

## **Лекция № 4.**

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



# Основные положения теории случайных процессов

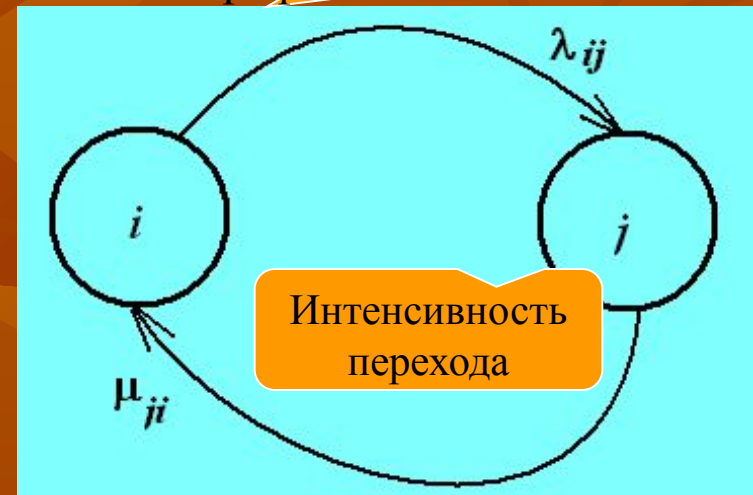
Вершина графа

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  $p_{ij}$



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

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

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

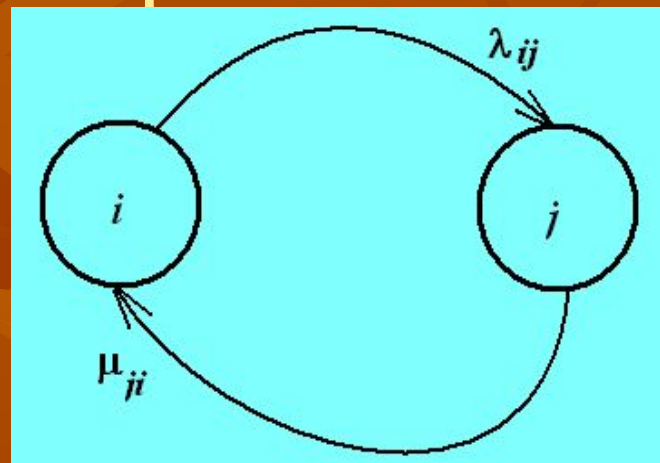


# Расчёт показателей надёжности проектируемого объекта

## Теоретические основы расчёта

Условия применения теории марковских случайных процессов:

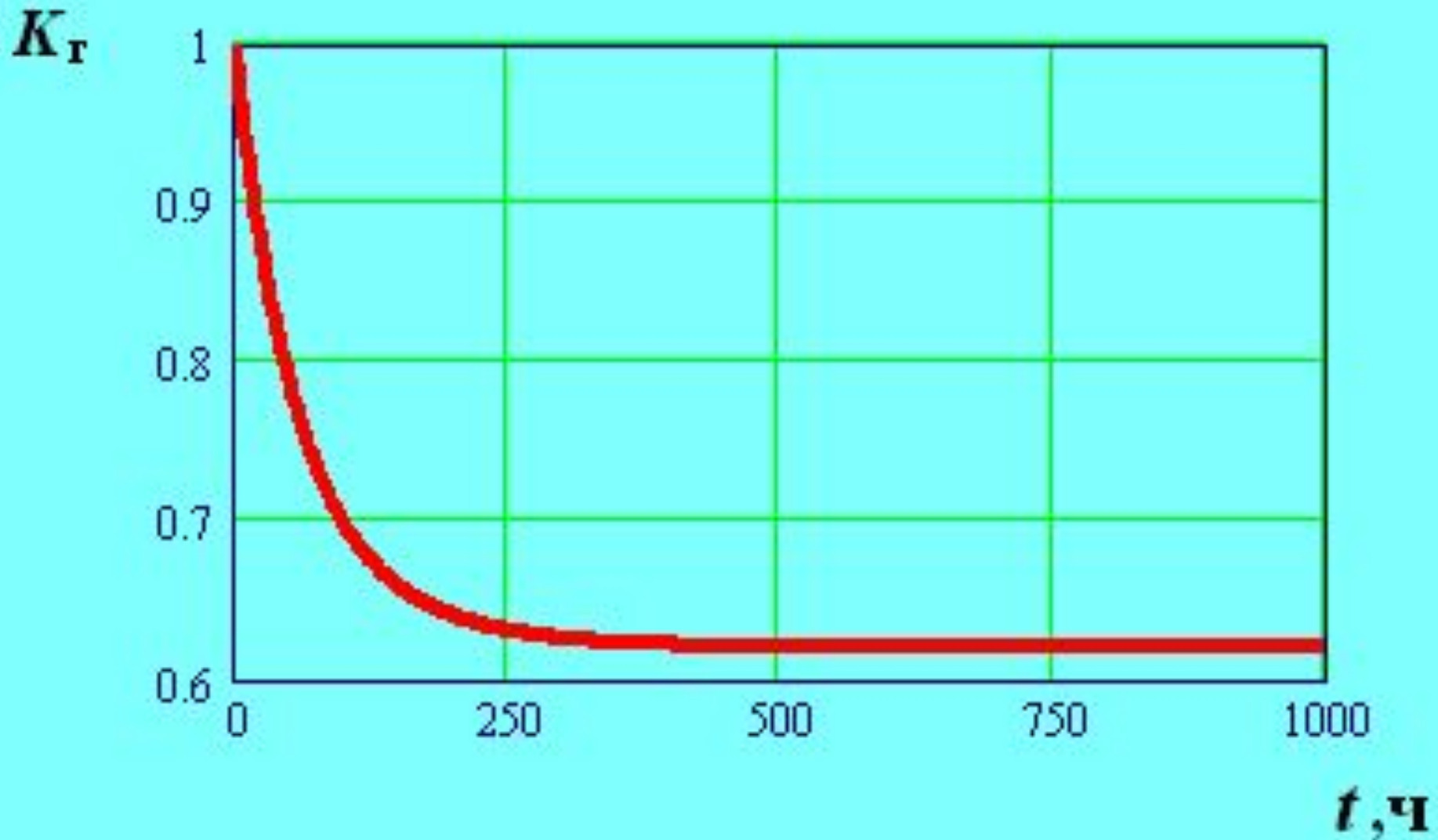
- экспоненциальность потока событий;
- переход из состояния в состояние занимает конечный интервал времени;
- интенсивность переходов не зависит от момента его начала;
- сумма вероятностей нахождения в различных состояниях в любой момент времени равна единице.



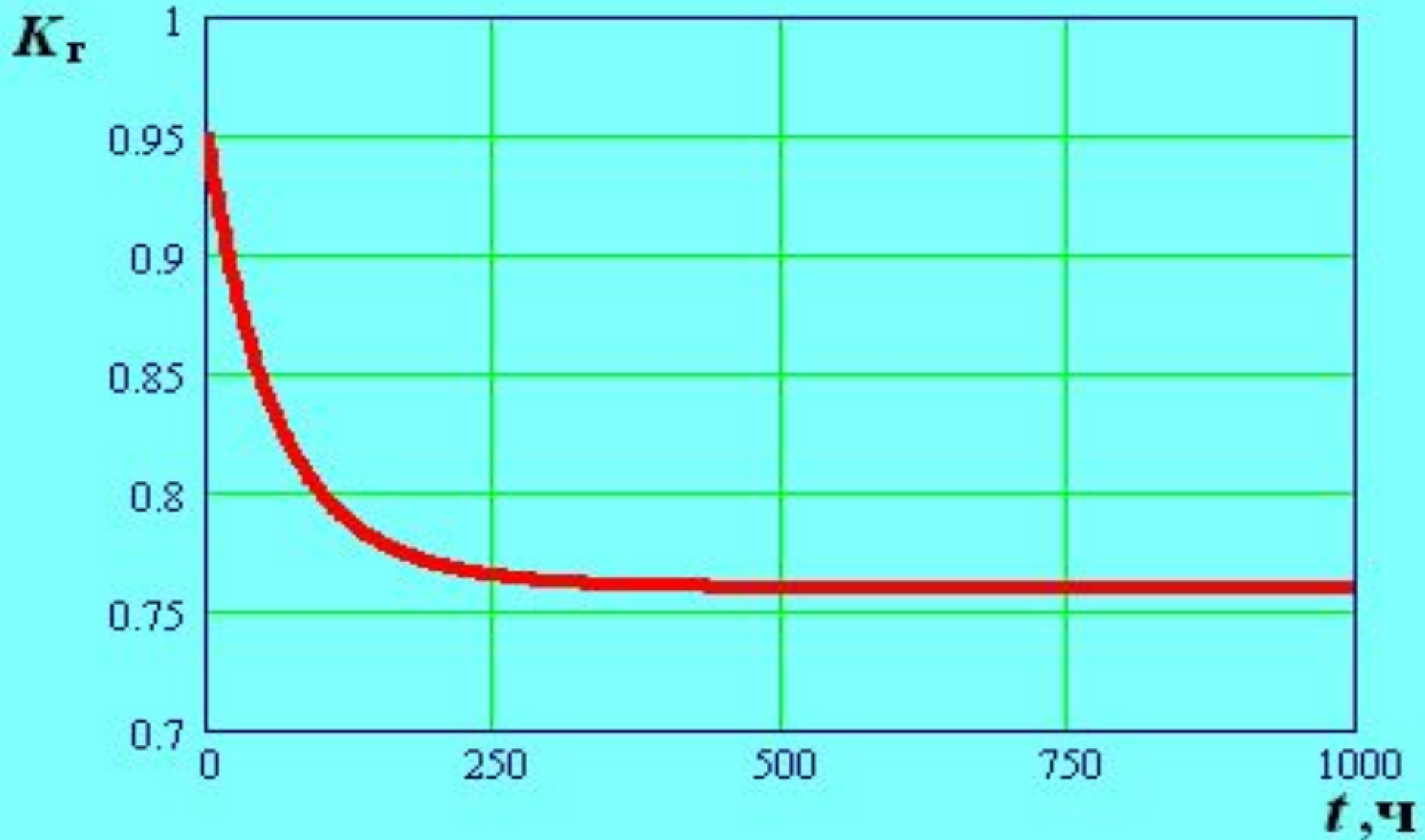
$$\begin{cases} \frac{dp_i}{dt} = -\lambda_{ij}p_i + \mu_{ji}p_j; \\ \frac{dp_j}{dt} = -\mu_{ji}p_j + \lambda_{ij}p_i; \end{cases}$$

Система уравнений  
Колмогорова

# Модель расчёта надёжности объектов при горячем резервировании элементов

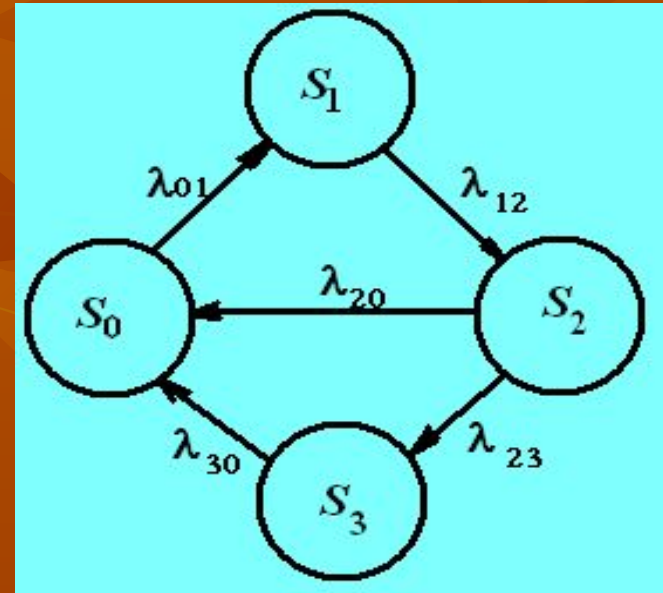


# Расчёт надёжности объектов при холодном резервировании элементов



# 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;

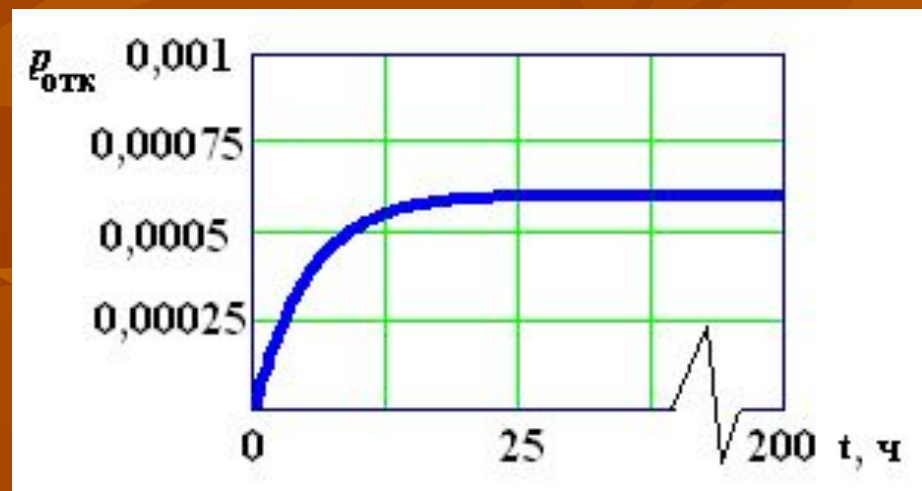
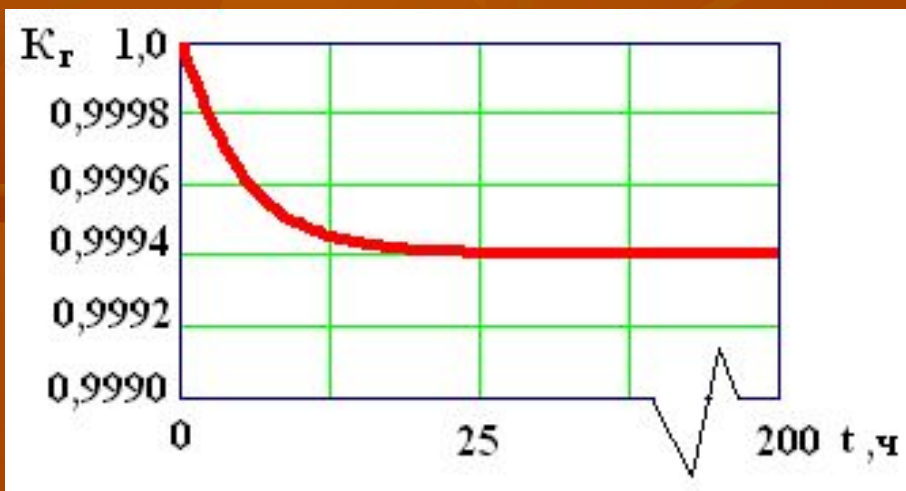
$S_1$  – состояние скрытого отказа;

$S_2$  – 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;

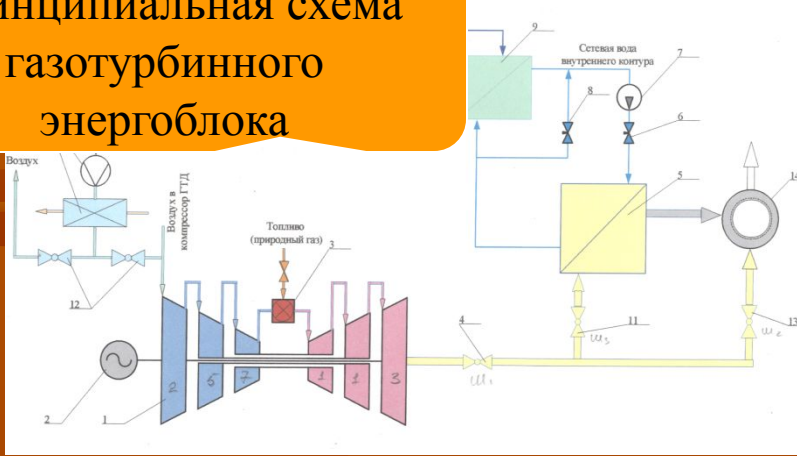
$\lambda_{20} = \lambda_{23} = 0,1$  — интенсивность восстановления, 1/ч;

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

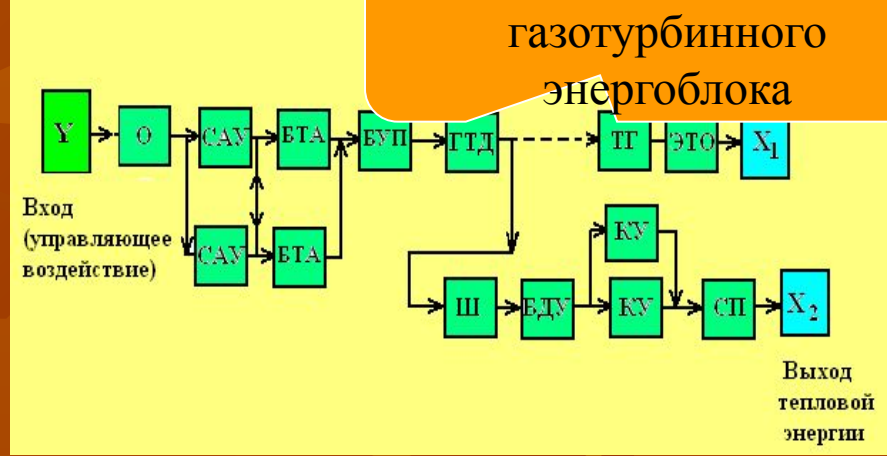
# Расчёт показателей надёжности проектируемого объекта

## Математическая модель надёжности установки как структурно сложного объекта

Принципиальная схема газотурбинного энергоблока

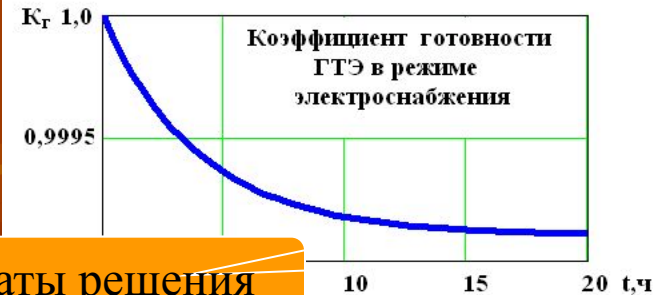


Структурная схема газотурбинного энергоблока



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

Система уравнений Колмогорова



Результаты решения



# Интерфейс программы расчёта ПН с среде Mathcad

Mathcad - [ПР №4\_2004]

File Edit View Insert Format Tools Symbolics Window Help

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

Tutorials Go

## 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:**

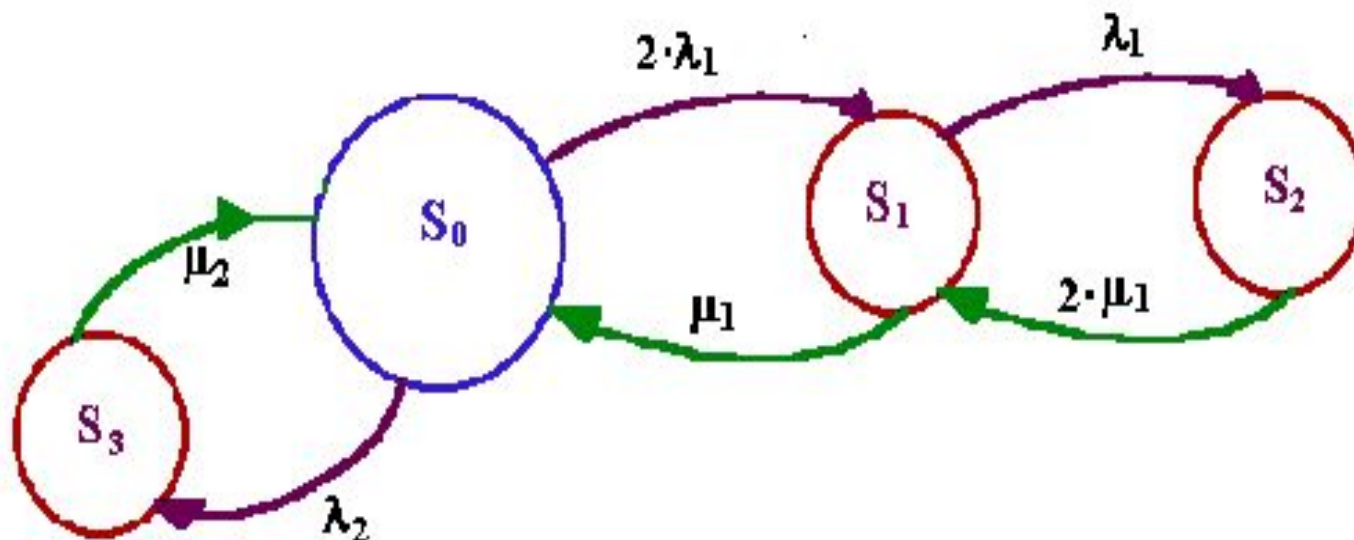
```
graph LR; In(( )) --- B1[Котлоагрегат №1]; In --- B2[Котлоагрегат №2]; B1 --- T[Турбоагрегат]; B2 --- T; T --- Out(( ))
```

Press F1 for help. AUTO NUM Page 1

пуск Total Commander 6... Расчёт показател... Мультипликация Mathcad - [ПР №4\_... 16:35

# 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.

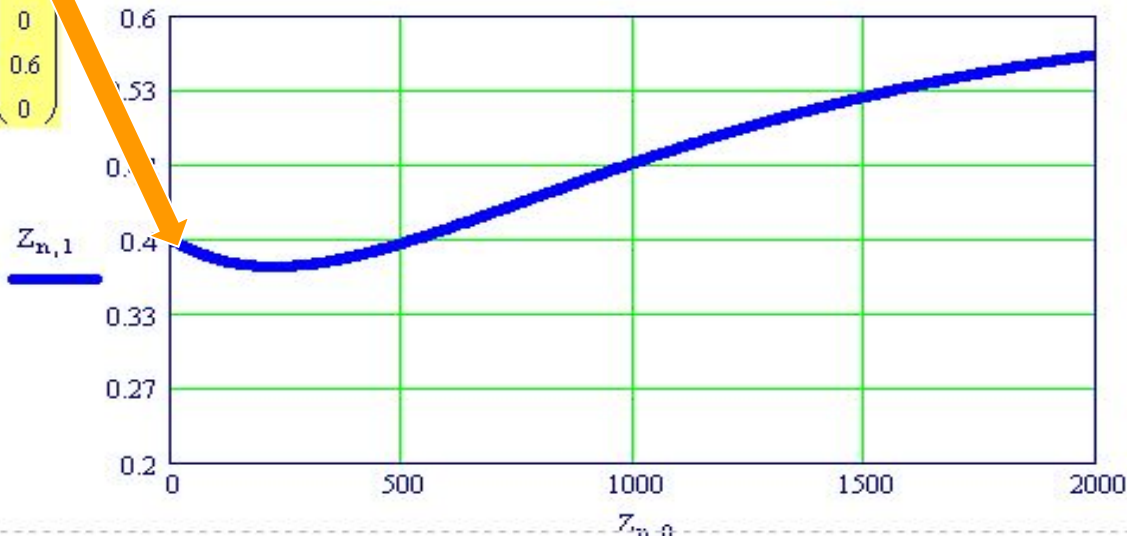
# Коэффициент готовности энергоблока с использованием котлоагрегатов в режиме горячего (нагруженного) резерва

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



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

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

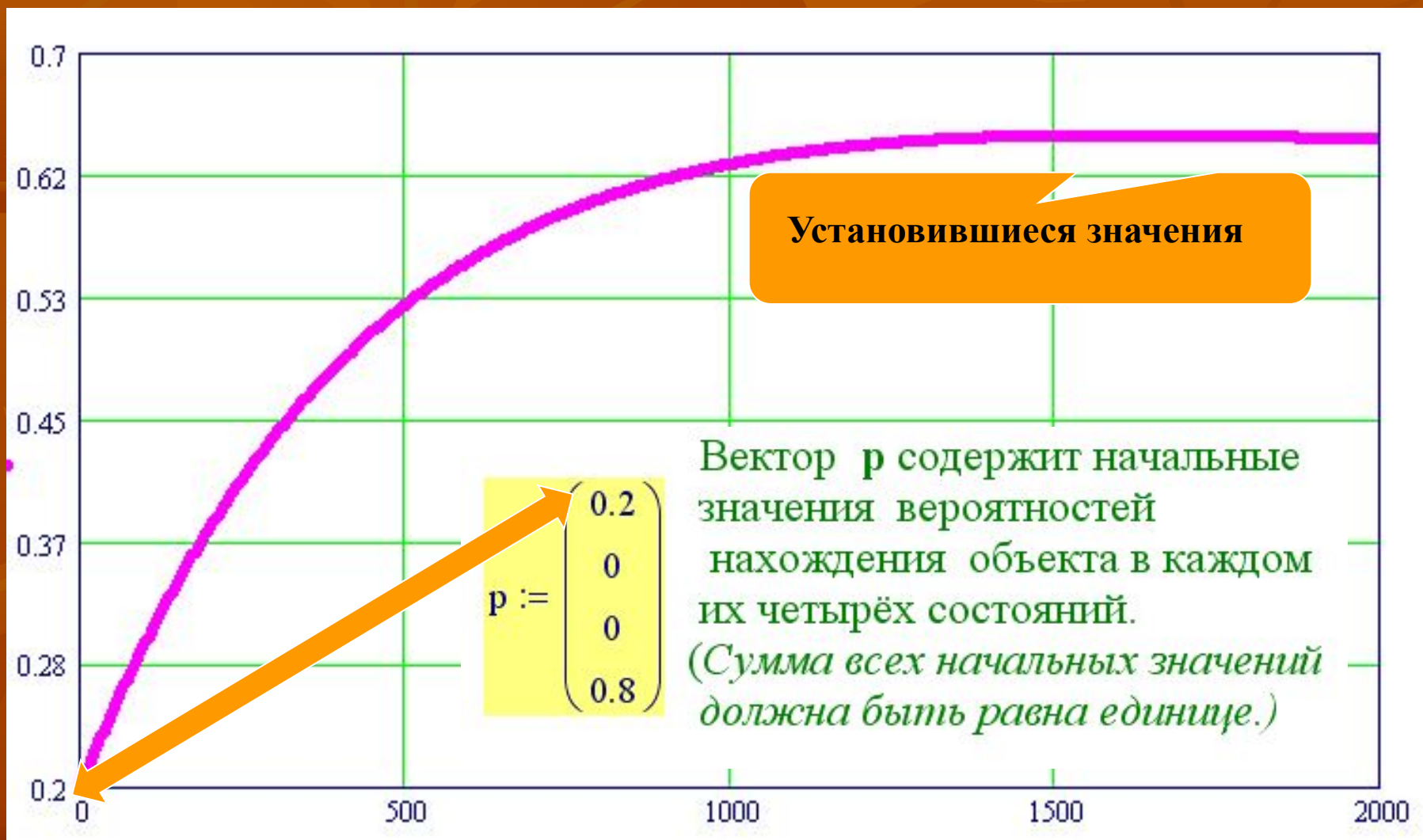


+

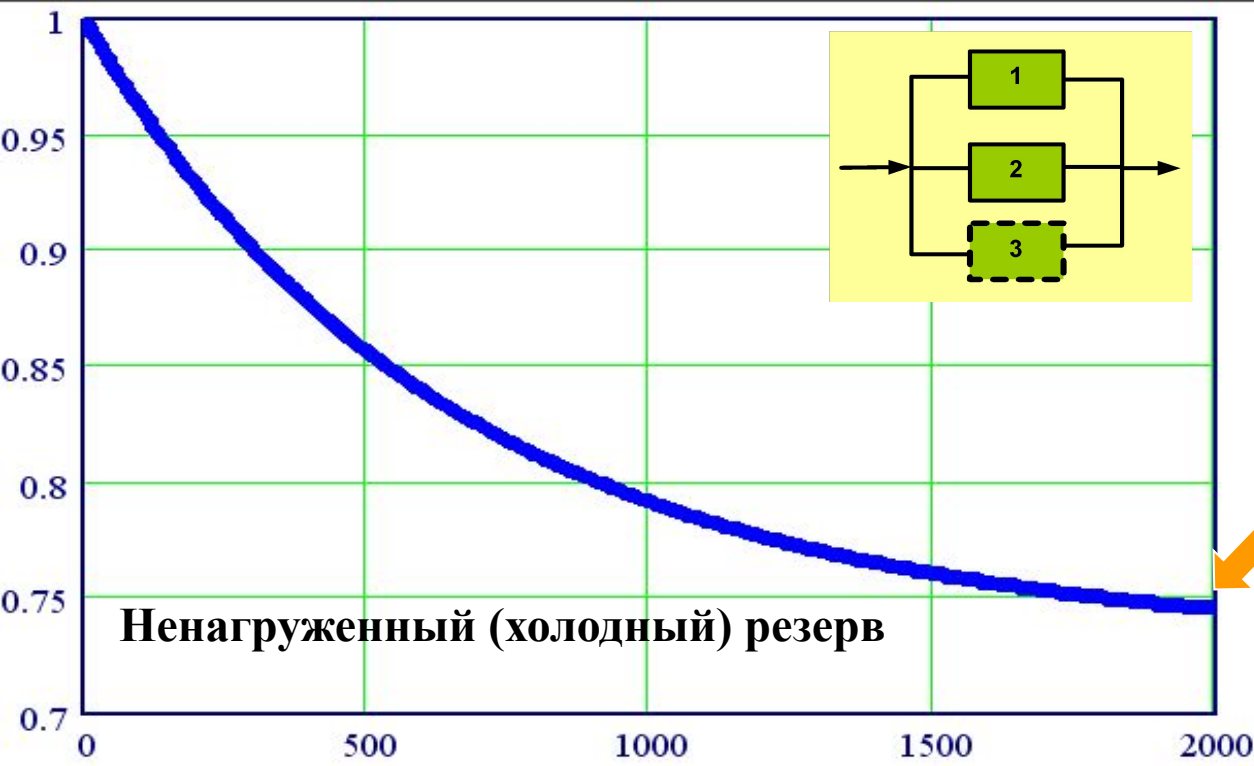
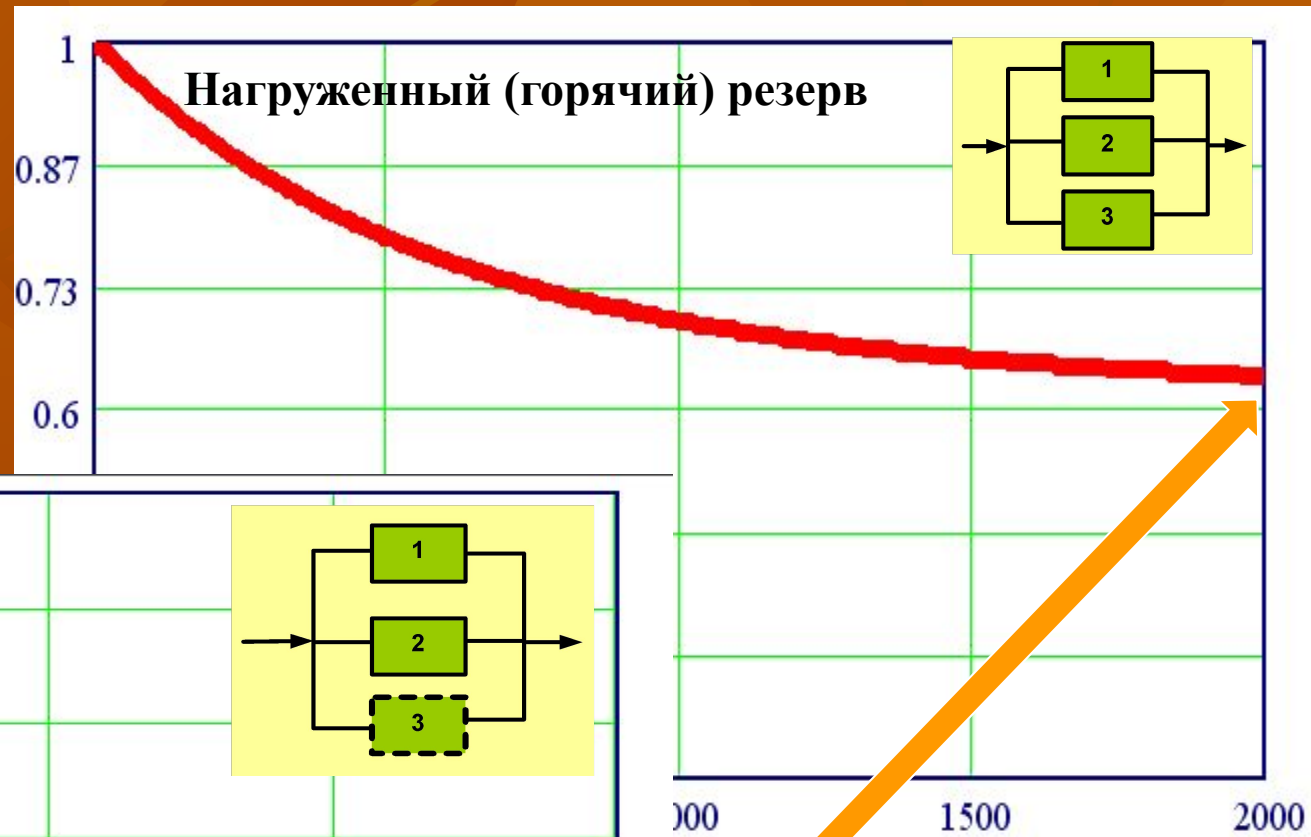
2000

$Z_{n,0}$

# 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 .....

+

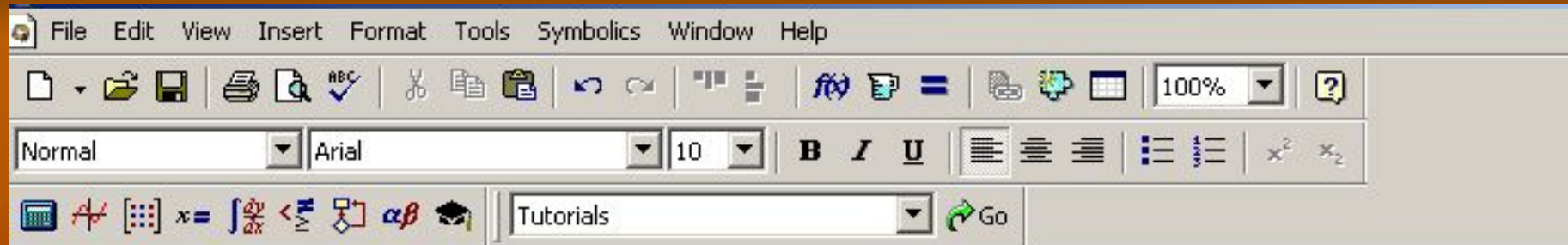
**Исследовать:**

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

$n := 0..rows(Z) - 1$

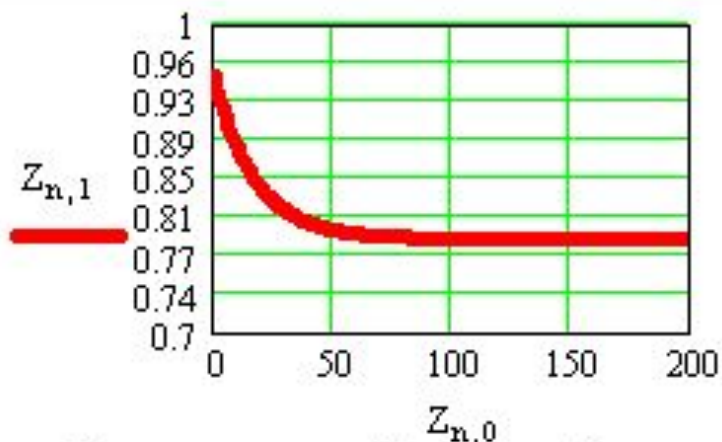
Результаты решения представлены на рисунках

трудопроизводны

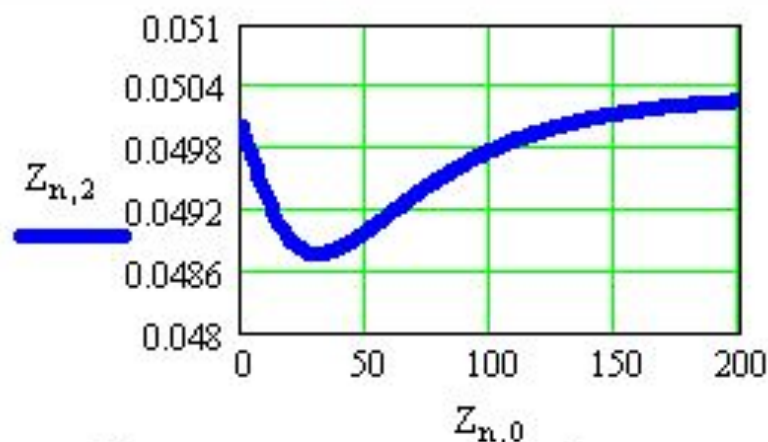
+



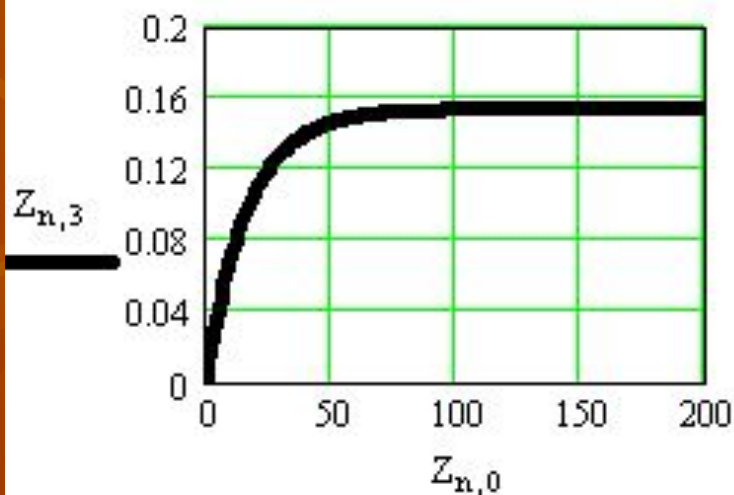
# Результаты вычисления



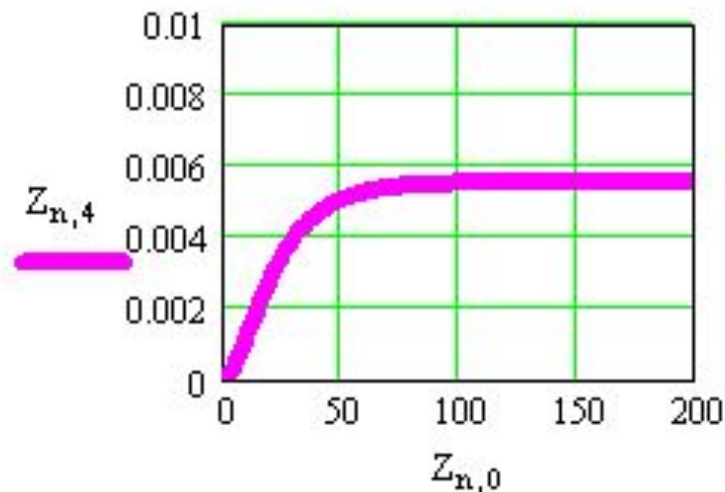
Вероятность работоспособного состояния системы



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.**

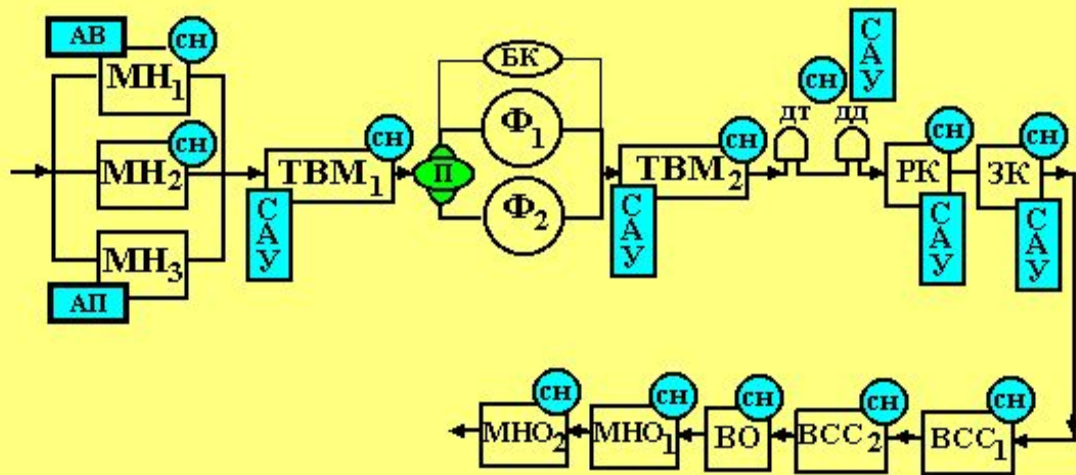
## Выводы:

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 ...

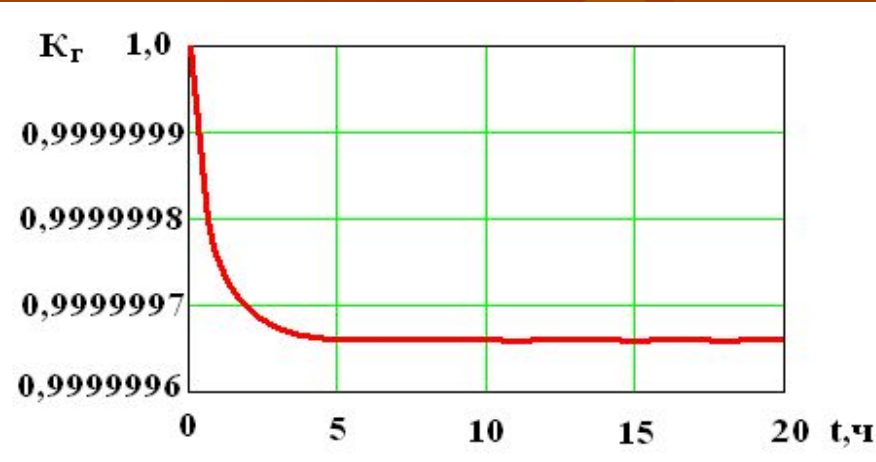


# Пример: Математическая модель и результаты расчёта надёжности системы смазки газотурбинного энергоблока (ГТЭ)

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!*

