УДК: 681.326

Тупкало В.М.
Національний центр управління та випробувань космічних засобів, м. Київ

МЕТОД СИГНАТУРНОГО ОПЕРАЦІЙНОГО КОНТРОЛЮ ЦИФРОВИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Предметом дослідження є забезпечення надійності функціонування цифрових інформаційних систем широкого спектру цільового призначення у реальному масштабі часу на основі введення структурної надмірності. Метою проведеного дослідження є розробка методу синтезу структурної надмірності. Результатом роботи є створений математичний апарат сигнатурної алгебри. Цей апарат дозволяє зводити рішення задачі синтезу підсистеми контролю функціонування цифрових інформаційних систем у реальному масштабі часу до простої процедури композиції функціонально закінчених елементарних комбінаційних вузлів з кінцевого універсального набору. Один з можливих напрямків використання результатів дослідження може бути пов'язаним з вирішенням проблеми забезпечення надійності авіаційно-космічних тренажерів.

Ключові слова: *цифрові інформаційні системи, сигнатурний контроль, математичний апарат сигнатурної алгебри, метод синтезу структурної надмірності, надійність авіаційно-космічних тренажерів.*

Вступ. Рішення задач вдосконалення існуючих і створення нових авіаційно-космічних тренажерів вимагає нового якісного забезпечення ефективної контролепридатності їх апаратно-програмних засобів на всіх етапах життєвого циклу.

Аналіз відомих публікацій зі створення відмовостійких керуючих систем [1-4] показав, що найбільш досліджуваними є тестові методи забезпечення контролепридатності, що реалізують ідею «розкладання» апаратури цафрових систем (ЦС) на ряд незалежно діагностованих пристроїв невеликої складності та розміщення в них додаткових апаратних засобів. Але, що стосується методів забезпечення контролепридатності ЦС в реальному масштабі часу (в ході виконання цільових завдань управління), то незважаючи на їх актуальність, вони залишаються практично недослідженими. Основною причиною цього є недостатній розвиток теорії контролю цифрових автоматів. Крім того, сьогодні ще більш актуальною постає задача забезпечення контролепридатності ходу керуючих управлінських програм.

У зв'язку з цим необхідна розробка нового комплексного підходу до вирішення проблеми забезпечення контролепридатності складних ЦС (авіаційно-космічних тренажерів) в реальному часі вирішення тренінгових завдань управління з урахуванням нерозривного єднання апаратних і програмних засобів ЦС.

Формулювання мети та завдань. Концептуальне твердження автора: перспективним напрямом рішення задачі забезпечення функціональної контролепридатності у реальному часі роботи складних ЦС за прямим призначенням з урахуванням нерозривного єднання апаратних і програмних засобів може бути розробка сигнатурних методів, які використовують математичний апарат синтезу структурної надмірності, заснований на автоматній моделі представлення об'єктів контролю (ОК) [5].

В контексті сказаного у подальшому поняття «функціональна контролепридатність» будемо трактувати згідно наступному визначенню.

Визначення 1. Функціональна придатність цифрової системи до контролю за прямим призначенням - властивість системи, що характеризує її придатність до проведення контролю заданими засобами частини або всіх властивих їй функцій в процесі використання системи за прямим (цільовим) призначенням.

Необхідність в пошуку нового математичного апарату, в першу чергу, пов'язана з питанням вибору рівня формалізації моделі ОК сучасних цифрових авіаційно-космічних тренажерів. З одного боку, рівень повинен бути вибраний найближчим до базисного елементного рівня; з іншого боку, слід забезпечити єдність формалізованого представлення ієрархічних моделей контролю апаратно-програмних засобів з урахуванням вибраного виду відображення множини реакцій ОК на множину їх контрольних ознак. Правомірність такої вимоги виходить з тенденції розвитку сучасних ЦС на принципах глибокої уніфікації, стандартизації структур сигналів і інтерфейсів [6]. Тому стає актуальною формалізація процесу синтезу надмірності в умовах безперервного зростання складності і ступеня інтеграції сучасних КМ. Одним з напрямів розвитку є уявлення і обробка контрольної інформації у вигляді сигнатур.

Виклад основного матеріалу. Блок-схема функціонального контролю ФК при використанні входів X і виходів Y об'єкту контролю надана на рис. 1 (ОК - цифровий автомат з передавальною функцією Ψ; умовний контрольний пристрій (УКП) є комбінаційним і здійснює сюр'єктивне відображення $\Psi_k : X \rightarrow Y_k$ вхідних двійкових векторів X і вихідних двійкових векторів Y_k таким чином, щоб забезпечувалася задана достовірність контролю; вирішальний орган (ВО) проводить відображення $\Psi_{BO} : Y \times Y_k \rightarrow \varepsilon = \{0,1\}$ шляхом ідентифікації кожного вектора виходу ОК $y_i \in Y$ з векторами y_k $Y_{k_i} \in Y_k$; оператор S необхідний для кодування векторів довжини n у відповідні їм вектори довжини *m (n > m).*

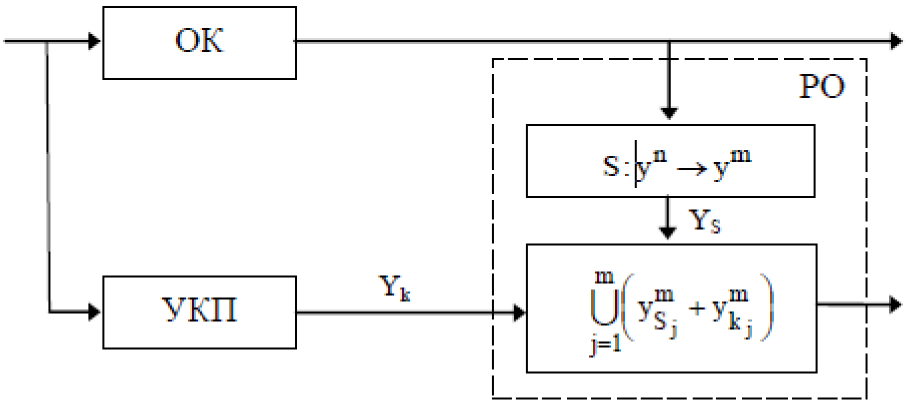

Рис. 1. Блок-схема функціонального контролю

Залежність між функціями $\Psi(X)$ і $\Psi_k(X)$ визначимо у вигляді:

$$\begin{aligned}\Psi_k &= S(\Psi(X)) = S(\Psi_1 * \Psi_2 * \ldots * \Psi_q) = \\ &= S_{\Psi_1} * S_{\Psi_2} * \ldots * S_{\Psi_q}\end{aligned} \quad (1)$$

де Ψ_j і «*» - відповідно булева функція j-го елементарного контрольного вузла з шуканого кінцевого (стандартного) набору і булева операція суперпозиції (комутації).

При цьому рівень абстракції ОК (опис функції $\Psi(X)$) обмежимо детермінованими арифметичними функціями, оскільки єдиною (універсальною) основою всіх арифметичних і логічних операцій КМ є елементарна операція арифметичного складання. Зокрема, приклади даного уявлення для булевих операцій розглянуті в роботі [7].

Тоді завдання вибору аналітичної моделі ОК з урахуванням прийнятих початкових посилок сформулюємо наступним чином.

Нехай задано ОК з доступними для контролю його входами і виходами. Знайти для цього ОК опис його УКП у вигляді (1) такий, щоб детермінована арифметична функція $\Psi(X)$ була представлена еквівалентною булевою функцією

$$(\Psi_1 * \Psi_2 * \ldots * \Psi_q). \quad (2)$$

Оскільки (2) припускає незалежність вибору оператора S від функції $\Psi(X)$, то основою синтезу УКП слугує таке твердження.

Твердження 1. Детермінованій арифметичній функції $\Psi(X)$ може бути поставлено у відповідність S-перетворення її $\oplus$ булевого еквівалента в інфіксному вигляді (2), якщо кожна з функцій Ψ_j унітарна або бінарна, оператор S є лінійним, а операція * - це складання по модулю два.

Доказ. Оскільки умовою виконання рівності (1) є незалежність вибору оператора S від функції Ψ, то існування для детермінованої арифметичної функції булевого еквівалента у принципі не виключає його інфіксного уявлення

$$S(\Psi_1 * \Psi_2 * \ldots * \Psi_q). \quad (3)$$

У свою чергу, оскільки розглядається безперервний в часі (безперервний по тактах роботи цифрової системи) контроль, то з рішення 13-ї проблеми Гильберта відомо, що всяка безперервна функція N змінних представима у вигляді суперпозиції безперервних функцій двох змінних [7].

Тоді принцип суперпозиції

$$S(\Psi_1 * \Psi_2 * \ldots * \Psi_q) = S_{\Psi_1} * S_{\Psi_2} * \ldots * S_{\Psi_q},$$

реалізується, якщо має місце лінійне S-перетворення лінійної булевої функції. Лінійність булевого еквівалента (2) можлива тільки у тому випадку, коли всі функції Ψ_j є функціями однієї і (або) двох змінних за умови уявлення Ψ_j та * сумою по модулю два або еквівалентністю [7].

Припустимо, що S несюр'єктивне відображення. Тоді повинен бути хоч би один такий вектор і $y_i^k \in Y_k$ на вході УКП, що для всіх y_i $S(y_i) \neq y_i^k$.

Проте перехід безпомилково працюючого КО в працездатний стан з таким y_i^k суперечить суті організації ФК і тому $S: Y \to S(\leftarrow Y)$ є сюр'єктивне відображення, що і було потрібно довести.

З урахуванням твердження 1 булевий еквівалент арифметичної функції складання має вигляд:

$$\begin{aligned}A + B &= (A \oplus B) \oplus H(A \oplus B) = \\ &= A \oplus B \oplus H(A + B)\end{aligned} \quad (4)$$

де $H(A \oplus B)$ - число, код якого характеризує перехід одиниць перенесення при складанні чисел A і B. Оскільки $H(A \oplus B)$ встановлює взаємний поліноміальний зв'язок між A і B, то $H(A\oplus B)$ визначимо як взаємну поліноміальну характеристику двох чисел, що вступають в операцію арифметичного складання.

Приклад 1.

A = 1010111 або $P(A)=x^7+x^5+x^3+x^2+1$;

B = 0110001 або $P(B)=x^6+x^5+1$.

Результат:

$$A+B=\left(\oplus\begin{matrix}1010111\\0110001\end{matrix}\right)=10001000\ ,$$
$$H(A+B)=11101110\ .$$

Тоді арифметична сума чисел A і B згідно (3) через виконання булевої операції «сума по модулю два» буде сформований так:

$$A+B=\left(\begin{matrix}01010111\\ \oplus\\ 00110001\\ \oplus\\ 11101110\end{matrix}\right)=10001000\ .$$

Аналогічно використання суперпозиції по модулю два контрольних характеристик у відомому методі тестового контролю – сигнатурному аналізі, як оператора S вибираємо векторну інтеграцію *(sig)* оператора утворення сигнатур двійкової послідовності довжини n. У [7] показано, що при загальному виді створюючого (що породжує) полінома

$$P(x)=\delta_m x^m+\delta_{m-1}x^{m-1}+...+\delta_1 x+1$$

синтез формувача сигнатур двійкових векторів $A=a_n a_{n-1}...a_1$ (вага розрядів зростає справа наліво) зводиться до тривіального синтезу комбінаційної схеми згортки по модулю два $(sigA=g_m g_{m1}...g_1)$ на основі алгоритму зрушення регістра із зворотними зв'язками.

Покажемо, що щодо множини R аналітичних модулів ОК у вигляді детермінованих арифметичних функцій існує кінцева множина W операцій інфіксного уявлення (1). З цією метою необхідно довести, що для всіх чотирьох елементарних арифметичних функцій умова сформульованої теореми виконується.

Враховуючи (4), для функції складання маємо:

$$\begin{aligned}&sig(A+B)=sig(A\oplus B)\oplus sigH(A\oplus B)=\\&=sigA\oplus sigB\oplus sigH(A\oplus B)\end{aligned}\qquad(4)$$

і, отже, оператори $\{\oplus,\mathrm{sig},\mathrm{H}(...),\}\in W$.

Визначення 2. $H(A+B)$ - є усічена зліва (відкинутий старший розряд) взаємна поліноміальна характеристика операндів A і B.

Функція віднімання $F^{(-)}=A-B=A+(-B)$.

В результаті перетворення n-розрядного прямого коду негативного числа *(-B)* в його додатковий код $(-B)_{\partial o \partial}$ одержуємо:

$$(-B)_{\partial o\partial}=B\oplus d_{[n]}\oplus f_{[n]}\oplus H\left[(B\oplus d_{[n]})+f_{[n]}\right];$$

$$\begin{aligned}&sig(A-B)=sigA\oplus sigb\oplus sig(d_{[n]}\oplus f_{[n]})\oplus\\&\oplus sigH\left[(B\oplus d_{[n]})+f_{[n]}\right]\oplus\\&sigH\left\{A+\left[B\oplus d_{[n]}\oplus f_{[n]}\oplus H\left[(B\oplus d_{[n]})+f_{[n]}\right]\right]\right\}\end{aligned}\qquad(5)$$

де $d_{[n]}$ - n-розрядне число (константа) з одиницями у всіх розрядах; $f_{[n]}$ - n-розрядне числа (константа) відповідно з одиницею тільки у молодшому розряді.

Із зіставлення (4) і (5) слідує висновок: $\{\mathrm{H}(\ ),d,f\}\in W$.

Функція множення $F^{(\times)}=(A\times B)$. З урахуванням староєгипетського способу множення [8] і представлення вагів розрядів множника:

$$\begin{aligned}&B(x)=b_n x^n+b_{n-1}x^{n-1}+...+b_2x^2+b_1x^1\\&A\times B=A\sum_{i=1}^{n}b^i\,2^{i-1}\end{aligned}\qquad(6)$$

Тоді на підставі (4) для випадку позитивних співмножників маємо рівняння

$$\begin{aligned}&sig(A\times B)=b_1 sigA\oplus b_2 sigH(A+A)\oplus...\oplus b_{n-1}sigA2^{n-2}\oplus b_n sigA2^{n-1}\\&\oplus b_1b_2 sigH[A+H(A+A)]\oplus...\oplus b_{n-1}sigH\left[Ab_1\oplus b_2H(A+A)\oplus b_1b_2H[A+H(A+A)\oplus...)+A2^{n-2}\right]\oplus\\&\oplus b_n sigH\begin{Bmatrix}[Ab_1\oplus b_2H(A+A)\oplus...\oplus Ab_{n-1}2^{n-2}\oplus Ab_n2^{n-2}\oplus b_1b_2H[A+H(A+A)]\oplus...\oplus\\ \oplus b_{n-1}H[Ab_1\oplus b_2H(A+A)\oplus b_1b_2H[A+H(A+A)]\oplus...)+A2^{n-2}]]+A2^{n-1}\end{Bmatrix}\end{aligned}\qquad(7)$$

Випадки різних знакових розрядів співмножників розглянуті у [7]. При цьому загальне представлення результатів множення як суперпозиції по модулю два має вигляд:

$$\begin{aligned}&F^{(x)}_{зн}=(|A|\times|B|)+k_{[2n+1]}=\\&(|A|\times|B|)\oplus k_{[2n+1]}\oplus H\left[(|A|\times|B|)+k_{[2n+1]}\right]\end{aligned}\qquad(8)$$

де $k_{[2n-1]}$ – $(2n+1)$-розрядне число (константа з одиницею тільки в старшому розряді) представлення знакового розряду за умови його розташування зліва від старшого розряду мантиси. Із зіставлення (4), (5) з (7) витікає, що $k \in W$.

Функція ділення $F^{(:)} = (\frac{A}{B})$. Подібно до множення звісно, що ділення двійкових чисел може бути виконано у вигляді чергування простих операцій віднімання і зрушення [7]. Щодо операції зрушення інтерес представляє випадок співвідношення.

$$B = 2^{-r} A,\ (r = 1,2,...)\ .$$

Визначення 3. Якщо число A описується приведеним поліномом

$$A(x) = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + ... + a_1 x + a_0\ ,$$

то відповідне йому транспоноване число A^T описується поліномом

$$A^T(x) = a_0 x^n + a_1 x^{n-1} + ... + a_{n-1} x + a_n$$

де T - операція транспонування кодів двійкових чисел (логічна операція).
З урахуванням даного визначення

$$\begin{aligned} 2^{-1}A = A - B = [H(A^{T(A)} + A^{T(A)}]^T = \\ = H^T(A^{T(A)} + A^{T(A)}) \end{aligned} \tag{9}$$

Тоді

$$\begin{aligned} sigB = sig(2^{-1}2 - (r-1)A) = \\ = sigH^T[(2^{-(r-1)}A)^T + (2^{-(r-1)}A^T] = \\ = sigH^T[(2^{(r-1)}A^T + (2^{(r-1)}A^T] = \\ = sig[2^{-(r-1)}H^T(A^T + A^T)] \end{aligned} \tag{10}$$

Із зіставлення (4) - (8) з (9) витікає, що $T \in W$.
Таким чином, $W = (sig, \oplus, H, H, T, f, d, k)$ – є множина операцій інфіксного представлення моделі (1) множини R і згідно відомому визначенню [9] система ($R;\ W$) - є алгебра (R - основна множина, W - сигнатура алгебри) з двома бінарними логічними операціями: $\oplus, H$; трьома унарними логічними операціями: H, T, sig ; константами: k, d, f . Виходячи з приоритету у часі опублікування результатів наукових досліджень автора даної статті у монографії [7], назвемо алгебру $A\lg(R; sig, \oplus, H, H, T, f, d, k)$ сигнатурною алгеброю Тупкало (булево-поліноміальна алгебра Тупкало).

Твердження 2. Сигнатурна алгебра Тупкало

$$A\lg(R; sig, \oplus, H, H, T, f, d, k)$$

є лінійною комутативною.
Доказ. Відносно (1) відображення

$$sig(\psi_1 * \psi_2 * ... * \psi_q) \to sig(Y)$$

лінійно, оскільки воно зберігає лінійну структуру в наступному сенсі:
1) є адитивним, тобто з (1) слідує

$$sig(\psi_1 * \psi_2 * .. \psi_q) = sig\psi_1 \oplus sig\psi_2 \oplus ... \oplus sig\psi_q$$

2) є однорідним першого ступеня, тобто $sig(\Psi_j) = sig\Psi_j$, де $\chi = \{0,1\}$ – скаляр поля $GF(2)$, а Ψ_j – будь-який n-розрядний вектор з розширення $GF(2^n)$.

Відомо [10], що алгебра називається комутативною, якщо основна множина R наділена комутативним законом композиції. З твердження 1 витікає, що у разі булевого інфіксного уявлення (1) таким законом є сума по модулю два $\oplus$.

Висновки. Отже, перевагою синтезованої сигнатурної алгебри Тупкало $A\lg(R;W)$ є можливість переходу від формул алгебри до реалізації їх умовного контрольного пристрою (УКП) безпосередньо без застосування додаткових інтерпретуючих і мінімізуючих процедур шляхом простої логічної композиції (комутації) функціонально закінчених елементарних структур з кінцевої множини (стандартного набору). Це дасть змогу розширити використання методу сигнатурного аналізу на основі запропонованого апарату сигнатурної алгебри Тупкало для оперативного у часі контролю функціонування цифрових систем різного призначення, в тому числі нових розроблювальних перспективних авіаційно-космічних тренажерів. Метою подальших досліджень є розробка практичних рекомендацій до застосування наведених результатів дослідження.

Список літератури:

1. Збинятов А.Н. Анализ методов контроля технического состояния цифровых систем передачи и определения мест отказов в этих системах/ А.Н. Збинятов, Р.Н. Шульгін, И.Ю. Лысанов // Телекоммуникации. – 2012. – №8. – С.21-32.

2. Золоторевич Л. А. Построение тестов контроля цифровых систем на уровне межрегистровых передач // Л.А. Золоторевич, А.В. Ильинкова // Информатика. – 2010. – №1. – С. 112–121.

3. Хетагуров Я. А. Практические методы построения надежных цифровых систем. Проектирование, *производство, эксплуатация / Я. А. Хетагуров.– М. : Высш. шк., 2013. – 156 с.*

4. Черкесов Г.Н. Надежность аппаратно-программных комплексов / Г.Н. Черкесов. – СПб.: Питер, 2015. – 479 с.

5. Мухопад Ю.Ф. Контроль управляющих автоматов сложных технических систем реального времени // Ю.Ф. Мухопад, А.Ю. Мухопад, Д.Ц. Пунсык-Намжилов// Научный вестник НГТУ. – 2017. – №1. – С.53-62.

6. Соловьев В.В. Логическое проектирование цифровых систем на основе программируемых логических интегральных схем // В.В.Соловьев, А.П.Климович//. – М.: Горячая линия-Телеком, 2008. – 374 с.

7. Тупкало В.Н. Основы теории сигнатурного контроля цифровых систем:монография / В.Н.Тупкало. – МО Украины, 1994. – 324 с.

8. Самофалов К.Г. Прикладная теория цифровых автоматов / К.Г. Самофалов. – К.: Вища школа, 1987. – 375 с.

9.Кузнецов А.П. Дискретная математика для ин-женера. / А.П. Кузнецов, Г.М. Адельсон-Вельский. – М.: Энергия, 1980. – 344 с.

10. Функциональный анализ / Под ред. С.Г. Крейна. – М.: Наука, 1972. – 544 с.

References:

1. Zbinyatov A.H. Analiz metodov kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya i peredachi dannykh v etikh sistemakh / A.N. Zbinyatov, R.N. Shul'gín, I.U. Lysanov // Telekommunikatsii. − 2012. − №8. − P.21-32.

2. Zolotorevich L.A. Postroyeniye testov kontrolya sistem na urovne mezhregistrovykh peredach // L.A. Zolotorevich, A.V. Il'inkova // Informatika. − 2010. − №1. − P. 112-121.

3. Khetagurov, Y. A. Prakticheskiye metody postroyeniya nadezhnykh tsifrovykh sistem. Proyektirovaniye, proizvodstvo, ekspluatatsiya / Y. A. Khetagurov. − M. : Vyssh. shk., 2013. − 156 p.

4. Cherkesov G.N. Nadezhnost' apparatno-programmnykh kompleksov / G.N. Cherkesov. − SPb .: Piter, 2015. − 479 p.

5. Mukhopad Y.F. Kontrol' upravlyayushchikh avtomatov slozhnykh tekhnicheskikh sistem vremeni // Y.F. Mukhopad, A.U. Mukhopad, D.S. Punsyk-Namzhilov // Nauchnyy vestnik NGTU-2017. −№1. − P.53-62.

6. Solov'yev V.V., Klimovich A.P. Logicheskoye proyektirovaniye tsifrovykh sistem na osnove programmiruyemykh logicheskikh integral'nykh skhem // V.V.Solov'yev, A.P.Klimovich // − M .: Goryachaya liniya-Telekom, 2008. −374 p.

7. Tupkalo V.N. Osnovy teorii signaturnogo kontrolya tsifrovykh sistem: monografiya / V.N.Tupkalo. − MO Ukrainy, 1994. −324 p.

8. Samofalov K.G. Prikladnaya teoriya tsifrovykh avtomatov / K.G. Samofalov. − K .: Vishcha shkola, 1987. − 375 p.

9.Kuznetsov A.P., G.M. Diskretnaya matematika dlya in-zhenera. / A.P. Kuznetsov, G.M. Adel'son-Vel'skiy. −M .: Energiya, 1980. − 344 p.

10. Funktsional'nyy analiz / Pod red. S.G. Kreyna. − M .: Nauka, 1972. − 544 p.

МЕТОД СИГНАТУРНОГО ОПЕРАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ ЦИФРОВЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Тупкало В.М.

Предметом исследования является обеспечение надежности функционирования цифровых информационных систем широкого спектра целевого назначения в реальном масштабе времени на основе введения структурной избыточности. Целью проведенного исследования является разработка метода синтеза структурной избыточности. Результатом работы является созданный математический аппарат сигнатурной алгебры. Этот аппарат позволяет сводить решение задачи синтеза подсистемы контроля функционирования цифровых информационных систем в реальном масштабе времени к простой процедуре композиции функционально законченных элементарных комбинационных узлов из конечного универсального набора. Одно из возможных направлений использования результатов исследования может быть связано с решением проблемы обеспечения надежности авиационно-космических тренажеров.

Ключевые слова: цифровые информационные системы, сигнатурный контроль, математический аппарат сигнатурной алгебры, метод синтеза структурной избыточности, надежность авиационно-космических тренажеров.

METHOD OF SIGNATURE OPERATIONAL CONTROL OVER DIGITAL INFORMATION SYSTEMS

V.M. Tupkalo

The subject of the study is to ensure the reliability of the operation of digital information systems of a wide range of real-time applications based on the introduction of structural redundancy. The result of this study is the created mathematical apparatus of signature algebra. This mathematical apparatus makes it possible to reduce the problem of synthesizing the subsystem controlling the operation of digital information systems in real time to a simple procedure for connecting functionally completed elementary combinational nodes from a finite universal set. One of the possible directions of using the results of the study may be related to solving the problem of ensuring the reliability of aerospace simulators.

Keywords: digital information systems, signature control, mathematical apparatus of signature algebra, method of synthesis of structural redundancy, reliability of aerospace simulators.