

$$h_{д} = \vartheta_{д} t_{р д}, \text{ см.} \quad (5)$$

Расчетные зависимости (1)–(5) используются в программе для моделирования процесса горения дуги. Эти параметры и определяют графическое представление дуги. Электрическая дуга возникает при размыкании контактов, если значения напряжения и тока больше минимальных, необходимых для поддержания дугового разряда. Если расчетное значение тока меньше минимально необходимого значения тока для поддержания горения дуги, то размыкание контактов происходит без образования дуги. Если расчетное значение больше, то в программе моделируется электрическая дуга постоянного тока. При размыкании контактов дуга изменяет свою траекторию, длину. Моделируемый диаметр дуги зависит от значения отключаемого тока. Скорость гашения дуги определяется по формуле (3).

Программа разработана на языке Visual Basic 6.0. Она содержит удобную систему помощи, которая позволяет разобраться в особенностях работы программы. При вводе некорректных параметров программа сообщит об этом пользователю и предложит ввести корректные данные. Разработанная программа может быть полезна студентам при изучении контакторов постоянного тока и особенностей электрической дуги.

### Литература

1. Чунихин, А.А. Электрические аппараты: Общий курс. Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 720 с.
2. Сахаров, П.В. Проектирование электрических аппаратов (Общие вопросы проектирования). Учебное пособие для студентов электротехнических вузов. – М.: Энергия, 1971. – 560 с.
3. Алексеев, Д.В. Компьютерное моделирование физических задач в Visual Basic. – М.: Солон-ПРЕСС, 2004. – 528 с.

УДК 620.004.5

## ВЫБОР НЕВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ РЕЗЕРВИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

*Северин Л.А.*

Научный руководитель – д-р техн. наук, профессор АНИЩЕНКО В.А.

Для повышения надежности систем автоматического регулирования применяют различные схемы структурного резервирования: дублирование, троирование, мажоритарные схемы «два из трех» («2 из 3»), «три из пяти» («3 из 5») и др.

Основными показателями, характеризующими надежность невосстанавливаемых систем, являются вероятность безотказной работы  $P(t)$  и наработка на отказ  $T$ .

При экспоненциальном законе надежности каждого элемента система, состоящая из  $m$  последовательно соединенных элементов, также подчиняется этому закону:

$$P(t) = \prod_{i=1}^m p_i(t) = e^{-t\Lambda},$$

где  $p_i(t)$  – вероятность безотказной работы  $i$ -го элемента;

$\Lambda$  – интенсивность отказов системы, равная сумме интенсивностей отказов элементов  $\lambda_i$  и не зависящая от времени  $t$ :

$$\Lambda = \sum_{i=1}^m \lambda_i = \text{const}.$$

Наработка на отказ обратно пропорциональна интенсивности отказов:

$$T = \Lambda^{-1}.$$

Системы последовательно соединенных элементов при большей наработке на отказ имеют и большую вероятность безотказной работы.

Невосстанавливаемые резервированные системы не подчиняются экспоненциальному закону надежности, т. к. вероятности их безотказной работы описываются комбинациями экспонент составляющих элементов и интенсивности отказов изменяются во времени ( $\Lambda = \text{var}$ ). Это приводит к тому, что сравнение ряда резервированных систем по показателям надежности  $P$  и  $T$  дает противоречивые результаты [1, 2].

В таблице 1 приведены исходные данные исследованных схем с постоянным резервированием. Кратность резервирования  $k$  определяется отношением:

$$k = \frac{n-r}{n},$$

где  $n$  – общее число параллельно включенных элементов;

$r$  – минимальное число элементов, необходимых для нормальной работы схемы.

**Таблица 1. Исходные данные исследованных схем с постоянным резервированием**

$k$	$P_k(k)$	$T_k$
0/1	$e^{-\lambda t}$	$\frac{1}{\lambda}$
1/4	$5e^{-4\lambda t} - 4e^{-5\lambda t}$	$\frac{1}{\lambda} \left( \frac{1}{4} + \frac{1}{5} \right)$
1/3	$4e^{-3\lambda t} - 3e^{-4\lambda t}$	$\frac{1}{\lambda} \left( \frac{1}{3} + \frac{1}{4} \right)$
1/2	$3e^{-2\lambda t} - 2e^{-3\lambda t}$	$\frac{1}{\lambda} \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{3} \right)$
1/1	$2e^{-\lambda t} - e^{-2\lambda t}$	$\frac{1}{\lambda} \left( 1 + \frac{1}{2} \right)$
2/2	$6e^{-2\lambda t} - 8e^{-3\lambda t} + 3e^{-4\lambda t}$	$\frac{1}{\lambda} \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} \right)$
2/1	$3e^{-\lambda t} - 3e^{-2\lambda t} + e^{-3\lambda t}$	$\frac{1}{\lambda} \left( 1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} \right)$
3/1	$4e^{-\lambda t} - 6e^{-2\lambda t} + 4e^{-3\lambda t} - e^{-4\lambda t}$	$\frac{1}{\lambda} \left( 1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} \right)$
4/1	$5e^{-\lambda t} - 10e^{-2\lambda t} + 10e^{-3\lambda t} - 5e^{-4\lambda t} + e^{-5\lambda t}$	$\frac{1}{\lambda} \left( 1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} + \frac{1}{5} \right)$
3/2	$10e^{-2\lambda t} - 20e^{-3\lambda t} + 15e^{-4\lambda t} - 4e^{-5\lambda t}$	$\frac{1}{\lambda} \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} + \frac{1}{5} \right)$
2/3	$10e^{-3\lambda t} - 15e^{-4\lambda t} + 6e^{-5\lambda t}$	$\frac{1}{\lambda} \left( \frac{1}{3} + \frac{1}{4} + \frac{1}{5} \right)$

Результаты расчетов вероятностей безотказной работы и наработок на отказ по формулам из таблицы 1 представлены на рисунках 1 и 2. Анализ этих результатов показывает, что шкала предпочтений резервированных систем по показателю надежности  $T$  не зависит от интенсивности отказов  $\lambda$ . Наилучшей является система с кратностью резервирования  $k = 4/1$ , далее в порядке убывания  $T$  следуют системы с кратностью резервирования  $k = 3/1$ ,  $k = 2/1$ ,  $k = 1/1$ ,  $k = 3/2$ ,  $k = 2/2$ ,  $k = 0/1$ ,  $k = 1/2$ ,  $k = 2/3$ ,  $k = 1/3$ ,  $k = 1/4$ .

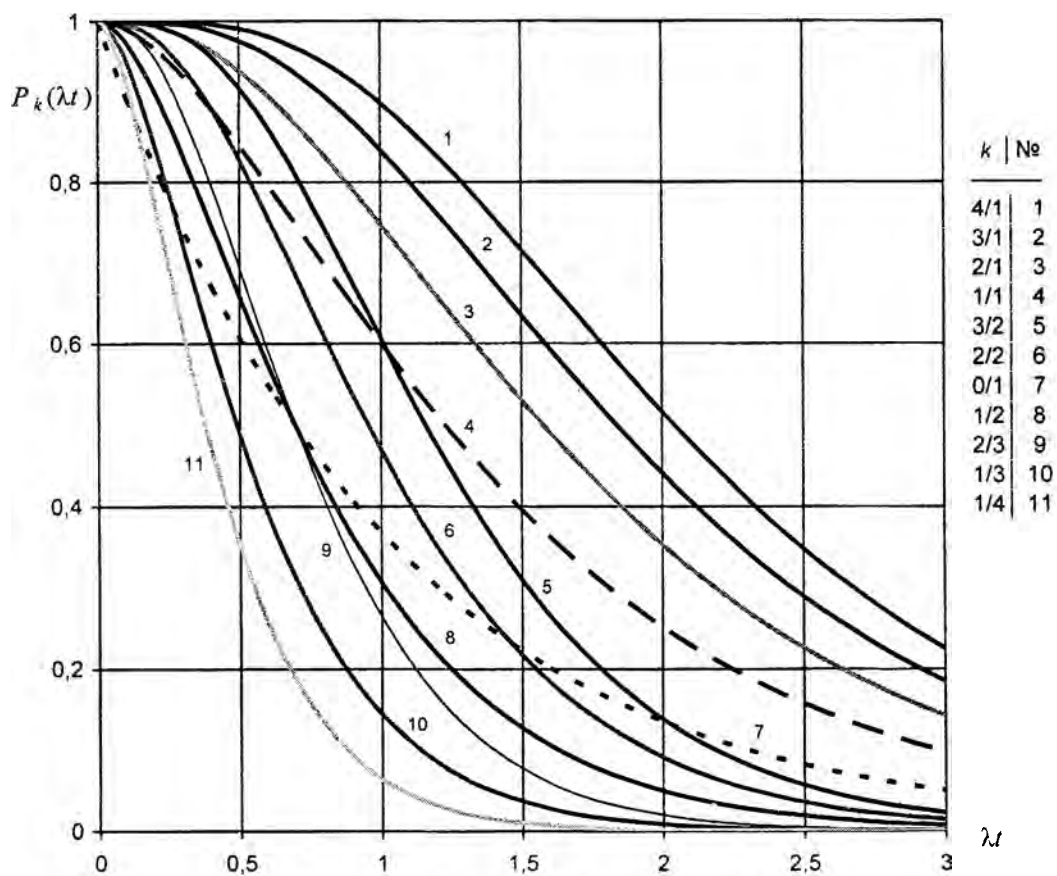


Рисунок 1. Вероятности безотказной работы

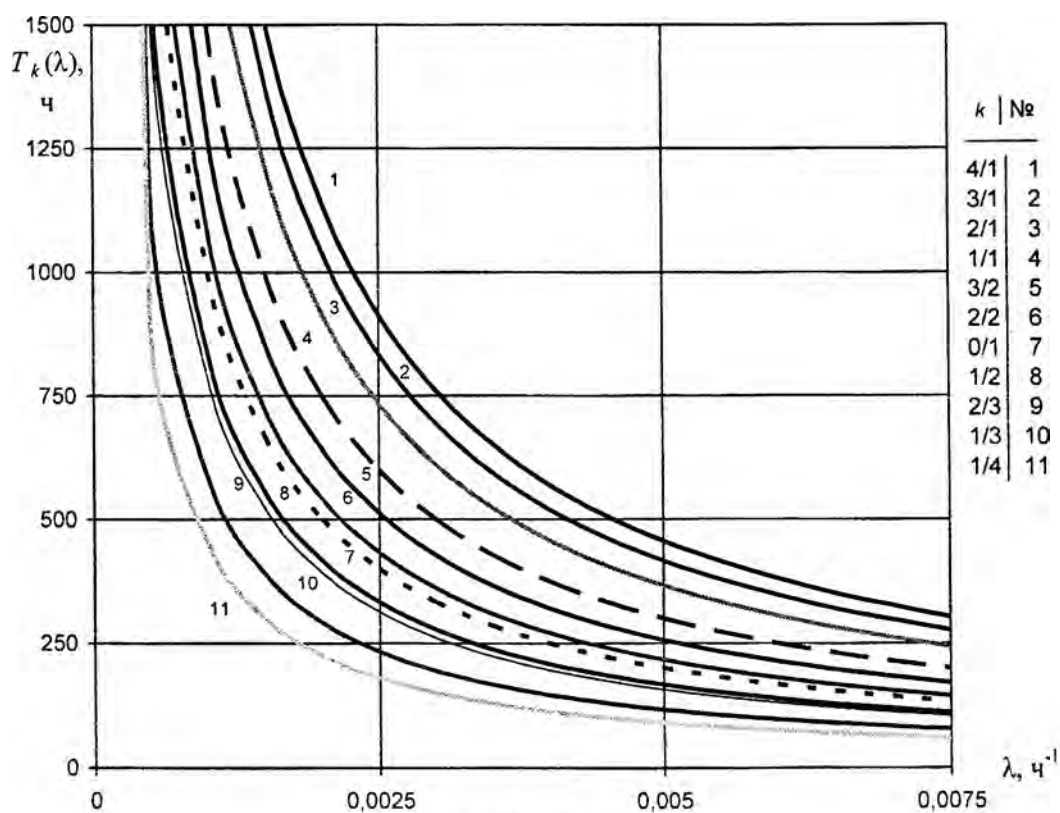


Рисунок 2. Нарботки на отказ

Таблица 2. Шкала предпочтений по показателю надежности  $P$

Интервал изменения $\lambda t$	Системы резервирования по мере убывания вероятности $P_{cp}(\lambda t)$											
	4/1	3/1	3/2	2/1	2/2	2/3	1/1	1/2	1/3	1/4	0/1	0/1
0,000–0,1287	4/1	3/1	3/2	2/1	2/2	2/3	1/1	1/2	1/3	1/4	0/1	0/1
0,1287–0,14055	4/1	3/1	3/2	2/1	2/2	2/3	1/1	1/2	1/3	1/4	0/1	0/1
0,14055–0,2645	4/1	3/1	3/2	2/1	2/2	1/1	2/3	1/2	1/3	0/1	1/4	1/4
0,2645–0,2877	4/1	3/1	3/2	2/1	2/2	1/1	2/3	1/2	1/3	0/1	1/4	1/4
0,2877–0,40554	4/1	3/1	2/1	3/2	2/2	1/1	2/3	1/2	1/3	0/1	1/4	1/4
0,40554–0,6932	4/1	3/1	2/1	3/2	1/1	2/2	2/3	1/2	0/1	1/3	1/4	1/4
0,6932–1,0227	4/1	3/1	2/1	3/2	1/1	2/2	2/3	1/2	0/1	1/3	1/4	1/4
1,0227–1,4593	4/1	3/1	2/1	3/2	1/1	2/2	0/1	1/2	2/3	1/3	1/4	1/4
1,4593–2,03162	4/1	3/1	2/1	1/1	3/2	2/2	0/1	1/2	2/3	1/3	1/4	1/4
2,03162–3,0000	4/1	3/1	2/1	1/1	3/2	2/2	0/1	1/2	2/3	1/3	1/4	1/4

Шкала предпочтений по показателю надежности  $P$  – переменная в зависимости от параметра  $\lambda t$  (таблица 2), т. к. быстрота убывания вероятностей безотказной работы при росте  $\lambda t$  у разных систем неодинакова. Построение шкалы предпочтений по  $P$  основывалось на сравнении средних на интервалах  $(0, \lambda t)$  значениях вероятностей безотказной работы систем.

$$P_{cp}(0, \lambda t) = \frac{1}{\lambda t} \int_0^{\lambda t} P(x) dx.$$

Если ресурс системы  $t_p$  не превышает наработку на отказ, выбор системы целесообразно производить по показателю надежности  $P$ .

При проектировании системы с резервированием необходимо удовлетворять требованиям надежности с учетом стоимости системы  $C_\Sigma$ . Возможна постановка следующих задач оптимального резервирования.

**Задача 1.** При известных значениях  $\lambda_i, r, t_p$  стоимости одного элемента  $c_i$  выбрать систему минимальной стоимости, обеспечивающую заданную вероятность безотказной работы  $P_{зад}$ , т. е.

$$C_\Sigma = \sum_{i=1}^m c_i \rightarrow \min;$$

$$P_{cp}(\lambda t_p) \geq P_{зад}.$$

**Задача 2.** При известных значениях  $\lambda_i, r, c_i, t_p$  выбрать максимально надежную систему, стоимость которой не превышает допустимую  $C_{доп}$ , т. е.

$$P_{cp}(\lambda t_p) \rightarrow \max;$$

$$C_\Sigma = \sum_{i=1}^m c_i \leq C_{доп}.$$

Для случаев, когда сравниваемые системы имеют одинаковое количество элементов, шкала предпочтений по  $P$  позволяет выбрать максимально надежную систему и при отсутствии информации о стоимости элементов.

### Литература

1. Теория надежности радиоэлектронных систем в примерах и задачах / Под ред. Г.В. Дружинина. – М.: Энергия, 1976. – 448 с.
2. Северин, Л.А., Анищенко, В.А. Обоснование критерия выбора схем резервирования систем управления. // Актуальные проблемы энергетики: материалы докладов 62-й научн.-техн. конф. студентов, магистрантов и аспирантов / БНТУ. – Минск: БНТУ, 2006. – С. 90–92.