

Университет ИТМО

Факультет программной инженерии и компьютерной техники

Теория надежности

Лабораторная работа №3

Организация кластера и доступа к нему через сеть

Лабушев Тимофей

Нестеров Дали

Группа Р3402

Санкт-Петербург

2020

Вариант 8

- Интенсивности отказов и восстановлений серверов: $\lambda_1=4 \cdot 10^{-4}$ 1/ч, $\mu_1=2$ 1/ч
- Интенсивности отказов и восстановлений коммутационных узлов: $\lambda_2=1 \cdot 10^{-4}$ 1/ч, $\mu_2=1$ 1/ч
- Вариант резервирования и восстановления: (A1, B3, C1)
- Число узлов $(m, n)=(2, 3)$

Объектом исследования является кластер, состоящий из m серверов и n коммуникационных узлов:

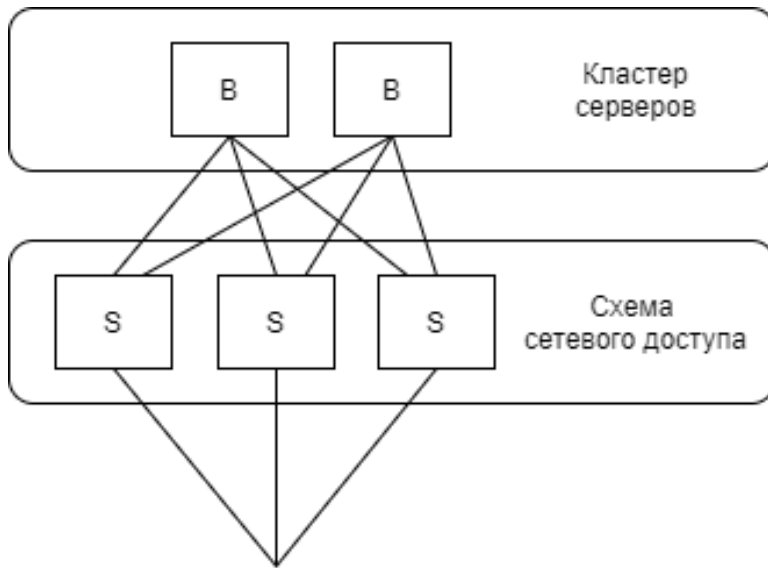


Рисунок 1. Модель кластера

Порядок резервирования и восстановления:

- A1: серверы и коммутационные узлы работают в нагруженном резерве;
- B3: приоритет восстановления выше для узлов, ремонт которых непосредственно приводит к переходу системы из неработоспособного в работоспособное состояние; в остальных случаях приоритет коммуникационных узлов выше;
- C1: после перехода системы в состояние отказа электропитание отключается; предполагаем, что в состоянии отказа системы узлы, сохранившие работоспособность, не отказывают.

Задание

Для заданного варианта организации системы:

- построить диаграмму состояний и переходов;
- в соответствии с диаграммой состояний и переходов составить систему алгебраических уравнений;
- в соответствии с диаграммой состояний и переходов составить систему дифференциальных уравнений;
- с использованием средств компьютерной математики решить систему алгебраических уравнений;
- с использованием средств компьютерной математики решить систему дифференциальных уравнений;
- определить стационарный коэффициент готовности;
- определить нестационарный коэффициент готовности;
- определить нестационарный коэффициент готовности при холодном резерве;
- представить зависимость нестационарного коэффициента готовности от времени в виде графика;
- построить диаграмму состояний и переходов для невосстанавливаемой системы с учетом заданного варианта нагруженного или ненагруженного резерва;
- в соответствии с диаграммой состояний и переходов составить систему дифференциальных уравнений;
- с использованием средств компьютерной математики решить систему дифференциальных уравнений;
- определить зависимость вероятности безотказной работы системы от времени ее функционирования (результаты представить в виде графиков);
- проанализировать полученные результаты.

Восстанавливаемая система

Построение графа состояний и переходов

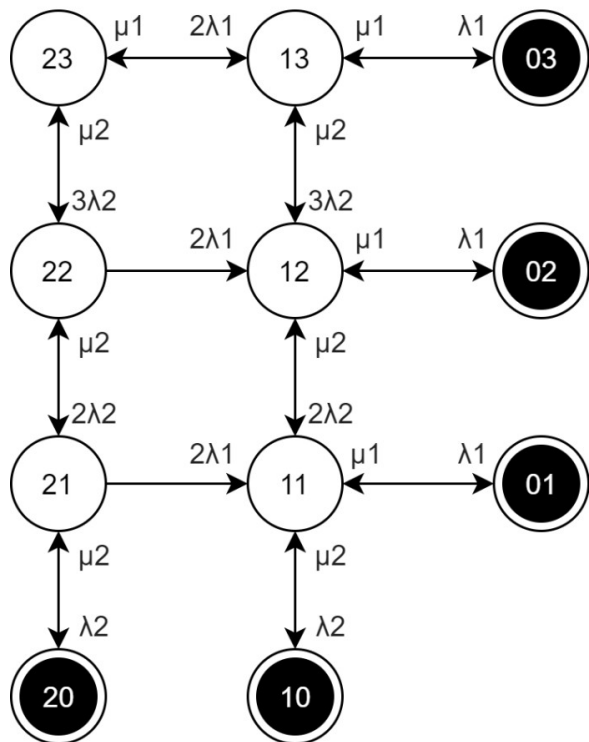


Рисунок 2. Граф состояний и переходов в восстанавливаемой системе при нагруженном резерве

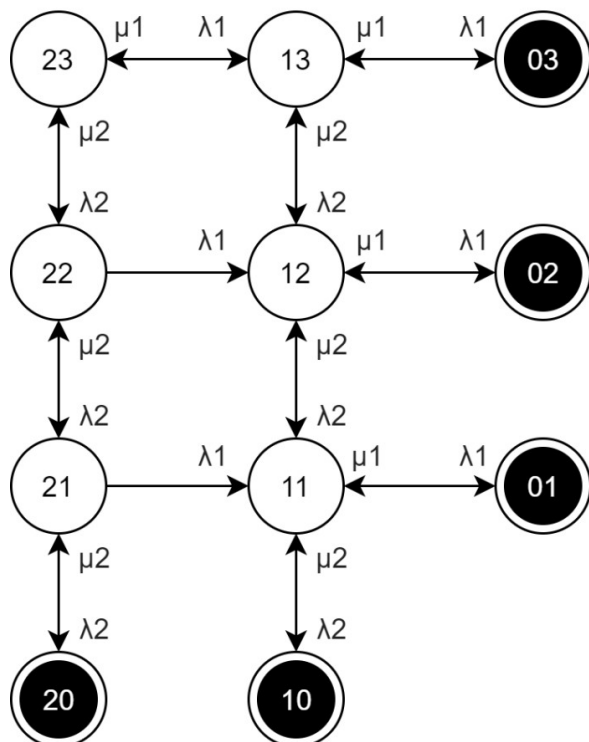


Рисунок 3. Граф состояний и переходов в восстанавливаемой системе при холодном (ненагруженном) резерве

Построение и решение системы алгебраических уравнений

```
states <- c("23", "22", "21", "20", "13", "12", "11", "10", "03", "02", "01")

lambda1 <- 4*10^-4
mu1 <- 2
lambda2 <- 1*10^-4
mu2 <- 1
```

Нагруженный резерв

Матрица интенсивностей переходов:

```
transition_rate_hot_reserve_M <- matrix(
  data = c(
    0, 3*lambda2, 0, 0, 2*lambda1, 0, 0, 0, 0, 0, 0,
    mu2, 0, 2*lambda2, 0, 0, 2*lambda1, 0, 0, 0, 0, 0,
    0, mu2, 0, lambda2, 0, 0, 2*lambda1, 0, 0, 0, 0,
    0, 0, mu2, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0,
    mu1, 0, 0, 0, 0, 3*lambda2, 0, 0, lambda1, 0, 0,
    0, 0, 0, 0, mu2, 0, 2*lambda2, 0, 0, lambda1, 0,
    0, 0, 0, 0, 0, mu2, 0, lambda2, 0, 0, lambda1,
    0, 0, 0, 0, 0, 0, mu2, 0, 0, 0, 0,
    0, 0, 0, 0, mu1, 0, 0, 0, 0, 0, 0,
    0, 0, 0, 0, 0, mu1, 0, 0, 0, 0, 0,
    0, 0, 0, 0, 0, 0, mu1, 0, 0, 0, 0
  ),
  byrow = T, ncol = 11, dimnames = list(states, states))
diag(transition_rate_hot_reserve_M) <- -rowSums(transition_rate_hot_reserve_M)
transition_rate_hot_reserve_M
```

```
##           23           22           21           20           13           12           11           10           03
## 23 -0.0011  0.0003  0.0000  0.0000  0.0008  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000
## 22  1.0000 -1.0010  0.0002  0.0000  0.0000  0.0008  0.0000  0.0000  0.0000
## 21  0.0000  1.0000 -1.0009  0.0001  0.0000  0.0000  0.0008  0.0000  0.0000
## 20  0.0000  0.0000  1.0000 -1.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000
## 13  2.0000  0.0000  0.0000  0.0000 -2.0007  0.0003  0.0000  0.0000  0.0004
## 12  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  1.0000 -1.0006  0.0002  0.0000  0.0000
## 11  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  1.0000 -1.0005  0.0001  0.0000
## 10  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  1.0000 -1.0000  0.0000
## 03  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  2.0000  0.0000  0.0000  0.0000 -2.0000
## 02  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  2.0000  0.0000  0.0000  0.0000
## 01  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  2.0000  0.0000  0.0000
##           02           01
## 23  0.0000  0.0000
## 22  0.0000  0.0000
## 21  0.0000  0.0000
## 20  0.0000  0.0000
## 13  0.0000  0.0000
## 12  0.0004  0.0000
## 11  0.0000  0.0004
## 10  0.0000  0.0000
## 03  0.0000  0.0000
## 02 -2.0000  0.0000
## 01  0.0000 -2.0000
```

Стационарные вероятности:

```
mc_hot <- new("markovchain", states = states, byrow = T, transitionMatrix =
expm(transition_rate_hot_reserve_M))
steady_hot <- steadyStates(mc_hot)
steady_hot

##           23           22           21           20           13           12
## [1,] 0.9993 0.0002996 0.00000005986 0.00000000005986 0.0003998 0.0000003596
##           11           10           03           02
## [1,] 0.0000000001198 0.00000000000001196 0.00000007997 0.0000000007193
##           01
## [1,] 0.00000000000002395
```

Холодный резерв

Матрица интенсивностей переходов:

```
transition_rate_cold_reserve_M <- matrix(
  data = c(
    0, lambda2, 0, 0, lambda1, 0, 0, 0, 0, 0,
    mu2, 0, lambda2, 0, 0, lambda1, 0, 0, 0, 0,
    0, mu2, 0, lambda2, 0, 0, lambda1, 0, 0, 0,
    0, 0, mu2, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0,
    mu1, 0, 0, 0, 0, lambda2, 0, 0, lambda1, 0, 0,
    0, 0, 0, 0, mu2, 0, lambda2, 0, 0, lambda1, 0,
    0, 0, 0, 0, 0, mu2, 0, lambda2, 0, 0, lambda1,
    0, 0, 0, 0, 0, 0, mu2, 0, 0, 0, 0,
    0, 0, 0, 0, mu1, 0, 0, 0, 0, 0, 0,
    0, 0, 0, 0, 0, mu1, 0, 0, 0, 0, 0,
    0, 0, 0, 0, 0, 0, mu1, 0, 0, 0, 0
  ),
  byrow = T, ncol = 11, dimnames = list(states, states))
diag(transition_rate_cold_reserve_M) <- -rowSums(transition_rate_cold_reserve_M)
transition_rate_cold_reserve_M
```

##		23	22	21	20	13	12	11	10	03
##	23	-0.0005	0.0001	0.0000	0.0000	0.0004	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
##	22	1.0000	-1.0005	0.0001	0.0000	0.0000	0.0004	0.0000	0.0000	0.0000
##	21	0.0000	1.0000	-1.0005	0.0001	0.0000	0.0000	0.0004	0.0000	0.0000
##	20	0.0000	0.0000	1.0000	-1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
##	13	2.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-2.0005	0.0001	0.0000	0.0000	0.0004
##	12	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	-1.0005	0.0001	0.0000	0.0000
##	11	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	-1.0005	0.0001	0.0000
##	10	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	-1.0000	0.0000
##	03	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	2.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-2.0000
##	02	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	2.0000	0.0000	0.0000	0.0000
##	01	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	2.0000	0.0000	0.0000
##		02	01							
##	23	0.0000	0.0000							
##	22	0.0000	0.0000							
##	21	0.0000	0.0000							
##	20	0.0000	0.0000							
##	13	0.0000	0.0000							
##	12	0.0004	0.0000							
##	11	0.0000	0.0004							
##	10	0.0000	0.0000							
##	03	0.0000	0.0000							
##	02	-2.0000	0.0000							
##	01	0.0000	-2.0000							

Стационарные вероятности:

```
mc_cold <- new("markovchain", states = states, byrow = T, transitionMatrix =
expm(transition_rate_cold_reserve_M))
steady_cold <- steadyStates(mc_cold)
steady_cold

##           23           22           21           20           13           12
## [1,] 0.9997 0.00009993 0.000000009989 0.0000000000009988 0.0002 0.00000005997
##           11           10           03           02
## [1,] 0.0000000000009993 0.000000000000009445 0.00000003999 0.00000000001199
##           01
## [1,] 0.000000000000001959
```

Определение стационарного коэффициента готовности

Готовность системы определяется как сумма ее работоспособных состояний. Для определения стационарного коэффициента готовности просуммируем стационарные вероятности рабочих состояний:

$$K_r = p_{23} + p_{22} + p_{21} + p_{13} + p_{12} + p_{11}$$

При нагруженном резерве:

```
sum(steady_hot[, "23"], steady_hot[, "22"], steady_hot[, "21"], steady_hot[, "13"],
steady_hot[, "12"], steady_hot[, "11"])

## [1] 1
```

При холодном резерве:

```
sum(steady_cold[, "23"], steady_cold[, "22"], steady_cold[, "21"],
steady_cold[, "13"], steady_cold[, "12"], steady_cold[, "11"])

## [1] 1
```


Построение системы дифференциальных уравнений для нагруженного резерва

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt}P_{23}(t) &= -(2\lambda_1 + 3\lambda_2)P_{23}(t) + \mu_1P_{13}(t) + \mu_2P_{22}(t), \\ \frac{d}{dt}P_{13}(t) &= -(\lambda_1 + 3\lambda_2 + \mu_1)P_{13}(t) + 2\lambda_1P_{23}(t) + \mu_1P_{03}(t) + \mu_2P_{12}(t), \\ \frac{d}{dt}P_{03}(t) &= -\mu_1P_{03}(t) + \lambda_1P_{13}(t), \\ \frac{d}{dt}P_{22}(t) &= -(\mu_2 + 2\lambda_1 + 2\lambda_2)P_{22}(t) + 3\lambda_2P_{23}(t) + \mu_2P_{21}(t), \\ \frac{d}{dt}P_{12}(t) &= -(\mu_2 + \lambda_1 + 2\lambda_2)P_{12}(t) + 2\lambda_1P_{22}(t) + 3\lambda_2P_{13}(t) + \mu_1P_{02}(t) + \mu_2P_{11}(t), \\ \frac{d}{dt}P_{02}(t) &= -\mu_1P_{02}(t) + \lambda_1P_{12}(t), \\ \frac{d}{dt}P_{21}(t) &= -(\mu_2 + 2\lambda_1 + \lambda_2)P_{21}(t) + 2\lambda_2P_{22}(t) + \mu_2P_{20}(t), \\ \frac{d}{dt}P_{11}(t) &= -(\mu_2 + \lambda_1 + \lambda_2)P_{11}(t) + 2\lambda_1P_{21}(t) + 2\lambda_2P_{12}(t) + \mu_1P_{01}(t) + \mu_2P_{10}(t), \\ \frac{d}{dt}P_{01}(t) &= -\mu_1P_{01}(t) + \lambda_1P_{11}(t), \\ \frac{d}{dt}P_{20}(t) &= -\mu_2P_{20}(t) + \lambda_2P_{21}(t), \\ \frac{d}{dt}P_{10}(t) &= -\mu_2P_{10}(t) + \lambda_2P_{11}(t)\end{aligned}$$

Построение системы дифференциальных уравнений для ненагруженного резерва

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt}P_{23}(t) &= -(\lambda_1 + \lambda_2)P_{23}(t) + \mu_1P_{13}(t) + \mu_2P_{22}(t), \\ \frac{d}{dt}P_{13}(t) &= -(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1)P_{13}(t) + \lambda_1P_{23}(t) + \mu_1P_{03}(t) + \mu_2P_{12}(t), \\ \frac{d}{dt}P_{03}(t) &= -\mu_1P_{03}(t) + \lambda_1P_{13}(t), \\ \frac{d}{dt}P_{22}(t) &= -(\mu_2 + \lambda_1 + \lambda_2)P_{22}(t) + \lambda_2P_{23}(t) + \mu_2P_{21}(t), \\ \frac{d}{dt}P_{12}(t) &= -(\mu_2 + \lambda_1 + \lambda_2)P_{12}(t) + \lambda_1P_{22}(t) + \lambda_2P_{13}(t) + \mu_1P_{02}(t) + \mu_2P_{11}(t), \\ \frac{d}{dt}P_{02}(t) &= -\mu_1P_{02}(t) + \lambda_1P_{12}(t), \\ \frac{d}{dt}P_{21}(t) &= -(\mu_2 + \lambda_1 + \lambda_2)P_{21}(t) + \lambda_2P_{22}(t) + \mu_2P_{20}(t), \\ \frac{d}{dt}P_{11}(t) &= -(\mu_2 + \lambda_1 + \lambda_2)P_{11}(t) + \lambda_1P_{21}(t) + \lambda_2P_{12}(t) + \mu_1P_{01}(t) + \mu_2P_{10}(t), \\ \frac{d}{dt}P_{01}(t) &= -\mu_1P_{01}(t) + \lambda_1P_{11}(t), \\ \frac{d}{dt}P_{20}(t) &= -\mu_2P_{20}(t) + \lambda_2P_{21}(t), \\ \frac{d}{dt}P_{10}(t) &= -\mu_2P_{10}(t) + \lambda_2P_{11}(t)\end{aligned}$$

Определение нестационарного коэффициента готовности

Для определения нестационарного коэффициента готовности суммируются вероятности рабочих состояний:

$$K_r(t) = P_{23}(t) + P_{22}(t) + P_{21}(t) + P_{13}(t) + P_{12}(t) + P_{11}(t)$$

Решим систему дифференциальных уравнений при помощи нахождения экспоненты матрицы интенсивностей переходов, умноженной на время t :

```
initial_state <- "23"  
p_hot <- function(t, s) expm(t*transition_rate_hot_reserve_M)[initial_state, s]  
p_cold <- function(t, s) expm(t*transition_rate_cold_reserve_M)[initial_state, s]
```

Нагруженный резерв:

```
k_r_hot <- function(t) p_hot(t, "23") + p_hot(t, "22") + p_hot(t, "21") +  
p_hot(t, "13") + p_hot(t, "12") + p_hot(t, "11")
```

Холодный резерв:

```
k_r_cold <- function(t) p_cold(t, "23") + p_cold(t, "22") + p_cold(t, "21") +  
p_cold(t, "13") + p_cold(t, "12") + p_cold(t, "11")
```

Построение графика зависимости нестационарного коэффициента готовности от времени

```
t <- seq(0, 10, 0.1)
k_r_hot_t <- sapply(t, k_r_hot)
k_r_cold_t <- sapply(t, k_r_cold)

par(mar = c(4, 8, 2, 2))
plot(t, k_r_hot_t, type="l", col="red", axes = F, xlab="Время, ч", ylab="",
ylim=c(0.99999992, 1.0000000000000001))
lines(t, k_r_cold_t, col="blue")
axis(1, at=c(0, 2, 5, 10))
axis(2, at=c(0.99999992, 0.99999996, 1.000000000000000), labels=c(0.99999992,
0.99999996, 1.000000000000000), las = 2)
title(ylab = "Коэффициент готовности", line = 6)
legend("topright", c("Нагруженный резерв", "Холодный резерв"), fill=c("red",
"blue"))
```

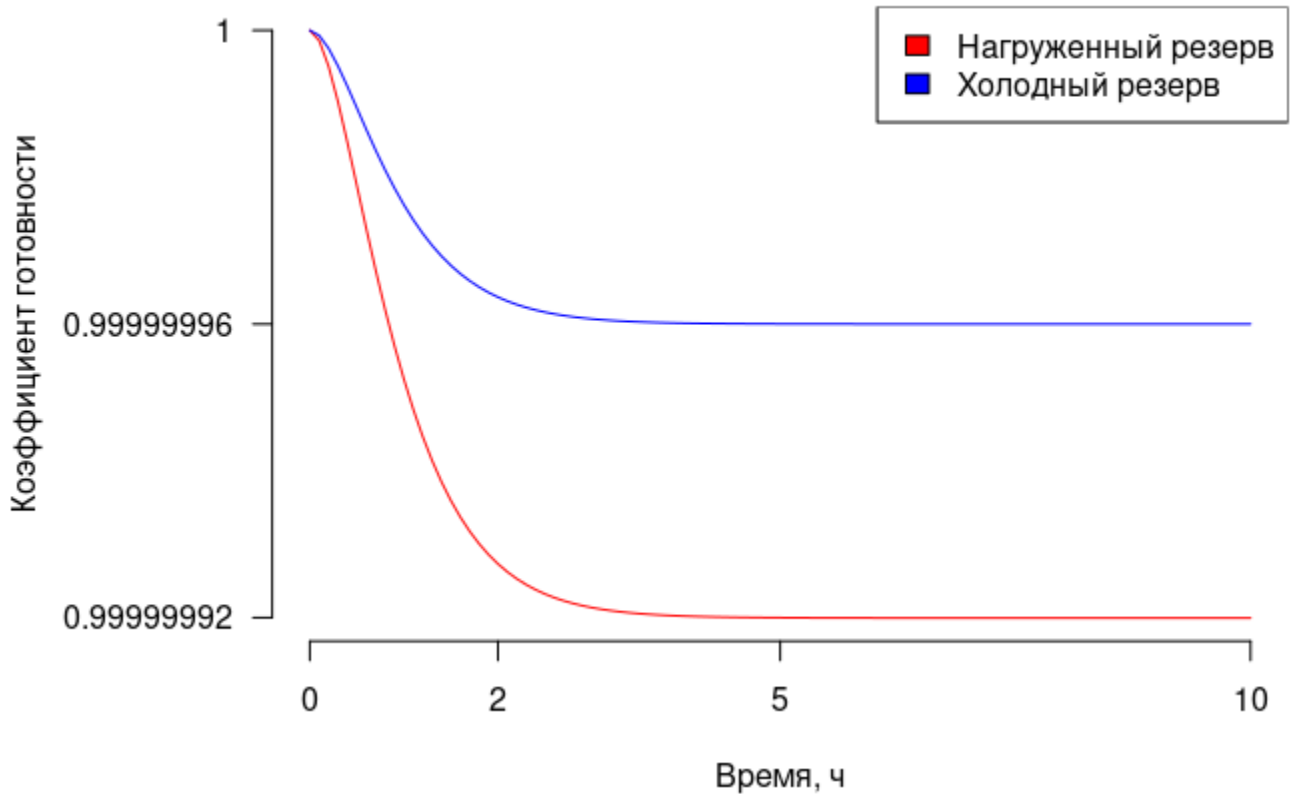


Рисунок 4. График зависимости нестационарного коэффициента готовности от времени

Невосстанавливаемая система

Построение графа состояний и переходов

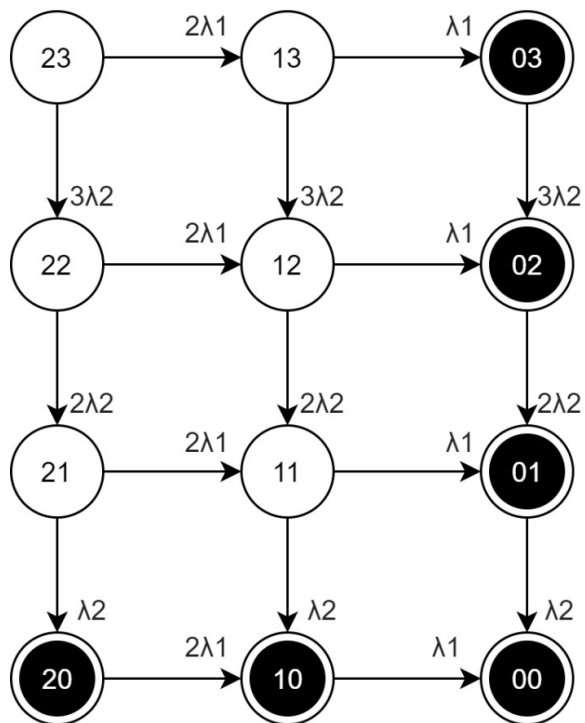


Рисунок 5. Граф состояний и переходов в невосстанавливаемой системе при нагруженном резерве

Построение и решение системы алгебраических уравнений

Матрица интенсивностей переходов:

```
states_unrec <- c("23", "22", "21", "20", "13", "12", "11", "10", "03", "02",  
"01", "00")
```

```
transition_rate_unrec_M <- matrix(  
  data = c(  
    0, 3*lambda2, 0, 0, 2*lambda1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0,  
    0, 0, 2*lambda2, 0, 0, 2*lambda1, 0, 0, 0, 0, 0, 0,  
    0, 0, 0, lambda2, 0, 0, 2*lambda1, 0, 0, 0, 0, 0,  
    0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 2*lambda1, 0, 0, 0, 0,  
    0, 0, 0, 0, 0, 3*lambda2, 0, 0, lambda1, 0, 0, 0,  
    0, 0, 0, 0, 0, 0, 2*lambda2, 0, 0, lambda1, 0, 0,  
    0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, lambda2, 0, 0, lambda1, 0,  
    0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, lambda1,  
    0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 3*lambda2, 0, 0,  
    0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 2*lambda2, 0,  
    0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, lambda2,  
    0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0,  
  ),  
  byrow = T, ncol = 12, dimnames = list(states_unrec, states_unrec))  
diag(transition_rate_unrec_M) <- -rowSums(transition_rate_unrec_M)  
transition_rate_unrec_M
```

```
##          23          22          21          20          13          12          11          10          03  
## 23 -0.0011  0.0003  0.0000  0.0000  0.0008  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  
## 22  0.0000 -0.0010  0.0002  0.0000  0.0000  0.0008  0.0000  0.0000  0.0000  
## 21  0.0000  0.0000 -0.0009  0.0001  0.0000  0.0000  0.0008  0.0000  0.0000  
## 20  0.0000  0.0000  0.0000 -0.0008  0.0000  0.0000  0.0000  0.0008  0.0000  
## 13  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000 -0.0007  0.0003  0.0000  0.0000  0.0004  
## 12  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000 -0.0006  0.0002  0.0000  0.0000  
## 11  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000 -0.0005  0.0001  0.0000  
## 10  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000 -0.0004  0.0000  
## 03  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000 -0.0003  
## 02  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  
## 01  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  
## 00  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  
##          02          01          00  
## 23  0.0000  0.0000  0.0000  
## 22  0.0000  0.0000  0.0000  
## 21  0.0000  0.0000  0.0000  
## 20  0.0000  0.0000  0.0000  
## 13  0.0000  0.0000  0.0000  
## 12  0.0004  0.0000  0.0000  
## 11  0.0000  0.0004  0.0000  
## 10  0.0000  0.0000  0.0004  
## 03  0.0003  0.0000  0.0000  
## 02 -0.0002  0.0002  0.0000  
## 01  0.0000 -0.0001  0.0001  
## 00  0.0000  0.0000  0.0000
```

Расчет стационарных вероятностей не требуется, так как без возможности восстановления система с течением времени окажется в состоянии полного отказа (00) и не сможет из него вернуться.

Построение системы дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt}P_{23}(t) &= -(2\lambda_1 + 3\lambda_2)P_{23}(t), \\ \frac{d}{dt}P_{13}(t) &= -(\lambda_1 + 3\lambda_2)P_{13}(t) + 2\lambda_1P_{23}(t), \\ \frac{d}{dt}P_{03}(t) &= -3\lambda_2P_{03}(t) + \lambda_1P_{13}(t), \\ \frac{d}{dt}P_{22}(t) &= -(2\lambda_1 + 2\lambda_2)P_{22}(t) + 3\lambda_2P_{23}(t), \\ \frac{d}{dt}P_{12}(t) &= -(\lambda_1 + 2\lambda_2)P_{12}(t) + 2\lambda_1P_{22}(t) + 3\lambda_2P_{13}(t), \\ \frac{d}{dt}P_{02}(t) &= -2\lambda_2P_{02}(t) + \lambda_1P_{12}(t) + 3\lambda_2P_{03}(t), \\ \frac{d}{dt}P_{21}(t) &= -(2\lambda_1 + \lambda_2)P_{21}(t) + 2\lambda_2P_{22}(t), \\ \frac{d}{dt}P_{11}(t) &= -(\lambda_1 + \lambda_2)P_{11}(t) + 2\lambda_1P_{21}(t) + 2\lambda_2P_{12}(t), \\ \frac{d}{dt}P_{01}(t) &= -\lambda_2P_{01}(t) + \lambda_1P_{11}(t) + 2\lambda_2P_{02}(t), \\ \frac{d}{dt}P_{20}(t) &= -2\lambda_1P_{20}(t) + \lambda_2P_{21}(t), \\ \frac{d}{dt}P_{10}(t) &= -\lambda_1P_{10}(t) + \lambda_2P_{11}(t) + 2\lambda_1P_{20}, \\ \frac{d}{dt}P_{00}(t) &= \lambda_2P_{01}(t) + \lambda_1P_{10}\end{aligned}$$

Определение нестационарного коэффициента готовности

Для определения нестационарного коэффициента готовности суммируются вероятности рабочих состояний:

$$K_r(t) = P_{23}(t) + P_{22}(t) + P_{21}(t) + P_{13}(t) + P_{12}(t) + P_{11}(t)$$

Решим систему дифференциальных уравнений при помощи нахождения экспоненты матрицы интенсивностей переходов, умноженной на время t :

```
initial_state <- "23"
p_unrec <- function(t, s) expm(t*transition_rate_unrec_M)[initial_state, s]
k_r_unrec <- function(t) p_unrec(t, "23") + p_unrec(t, "22") + p_unrec(t, "21") +
p_unrec(t, "13") + p_unrec(t, "12") + p_unrec(t, "11")
```

Построение графика зависимости нестационарного коэффициента готовности от времени

```
t <- seq(0, 15000, 100)
k_r_unrec_t <- sapply(t, k_r_unrec)

par(mar = c(4, 8, 2, 2))
plot(t, k_r_unrec_t, type="l", axes = F, xlab="Время, ч", ylab="", ylim=c(0,
1.0000000000000001))
axis(1, at=c(0, 2500, 5000, 10000, 15000))
axis(2, at=c(0, 1.000000000000000), labels=c(0, 1.000000000000000), las = 2)
title(ylab = "Коэффициент готовности", line = 6)
```

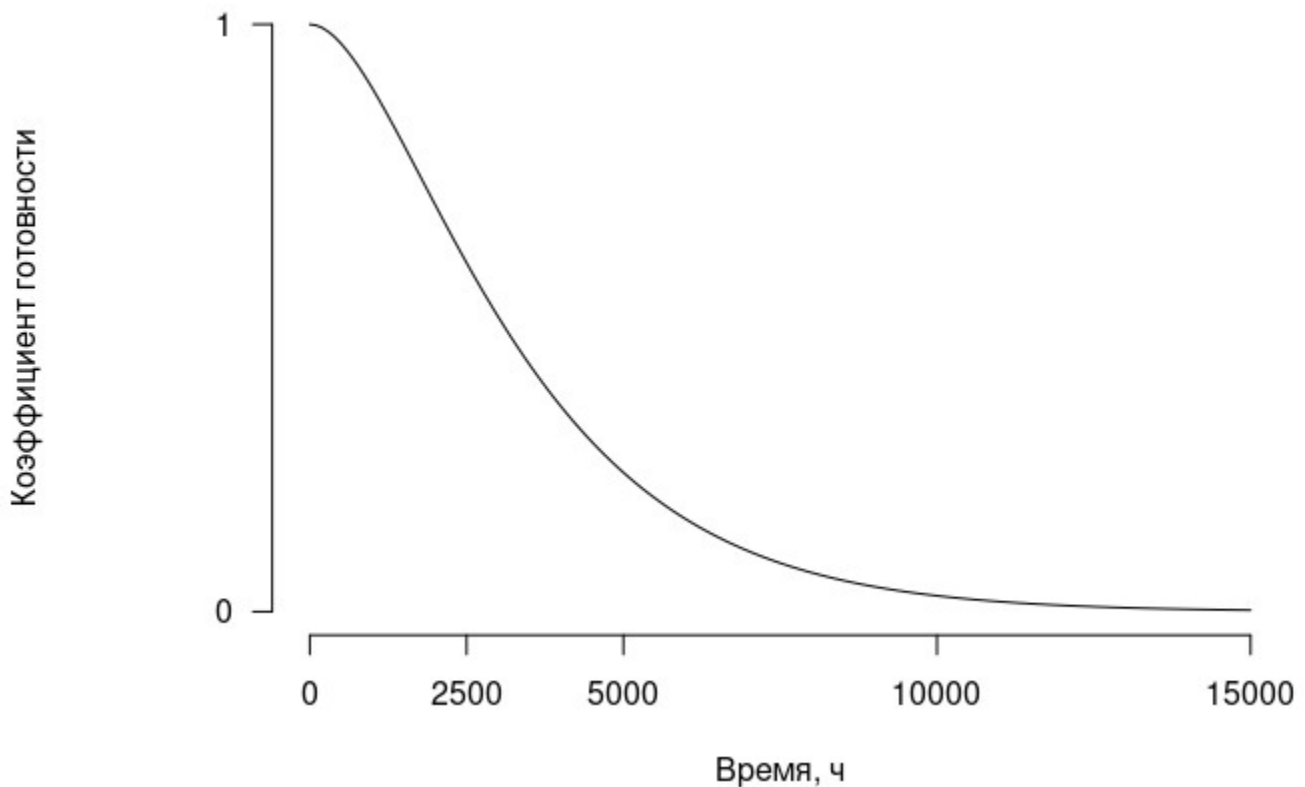


Рисунок 6. График зависимости нестационарного коэффициента готовности от времени, невосстанавливаемая система

Вывод

В ходе выполнения работы для заданного варианта организации системы была построена марковская модель надежности, при этом рассмотрены две дисциплины резервирования (нагруженный резерв и холодный резерв), а также восстанавливаемые и невосстанавливаемые системы.

Сравнительный анализ зависимости нестационарного коэффициента готовности для обозначенных конфигураций позволяет сделать следующие выводы:

- нестационарный коэффициент готовности восстанавливаемых систем уменьшается до достижения стационарного значения, которое в рассмотренных случаях близко к единице;
- при нагруженном резерве коэффициент готовности ниже, чем при холодном, так как возможен выход из строя резервных элементов;
- коэффициент готовности невосстанавливаемых систем с течением времени стремится к нулю.