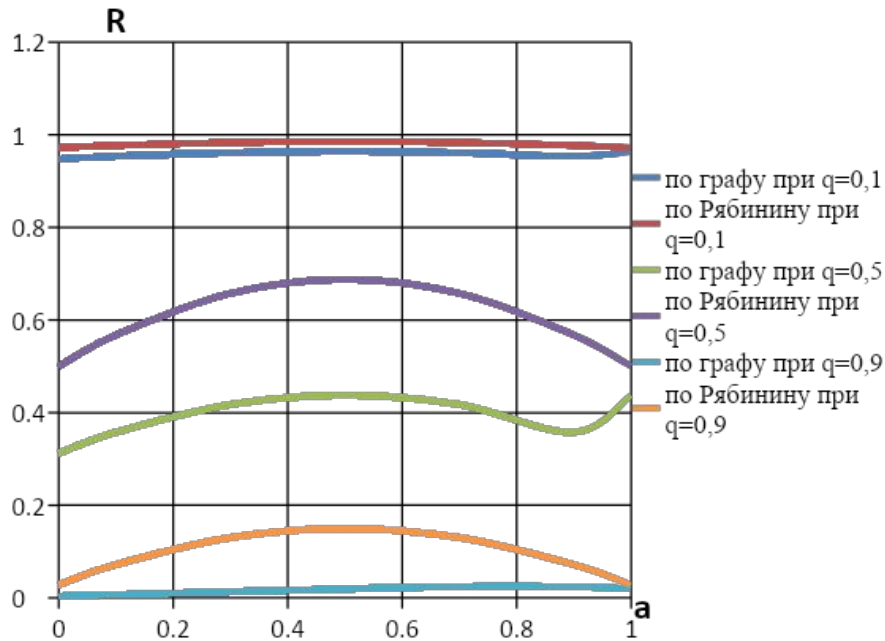
$$R(t) = P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) + P_6(t) + P_8(t) + P_{10}(t);$$

$$Q_{\text{лож_сраб}}(t) = P_l(t);$$

$$Q_{\text{скрыт_отказ}}(t) = P_5(t) + P_7(t) + P_9(t) + P_{13}(t) + P_{14}(t) + \\ + P_{17}(t) + P_{18}(t) + P_{20}(t) + P_{23}(t) + P_{24}(t) + P_{26}(t) + P_c(t)$$

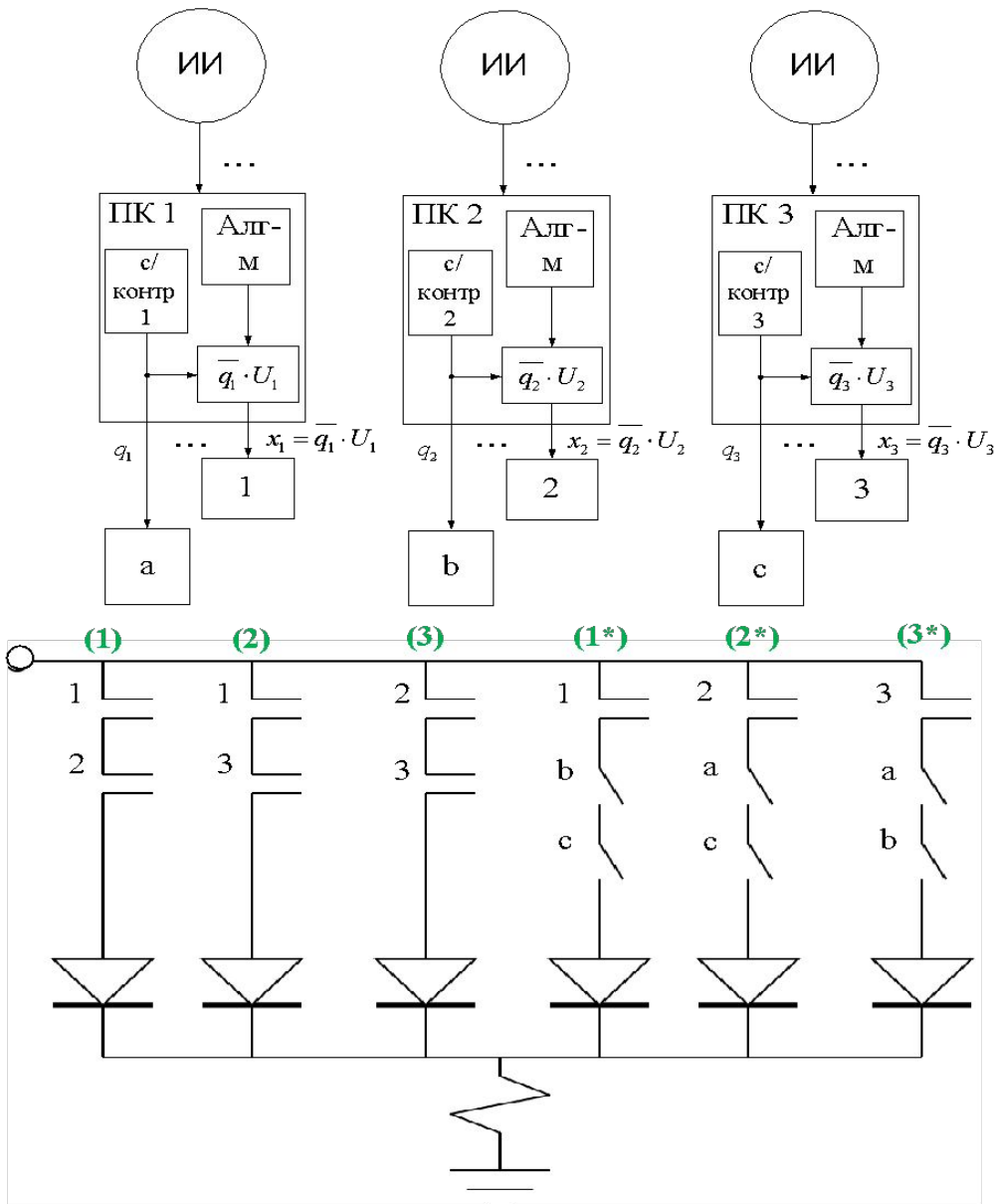
Графики зависимостей вероятности безотказной работы “R” и ложного срабатывания “Qл” от доли скрытых отказов “а” при различных значениях вероятности отказа “q” для результатов, полученных с использованием графа переходов и алгоритма Рябина для схемы «2 канал по «И» каждый и объединение их по «ИЛИ»»

(Результаты численных экспериментов)

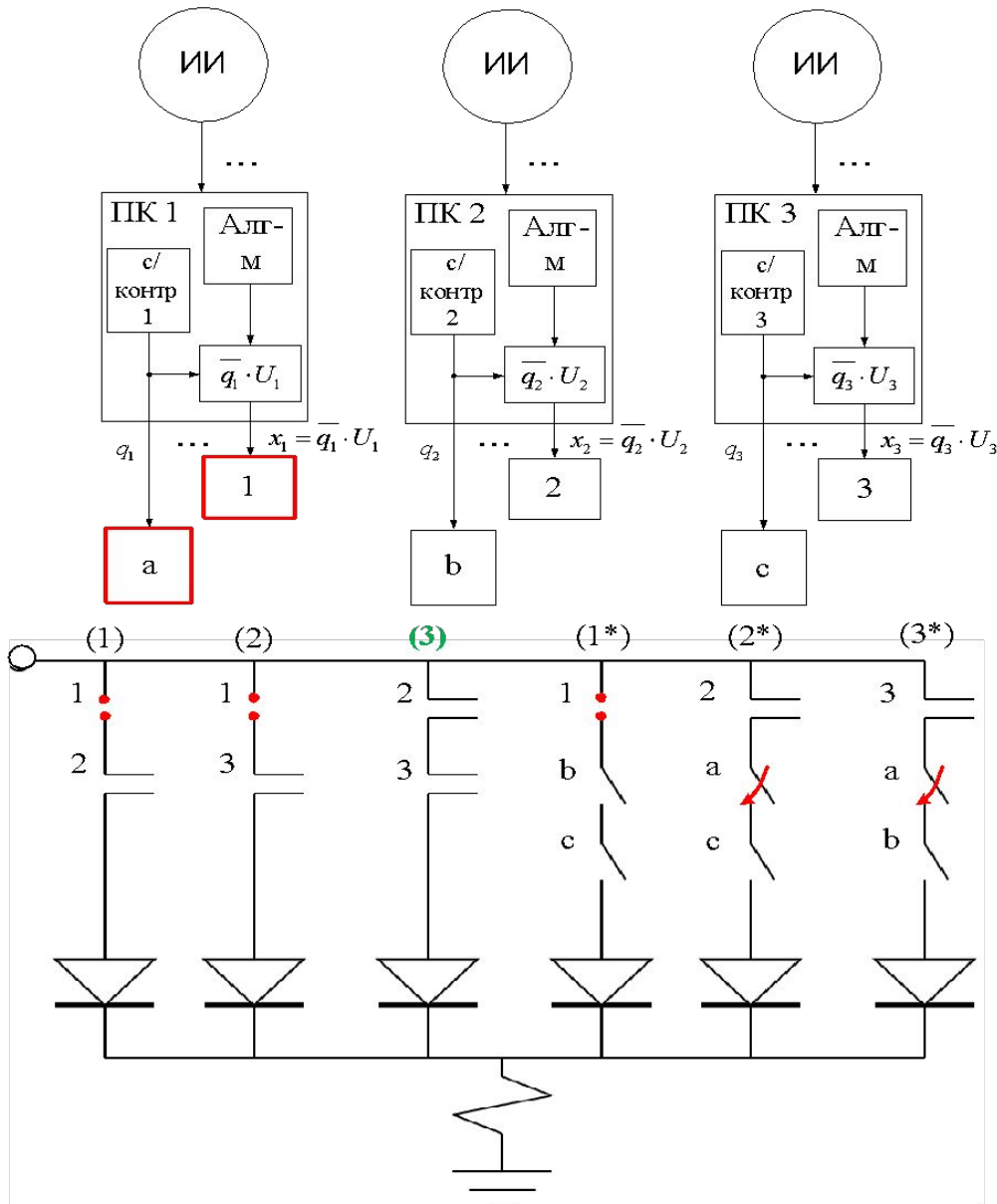


Для рассматриваемой структуры алгоритм И.А.Р. дает в целом неверные результаты (по «R», «Qл», «Qс»), приходится использовать граф деградации и решать уравнения Колмогорова.

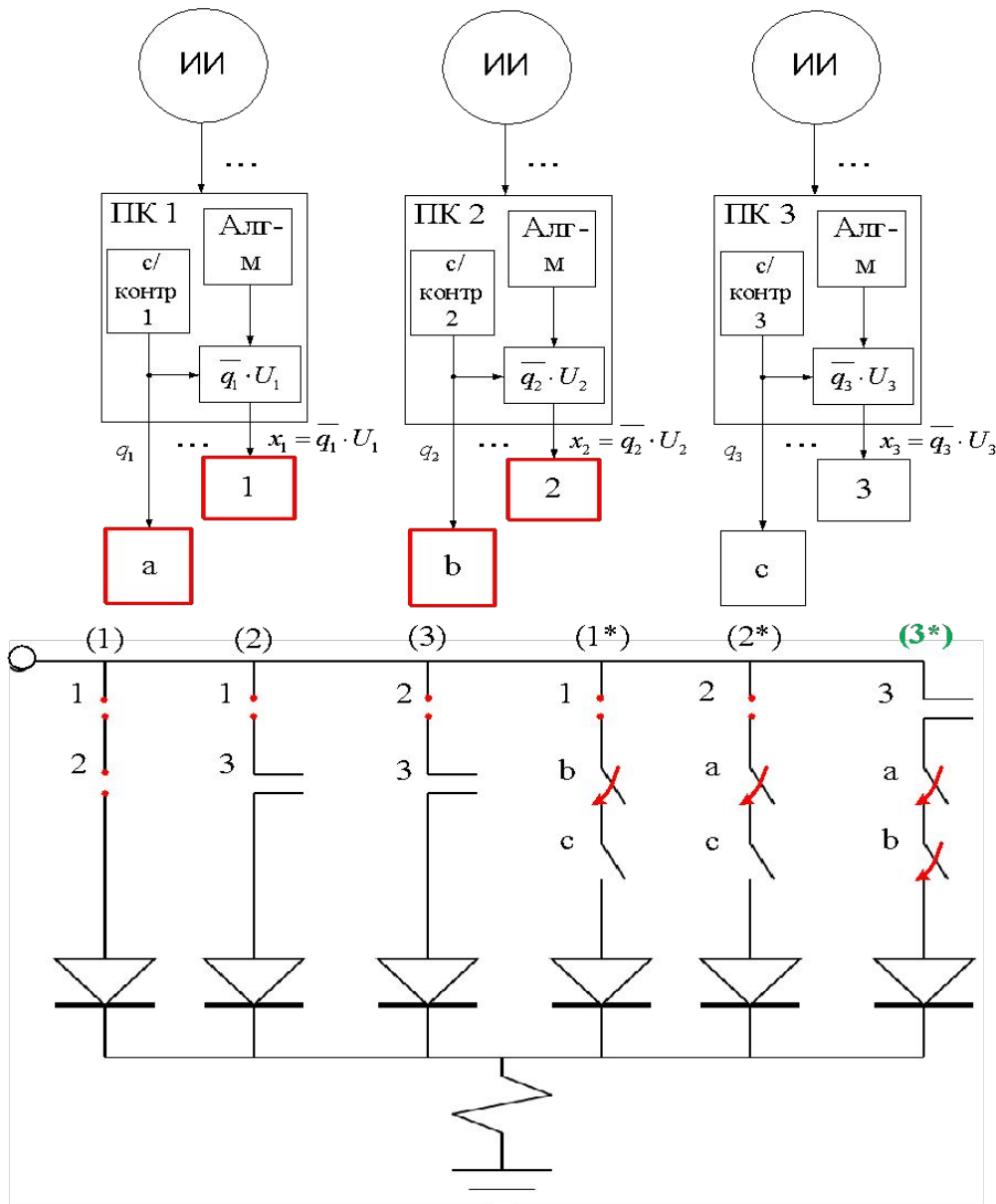
Трехканальная УСБ со схемой "2 из 3-х" с реконфигурацией восстанавливающего органа с работой на последнем канале



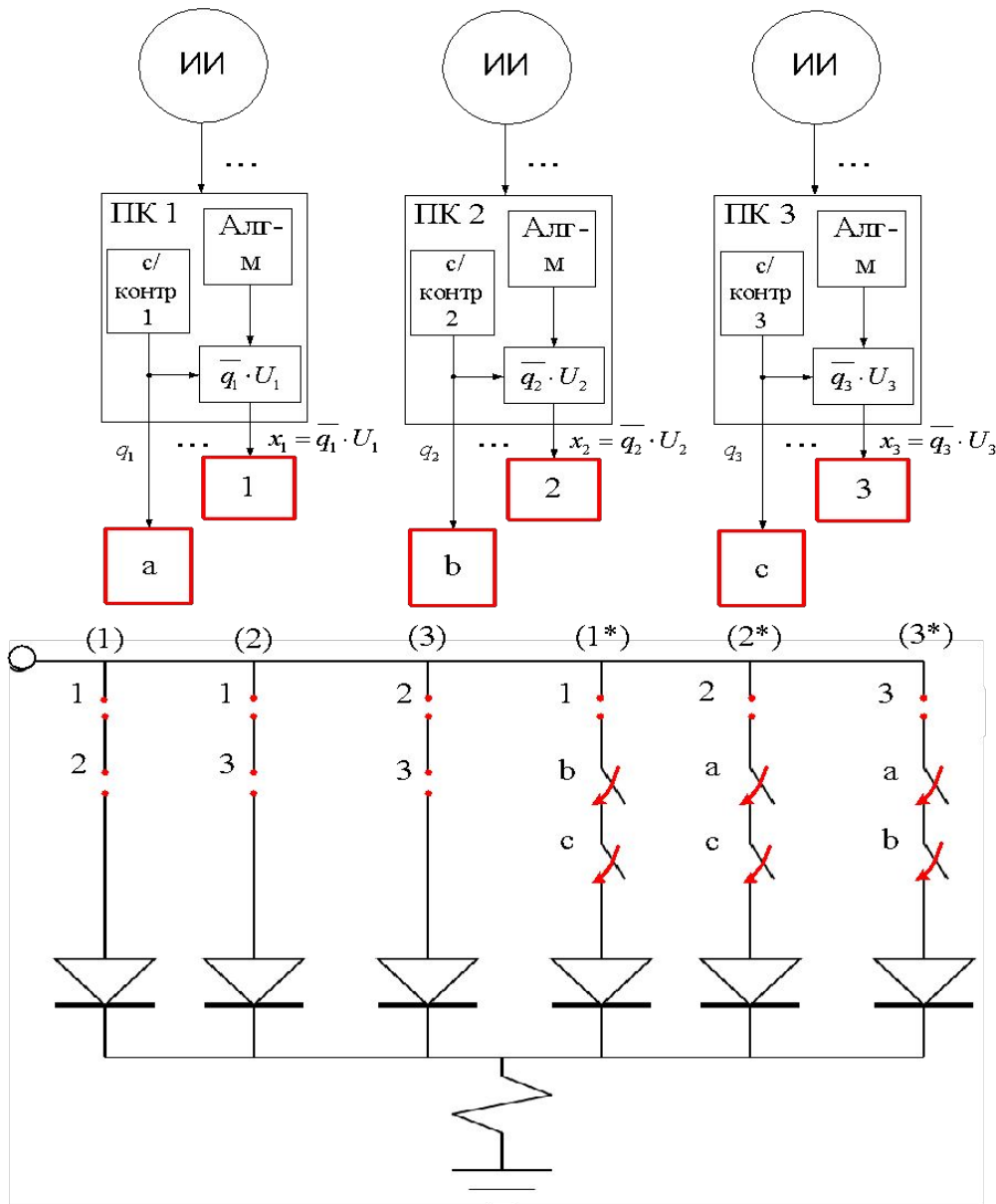
Трехканальная УСБ со схемой "2 из 3-х" с реконфигурацией восстанавливающего органа с работой на последнем канале



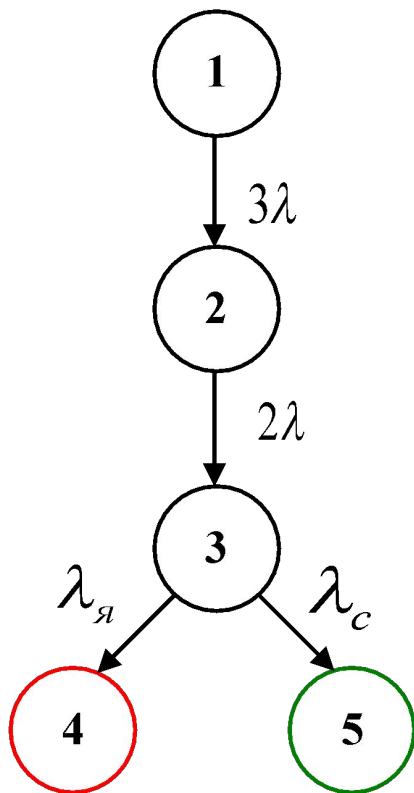
Трехканальная УСБ со схемой "2 из 3-х" с реконфигурацией восстанавливающего органа с работой на последнем канале



Трехканальная УСБ со схемой "2 из 3-х" с реконфигурированием восстанавливающего органа с работой на последнем канале



Уравнения А.Н. Колмогорова и их решение для схемы «2 из 3-х» с динамическим резервированием



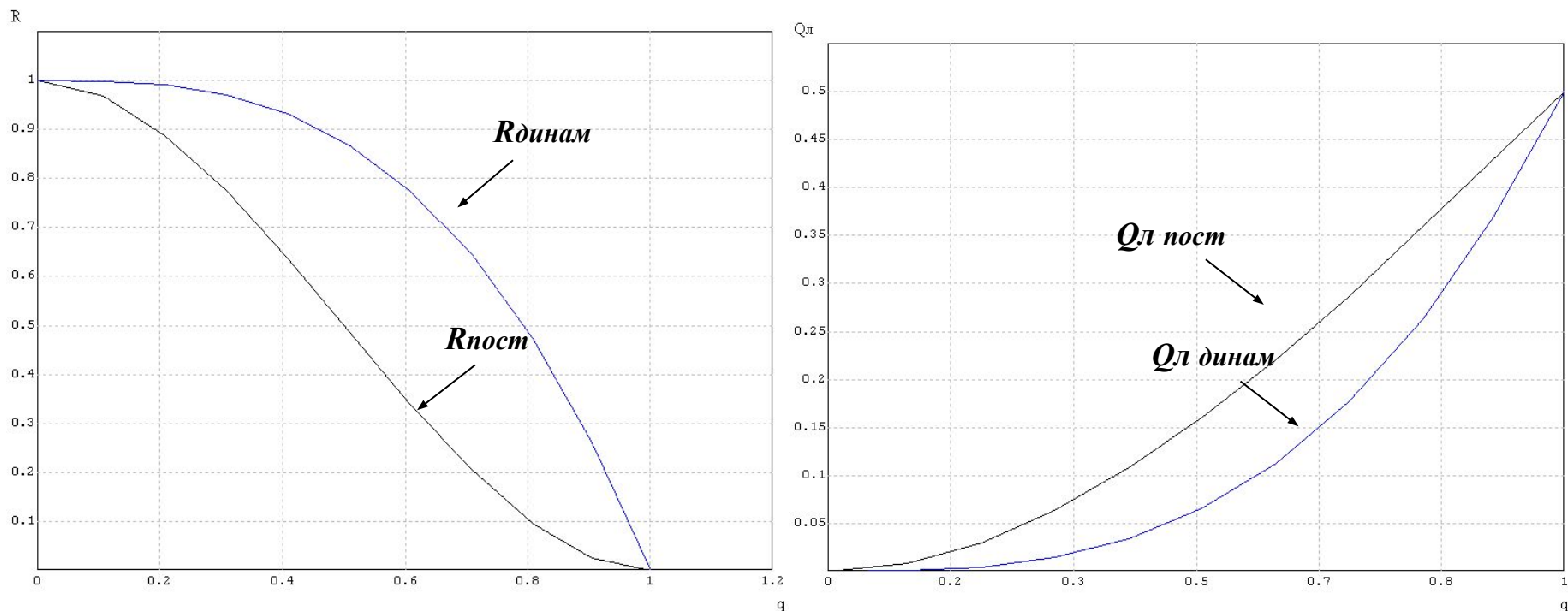
Система уравнений А.Н.Колмогорова

$$\begin{cases} P_1' = -3\lambda P_1; & P_1(0) = 1; \\ P_2' = 3\lambda P_1 - 2\lambda P_2; & P_2(0) = 0; \\ P_3' = 2\lambda P_2 - \lambda P_3; & P_3(0) = 0; \\ P_4' = \lambda_{я} P_3; & P_4(0) = 0; \\ P_5' = \lambda_{с} P_3; & P_5(0) = 0; \end{cases} \quad (16)$$

Решение системы уравнений (16)

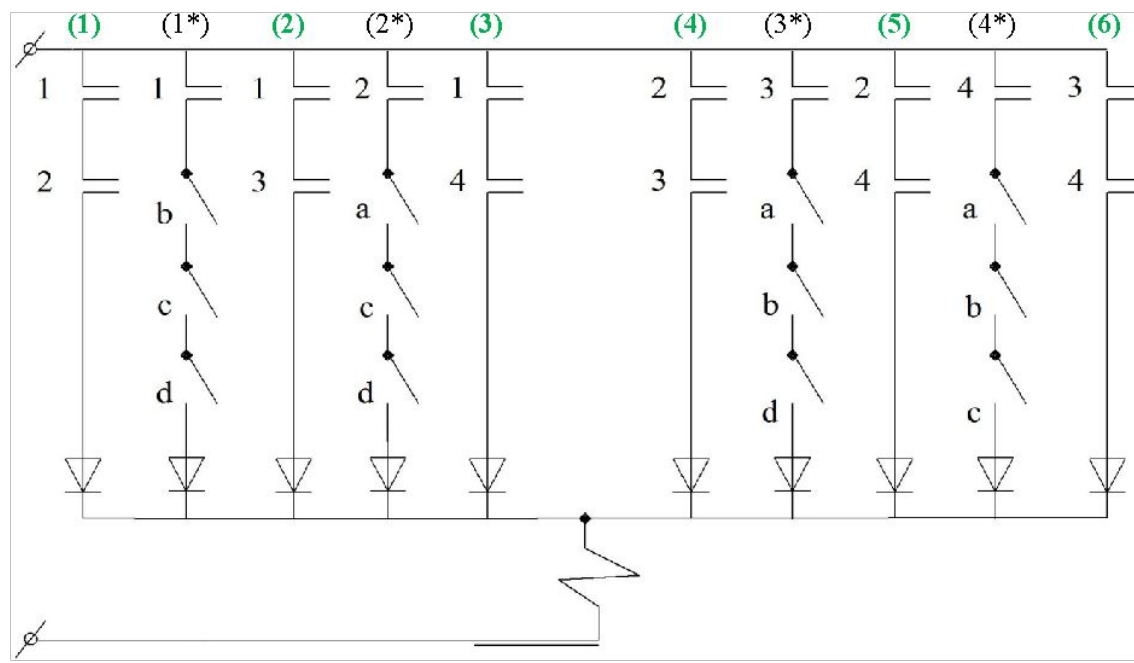
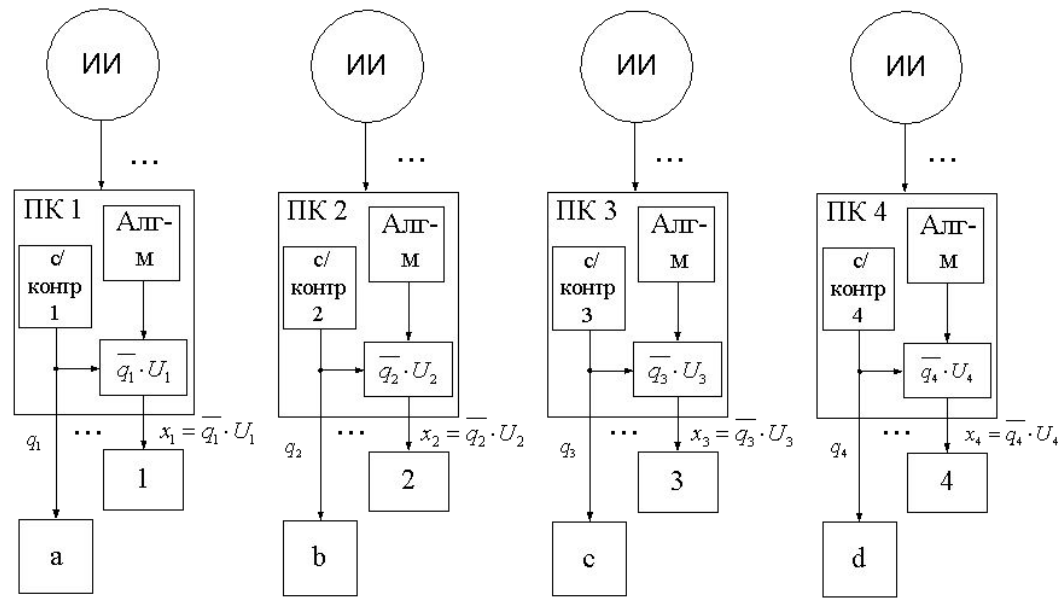
$$\begin{aligned} R(t) &= 3p - 3p^2 + p^3; \\ Q_n(t) &= (1-a)(1 - 3p + 3p^2 - p^3); \\ Q_a(t) &= 1 - R - Q; \end{aligned} \quad (17)$$

Сравнение результатов, полученных для схемы «2 из 3-х» с динамическим и с постоянным резервированием для вероятности безотказной работы “R” и ложного срабатывания “Qл” при различных значениях вероятности отказа “q”

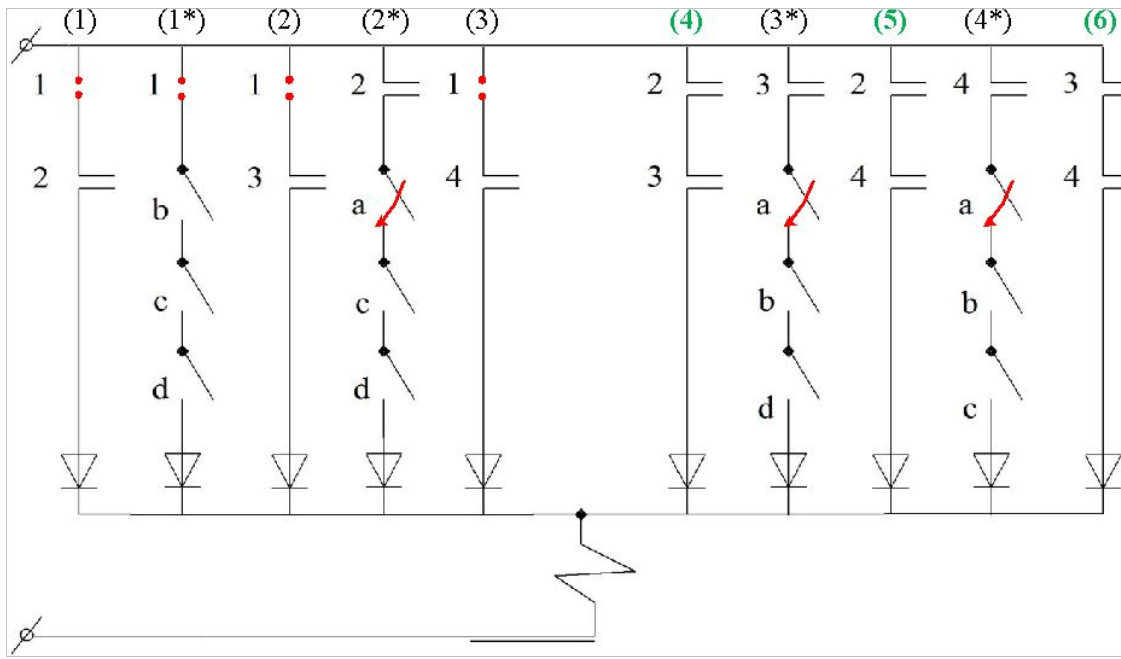
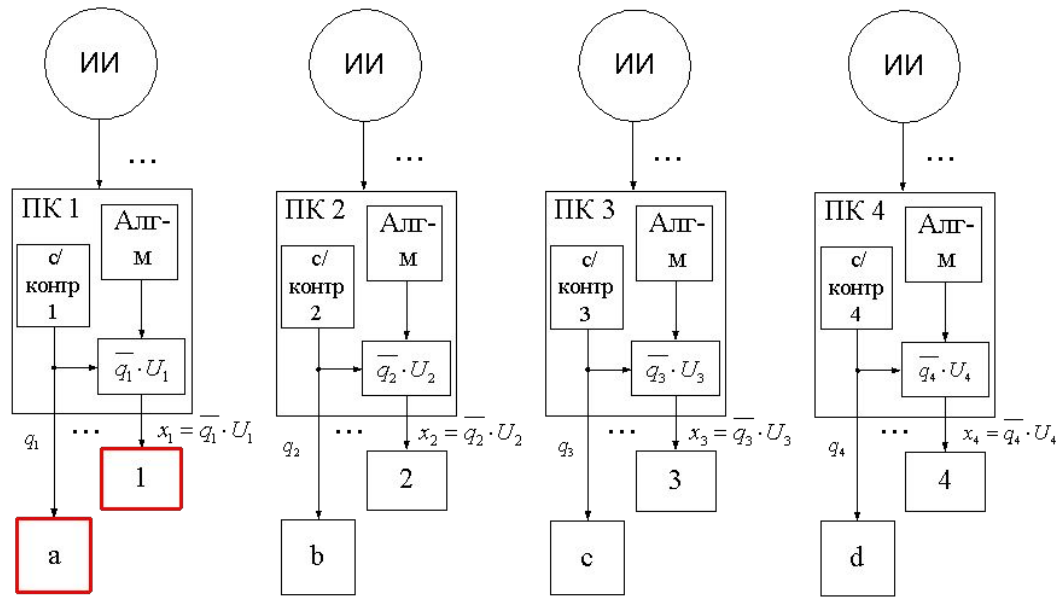


Динамическое резервирование с реконfigurацией до последнего канала дает ощутимый эффект в надежности.

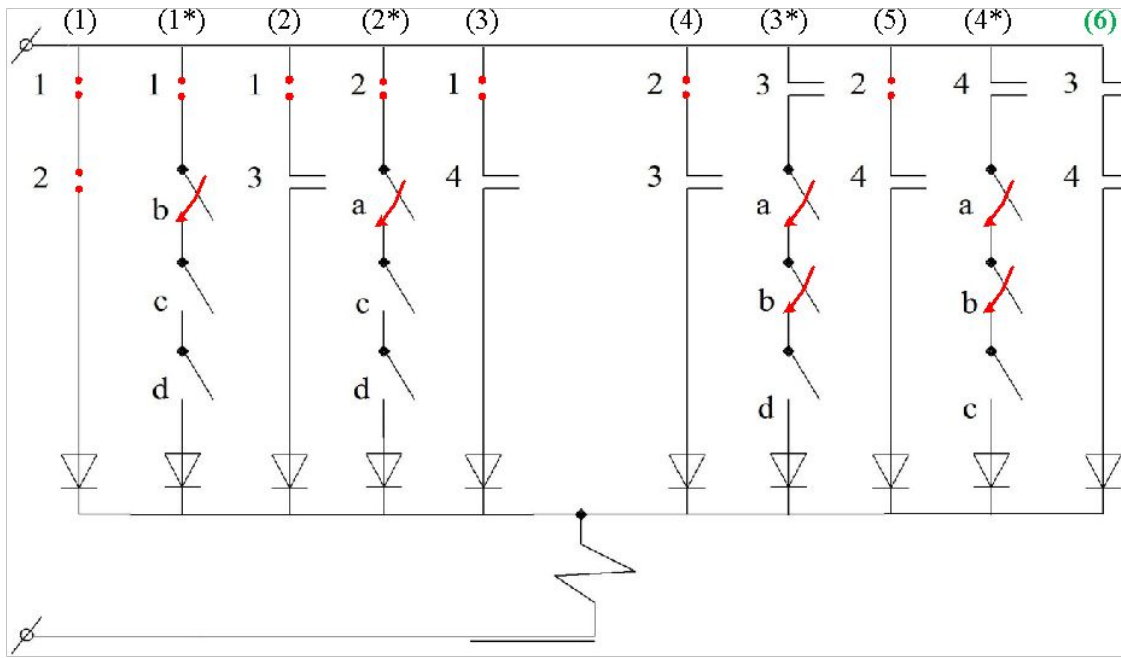
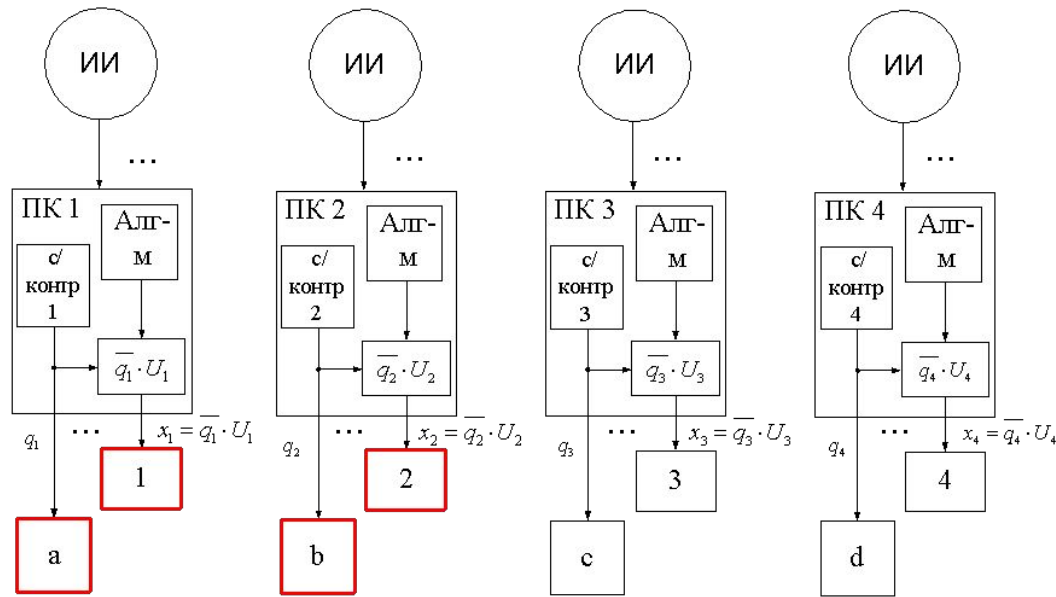
Четырехканальный УСВ со схемой 2 из 4-х с реконфигурацией восстанавливающего органа с работой на последнем канале



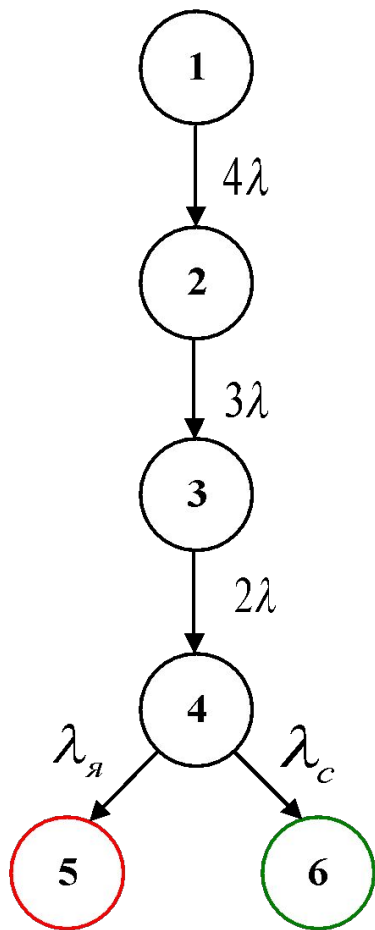
Четырехканальный УСВ со схемой 2 из 4-х с реконфигурацией восстанавливающего органа с работой на последнем канале



Четырехканальный УСВ со схемой 2 из 4-х с реконfigurацией восстанавливающего органа с работой на последнем канале



Составление уравнений А.Н. Колмогорова и их решение для схемы «2 из 4-х» с динамическим резервированием



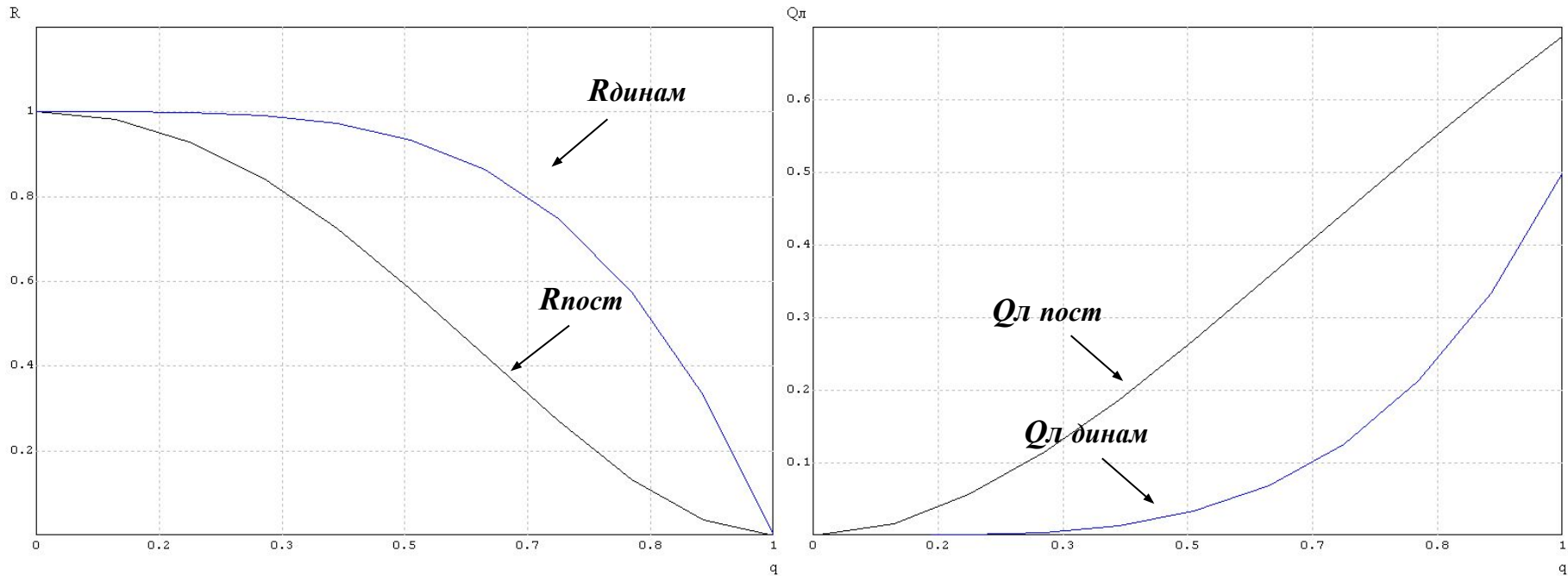
Система уравнений А.Н.Колмогорова

$$\left\{ \begin{array}{ll} P_1' = -4\lambda P_1; & P_1(0) = 1; \\ P_2' = 4\lambda P_1 - 3\lambda P_2; & P_2(0) = 0; \\ P_3' = 3\lambda P_2 - 2\lambda P_3; & P_3(0) = 0; \\ P_4' = 2\lambda P_3 - \lambda P_4; & P_4(0) = 0; \\ P_5' = \lambda_{я} P_4; & P_5(0) = 0; \\ P_6' = \lambda_{с} P_4; & P_6(0) = 0; \end{array} \right. \quad (18)$$

Решение системы уравнений (18)

$$\begin{aligned} R(t) &= -p^4 + 4p^3 - 6p^2 + 4p; \\ Q_a(t) &= (1-a)(1 - 4p + 6p^2 - 4p^3 + p^4); \\ Q_c(t) &= 1 - R - Q; \end{aligned} \quad (19)$$

Сравнение результатов, полученных для схемы «2 из 4-х» с динамическим и с постоянным резервированием для вероятности безотказной работы “R” и ложного срабатывания “Qл” при различных значениях вероятности отказа “q”



Динамическое резервирование с реконfigurацией до последнего канала дает ощутимый эффект в надежности.

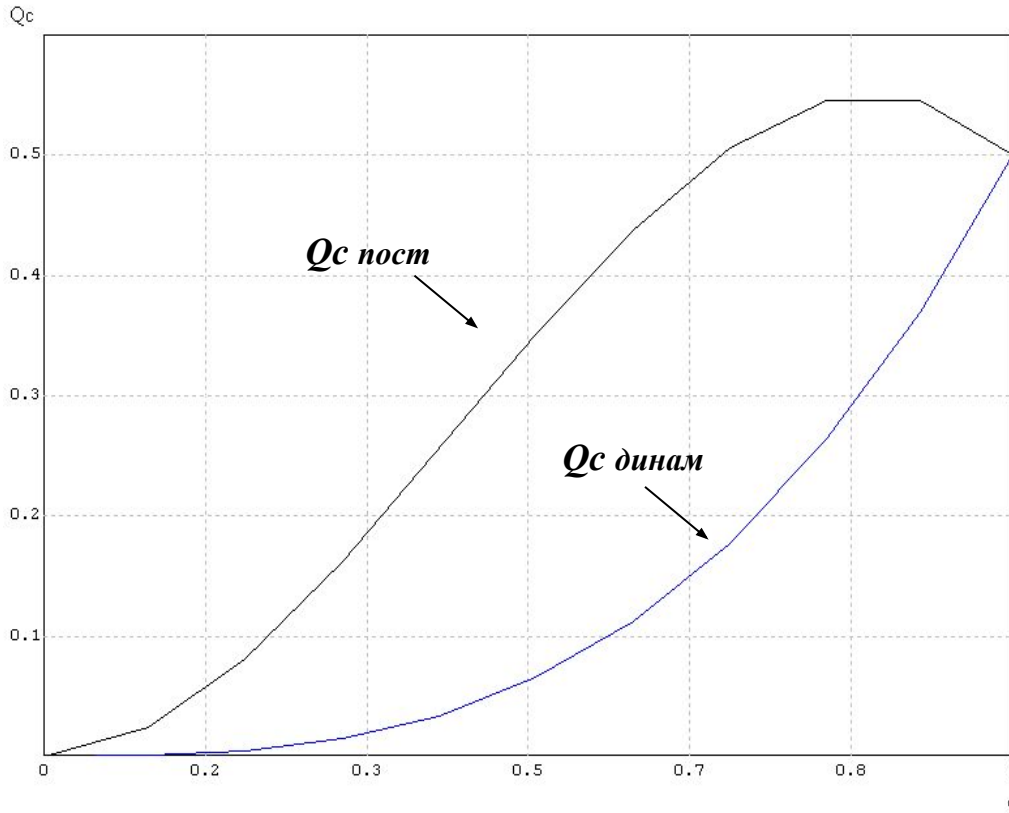
Заключение

1. Разработаны математические модели и методы оценки надежности и отказоустойчивости невосстанавливаемых многоканальных управляющих систем безопасности (УСБ) и аварийной защиты (САЗ) как систем из элементов с тремя несовместными состояниями и разнообразием возможных вариантов последовательностей возникновения отказов.
2. Исследована возможность применения алгоритма И.А. Рябина для оценки надежности трехканальных и четырехканальных УСБ и САЗ.
3. Для всех рассматриваемых принципов резервирования получены аналитические выражения для вероятностей нахождения системы в работоспособном состоянии, в состоянии ложного (излишнего) срабатывания и состоянии скрытого отказа с установлением их зависимостей от вероятности отказа одиночного канала и соотношения между явными и скрытыми отказами канала.
4. Исследованы характеристики надежности многоканальных УСБ и САЗ с динамическим резервированием с перестройкой алгоритмов работы восстанавливающих органов при накоплении числа отказавших каналов для обеспечения функционирования на последнем оставшемся в строю канале (принцип «каннибализации» или «элегантной деградации») и их сравнение со структурами «2 из 3-х» и «2 из 4-х» с постоянным резервированием.
5. Разработано и всесторонне апробировано программное обеспечение, реализованное в среде отечественного Программного комплекса «МВТУ 3.5».

Спасибо за внимание.

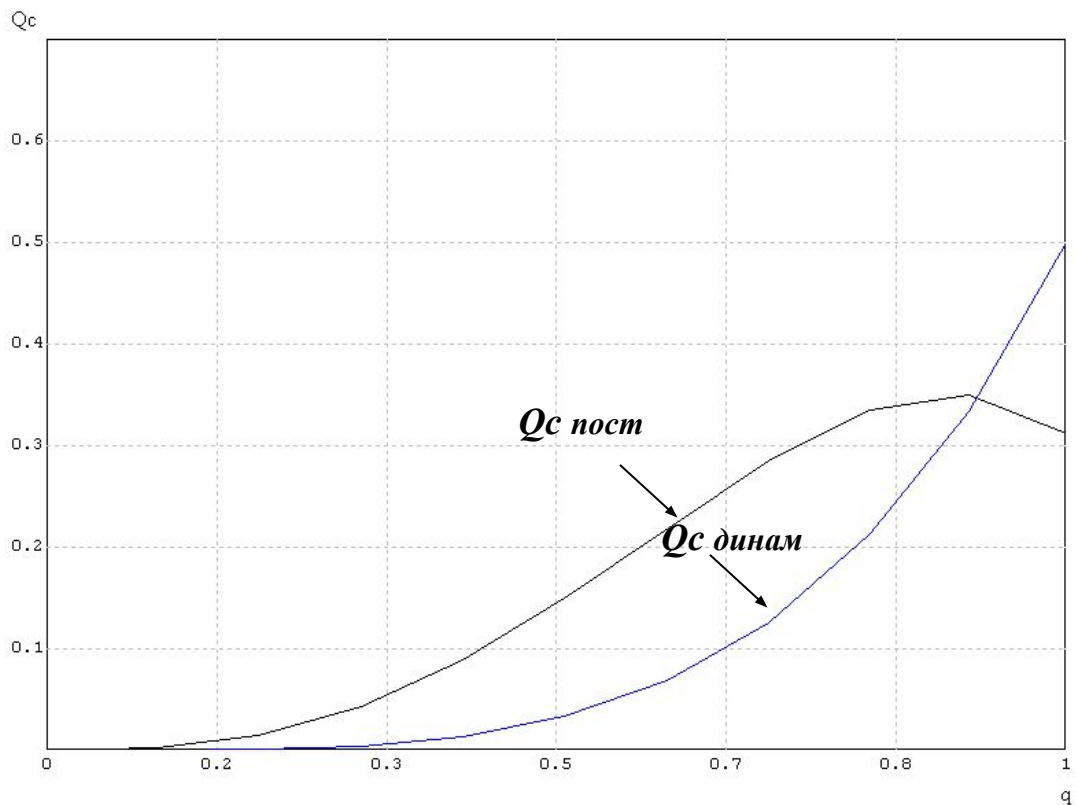
Вопросы ?

Сравнение результатов, полученных для схемы «2 из 3-х» с динамическим и с постоянным резервированием для вероятности нахождения в скрытом отказе « Q_c » при различных значениях вероятности отказа « q »



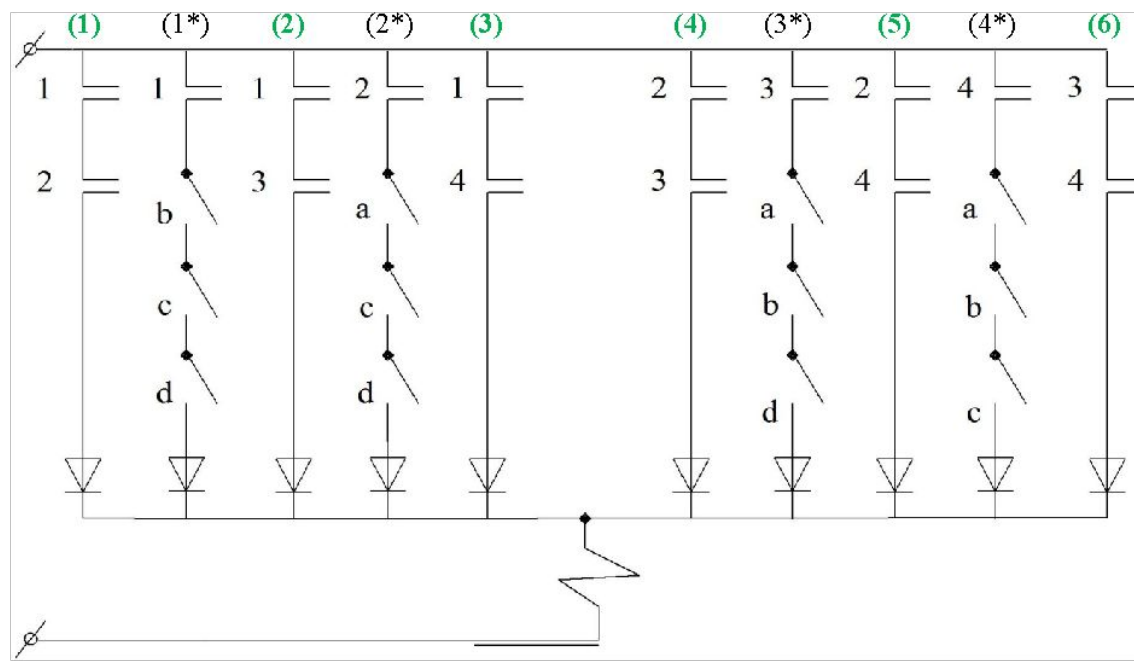
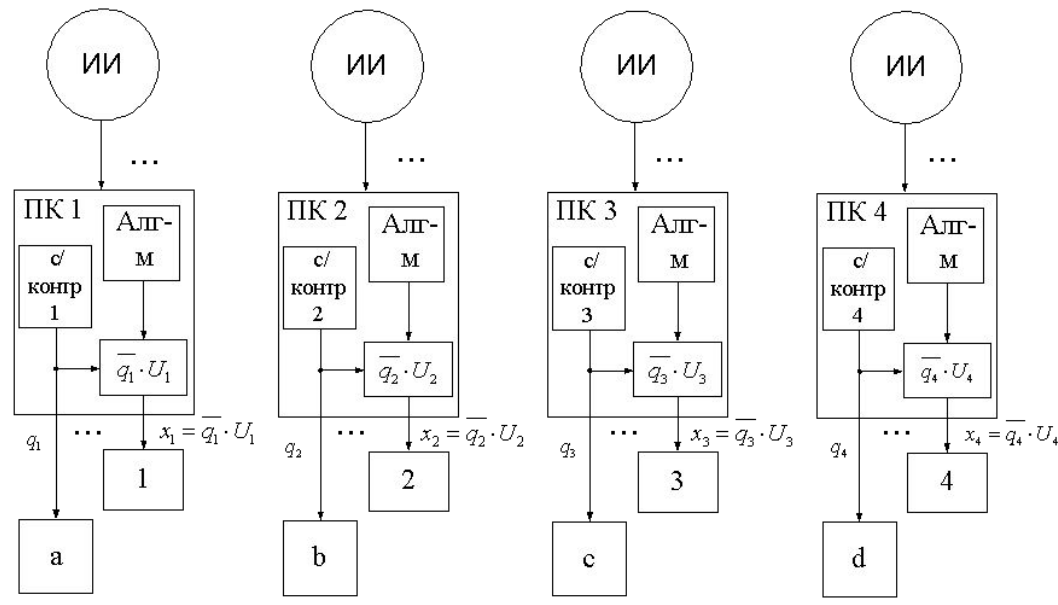
Обнаружен неожиданный и необъяснимый эффект экстремума на кривой « Q_c пост» от « q ».

Сравнение результатов, полученных для схемы «2 из 4-х» с динамическим и с постоянным резервированием для вероятности нахождения в скрытом отказе “ Q_c ” при различных значениях вероятности отказа “ q ”

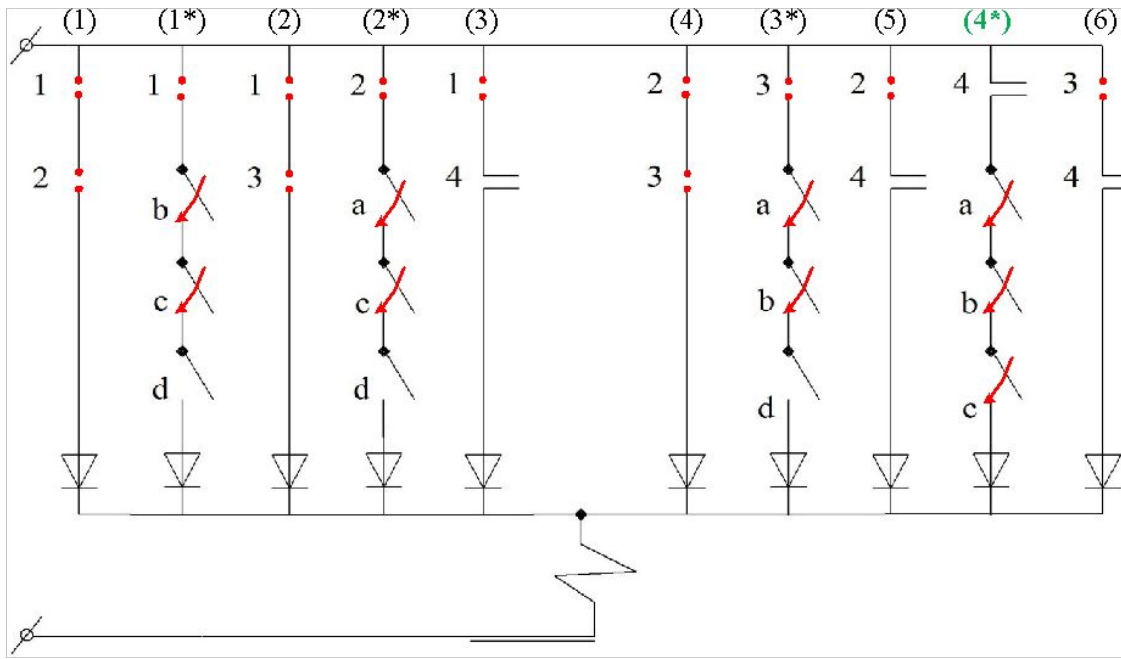
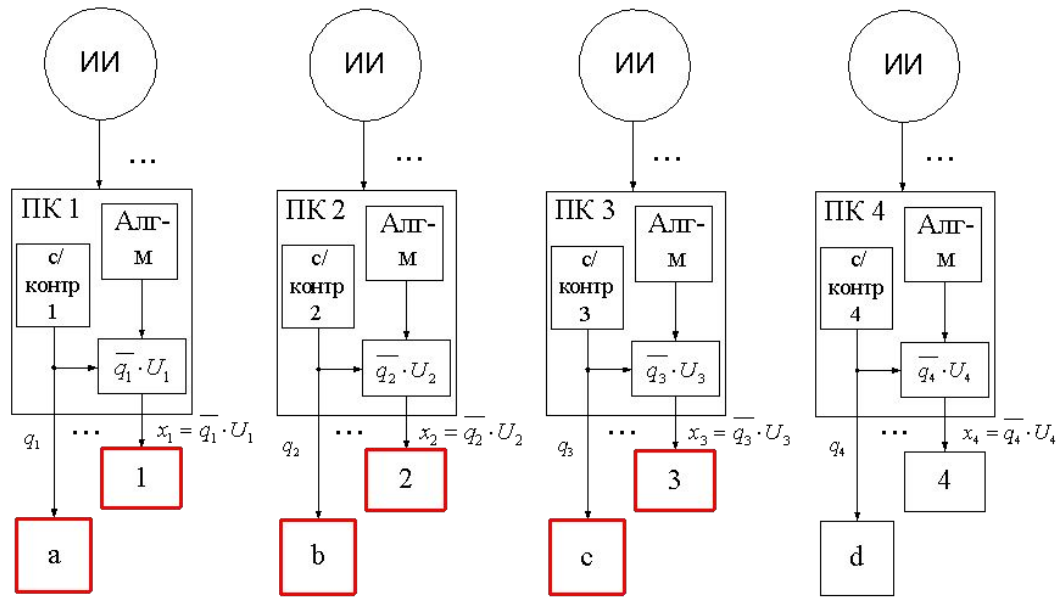


Для схемы «2 из 4-х» наблюдается тот же неожиданный и необъяснимый эффект экстремума на кривой « Q_c пост» от « q », что и для схемы «2 из 3-х».

Четырехканальный УСВ со схемой 2 из 4-х с реконфигурацией восстанавливающего органа с работой на последнем канале



Четырехканальный УСВ со схемой 2 из 4-х с реконfigurацией восстанавливающего органа с работой на последнем канале



Четырехканальный УСВ со схемой 2 из 4-х с реконfigurацией восстанавливающего органа с работой на последнем канале

