

Лекция № 4.

Расчёт показателей надёжности объектов теплоэнергетики при проектировании на основе теории случайных процессов



Основные положения теории случайных процессов

Вершина графа

Дуга графа

Случайный процесс - такая функция, которая при любом фиксированном значении непрерывного аргумента является случайной величиной.

Основные положения:

- ✓ Число состояний объекта конечно.
- ✓ Состояния несовместны между собой.
- ✓ Переход из состояния в состояние осуществляется за конечный промежуток времени и характеризуется вероятностью перехода p_{ij}



$$\sum_{i=1}^n p_i(t) = 1; \quad i = 1, 2, \dots, n;$$

$$p_{ij}(\Delta t) = \lambda_{ij} \Delta t; \quad q_{ij}(\Delta t) = 1 - p_{ij}(\Delta t);$$

$$p_i(\Delta t) + q_i(\Delta t) = 1.$$

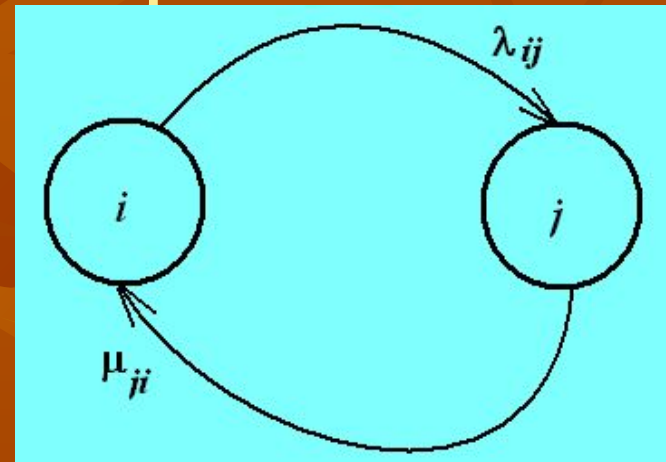


Расчёт показателей надёжности проектируемого объекта

Теоретические основы расчёта

Условия применения теории марковских случайных процессов:

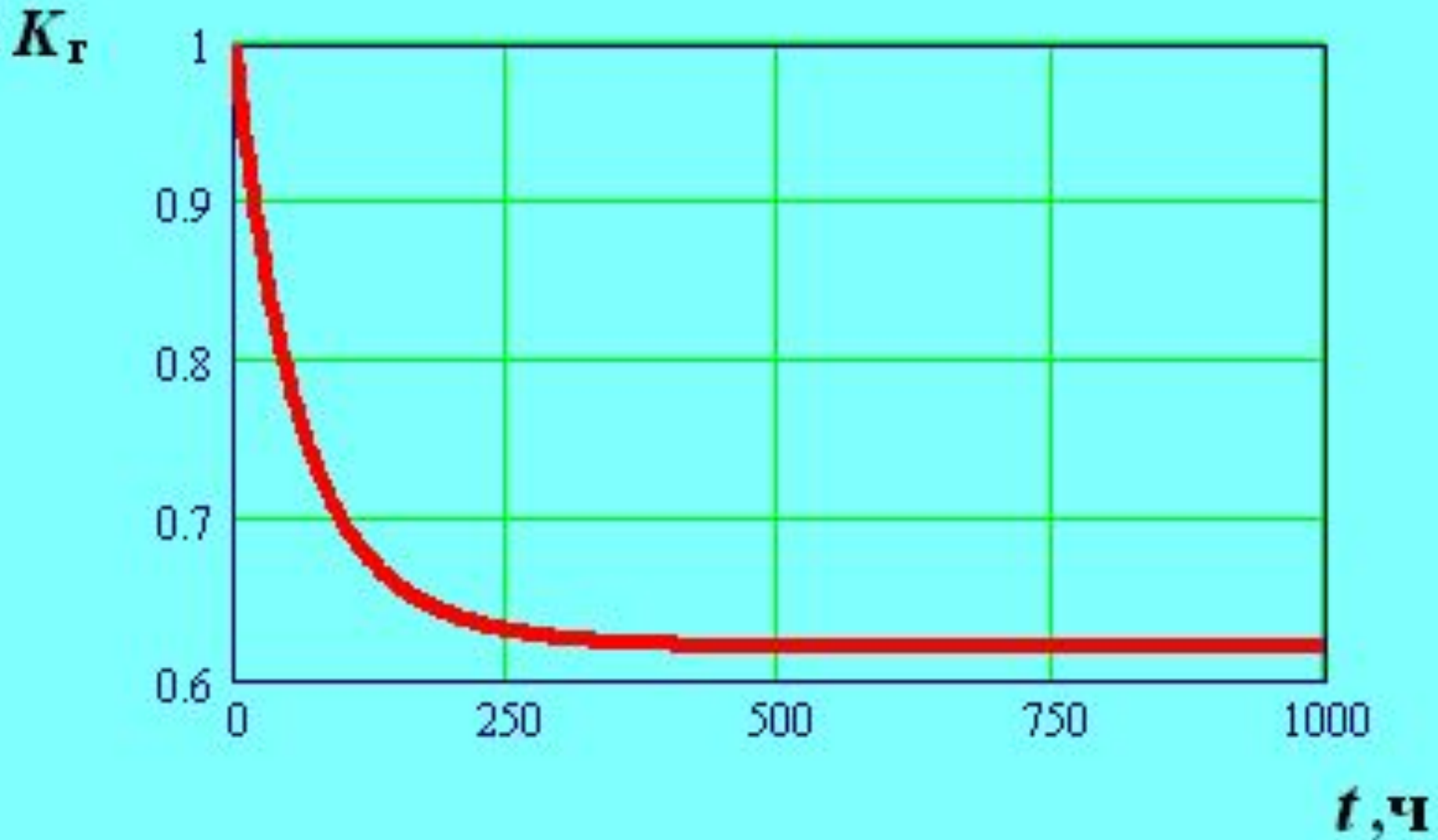
- экспоненциальность потока событий;
- переход из состояния в состояние занимает конечный интервал времени;
- интенсивность переходов не зависит от момента его начала;
- сумма вероятностей нахождения в различных состояниях в любой момент времени равна единице.



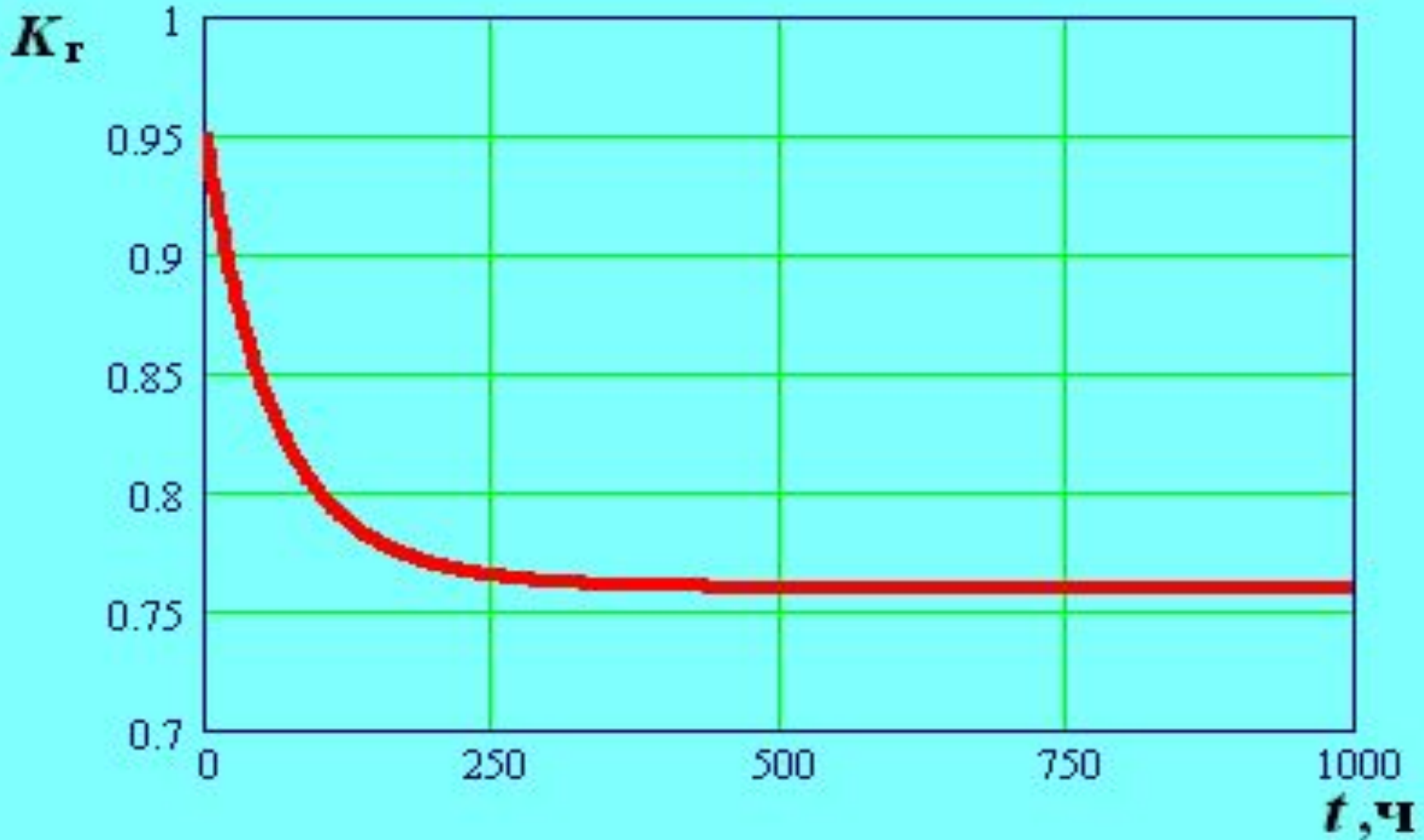
$$\begin{cases} \frac{dp_i}{dt} = -\lambda_{ij}p_i + \mu_{ji}p_j; \\ \frac{dp_j}{dt} = -\mu_{ji}p_j + \lambda_{ij}p_i; \end{cases}$$

Система уравнений
Колмогорова

Модель расчёта надёжности объектов при горячем резервировании элементов

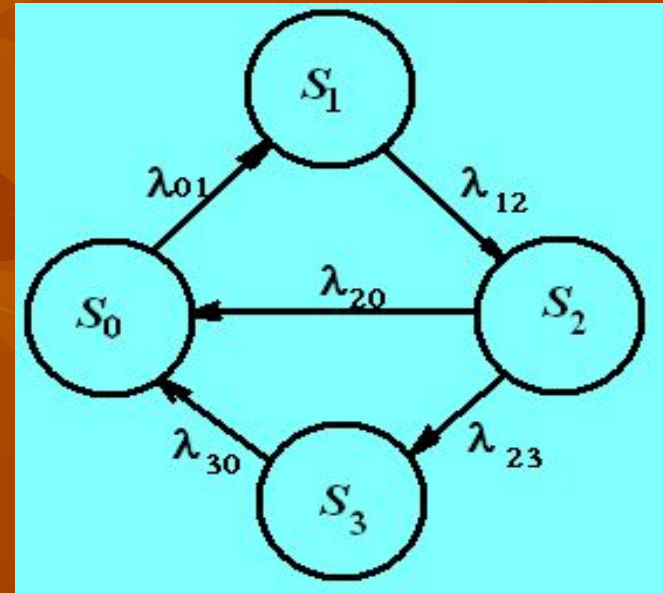


Расчёт надёжности объектов при холодном резервировании элементов



Математическая модель надёжности объекта

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dp_0}{dt} = -\lambda_{01}p_0 + \lambda_{20}p_2 + \lambda_{30}p_3; \\ \frac{dp_1}{dt} = -\lambda_{12}p_1 + \lambda_{01}p_0; \\ \frac{dp_2}{dt} = -\lambda_{20}p_2 - \lambda_{23}p_2 + \lambda_{12}p_1; \\ \frac{dp_3}{dt} = -\lambda_{30}p_3 + \lambda_{23}p_2; \end{array} \right.$$



S_0 – работоспособное состояние;

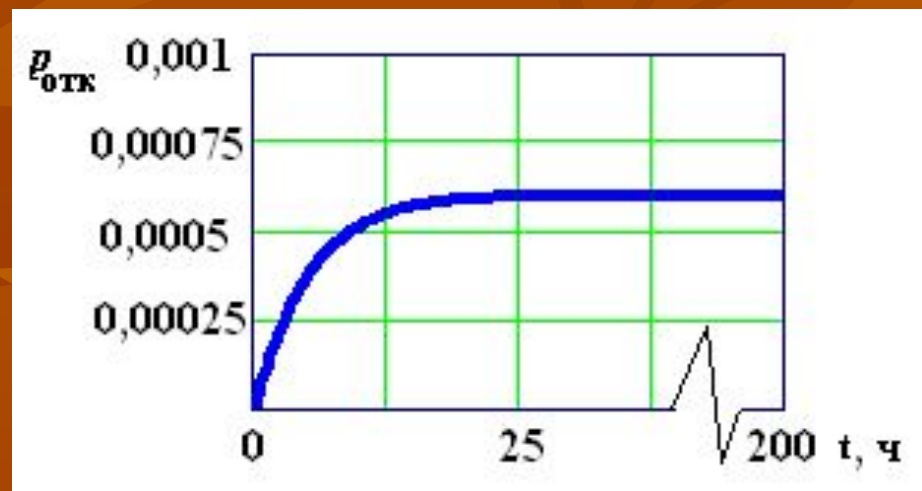
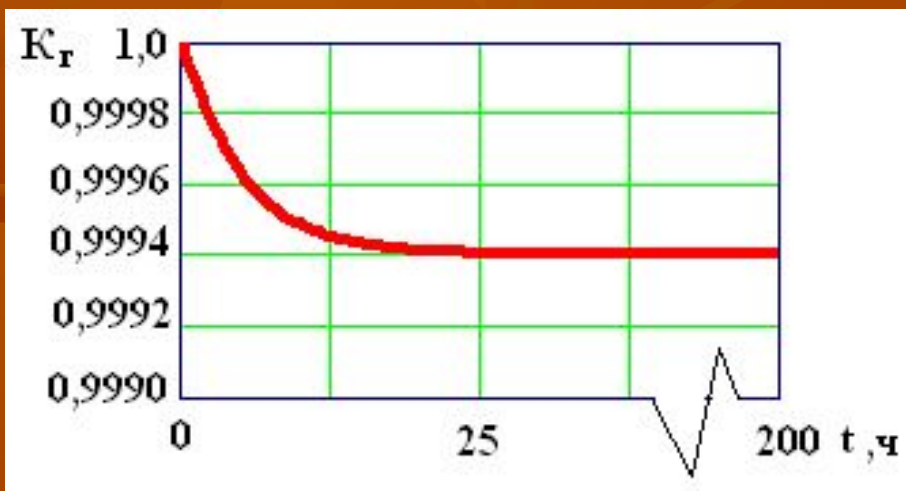
S_1 – состояние скрытого отказа;

S_2 – состояние восстановления после отказа;

S_3 – состояние готовности к работе.



Результаты оценки надёжности объекта



Результаты получены при следующей исходной информации:

$\lambda_{01} = 0,0001$ — интенсивность отказа, 1/ч;

$\lambda_{12} = 10$ — интенсивность обнаружения отказа, 1/ч;

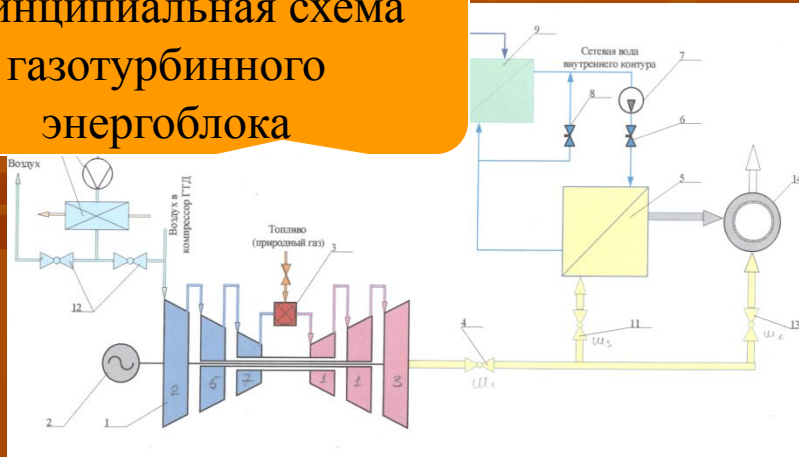
$\lambda_{20} = \lambda_{23} = 0,1$ — интенсивность восстановления, 1/ч;

$\lambda_{30} = 2$ — интенсивность приготовления к действию, 1/ч;

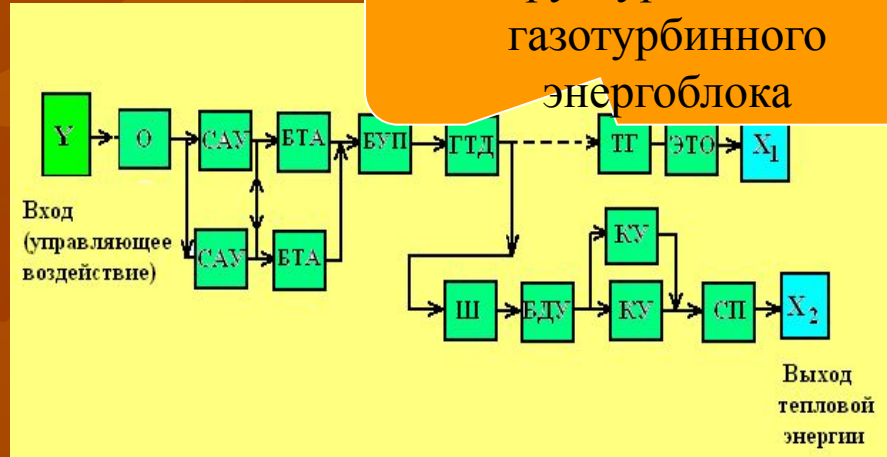
Расчёт показателей надёжности проектируемого объекта

Математическая модель надёжности установки как структурно сложного объекта

Принципиальная схема газотурбинного энергоблока

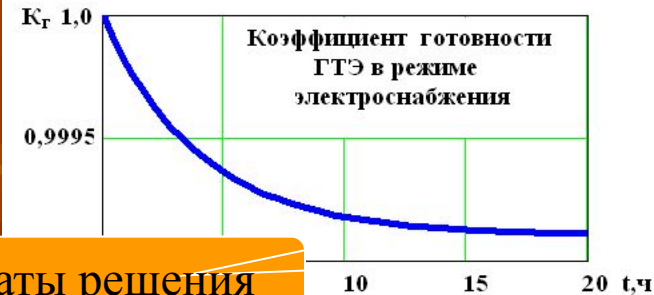


Структурная схема газотурбинного энергоблока



$$D(t, p) := \begin{cases} - (2 \cdot \lambda_0 + 2 \cdot \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + 2 \cdot \lambda_6 + \lambda_7 + \lambda_{op}) \cdot p_0 + \mu_0 \cdot p_1 + \mu_1 \cdot p_2 + (\mu_2 + \mu_3 + \mu_4 + \mu_5 + \mu_7 + \mu_{op}) \cdot p_4 + \mu_6 \cdot p_3 \\ - (\lambda_0 + \mu_0) \cdot p_1 + 2 \cdot \lambda_0 \cdot p_0 + 2 \cdot \mu_0 \cdot p_4 \\ - (\lambda_1 + \mu_1) \cdot p_2 + 2 \cdot \lambda_1 \cdot p_0 + 2 \cdot \mu_1 \cdot p_4 \\ - (\lambda_6 + \mu_6) \cdot p_3 + 2 \cdot \lambda_6 \cdot p_0 + 2 \cdot \mu_6 \cdot p_4 \\ (\mu_3 + \mu_4 + \mu_5 + 2 \cdot \mu_6 + \mu_7 + \mu_{op}) \cdot p_4 + \lambda_0 \cdot p_1 + \lambda_1 \cdot p_2 + (\lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_7 + \lambda_{op}) \cdot p_0 + \lambda_6 \cdot p_3 \end{cases}$$

Система уравнений Колмогорова



Результаты решения

Интерфейс программы расчёта ПН с среде Mathcad

The screenshot displays the Mathcad software interface. The title bar reads "Mathcad - [ПР №4_2004]". The menu bar includes "File", "Edit", "View", "Insert", "Format", "Tools", "Symbolics", "Window", and "Help". The toolbar contains various icons for file operations, editing, and calculation. The status bar at the bottom shows "Press F1 for help.", "AUTO", "NUM", "Page 1", and the system tray with icons for "пуск", "Total Commander 6...", "Расчёт показател...", "Мультипликация", and "Mathcad - [ПР №4_...]" along with the time "16:35".

Практическая работа №4

"Расчёт коэффициента готовности энергоблока"

Исходная информация: - принципиальная схема энергоблока;
- средние наработки до отказа и среднее время восстановления элементов после отказа.

Часть 1. Моделируется ситуация: оба котлоагрегата подключены к главному паропроводу. Расход пара на турбоагрегат может быть обеспечен одним котлоагрегатом при его номинальной нагрузке. Это позволяет рассматривать один из котлоагрегатов, как находящийся в в нагруженном резерве

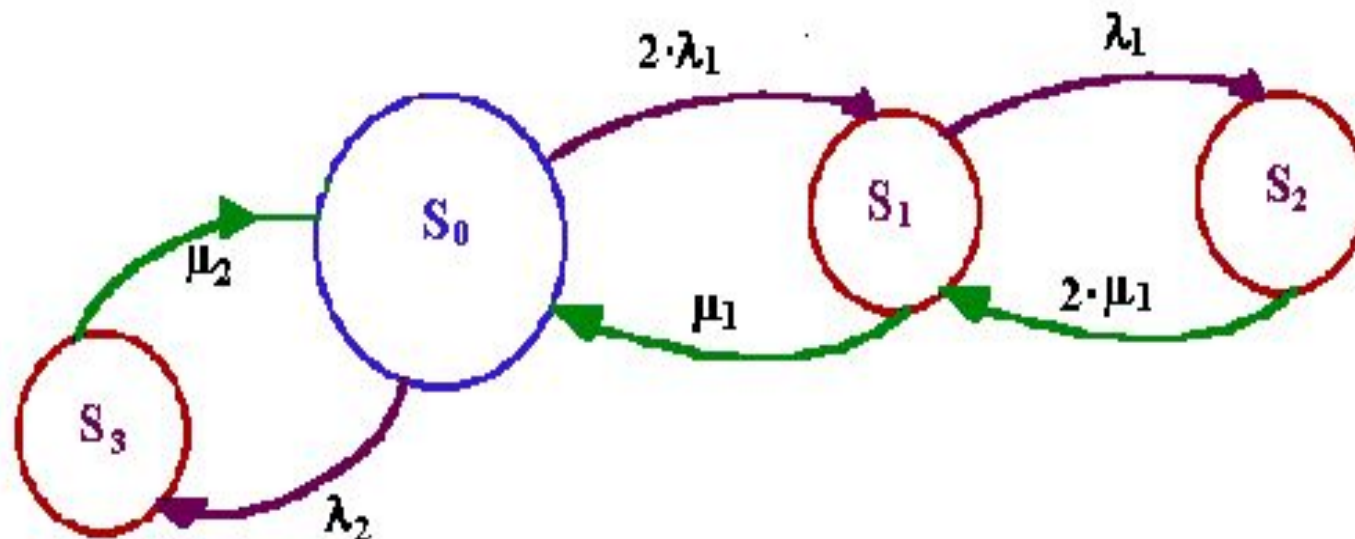
Принципиальная схема энергоблока:

```
graph LR; In(( )) --- B1[Котлоагрегат №1]; In --- B2[Котлоагрегат №2]; B1 --- T[Турбоагрегат]; B2 --- T; T --- Out(( ))
```

The diagram illustrates a parallel configuration of two boiler units, labeled "Котлоагрегат №1" and "Котлоагрегат №2", which feed into a single turbine unit labeled "Турбоагрегат". A plus sign (+) is positioned to the right of the turbine unit, indicating a sum or addition.

Присвоение исходной информации

Граф состояний энергоблока: *вариант горячего (нагруженного) резерва*



Состояния энергоблока: S_0 - работоспособное состояние энергоблока;
 S_1 - отказ одного котлоагрегата;
 S_2 - отказ двух котлоагрегатов;
 S_3 - отказ турбоагрегата.

Среднее время безотказной работы (ч): $\tau_1 := 4500$ $\tau_2 := 5000$ +

Среднее время восстановления (ч): $\tau_{v1} := 1000$ $\tau_{v2} := 650$

Задание начальных условий

Интенсивности переходов:

$$\lambda_1 := \frac{1}{\tau_1} \quad \lambda_2 := \frac{1}{\tau_2}$$

$$\mu_1 := \frac{1}{\tau_{v1}} \quad \mu_2 := \frac{1}{\tau_{v2}}$$

$$j := 0..3$$

$$p := \begin{pmatrix} 0.4 \\ 0 \\ 0.6 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Вектор p содержит начальные значения вероятностей нахождения объекта в каждом из четырёх состояний.
(Сумма всех начальных значений должна быть равна единице.)

$$\sum_j p_j = 1$$

$$Z := \text{rkfixed}(p, 0, 2000, 500, D)$$

$$K := Z_{500,1}$$

$$n := 0.. \text{rows}(Z) - 1$$

$$\lambda_1 = 2.222 \times 10^{-4} \quad \lambda_2 = 2 \times 10^{-4}$$

$$\mu_1 = 1 \times 10^{-3} \quad \mu_2 = 1.538 \times 10^{-3}$$

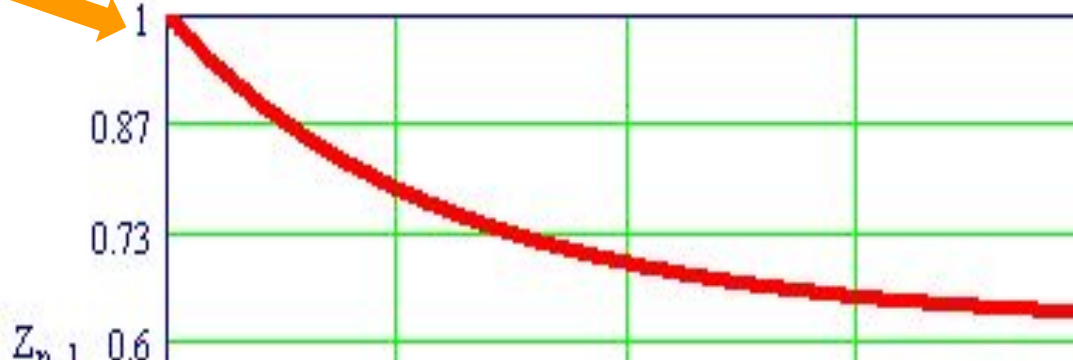
+

$$D(t,p) := \begin{bmatrix} -(2 \cdot \lambda_1 \cdot p_0) + \mu_1 \cdot p_1 - \lambda_2 \cdot p_0 + \mu_2 \cdot p_3 \\ 2 \cdot p_0 \cdot \lambda_1 - [(\mu_1 + \lambda_1) p_1] + 2 \cdot \mu_1 \cdot p_2 \\ -2 \cdot \mu_1 \cdot p_2 + \lambda_1 \cdot p_1 \\ -\mu_2 \cdot p_3 + \lambda_2 \cdot p_0 \end{bmatrix}$$

D - матрица значений первых производных.
Z - матрица результатов решения системы дифференциальных уравнений, столбцы которой содержат значения искомых функций.

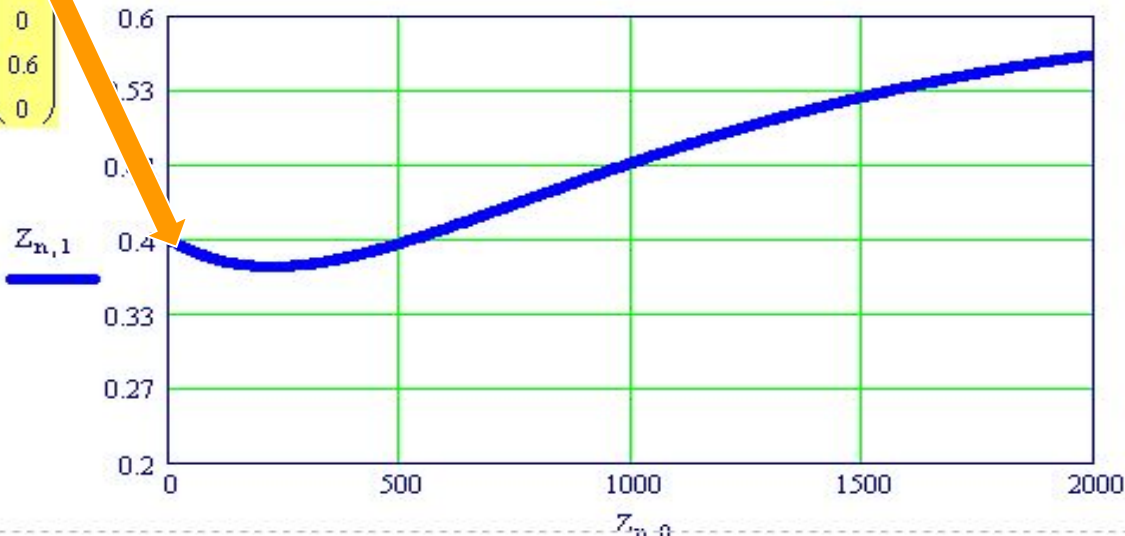
Коэффициент готовности энергоблока с использованием котлоагрегатов в режиме горячего (нагруженного) резерва

$$p := \begin{pmatrix} 1.0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$



Коэффициент готовности энергоблока с использованием котлоагрегатов в режиме горячего (нагруженного) резерва (изменены начальные условия)

$$p := \begin{pmatrix} 0.4 \\ 0 \\ 0.6 \\ 0 \end{pmatrix}$$



+

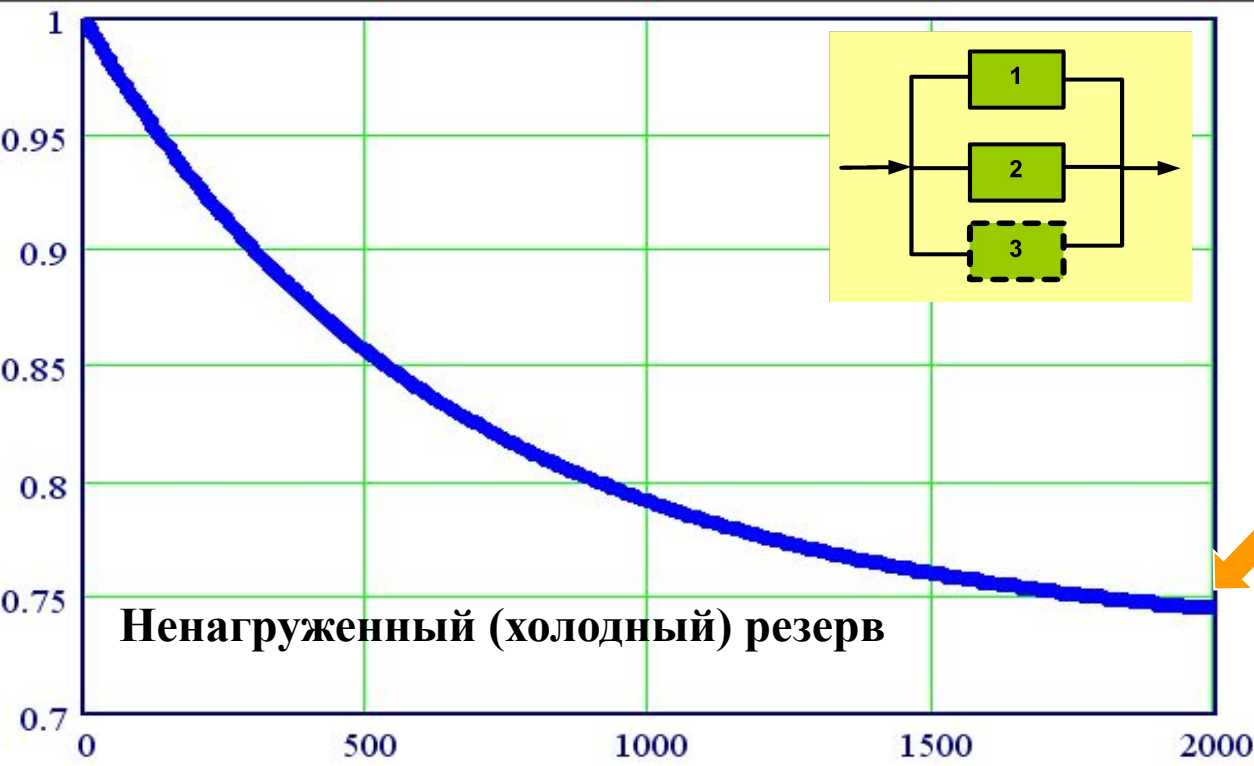
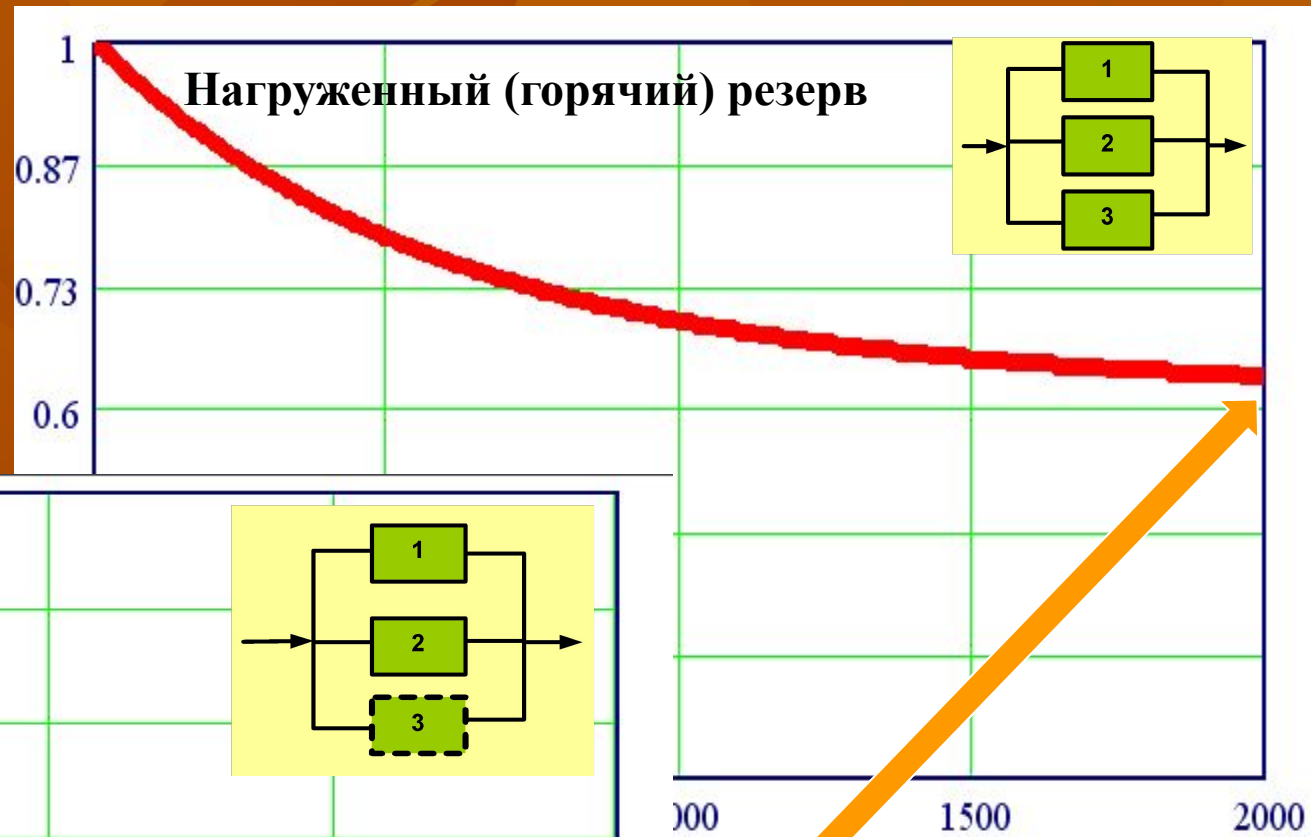
2000

$Z_{n,0}$

Влияние начальных условий на показатели надёжности



Сравнение результатов расчёта для нагруженного и ненагруженного резерва



1000 1500 2000

Выводы по работе № 4

Mathcad - [ПР №4_2004]

File Edit View Insert Format Tools Symbolics Window Help

Normal Times New Roman 12 **B** *I* U 100% ?

Tutorials Go

Выводы:

1. Коэффициент готовности энергоблока при нахождении одного из котлоагрегатов в холодном резерве выше и составляет $K = 0.74$.
Это можно объяснить
2. При увеличении времени восстановления котлоагрегата с ... ч до ... ч коэффициент готовности энергоблока
3. При уменьшении средней наработки до отказа турбоагрегата с ... ч до ... ч коэффициент готовности энергоблока
4. Если в начальный момент времени энергоблок с вероятностью находится в состоянии ..., то коэффициент готовности

+

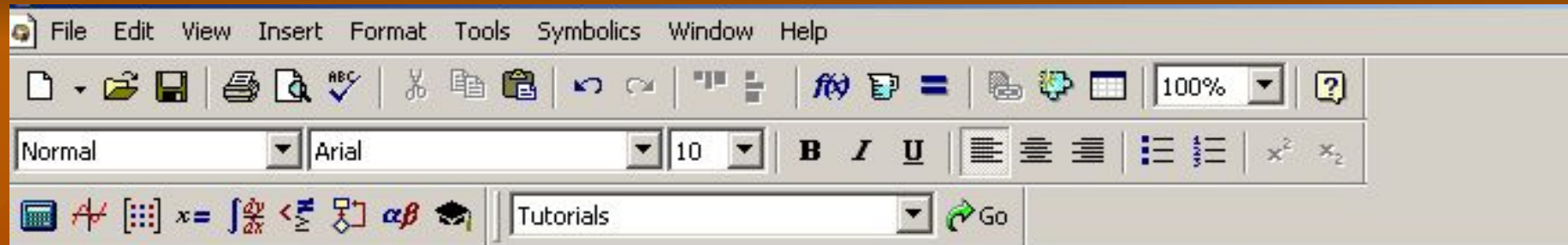
Исследовать:

1. Влияние времени восстановления котлоагрегата и турбоагрегата на коэффициент готовности.
2. Изменение средней наработки до отказа на величину коэффициента готовности.
3. Влияние начальных состояний энергоблока на показатели надёжности.

Результаты исследования отразить в выводах.

Press F1 for help. AUTO NUM Page 5

ПУСК Total Commander 6... Расчёт показател... Мультипликация Mathcad - [ПР №4_... 17:02



$j := 0..2$

$$p := \begin{pmatrix} 0.95 \\ 0.05 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Вектор **p** содержит начальные значения вероятностей нахождения объекта в каждом из четырёх состояний.
(Сумма всех начальных значений должна быть равна единице.)

$$\sum_j p_j = 1$$

$$D(t,p) := \begin{pmatrix} -\lambda t \cdot p_0 - 2 \cdot \lambda t p \cdot p_0 + p_1 \cdot \mu t + p_2 \cdot \mu t \\ -p_1 \cdot (\lambda p + \mu t) + \lambda t \cdot p_0 + \mu p \cdot p_3 \\ -p_2 \cdot (\mu p + \lambda t p) + p_0 \cdot 2 \cdot \lambda t p + p_3 \cdot 2 \cdot \mu t p \\ -p_3 \cdot (\mu p + 2 \cdot \mu t p) + p_1 \cdot \lambda p + p_2 \cdot \lambda t p \end{pmatrix}$$

D - матрица значений первых производных.

Z - матрица результатов решения системы дифференциальных уравнений, столбцы которой содержат значения искомых функций.

`Z := rkfixed(p, 0, 200, 200, D)`

- процедура решения системы дифференциальных уравнений

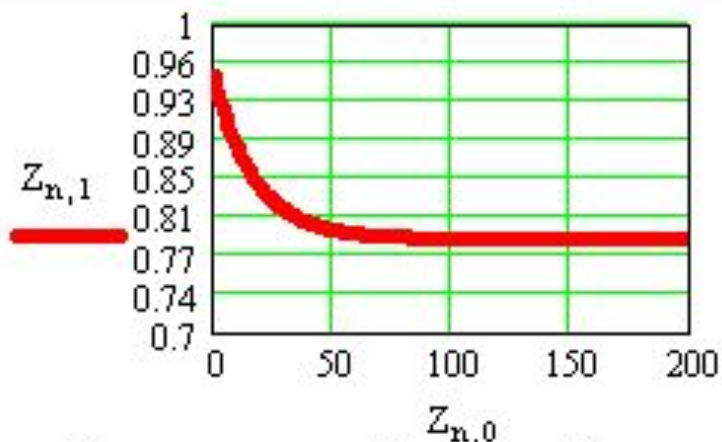
$n := 0.. \text{rows}(Z) - 1$

Результаты решения представлены на рисунках

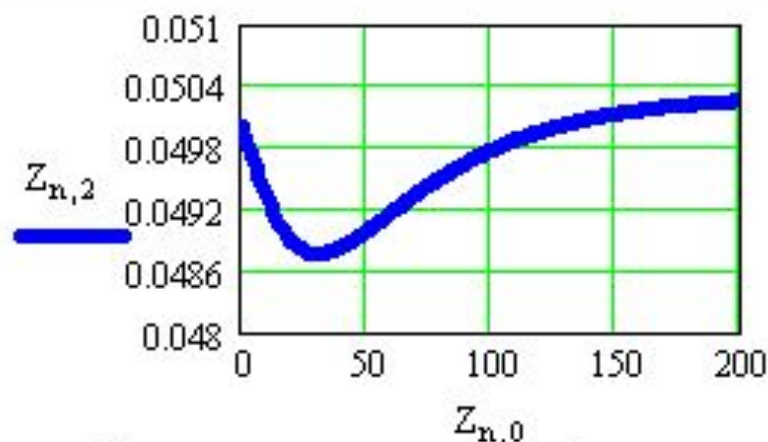
трудопроизводит

+

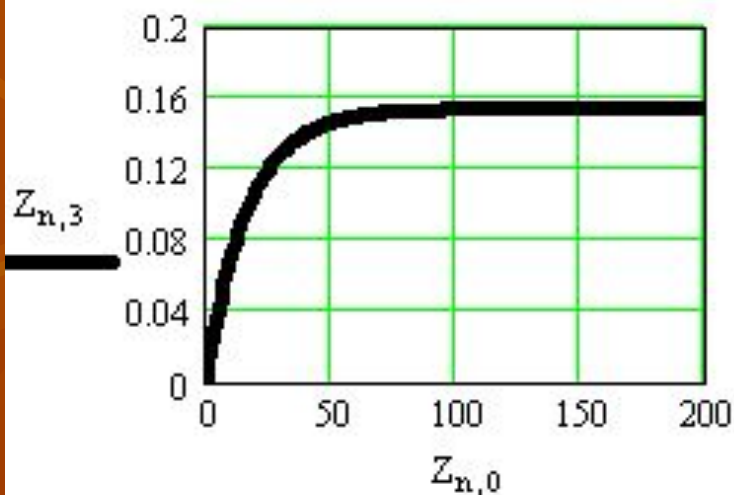
Результаты вычисления



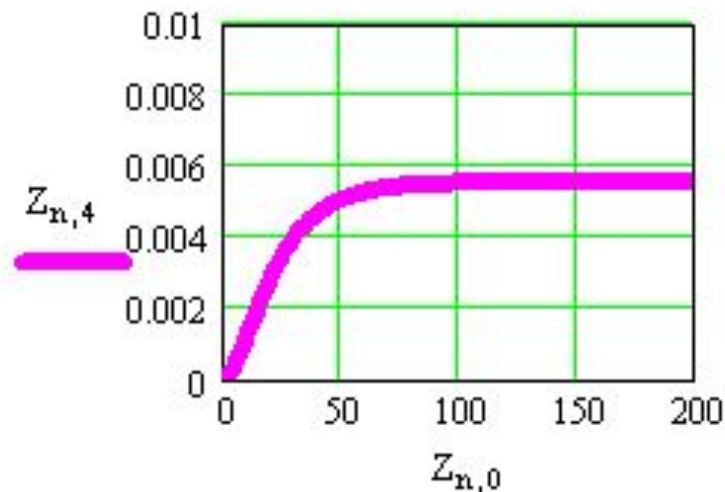
Вероятность работоспособного состояния системы



Вероятность отказа турбоагрегата и системы подачи пара через РОУ:



Вероятность отказа одного из трубопроводов ;



Вероятность полного отказа (турбоагрегата или двух трубопроводов одновременно).

Выводы по работе

Исследовать:

1. Влияние изменения времени восстановления одного из элементов на вероятность безотказной работы системы.
2. Влияние изменения среднего времени безотказной работы одного из элементов на вероятность безотказной работы системы.
3. Влияние холодного и горячего резервирования РОУ на показатели надёжности системы.
4. Влияние подключения дополнительной магистрали пара на показатели надёжности системы.

Результаты исследования отразить в выводах.

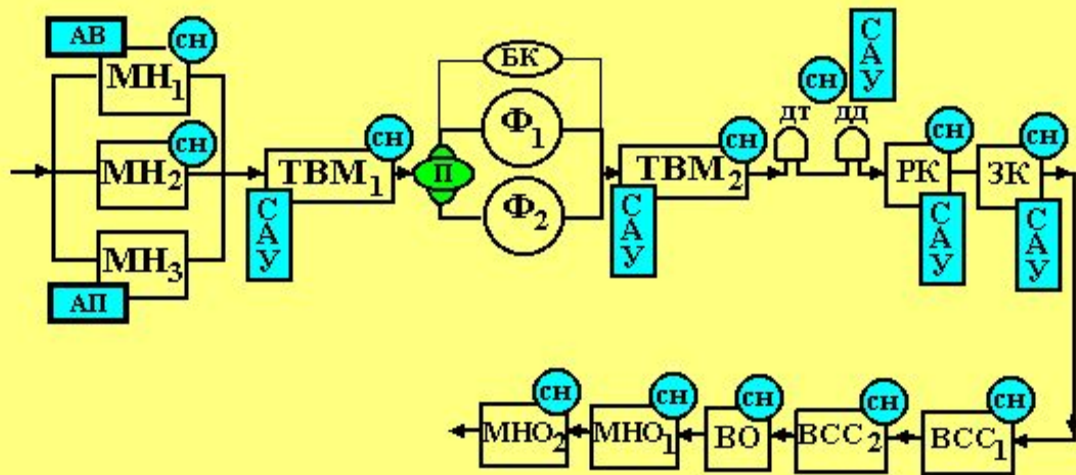
Выводы:

1. Безотказность системы промышленного теплоснабжения обеспечивается с вероятностью $P_0 = 0.79$.
2. Вероятность полного отказа системы составляет $P_3 = 0.006$.
3. При увеличении времени восстановления турбоагрегата до ... ч вероятность безотказной работы изменяется и становится равной
4. При увеличении среднего времени безотказной работы трубопроводов вероятность безотказной работы становится равной.....
5. Если РОУ держать в холодном резерве, то
6. Если дополнительно проложить третью линию подачи пара к потребителю, то ...

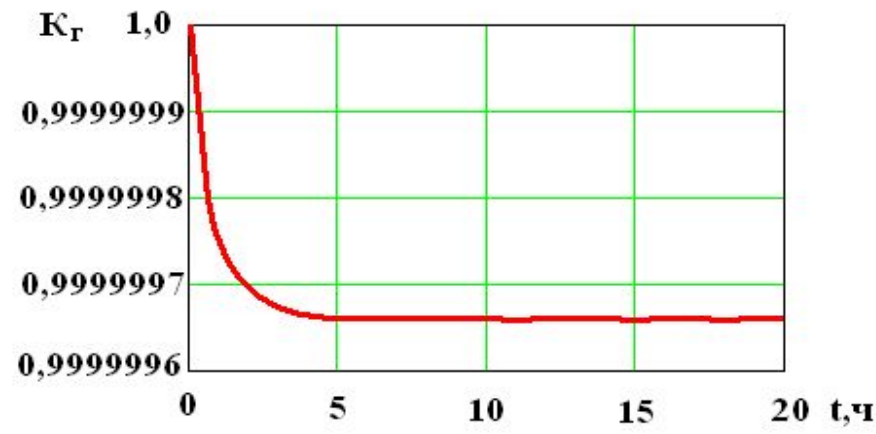


Пример: Математическая модель и результаты расчёта надёжности системы смазки газотурбинного энергоблока (ГТЭ)

Структурная схема системы смазки



$$D(t, p) := \begin{aligned} & -\Lambda_0 \cdot p_0 + M_0 \cdot p_4 + \left[\mu_5 + \mu_{k_6} \cdot (k_6 - 1) + \mu_{k_0} \cdot (k_0 - 1) \right] \cdot p_5 \dots \\ & + \left[\mu_7 + \mu_{k_6} \cdot (k_6 - 1) + \mu_{k_0} \cdot (k_0 - 1) \right] \cdot p_6 + \left[\mu_0 + \mu_{k_0} \cdot (k_0 - 1) \right] \cdot p_1 + \mu_3 \cdot p_3 \\ & - \left[\lambda_0 + \mu_0 + \mu_{k_0} \cdot (k_0 - 1) \right] \cdot p_1 + \lambda_0 \cdot (2 - k_0) \cdot p_0 + 2 \cdot \mu_0 \cdot p_2 \\ & - (2 \cdot \mu_0 + \lambda_0) \cdot p_2 + \lambda_0 \cdot p_1 + 3 \cdot \mu_0 \cdot p_4 \\ & - (\mu_3 + \lambda_3) \cdot p_3 + \lambda_3 \cdot p_0 + 2 \cdot \mu_3 \cdot p_4 \\ & - M_4 \cdot p_4 + \lambda_3 \cdot p_3 + \Lambda_4 \cdot p_0 + \lambda_5 \cdot (3 - k_6 - k_0) \cdot p_5 + \lambda_7 \cdot (3 - k_6 - k_0) \cdot p_6 + \lambda_0 \cdot p_2 \\ & - \left[\lambda_5 \cdot (3 - k_0 - k_6) + \mu_5 + \mu_{k_6} \cdot (k_6 - 1) + \mu_{k_0} \cdot (k_0 - 1) \right] \cdot p_5 + \lambda_5 \cdot (3 - k_0 - k_6) \cdot p_0 \dots \\ & + 2 \cdot \left[\mu_5 + \mu_{k_6} \cdot (k_6 - 1) + \mu_{k_0} \cdot (k_0 - 1) \right] \cdot p_4 \\ & - \left[\lambda_7 \cdot (3 - k_0 - k_6) + \mu_7 + \mu_{k_6} \cdot (k_6 - 1) + \mu_{k_0} \cdot (k_0 - 1) \right] \cdot p_6 + \lambda_7 \cdot (3 - k_0 - k_6) \cdot p_0 \dots \\ & + 2 \cdot \left[\mu_7 + \mu_{k_6} \cdot (k_6 - 1) + \mu_{k_0} \cdot (k_0 - 1) \right] \cdot p_4 \end{aligned}$$



Заключение

1. Расчёт надёжности проектируемых объектов энергетики может быть выполнен с помощью специально разработанных математических моделей на основе теории *марковских случайных процессов*.
2. Для расчёта показателей надёжности требуется определённая исходная информация, без которой расчёт невозможен.
3. Путём сравнения рассчитанных и нормативных показателей надёжности осуществляется контроль достигнутого уровня надёжности проектируемого объекта.
4. Методика на основе марковских случайных процессов позволяет осуществлять частичный синтез объекта с требуемым уровнем качества.



Благодарю за внимание!

