

УДК 620.004.5

## МЕТОДИКА ВЫБОРА НЕВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ РЕЗЕРВИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

Докт. техн. наук, проф. АНИЩЕНКО В. А., инж. СЕВЕРИН Л. А.

*Белорусский национальный технический университет,  
СООО «БелРосСтройЭнергоСервис»*

Надежность сложных систем контроля и управления технологическими процессами определяется, наряду с надежностью составляющих отдельных подсистем (элементов), способом их резервирования. Ниже рассматривается пассивное структурное резервирование с целой и дробной кратностями. Под кратностью резервирования понимается [1] отношение числа резервных элементов  $z$  к числу основных  $r$

$$k = \frac{z}{r} = \frac{n-r}{r}, \quad (1)$$

где  $n$  – общее число параллельно включенных элементов; под основными элементами понимается их минимальный набор, необходимый для нормальной работы системы.

При резервировании с целой кратностью величина  $k$  есть целое число, при резервировании с дробной кратностью величина  $k$  представляет собой дробное несокращаемое число.

Основные и резервные элементы невосстанавливаемых систем с постоянным резервированием находятся постоянно в рабочем состоянии. Отказ таких систем возникает при одновременном пребывании в неисправном состоянии всех параллельных элементов, если каждый из последних способен передавать требуемую мощность.

Если пропускная способность одного элемента недостаточна для передачи требуемой мощности системы и имеются несколько основных элементов, то отказ системы может произойти при отказе части параллельных элементов.

Для сравнения надежности резервированных систем необходимо выбрать оперативные показатели, по которым оно будет производиться. С точки зрения потребителя, надежность функционирования невосстанов-

ливаемой резервированной системы может оцениваться вероятностью ее безотказной работы  $P(t)$  или средним временем безотказной работы  $T$  [2].

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

$$P(t) = \prod_{i=1}^m p_i(t) = \exp(-\Lambda t), \quad (2)$$

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  $t$ ,

$$\Lambda = \sum_{i=1}^m \lambda_i = \text{const}. \quad (3)$$

Среднее время безотказной работы системы обратно пропорционально интенсивности ее отказов

$$T = \Lambda^{-1} \quad (4)$$

и связано с вероятностью безотказной работы системы соотношением

$$T = \int_0^{\infty} P(t) dt. \quad (5)$$

Невосстанавливаемые резервированные системы, составленные из параллельных элементов, не подчиняются экспоненциальному закону надежности, поскольку вероятности их безотказной работы описываются комбинациями экспонент, характеризующих вероятности безотказной работы отдельных элементов (табл. 1). Поэтому интенсивности отказов таких систем зависят от времени ( $\Lambda = \text{var}$ ) и сравнение их надежности по показателям типов  $P$  или  $T$  может привести к противоположным результатам [3, 4].

Взятые для сравнительного анализа резервированные системы охватывают следующие наиболее характерные ситуации.

Если нормальная работа системы обеспечивается одним элементом с достаточно большой пропускной способностью, то можно применить схему:

- дублированную с одним резервным элементом;
- троированную с двумя резервными элементами;
- квадрированную с тремя резервными элементами;
- квинтированную с четырьмя резервными элементами.

При недостаточной пропускной способности одного элемента используют схемы с двумя основными элементами:

- мажоритарную схему «два из трех» с одним резервным элементом;
- схему с двумя резервными элементами;
- схему с тремя резервными элементами.

Если нормальная работа системы требует три основные элемента, то используют:

- мажоритарную схему «три из четырех» с одним резервным элементом;

- мажоритарную схему «три из пяти» с двумя резервными элементами.

Если нормальная работа системы требует четыре основных элемента, то возможна мажоритарная схема «четыре из пяти» с одним резервным элементом.

Таблица 1

Расчетные формулы для определения показателей надежности

$k$	$P(t)$	$T_k$
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	$10e^{-3\lambda t} - 15e^{-4\lambda t} + 6e^{-5\lambda t}$	$\frac{1}{\lambda} \left( \frac{1}{3} + \frac{1}{4} + \frac{1}{5} \right)$

Мажоритарные схемы могут применяться и тогда, когда для нормальной работы достаточен один основной элемент. Резервные элементы в этом случае обеспечивают информационную избыточность, что позволяет решать задачу оперативной функциональной диагностики правильности передаваемого сигнала. Достоверным принимается значение сигнала, совпадающее на выходах большинства элементов системы.

Результаты расчетов вероятностей и среднего времени безотказной работы по формулам из табл. 1 представлены соответственно на рис. 1 и 2.

Анализ этих результатов показал, что шкала предпочтений резервированных систем по показателю типа  $T$  неизменна.

При любых значениях интенсивностей отказов элементов наилучшей является система с кратностью резервирования  $k = 4/1$ , далее в порядке убывания  $T$  располагаются системы с кратностями:  $k = 3/1$ ;  $k = 2/1$ ;  $k = 1/1$ ;  $k = 3/2$ ;  $k = 2/2$ ;  $k = 0/1$ ;  $k = 1/2$ ;  $k = 2/3$ ;  $k = 1/3$ ;  $k = 1/4$ . Шкала предпочтений систем по показателю типа  $P$  переменная в функции от параметра  $\lambda t$ , по-

сколькx быстрота убывания вероятностей безотказной работы при росте  $\lambda t$  у разных систем неодинакова (табл. 2). Построение шкалы предпочтений по этому показателю произведено на основе сравнения средних на интервалах  $(0, \lambda t)$  значений вероятностей безотказной работы систем

$$P_{\text{cp}}(0, \lambda t) = \frac{1}{\lambda t} \int_0^{\lambda t} P(x) dx. \quad (6)$$

Если ресурс  $t_p$  производственной системы, контроль и управление которой осуществляются с помощью невозстанавливаемой резервированной системы, не превышает среднее время безотказной работы системы контроля и управления ( $t_p \leq T$ ), то выбор последней предлагается производить по показателю надежности типа  $P$  на основе представленной в табл. 2 шкалы предпочтений. В противном случае ( $t_p > T$ ) выбор наилучшей по надежности системы контроля и управления целесообразно производить на основе совместного анализа показателей надежности  $P$  и  $T$ , используя приведенные на рис. 1 и 2 зависимости.

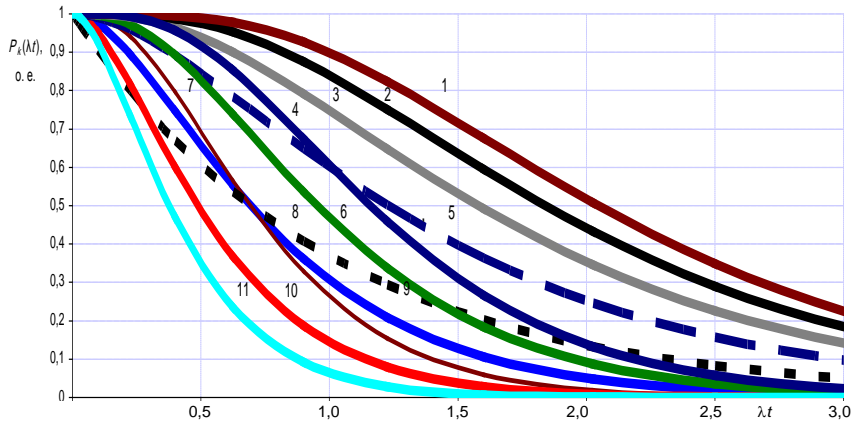


Рис. 1. Вероятности безотказной работы: 1 –  $k = 4/1$ ; 2 –  $3/1$ ; 3 –  $2/1$ ; 4 –  $1/1$ ; 5 –  $3/2$ ; 6 –  $2/2$ ; 7 –  $0/1$ ; 8 –  $1/2$ ; 9 –  $2/3$ ; 10 –  $1/3$ ; 11 –  $k = 1/4$

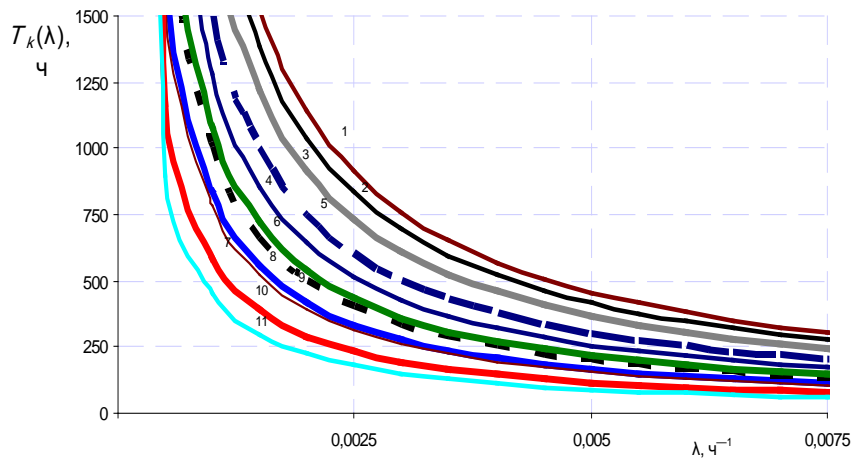


Рис. 2. Среднее время безотказной работы: 1 –  $k = 4/1$ ; 2 –  $3/1$ ; 3 –  $2/1$ ; 4 –  $1/1$ ; 5 –  $3/2$ ; 6 –  $2/2$ ; 7 –  $0/1$ ; 8 –  $1/2$ ; 9 –  $2/3$ ; 10 –  $1/3$ ; 11 –  $k = 1/4$

Приведенные выше рекомендации по выбору резервированной системы контроля и управления корректны, если ее стоимость намного меньше возможного экономического ущерба от снижения надежности соответствующей производственной системы.

Таблица 2

**Шкала предпочтений резервированных систем по показателю надежности  $P$**

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

Если же стоимость системы контроля и управления соизмерима с ущербом производственной системы, то возможна постановка следующих задач оптимального резервирования при  $t_p \leq T$ .

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

$$C_\Sigma = \sum_{i=1}^n c_i \rightarrow \min; \quad (7)$$

$$P_{cp}(0, \lambda t_p) \geq P_{зад}.$$

*Задача 2.* При известных  $\lambda_i$ ,  $r$ ,  $t_p$ ,  $c_i$  выбрать максимально надежную систему, стоимость которой не превышает допустимое значение  $C_{доп}$ :

$$P_{cp}(0, \lambda t_p) \rightarrow \max; \quad (8)$$

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

## ВЫВОДЫ

1. Рассчитаны количественные характеристики показателей надежности невосстанавливаемых систем контроля и управления технологическими процессами при общем пассивном резервировании.

2. Обоснованы критерии и разработана методика оптимального выбора невосстанавливаемых пассивных резервированных систем контроля и управления технологическими процессами.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гук, Ю. Б. Теория надежности в электроэнергетике / Ю. Б. Гук. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 208 с.
2. Надежность технических систем: справ. / Ю. К. Беляев [и др.] – М.: Радио и связь, 1985. – 608 с.
3. Теория надежности радиоэлектронных систем в примерах и задачах / под ред. Г. В. Дружинина. – М.: Энергия, 1976. – 448 с.
4. Северин, Л. А. Обоснование критерия выбора схем резервирования систем управления / Л. А. Северин, В. А. Анищенко // Актуальные проблемы энергетики. Материалы 62-й НТК студентов, магистрантов и аспирантов. – Минск: БНТУ, 2006. – С. 90–92.

Представлена кафедрой  
электроснабжения

Поступила 8.08.2007

УДК 621.314.1

### **СИНТЕЗ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ БЕСТРАНСФОРМАТОРНЫМ ПОВЫШАЮЩИМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ**

**Инж. МИРОНОВИЧ А. В., канд. техн. наук, доц. ПРИМШИЦ П. П.**

*Белорусский национальный технический университет*

Основная часть электроприемников питается непосредственно от сети, но существует ряд устройств, которые получают электрическую энергию от автономных источников (аккумуляторов). В таких случаях обычно возникает необходимость преобразовывать питающее напряжение в постоянное другой величины или в переменное. Для этих целей используются полупроводниковые преобразователи.

Наибольшее распространение сегодня имеют так называемые ключевые, или нерассеивающие, преобразователи-стабилизаторы, в которых поддержание требуемого значения выходного напряжения обеспечивается за счет импульсного управления силовым полупроводниковым ключом. В отличие от рассеивающих стабилизаторов, в которых полупроводниковый элемент (транзистор) работает в линейном режиме, ключевые стабилизаторы имеют высокий КПД [1], что обусловило их преимущественное использование, особенно для питания мощных потребителей электроэнергии.

Характерным примером является система электроснабжения оборудования пассажирских вагонов повышенной комфортности. Важный элемент таких вагонов – кондиционер, который имеет в своем составе компрессор для сжатия паров фреона. Серийно выпускаемые для этой цели компрессоры имеют встроенный приводной асинхронный двигатель с номинальным напряжением 380/220 В. Инвертор, обеспечивающий питание двигателя,