УДК 519.95+544.623 DOI: 10.33075/2220-5861-2020-2-144-150

# НАДЕЖНОСТЬ И ТОЧНОСТЬ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ. ЧАСТЬ 1

**В.А. Гайский**

Институт природно-технических систем, РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28
*E-mail: gaysky@inbox.ru*

Оцениваются требования к надежности систем контроля природной среды с учетом обеспечения заданной точности восстановления полей в типовых пространственно-временных масштабах. Приводится оригинальный метод расчета надежности избыточных систем по надежности элементов переходом от логической функции работоспособности к вероятности. Рассматриваются потенциальные возможности построения устойчивых к отказам типа короткое замыкание и обрыв самовосстанавливающихся из холодного резерва электронных элементов и цепей.

**Ключевые слова:** надежность, точность, диагностика неисправностей, пространственно-временная решетка измерений.

Поступила в редакцию: 17.04.2020. После доработки: 15.06.2020.

**Введение.** Состав системы контроля природной среды содержит все технические средства и действия, которые обеспечивают построение многомерных (2, 3 и 4-х мерных) полей по данным отбора информации о поле в точках пространственно-временной решетки.

Состав средств и их использование могут быть различными, что позволяет восстанавливать поля с различным качеством (точностью). Точность обусловлена уровнем инструментальных погрешностей непосредственных измерений и методических погрешностей элиайзинга, зависящих от параметров пространственно-временной решетки. Ненадежность приводит к постепенному увеличению инструментальной погрешности, катастрофическому отказу измерительных каналов или совокупности средств (технических, программных, организационных), обеспечивающих получение и использование информации от узла пространственно-временной решетки. Это обычно увеличивает все погрешности и для повышения надежности вводится целенаправленная избыточность во все средства и действия. Естественно, все многочисленные методы и технологии, созданные для анализа и повышения надежности различных систем, применимы и в системах контроля природной среды.

Целью данной работы является установление взаимосвязи точности систем контроля от их надежности.

**Показатели надежности элементов.** Принято надежность систем оценивать по известной априори надежности элементов (узлов, блоков или частей) и эквивалентной схемы надежности системы [1]. Предполагается, что функции надежности элементов соответствуют некоторым простым законам или их композиции, параметры которых определяются экспериментально.

Так элементы и блоки радиоэлектроники и цифровой электроники удовлетворительно описываются экспоненциальным законом надежности.

$P(t)=e^{-\lambda t}$, где интенсивность внезапных отказов $\lambda>0$ (1)

и среднее время жизни элемента

$$T_{cp}=\frac{1}{\lambda}\ . \qquad (2)$$

Для измерительных каналов и приема-передачи каналов связи характерен постепенный уход параметров до некоторого критического уровня (которых может быть несколько), при котором элемент считается отказавшим. В этом случае используется нормальный закон распределения надежности.

Функция надежности для элементов с переменной интенсивностью отказов хорошо аппроксимируется законом Вейбулла. Используются также для функции надежности элементов гамма-распределение, логарифмически нормальное распределение, степенное распределение и другие. Интеграл в пределах от 0 до ∞ от этих функций дает среднее время жизни элемента $T_{cp}$.

<u>Надежность систем.</u> Для определения показателей надежности системы необходимо знание структуры системы и формулировка её работоспособности в форме истинности функции алгебры логики, где переменными являются состояния элементов и условий использования.

Метод перехода от логической функции работоспособности системы из неоднородных элементов с произвольной структурой к формуле для вероятности (функции надежности) состоит в следующем [2]. Допустим имеется система из $n$ элементов и условий $\{x_i\}$, принимающих одно из двух состояний. Для элементов это исправен $-x_i$, неисправен – $\overline{x_i}$, для условий выполняется – $x_j$, не выполняется $-\overline{x_j}$. Мощность булева пространства $2^n$ точек. По известной произвольной структуре системы методом прямого перебора рабочих состояний системы при заданной погрешности или по качественными соображениями составляем логическую функцию работоспособности системы в произвольной дизъюнктивной нормальной форме (ДНФ) вида

$$F(x_{n-1}, \dots x_i, \dots x_0) = \bigvee_{i=1}^{l} U_i^1 \quad , \qquad (3)$$

где $U_i^1$ – элементарное произведение 1-го уровня из булевых переменных $\{x_i\}$, $i=\overline{1,l}$ – номер элементарного произведения, $l$ – число элементарных произведений 1-го уровня.

При разрядности $m$ элементарного произведения оно покрывает $2^{n-m}$ точек булева пространства. В общем случае множества точек, покрываемых элементарными событиями, пересекаются до $(n-m)$ раз. Исключим многократное покрытие булева пространства пересекающимися множествами, оставив однократное покрытие. При этом учтем, что исключение одного лишнего покрытия из парных пересечений множеств, покрываемых произведениями 1-го уровня, автоматически исключает все покрытия тройных пересечений и их надо восстанавливать. И далее, при выполнении всех четных пересечений стираются все нечетные пересечения и их тоже надо восстанавливать.

Сформируем новое логическое уравнение работоспособности с исключением лишних пересечений из множества объединенных событий. Для этого введем операцию исключающего «или» и обозначим её ⊕. С учетом приведенных выше правил исключения лишних пересечений перепишем формулу (3) в виде

$$f_1(x_{n-1,} \dots x_i, \dots, x_0) = \bigvee_{i=1}^{l} U_i^i \bigoplus_{i=1}^{C_l^2} U_i^2 \bigvee_{i=1}^{C_l^3} U_i^3 \bigoplus_{i=1}^{C_l^4} U_i^4 + \dots + \bigvee_{i=1}^{C_l^l} U_i^{l-1} \quad , \qquad (4)$$

где $U_i^S$ – произведение $S$ событий $U_i^1 \in \{U_i^1\}$.

От последнего выражения переходим к вероятности истинности функции $f_1(x_i)$ заменой переменных

$$x_i \to P_{x_i} \ ,$$
$$\overline{x_i} \to P_{\overline{x_i}} = 1 - P_{x_i} \qquad (5)$$

и операций

$$\& \to \times,$$
$$\vee \to +, \qquad (6)$$
$$\oplus \to -.$$

Получаем известную формулу для вычисления вероятности совместимых событий

$$P_{f(x)} = \sum_{t=1}^{l} p\left(U_i^1\right) - \sum_{i,j}^{C_l^2} p\left(U_i^1 \,\&\, U_j^1\right) + \sum_{i,S,t}^{C_l^3} p\left(U_i^1 \,\&\, U_j^1 \,\&\, U_k^1\right) + (-1)^{l-1} p\left(\mathop{\&}_{i=1}^{n-m} U_i^1\right) . \qquad (7)$$

Если вероятности надежности элементов заданы по $k$-уровням погрешности, то получим $k^n$ вариантов уравнения надежности системы, вероятности работоспособности системы при заданных уровнях погрешности элементов. Видимо, целесообразно для всех элементов принимать одинаковую погрешность несколько раз. Получим оценки надежности системы при нескольких погрешностях.

<u>Пример 1.</u> Система имеет мостиковую надежностную схему из пяти элементов $x_{1,} \dots x_5$, с вероятностями исправности $p_{1,} \dots p_5$ при заданной погрешности $\sigma_i$.

$$F(x_{1,} \dots x_5) = x_1x_4 \vee x_2x_5 \vee x_1x_3x_5 \vee x_2x_3x_4 \;;$$

$$\begin{aligned} f(x_{1,} \dots x_5) &= x_1x_4 \vee x_2x_5 \vee x_1x_3x_5 \vee x_2x_3x_4 \oplus \\ &\oplus + x_1x_2x_4x_5 \oplus x_1x_3x_4x_5 \oplus x_1x_2x_3x_4 \oplus x_1x_2x_3x_5 \oplus \\ &\oplus x_2x_3x_4x_5 \oplus x_1x_2x_3x_4x_5 \vee x_1x_2x_3x_4x_5 \vee x_1x_2x_3x_4x_5 \vee \\ &\vee x_2x_3x_4x_5 \vee x_1x_2x_3x_4x_5 \oplus x_1x_2x_3x_4x_5 = x_1x_4 \vee \\ &\vee x_2x_5 \vee x_1x_3x_5 \vee x_2x_3x_4 \oplus x_1x_2x_4x_5 \oplus x_1x_3x_4x_5 \oplus \\ &\oplus x_1x_2x_3x_4 \oplus x_1x_2x_3x_5 \oplus x_2x_3x_4x_5 \vee x_1x_2x_3x_4x_5 \vee \\ &\vee x_1x_2x_3x_4x_5 . \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_f = {} & p_1p_4 + p_2p_5 - p_1p_3p_5 + p_2p_3p_4 - p_1p_2p_4p_5 - p_1p_3p_4p_5 - \\ & - p_1p_2p_3p_4 - p_1p_2p_3p_5 - p_2p_3p_4p_5 + 2p_1p_2p_3p_4p_5 . \end{aligned}$$

При $p_i = p$ , $i = \overline{1,5}$. $\quad P_f = 2p^2 + 2p^3 - 5p^4 + 2p^5$.

<u>Пример 2.</u> Система содержит $N$ элементов $x_1$, дублированных элементами $x_2$, с вероятностями исправности $p_1$ и $p_2$ соответственно при заданной погрешности. При другой погрешности вероятности $p_1$ и $p_2$ будут другие.

$$F = \mathop{\&}_{i=1}^{N}(x_1 \vee x_2) , \qquad f = \mathop{\&}_{i=1}^{N}(x_1 \vee x_2 \oplus x_1x_2) , \qquad P_f = (p_1 + p_2 - p_1p_2)^N ,$$

При $p_1 = p_2 = p$ , $\quad P_f = \left(2p - p^2\right)^N$.

<u>Пример 3.</u>

$$F = x_1x_2 \vee x_1\overline{x_3} \vee x_1\overline{x_2}x_3x_4 .$$

$$f = x_1x_2 \vee x_1\overline{x_3} \vee x_1\overline{x_2}x_3x_4 \oplus x_1x_2x_3 .$$

$$P_f = p_1p_2 + p_1(1 - p_3) + p_1(1 - p_2)p_3p_4 - p_1p_2(1 - p_3)$$

Пример 4. Для гидрологического измерителя с каналами гидростатического давления $(x_1)$, температуры $(x_2)$, электропроводности $(x_3)$ и скорости звука $(x_4)$ можно записать функцию работоспособности

$$F = x_1x_2x_3 \vee x_1x_2x_4 \vee x_1x_2x_3x_4 \ .$$

$$\begin{gathered} f = x_1x_2x_3 \vee x_1x_2x_4 \vee x_1x_2x_3x_4 \oplus \\ \oplus x_1x_2x_3x_4 \oplus x_1x_2x_3x_4 \oplus x_1x_2x_3x_4 \vee \\ \vee x_1x_2x_3x_4 = x_1x_2x_3 \vee x_1x_2x_4 \oplus x_1x_2x_3x_4 \end{gathered} \ .$$

$$P_f = p_1p_2p_3 + p_1p_2p_4 - p_1p_2p_3p_4$$

При $p_i = p$ , $i = \overline{1{,}4}$ ; $P_f = 2p^3 - p^4$.

Пример 5. Ряд систем сохраняют работоспособность с достаточным качеством (точностью) при наличии $m$ однородных элементов из $n$. Это распределенные профилемеры при выходе из строя до $(n-m)$ орт, пространственно-временная решетка при потере до $(n-m)$ узлов и другие избыточные системы.

Для вероятности работоспособности $m,n$ -систем справедливо

$$P_{m,n} = 1 - (1-p)^{(n-m+1)}$$

Если есть зависимость методической погрешности восстановления процесса или поля вида

$$\delta_{m,n} = \varphi(m,n) \ ,$$

то можно построить распределение вероятности погрешности.

При переходе от непрерывных представлений к дискретным имеют место погрешности дискретизации (элиайзинга) [3]. Для многих процессов и пространственных сечений полей окружающей среды характерны спадающие степенные функции спектральной плотности вида $S(\nu) = C[\nu]^{-m}$, где $C - const$, $1/2 \le m \le 5$, $\nu -$ соответствует частоте для временного процесса и волновому числу $k_i$ для пространственного сечения по $i$-той оси $(i = \overline{1{,}3})$. Если считать спектры реализаций по всем пространственным и временному сечению идентичными и постоянными на периоде представления, то относительную погрешность дискретизации $n$-мерных случайных полей $(n = \overline{1{,}4})$ с $m$-степенными спектрами можно вычислить по приближенной формуле [3]

$$\delta_{m,n}(N) \approx \frac{10^{\left(0{,}0005m^4 - 0{,}006m^3 + 0{,}355m^2 - 0{,}054m + 0{,}024\right)}}{10^{0{,}5(m-1)\lg N/n}} \ , \qquad (8)$$

где $N$ – число отсчетов поля.

Возможности построения самовосстанавливающихся элементов и цепей. Известные способы построения избыточных цепей со статическим «горячим» резервом элементов не обеспечивают достаточное повышение времени безотказной работы цепи и постоянство рабочего параметра цепи при появлении отказов или технологических дефектов [4].

Естественно стремиться к построению такой цепи, в которой избыточные элементы находились бы в холодном резерве и автоматически последовательно замещали бы отказавшие элементы, причем рабочий параметр цепи оставался бы постоянным. Такие цепи, выполняющие функции одного элемента, могут быть построены при выполнении следующих условий.

Во-первых, отказы (дефекты) элементов носят предельный характер: короткое замыкание или обрыв.

Во-вторых, имеются два вспомогательных элемента разового действия: предохранитель по току (при срабатывании дает невозвратный обрыв) и предохранитель по напряжению (при срабатывании дает невозвратное короткое замыкание). Вольт-амперные характеристики и принятое обозначение таких элементов показаны на рис. 1. Предохранитель по току широко используется в технике. Видимо, не является проблемой выполнение его в микроэлектронном варианте с достаточной точностью порога по току. Предохранитель по напряжению прямого аналога с порогом по напряжению не имеет. Однако, известны элементы с порогом по напряжению (динисторы, тиристоры, стабилитроны), которые могли бы выполнить требуемую функцию будучи элементами разового действия. Видимо, предохранитель по напряжению может быть реализован. При наличии указанных вспомогательных элементов и выполнении условий по предельным отказам могут быть построены впервые предложенные автором (заявки на изобретения 1448704/26-9, 1448712/26-9, 1449725-1449732/26-9, 1451212/26-9, 1451213/26-9, 1452522/24-7. Самовосстанавливающиеся устройства. МГИ АН УССР. Автор изобретений В.А. Гайский. Май 1970) самовосстанавливающиеся элементы, примеры которых приведены на рис. 2 и 3.

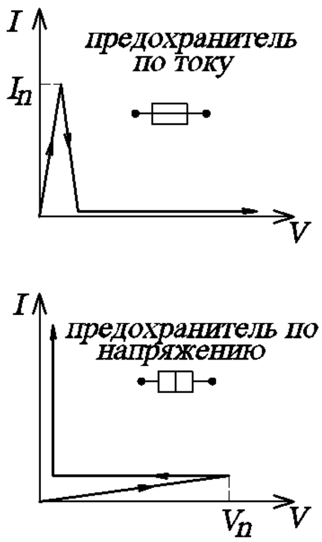
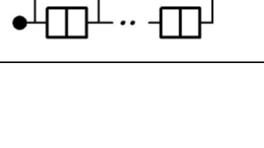
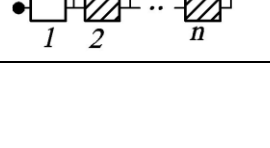



**Рис. 1.** Вольт-амперные характеристики срабатывания разовых пороговых элементов
**Fig. 1.** Volt-ampere response characteristics of single threshold elements

| № | Самовосстанавливающиеся элементы | Защита отказов типа | |
|---|---|---|---|
| | | Обрыв | Короткое замыкание |
| 1 | Общая схема включения и резистор |  |  |

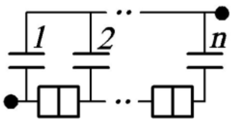
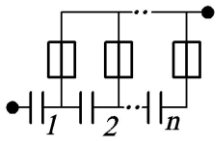
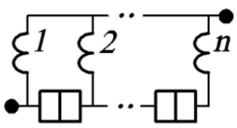
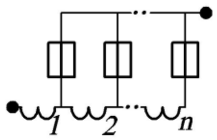
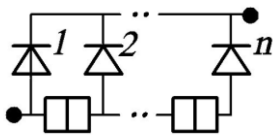
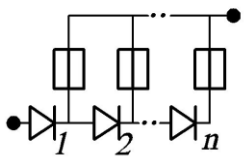
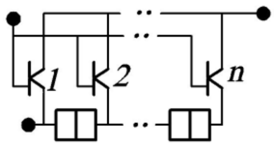
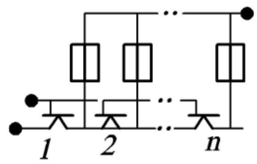
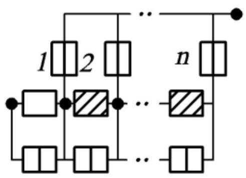
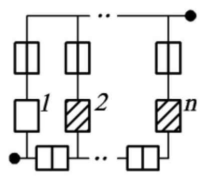
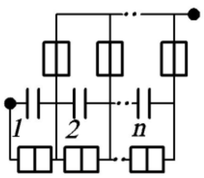
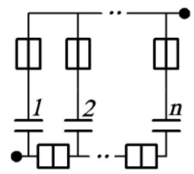
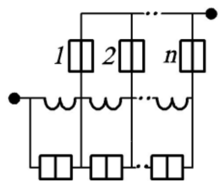
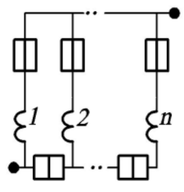
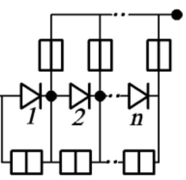
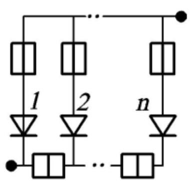
| | | | |
|---|---|---|---|
| 2 | Емкость |  |  |
| 3 | Индуктивность |  |  |
| 4 | Полупроводниковый диод |  |  |
| 5 | Транзистор |  |  |

**Рис. 2.** Схемы самовосстанавливающихся элементов
**Fig. 2.** Schemes of self-healing elements

| № | Самовосстанавливающиеся элементы | Защита отказов типа | |
|---|---|---|---|
| | | Короткое замыкание и обрыв | Обрыв и короткое замыкание |
| 1 | Общая схема включения и резистор |  |  |
| 2 | Емкость |  |  |
| 3 | Индуктивность |  |  |
| 4 | Полупроводниковый диод |  |  |

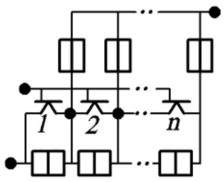
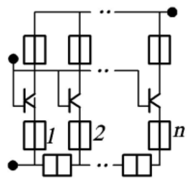
| | | | |
|---|---|---|---|
| 5 | Транзистор |  |  |

**Рис. 3.** Схемы самовосстанавливающихся элементов
**Fig. 3.** Schemes of self-healing elements

Принцип работы этих избыточных цепей состоит в том, что в «горячем» состоянии всегда находится только один исправный элемент. Его отказ приводит к изменению вольт-амперного режима цепи, что приводит к срабатыванию предохранителей и автоматическому подключению следующего элемента из «холодного» резерва. Если мощности внешней цепи в номинальном рабочем режиме оказывается недостаточно для срабатывания предохранителей, то для этого может быть применен форсированный режим энергопитания.

**Заключение.** Для расчета вероятности безотказной работы систем из неоднороных элементов произвольной структуры рационально использовать метод перехода от логической функции работоспособности системы или логической функции преобразования, заданной в произвольной нормальной форме, к формуле для вероятностей совместных событий, предложенный впервые автором [2].

Предложены принципы построения электронных устройств со скользящим автоматическим холодным резервированием на уровне элементов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д.* Математические методы в теории надежности. М.: Наука. 1965. 324 с.

2. *Гайский В.А.* Анализ помехоустойчивости релейных и аналоговых систем управления: дис. … канд. техн. наук. М. 1966. 183 с.

3. *Гайский В.А., Гайский П.В.* Погрешности дискретизации случайных многомерных полей со степенным спектром // Морской гидрофизический журнал. 1994. № 6. С. 61–66.

4. *Киндеев Е.А.* Надежность технических систем и техногенный риск: учебное пособие. Владимир: Изд-во Владимирский гос. ун-т. 2016. 154 с.

**RELIABILITY AND ACCURACY OF SYSTEMS OF THE NATURAL ENVIRONMENT CONTROL. PART 1**

**V.A. Gaisky**

Institute of Natural and Technical Systems, RF, Sevastopol, Lenin St., 28

The requirements to the reliability of environmental monitoring systems are assessed, taking into account the specified accuracy of field restoration at typical spatio-temporal scales. An original method of calculating the reliability of redundant systems according to the reliability of elements by the transition from a logical function of health to probability is given. The potential possibilities of building fault-tolerant type of short circuit and breakage of electronic elements and circuits self-healing from a cold reserve are considered.
**Keywords:** reliability, accuracy, fault diagnosis, spatio-temporal measurement lattice.