

Математическая модель функционирования специализированного микропроцессорного устройства как основа для составления его функциональной спецификации

А.К. Скуратов

ФГБНУ «Дирекция научно-технических программ», г. Москва, skuratov@fcntp.ru

Аннотация — В статье сформулированы требования к функциональной спецификации специализированного микропроцессорного устройства, отражающие особенности таких устройств и функциональной спецификации в целом. Эти требования формируют основу для выбора формализмов для описания работы специализированного микропроцессорного устройства. На основе изучения совокупности допустимых взаимодействий специализированного микропроцессорного устройства с внешней средой разработана математическая модель его функционирования с целью составления функциональной спецификации.

Ключевые слова — специализированное микропроцессорное устройство, функциональная спецификация, математическая модель, моделирование микропроцессорных устройств.

I. ВВЕДЕНИЕ

Целью настоящей статьи является разработка математической модели функционирования специализированного микропроцессорного устройства (далее СМУ) как формализма его функциональной спецификации. Такая математическая модель должна отражать особенности СМУ [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7], а также различные аспекты функциональных спецификаций цифровых систем [8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17]. Выбор математической модели СМУ предшествует выбору абстрактных средств спецификации функционирования, разрабатываемого СМУ, и собственно составлению функциональной спецификации на СМУ для разработки алгоритмов формирования тестовых заданий на ее основе в целях функционально-логического моделирования СМУ. Комплекс требований к функциональной спецификации на СМУ можно разделить на две части:

- требования, которые диктуются особенностями СМУ;
- требования, которые предъявляются к функциональным спецификациям в целом.

II. ВЫБОР МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО МИКРОПРОЦЕССОРНОГО УСТРОЙСТВА

Наиболее адекватной математической моделью его проекта, заданного принципиальной схемой технических средств и текстом программно-

микропрограммного обеспечения, является семейство стационарных динамических систем с конечным множеством входных, выходных и внутренних состояний [18, 19, 20]. Анализ правильности проекта СМУ методом моделирования заключается в проведении экспериментов с его машинной моделью, которая представляет собой некоторым образом закодированные принципиальную схему и текст микропрограммы и с математической точки зрения является также семейством стационарных динамических систем. Цель экспериментов состоит в определении соответствия машинной модели СМУ его функциональной спецификации. Следовательно, целесообразно выбрать в качестве математической модели функционирования СМУ также семейство стационарных систем S . Определим совокупность математических объектов указанной математической модели и отношений между ними, отражающую интересующие нас свойства СМУ следующим образом.

а) Конечное множество переменных микропроцессорного устройства P , которое состоит из непересекающихся подмножеств: P^1 – множество входных переменных, соответствующих входным линиям СМУ; P^2 – множество выходных переменных, соответствующих выходным линиям СМУ; P^3 – множество переменных, соответствующих двунаправленным линиям СМУ; P^4 – множество внутренних переменных, соответствующих регистрам и триггерам СМУ. Указанные множества целесообразно разделить на подмножества, соответствующие информационным и управляющим переменным СМУ: $P^1 = P^1_y \cup P^1_i$; $P^2 = P^2_y \cup P^2_i$; $P^3 = P^3_y \cup P^3_i$;

$$P^4 = P^4_y \cup P^4_i.$$

б) Множество элементов времени T – множество действительных неотрицательных чисел:

$$T = \{t \mid t \geq 0\}.$$

в) Множество внутренних состояний X . Множество внутренних состояний семейства S определяется количеством и значениями внутренних переменных множества P^4 .

г) Множество мгновенных значений входных воздействий U . Множество U семейства S определяется

количеством и значениями входных $P1$ и двунаправленных $P3$ переменных.

д) Множество мгновенных значений выходных величин Y . Множество Y семейства S определяется количеством и значениями выходных $P2$ и двунаправленных $P3$ переменных.

е) Множество мгновенных состояний Q семейства S определяется декартовым произведением: $Q=X \times U \times Y$.

ж) Множество Ψ допустимых взаимодействий с внешней средой впервые введено в [20] с целью более адекватного учета особенностей функционирования СМУ. В данной работе в множество Ψ введем взаимодействия, в которых участвуют и внутренние переменные СМУ. Тогда каждое $\psi \in \Psi$ есть отображение: $[0,t) \rightarrow Q$, $t \subseteq T$, и может быть представлено как конечное множество отображений Ψ_p : $[0,t) \rightarrow Z_p$, $p \subseteq P$, $t \subseteq T$, Z_p – область значений переменной p .

Событием по переменной p будем считать изменение ее значения $z_1 \subseteq Z_p$ на значение $z_2 \subseteq Z_p$ в момент времени t при $z_1 \neq z_2$. Обозначается такое событие X_{t,p,z_1,z_2} - в соответствии с [21]. Заметим, что любое допустимое взаимодействие $\psi \in \Psi$ может быть представлено в виде конечной последовательности событий на некотором конечном интервале времени $[t_0, t_s]$:

$$\Psi = (Z_{p_1}^h, \dots, Z_{p_k}^h)^{t_0}, X_{p_1 z_{j_1} z_{j_2}}^{t_1}, X_{p_2 z_{j_3} z_{j_4}}^{t_2}, \dots, X_{p_k z_{j_{(2d-1)}} z_{j_{2d}}}^{t_s}, \quad (2.1),$$

где $(Z_{p_1}^h, \dots, Z_{p_k}^h)^{t_0}$ – вектор начальных значений переменных $p_1 \dots p_k$ в начальный момент времени t_0 взаимодействия Ψ ;

k – мощность множества P ;

$t_0 \leq t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_s$ – упорядоченная последовательность моментов времени;

$Z_{j_1}, Z_{j_3}, \dots, Z_{j_{(2d-1)}}$ – значения переменных непосредственно перед событием;

$Z_{j_2}, Z_{j_4}, \dots, Z_{j_{2d}}$ – значения переменных непосредственно после события.

Итак, поскольку любое взаимодействие СМУ с внешней средой с учетом изменения значений внутренних переменных соответствует элементу множества Ψ , то можно считать, что математическая модель функционирования СМУ задается шестеркой:

$$(P, T, X, U, Y, \Psi).$$

То, что указанная шестерка представляет собой семейство стационарных динамических систем S , будет показано ниже.

III. ИССЛЕДОВАНИЕ МНОЖЕСТВА ДОПУСТИМЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ МИКРОПРОЦЕССОРНОГО УСТРОЙСТВА С ВНЕШНЕЙ СРЕДОЙ С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЙ ЗНАЧЕНИЙ ЕГО ВНУТРЕННИХ ПЕРЕМЕННЫХ

Проведем исследование множества допустимых взаимодействий микропроцессорного устройства с целью выделения в нем математических объектов и соотношений между ними, характеризующих стационарную динамическую систему.

а) Множество допустимых входных воздействий Ω . Каждое $\omega \subseteq \Omega$ есть отображение: $[0,t) \rightarrow U$, $t \subseteq T$. Множество Ω может быть выделено из множества Ψ последовательностей вида (2.1), как множество конечных подпоследовательностей событий, содержащих события только по переменным $p \in P^1 \cup P^3$ [20,22]:

$$\omega = (Z_{p_1}^h, \dots, Z_{p_n}^h)^{t_0}, X_{p_1 z_{j_1} z_{j_2}}^{t_1}, X_{p_2 z_{j_3} z_{j_4}}^{t_2}, \dots, X_{p_r z_{j_{(2m-1)}} z_{j_{2m}}}^{t_r} \quad (2.2),$$

где $(Z_{p_1}^h, \dots, Z_{p_n}^h)^{t_0}$ – вектор начальных значений входных переменных $p \subseteq P^1$ и двунаправленных переменных $p \subseteq P^3$, которые в момент времени t_0 являются входными;

n – количества переменных множества $P^1 \cup P^3$;
 $X_{p_1 z_{j_1} z_{j_2}}^{t_1}, X_{p_2 z_{j_3} z_{j_4}}^{t_2}, \dots, X_{p_r z_{j_{(2m-1)}} z_{j_{2m}}}^{t_r}$ – события,

соответствующие изменениям значений входных переменных $p \subseteq P^1$ и двунаправленных переменных $p \in P^3$, для которых начальное, конечное или оба значения являются входными;

$t_0 \leq t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_r$ – упорядоченная последовательность времен входных событий.

б) Множество выходных величин Γ . Каждое $\gamma \subseteq \Gamma$ есть отображение: $[0,t) \rightarrow Y$, $t \subseteq T$. Множество Γ может быть выделено из множества Ψ последовательностей вида (2.1), как множество конечных подпоследовательностей событий, содержащих события только по переменным $P^2 \cup P^3$ [20,22]:

$$\gamma = (Z_{p_1}^h, \dots, Z_{p_\nu}^h)^{t_0}, X_{p_1 z_{j_1} z_{j_2}}^{t_1}, X_{p_2 z_{j_3} z_{j_4}}^{t_2}, \dots, X_{p_r z_{j_{(2b-1)}} z_{j_{2b}}}^{t_r} \quad (2.3),$$

где $(Z_{p_1}^h, \dots, Z_{p_\nu}^h)^{t_0}$ – начальные значения выходных переменных $p \subseteq P^2$ и двунаправленных переменных $p \in P^3$, которые в момент времени t_0 являются выходными; $X_{p_1 z_{j_1} z_{j_2}}^{t_1}, X_{p_2 z_{j_3} z_{j_4}}^{t_2}, \dots, X_{p_r z_{j_{(2b-1)}} z_{j_{2b}}}^{t_r}$ –

события, соответствующие изменениям значений выходных переменных $p \subseteq P^3$, для которых начальное, конечное или оба значения являются выходными;

$t_0 \leq t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_r$ – упорядоченная последовательность времен выходных событий.

в) Переходная функция состояния ϕ для стационарной динамической системы, то есть системы, реакция которой на заданный отрезок входного

воздействия при условии, что системы находилась в заданном состоянии, не зависит от того, в каком промежутке времени осуществлялся этот опыт, принимает вид [20, 22]: $\varphi: T \times X \times \Omega \rightarrow X$. Значениями функции φ будем считать внутренние состояния $x(t) = \varphi(t, x, \omega)$. Где x – внутреннее состояние системы в некоторый начальный момент времени; ω – допустимый отрезок входного воздействия, поданный на систему, находившуюся в состоянии x ; t – момент времени, в который определяется новое состояние системы. Момент окончания подачи допустимого входного воздействия в реальных микропроцессорных устройствах не совпадает с тем моментом времени, когда устройство оказывается в новом внутреннем состоянии. Задержку перехода в новое внутреннее состояние можно определить как разницу $t - t'$, где t' – момент окончания отрезка входного воздействия.

Анализируя множество Ψ последовательностей вида (2.1), бесконечное в общем случае, можно определить значение переходной функции для произвольных $t \subseteq T, x \subseteq X, \omega \subseteq \Omega$. Действительно, рассмотрим некоторое $\varphi^* \in \Psi$ на временном интервале $[t_0, t^*]$:

$$\varphi^* = (Z_{p_1}^h, \dots, Z_{p_q}^h)^{*t_0}, X_{p_1 z_1 z_2}^{*t_1}, X_{p_2 z_3 z_4}^{*t_2}, \dots, X_{p_h z_{(2y-1)} z_{2y}}^{*t_h} \quad (2.4)$$

Момент времени подачи данного взаимодействия t_0 для стационарной динамической системы не существен. Исходное состояние $x \subseteq X$ задается начальными значениями переменных $p \subseteq P_4$:

$$(Z_{p_1}^h, \dots, Z_{p_4}^h) \subseteq (Z_{p_1}^h, \dots, Z_{p_4}^h)$$

Допустимое входное воздействие задается как конечная подпоследовательность ω^* последовательности φ^* , содержащая начальные значения входных переменных $p \subseteq P^1$ и двунаправленных переменных $p \subseteq P^3$, которые в момент времени t_0 являются входными, и события по входным и соответствующим двунаправленным переменным. Начало отрезка входного воздействия – t_0 , окончание – момент свершения последнего в подпоследовательности ω^* события – t_ω . Новое внутреннее состояние системы $x(t_x)$ определяется как совокупность значений, полученных переменными $p \subseteq P_4$ в результате свершения события над ними, содержащихся в φ^* , а также значений неизменившихся внутренних переменных. Момент времени соответствует последнему в φ^* событию по внутренней переменной. Тогда задержка перехода системы в новое внутреннее состояние при подаче допустимого входного воздействия ω^* определяется как разность $t_x - t_n$, причем $t_0 \leq t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_\omega \leq \dots \leq t_x \leq \dots \leq t_h$.

Исходя из вышеизложенного, на наш взгляд, целесообразнее представить переходную функцию (обозначим ее φ') в виде: $\Psi \rightarrow X$. Значениями функции φ' будем считать состояния $x = \varphi'(\Psi)$, в которых оказывается система в момент окончания подачи отрезков допустимых взаимодействий из множества Ψ . Стационарность динамической системы обуславливает

независимость функции φ' от времени начала подачи взаимодействий.

г) Выходное отображение η для стационарной динамической системы принимает вид

$$\eta: X \rightarrow Y,$$

то есть каждому внутреннему состоянию x однозначно соответствует мгновенное значение выходной величины y . Однако, для учета специфики СМУ более удобным [20, 22] является использование выходного отображения в виде $\eta: X \times \Omega \rightarrow \Gamma$, впервые предложенное в [23]. Анализируя множество Ψ , можно определить результат выходного отображения η для произвольных $x \subseteq X$ и $\omega \subseteq \Omega$. Таким образом, учитывая зависимость подачи допустимого входного воздействия от выходной реакции, характерную для СМУ (в частности, наличие сигнала квитирования), предлагается использовать выходное отображение в виде: $\eta': \Psi \rightarrow \Gamma$. Результатом отображения являются отрезки выходных величин $y \in \Gamma$, которые выработала система к моменту окончания подачи отрезков допустимых взаимодействий из множества Ψ .

IV. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО МИКРОПРОЦЕССОРНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ЦЕЛЕЙ СОСТАВЛЕНИЯ ЕГО ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СПЕЦИФИКАЦИИ

Взяв за основу общую математическую модель функционирования СМУ в виде семейства стационарных систем, адаптируем ее для целей составления функциональной спецификации на СМУ. Для этого определим следующие математические объекты и соотношения. Множество входных взаимодействий M . В [20, 22] множество M определяется следующим образом:

- выделяется из последовательности событий взаимодействия Ψ (2.1) подпоследовательность выходных событий, которые обуславливают моменты времени появления входных событий;
- выделенную из (2.1) таким образом подпоследовательность событий вместе с начальными значениями переменных множеств $P_y^2 \cup P_y^3$ называют в [20, 22] выходным воздействием управления обменом и обозначают γ_0 . Определим Γ_0 как множество подпоследовательностей, выделенных указанным образом из элементов множества Ψ ;
- объединение подпоследовательностей γ_0 и ω , выделенных из одной и той же последовательности ψ , называется в [20, 22] входным взаимодействием.

Однако особенностью СМУ, как уже отмечалось выше, является их программируемость (микропрограммируемость), поэтому возможность подачи того или иного входного воздействия определяется не только событиями, которые происходят по переменным управления обменом, но и внутренним состоянием системы в момент подачи ω . На

основании этого введем в определение входного взаимодействия $\mu \in M$ начальные значения внутренних переменных СМУ.

Множество реакций системы R. Определим множество R следующим образом:

- выделим из последовательности событий взаимодействия ψ (2.1) события по информационным выходным P^2_{in} и двунаправленным P^3_{in} переменным, которые в данном ψ являются выходными; обозначим эту подпоследовательность γ_{in} . Определим Γ_{in} как множество подпоследовательностей, выделенных указанным образом из элементов множества Ψ ;
- выделим из того же взаимодействия ψ события, определяющие внутреннее состояние системы в момент окончания ψ и обозначим эту последовательность событий через v . Определим V как множество подпоследовательностей, выделенных указанным образом из элементов множества Ψ ;
- объединение подпоследовательностей γ_{in} и v , выделенных из одной и той же подпоследовательности ψ , определяет элемент g множества R для данного ψ . Заметим, что в частных случаях в g может отсутствовать либо γ_{in} , либо v .

Отношение причины λ . На $M \times R$ определим отношение $\lambda(\mu, g)$ и двухместный предикат P_λ принимающий истинное значение в том и только том случае, если входное взаимодействие μ приводит к реакции системы g . Совокупность подпоследовательностей μ и g отличается от соответствующей последовательности ψ событиями по внутренним переменным, не вошедшими в подпоследовательность v .

Таким образом, тройка (M, R, λ) задает множество взаимодействий с учетом изменений значений внутренних переменных микропроцессорного устройства. Обозначим через K множество взаимодействий, то есть пар (μ_i, r_i) , $\mu_i \subseteq M, r_i \subseteq R$, для которых $P_\lambda(\mu_i, r_i) = 1$.

Отображение следования ξ . Обозначим через L множество некоторых логических функций $\{l_1, l_2, \dots, l_n\}$. Образует множество F как множество логических выражений типа:

$$f_i = k_1^i, l_1^i, k_2^i, l_2^i, \dots, l_{p_i-1}^i, k_p^i,$$

возможно, включающих скобки, где $k_j^i \subseteq K, l_j^i \subseteq L$.

Определим отношение следования ξ следующим образом: $(K \cup F) \rightarrow (K \cup F)$. Очевидно, что отображение ξ является частичным. Отображение ξ задает условие осуществления (определяемое логическим выражением) каждого взаимодействия $k \in K$ отдельно или в некоторой логической связи с другими взаимодействиями. Выделим некоторое подмножество

$k_n \subseteq K$, содержащее те взаимодействия, которые могут иметь место в начале функционирования СМУ, то есть после включения питания или подачи общего сигнала «СБРОС». В простейшем частном случае k_n может совпадать с K. Последовательность элементов множества F, полученную при выполнении отображения ξ первоначально над элементом $k_n^i \subseteq F$

и далее над элементами $\xi(k_n^i), \xi(\xi(k_n^i))$ и т.д. до тех пор, пока результатом отображения ξ не станет любой из уже включенных в последовательность элементов множества F, назовем функцией микропроцессорного устройства. Множество функций микропроцессорного устройства – множество различных последовательностей элементов множества F, сформированных указанным способом, – обозначим как Ф. Множество Ф задается тройкой (F, K_n, ξ) . Множество функций, имеющих одинаковое $k_n \in K_n$, назовем режимом работы СМУ.

Итак, стационарная динамическая система – элемент семейства S может быть представлен четверкой (P, T, K, Φ) . Для определения всего семейства S необходимо дополнительное исследование множества K. Множество K. Каждый элемент $k_i \subseteq K$ – пара (μ_i, r_i) , для которых $P_\lambda(\mu_i, r_i) = 1$. Однако, в реальных микропроцессорных устройствах каждое взаимодействие связано со множеством пар из множества $M \times R$, то есть μ_i и r_i являются бесконечными множествами. Действительно, рассмотрим входное воздействие μ_i , определенное на некотором интервале $[t_0, t_k]$:

$$\mu = (Z_{p_1}^h, \dots, Z_{p_s}^h)^{t_0}, \bar{X}_{p_1 z_{j_1} z_{j_2}}^{t_1}, \bar{X}_{p_2 z_{j_3} z_{j_4}}^{t_0}, \dots, \bar{X}_{p_k z_{j(2s-1)} z_{j_2}}^{t_h} \quad (2.5)$$

где $p_j \in P^1 \cup P^3 \cup P^4$, при $j=1, 2, \dots, s$, $i_1 \dots i_k$, является множеством, так как:

а) $\forall Z_{p_j}^h, j=1, 2, \dots, s$ – некоторое множество значений переменной p_j в частном случае, совпадающее с полным множеством значений, которые она может принимать. Таким образом, запись $(Z_{p_1}^h, \dots, Z_{p_s}^h)^{t_0}$ определяет не элемент, а некоторое подмножество множества Q (возможно совпадающее с ним). В практическом приложении это утверждение соответствует тому, что перед осуществлением взаимодействия k_j микропроцессорное устройство может находиться, в общем случае, в одном из нескольких мгновенных состояний;

б) различные элементы множества μ_i могут отличаться последовательностью событий по переменным $p_j, j=1, 2, \dots, k$, которая несущественна для данного взаимодействия. На практике это означает, что при отработке микропроцессорным устройством взаимодействий с внешней средой возможен различный допустимый порядок следования входных и выходных сигналов;

в) различные элементы множества μ_i могут отличаться количеством событий; они могут содержать события по различным переменным: $\forall \mathbf{Z}_{j(2r-1)}^n, \forall \mathbf{Z}_{j2r}^n$ – являются некоторыми множествами значений соответствующей переменной. Эти ситуации отражают то, что при отработке одного взаимодействия возможны несущественные переключения входных, двунаправленных и выходных управляющих сигналов СМУ;

г) μ_i является континуальным множеством, так как на практике каждый из моментов свершения событий t_1, t_2, \dots, t_k лежит в интервале действительных чисел. Поскольку мы рассматриваем семейство стационарных динамических систем, то существенным является не сами моменты, а разность между моментами свершения двух соседних событий. В [20, 22] на множестве моментов свершения событий: t_1, t_2, \dots, t_k задаются временные ограничения вида:

$$t_{i\min}^{l_i m_i} \leq t_{m_i} - t_{l_k} \leq t_{i\max}^{l_i m_i} \quad (2.6)$$

для двух произвольных событий последовательностей; $t_{i\min}^{l_i m_i}$ и $t_{i\max}^{l_i m_i}$ – минимально и максимально допустимые промежутки времени между l_i – м и m_i – м событиями.

Пусть область D_{μ_i} описывает допустимые интервалы задержек для всех входных событий и выходных событий управления обменом взаимодействия μ_i . Объединим области D_{μ_i} для всех $\mu_i \in M$ в единую область D :

$$D = \bigcup_{\mu_i \in M} D_{\mu_i}$$

Рассмотрим реакцию системы на некотором интервале $[t_1, t_x]$:

$$\bar{X}_{P_{i_1} z_{j_1} z_{j_2}}^{\tau_1}, \bar{X}_{P_{i_2} z_{j_3} z_{j_4}}^{\tau_2}, \dots, \bar{X}_{P_{i_g} z_{j(2g-1)} z_{j_{2g}}}^{t_x}, \quad (2.7)$$

где $P_{i_b} \subseteq P_n^2 \cup P^3 \cup P^4$, при $b=1, 2, \dots, ig$;

д) различные элементы множества τ_i могут отличаться последовательностью событий по переменным P_{i_b} , $b=1, 2, \dots, ig$. На практике это соответствует тому, что результат взаимодействия микропроцессорного устройства с внешней средой представляется как сам факт получения выходными и внутренними переменными определенных значений, а не как последовательность их получения;

е) различные элементы множества τ_i могут отличаться количеством событий по переменным. Однако, по определению, τ_i не может содержать несущественных событий по переменным $P_{i_b} \subseteq P^4$;

$\forall \mathbf{Z}_{j(2g-1)}^n, \forall \mathbf{Z}_{j2g}^n$ – являются некоторыми множествами значений соответствующей переменной. В

практическом приложении подобные ситуации соответствуют тому, что во взаимодействии микропроцессорного устройства с внешней средой могут содержаться несущественные переключения информационных выходных и двунаправленных переменных устройства;

ж) τ_i является континуальным множеством, так как моменты свершения событий $\tau_1 \dots \tau_x$ лежат в интервале действительных чисел. Аналогично вышеприведенным рассуждениям, на множестве моментов свершения событий $\tau_1 \dots \tau_x$ для двух произвольных событий последовательности (2.6) зададим временные ограничения вида:

$$\tau_{i\min}^{b_i d_i} \leq \tau_{b_i} - \tau_{d_i} \leq \tau_{i\max}^{b_i d_i};$$

где $\tau_{i\min}^{b_i d_i}, \tau_{i\max}^{b_i d_i}$ – минимально и максимально допустимые промежутки времени между b_i – м и d_i – м событиями.

Пусть область E_{τ_i} описывает допустимые интервалы задержек для всех выходных событий реакции τ_i и для всех событий по внутренним переменным, определяющим состояние микропроцессорного устройства по окончании реакции τ_i . Объединим области E_{τ_i} для всех $\tau_i \in R$ в единую область E : $E = \bigcup_{\tau_i \in R} E_{\tau_i}$.

Все указанные замечания (а-ж) обусловлены возможностью различного проектного решения задачи построения микропроцессорного устройства, выполняющего заданный набор функций, а также допустимыми разбросами временных характеристик ИС и БИС его составляющих. Именно замечания а-ж и учитываются в определении математической модели функционирования СМУ в виде семейства стационарных динамических систем.

Итак, показано, что элементы множеств M и R , в свою очередь, также являются множествами. Отсюда следует, что $\forall K_i \subseteq K$ также представляет собой множество взаимодействий (назовем их эквивалентными) – результат декартового произведения множеств $\mu_i \subseteq M$ и $\tau_i \subseteq R$, для которых $P_{\lambda}(\mu_i, \tau_i)=1$. Кроме того, определены множества D и E , задающие временные ограничения взаимодействий микропроцессорного устройства с внешней средой.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, математической моделью функционирования СМУ является семейство стационарных динамических систем, которое для целей составления функциональной спецификации на СМУ представляется шестеркой:

$$\check{S} = (P, T, K, D, E, \Phi),$$

где:

P – конечное множество переменных микропроцессорного устройства;

T – множество действительных чисел, совпадающее с временной полусью;

D – конечное множество временных ограничений на входные взаимодействия;

E – конечное множество временных ограничений на выходные реакции;

K – множество взаимодействий микропроцессорного устройства с внешней средой с учетом изменений значений его внутренних переменных;

Ф – конечное множество функций микропроцессорного устройства.

Для дальнейшего построения функциональной спецификации СМУ потребуются провести анализ и выбор средств спецификаций для описания функционирования СМУ. Собственно, составление функциональной спецификации СМУ предполагает:

а) разработку способа представления множества функция СМУ;

б) разработку методик составления функциональной спецификации СМУ как: задание множества функций СМУ, задание алгоритмических взаимодействий, задание режимов работы и описания переменных СМУ;

в) разработку или выбор языка и структуры функциональной спецификации СМУ;

г) разработку методики анализ корректности функциональной спецификации СМУ.

ПОДДЕРЖКА

Статья подготовлена при поддержке Минобрнауки России в рамках реализации Государственного задания ФГБНУ «Дирекция научно-технических программ» №075-01395-20-00.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Лукьянов С.И., Швидченко Д.В., Суспицын Е.С., Пишнограев Р.С., Швидченко Н.В., Красильников С.С. Основы микропроцессорной техники. Монография, Изд-во Магнитогорский гос. тех. университет им. Г.И. Носова, 2012, С. 139.
- [2] Александров Е.К., Грушвицкий Р.И., Куприянов М.С., Мартынов О.Е., Панфилов Д.И., Ремизевич Т.В., Татаринов Ю.С., Угрюмов Е.П., Шагурин И.И. Микропроцессорные системы. Учебное пособие для вузов / Изд-во: Политехника. Санкт-Петербург, 2016. С. 936.
- [3] Кирпичников А.П., Васильев С.Н. Особенности современной микроэлектроники и вопросы построения систем управления высокой надежности и безопасности // Надежность. 2017. Т. 17. № 3 (62). С. 10-16.
- [4] Дашкевич Е.А. Особенности архитектур и режимов работы современных микропроцессоров // Вестник науки и образования. 2018. Т. 2. № 5 (41). С. 37-39.
- [5] Магомедов Ш.Г., Шамхалов Ф.И. Особенности использования микропроцессорных устройств в системах контроля доступа // Промышленные АСУ и контроллеры. 2018. №3. С. 16-19.
- [6] Параскевов А.В., Лойко В.И. Микропроцессоры. Учебник. Изд-во ООО «Экоинвест». Краснодар, 2018. 159 с.
- [7] Лавров А.С., Никифоров М.Б. Особенности современных микропроцессорных систем // Студенческий вестник. 2019. № 21-8(71). С. 6-8.
- [8] Скрипниченко М.Н., Липатов И.А. Маршрут разработки и верификации цифровой части многостадийного Сигма-Дельта АЦП // Вопросы радиоэлектроники. 2018. № 8. С. 56-63.
- [9] Негода В.Н., Лылова А.В. Автоматизация процесса выбора проектных решений программных реализаций логических функций // Автоматизация процессов управления. 2019. № 4 (58). С. 45-50.
- [10] Сохацкий А.А. Практические аспекты верификации проектов СБИС // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС). 2016. № 2. С. 16-23.
- [11] Никитин А.В., Ндайонгеже Д. Свойство-ориентированные языки функциональных спецификаций для концептуального этапа проектирования // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. 2010. № 6. С. 25-30.
- [12] Камкин А.С., Проценко А.С., Татарников А.Д. Генерация тестовых программ для микропроцессоров на основе спецификаций подсистем памяти. Известия высших учебных заведений. Физика. 2015. Т. 58. № 11-2. С. 70-74.
- [13] Татарников А.Д. Комбинаторная генерация тестовых программ для микропроцессоров на основе формальных спецификаций систем команд // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС). 2016. № 2. С. 38-45.
- [14] Королев А.С., Егоров И.И. Формальная верификация технических решений при разработке программно-аппаратных комплексов // Информатизация и связь. 2019. № 5. С. 76-79.
- [15] Камашев М.А. Специализированные модели для разработки программных приложений на основе алгебраических спецификаций и средств функционального программирования // Системы управления и информационные технологии. 2010. № 4(42). С. 73-78.
- [16] Поляков Г.А., Лысых В.В., Толстолужская В.В. Функциональный синтез параллельных неперестраиваемых спецпроцессоров с использованием аппарата структур семантико-числовой спецификации // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика. Информатика. 2012. № 13 (132). С. 142-149.
- [17] Королев А.С., Егоров И.И. Формальная верификация технических решений при разработке программно-аппаратных комплексов // Информатизация и связь. 2019. № 5. С. 76-79.
- [18] Мальцев А.И. Алгебраические системы. М.: Наука, 1970. 383 с.
- [19] Калман Р. Фалб П., Арбиб М. Очерки по математической теории систем: Пер с англ. / Под ред. Я.З. Цыпкина. М.: Мир, 1971. 400 с.
- [20] Иванников А.Д., Стемпковский А.Л. Математическая модель отладки проектов сложных цифровых схем и микросистем на основе представления последних в виде семейств стационарных динамических систем // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС). 2014. № 2. С. 123-128.

- [21] Рогинский В.Н. Основы дискретной автоматики. Статистика и динамика дискретных автоматов. М.: Связь, 1975. 432 с.
- [22] Иванников А.Д., Стемповский А.Л. Формализация задачи отладки проектов цифровых систем // Информационные технологии. 2014. № 9. С. 3-10.
- [23] Заде Л. Понятие состояния в теории систем // Общая теория систем. М.: Мир, 1966. С. 49-65.
- [24] Иванников А.Д. Формирование отладочного набора тестов для проверки функций цифровых систем // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. Т. 18. № 12. С. 795-801.

Mathematical Model of a Specialized Microprocessor Device Functioning as a Basis for Compiling its Functional Specification

A.K. Skuratov

Directorate of State Scientific and Technical Programmes, Moscow, skuratov@fcntp.ru

Abstract — The article formulates the requirements for the functional specification of a specialized microprocessor device, reflecting the features of such devices and the functional specification as a whole. These requirements form the basis for choosing formalisms for describing the operation of a specialized microprocessor device. Based on the study of the set of permissible interactions of a specialized microprocessor device with the external environment, a mathematical model of its functioning is developed for the purpose of compiling a functional specification.

Keywords — specialized microprocessor device, functional specification, mathematical model, modeling of microprocessor devices.

REFERENCES

- [1] Luk'yanov S.I., SHvidchenko D.V., Suspicyan E.S., Pishnograev R.S., SHvidchenko N.V., Krasil'nikov S.S. Osnovy mikroprocessornoj tekhniki. (Fundamentals of microprocessor technology) Monografiya, Izd-vo Magnitogorskij gos. tekhn. universitet im. G.I. Nosova, 2012. 139 p. (In Russian).
- [2] Aleksandrov E.K., Grushvickij R.I., Kupriyanov M.S., Martynov O.E., Panfilov D.I., Remizevich T.V., Tatarinov YU.S., Ugryumov E.P., SHagurin I.I. Mikroprocessornye sistemy (Microprocessor systems). Uchebnoe posobie dlya vuzov/ Izd-vo: Politekhnik, Sankt-Peterburg, 2016, 936 p. (In Russian).
- [3] Kirpichnikov A.P., Vasil'ev S.N. Osobennosti sovremennoj mikroelektroniki i voprosy postroeniya sistem upravleniya vysokoj nadezhnosti i bezopasnosti. (Features of modern microelectronics and issues of building control systems of high reliability and safety) // Nadezhnost'. 2017. Vol 17. № 3 (62). P. 10-16 (in Russian).
- [4] Dashkevich E.A. Osobennosti arhitektur i rezhimov raboty sovremennykh mikroprocessorov (Features of architectures and operating modes of modern microprocessors) // Vestnik nauki i obrazovaniya. 2018. T. 2. № 5 (41). P. 37-39 (in Russian).
- [5] Magomedov SH.G., SHamhalov F.I. Osobennosti ispol'zovaniya mikroprocessornyh ustrojstv v sistemah kontrolya dostupa (Features of the use of microprocessor devices in access control systems) // Promyshlennye ASU i kontrollery. 2018. №3. P. 16-19 (in Russian).
- [6] Paraskevov A.V., Lojko V.I. Mikroprocessory (Microprocessors). Uchebnik. Izd-vo OOO «Ekoinvest». Krasnodar, 2018. 159 p. (In Russian).
- [7] Lavrov A.S., Nikiforov M.B. Osobennosti sovremennykh mikroprocessornyh sistem (Features of modern microprocessor systems) // Studencheskij vestnik. 2019. № 21-8 (71). P. 6-8 (in Russian).
- [8] Skripnichenko M.N., Lipatov I.A. Marshrut razrabotki i verifikacii cifrovoy chasti mnogostadijnogo Sigma-Del'ta ACP (The development and verification route of the digital part of the multi-stage Sigma-Delta ADC) // Voprosy radioelektroniki. 2018. № 8. P. 56-63 (in Russian).
- [9] Negoda V.N., Lylova A.V. Avtomatizaciya processa vybora proektnyh reshenij programmnyh realizacij logicheskikh funkcij (Automation of the process of choosing design solutions for software implementations of logical functions) // Avtomatizaciya processov upravleniya. 2019. № 4 (58). P. 45-50 (in Russian).
- [10] Sohackij A.A. Prakticheskie aspekty verifikacii proektov SBIS (Practical aspects of VLSI project verification) // Problems of developing promising micro- and nanoelectronic systems (MES). 2016. № 2. P. 16-23 (in Russian).
- [11] Nikitin A.V., Ndajongezhe D. Svoystvo-orientirovannye yazyki funkcional'nyh specifikacij dlya konceptual'nogo etapa proektirovaniya (Property-Oriented Functional Specification Languages for the Conceptual Design Phase) // Izvestiya SPbGETU LETI. 2010. № 6. P. 25-30 (in Russian).
- [12] Kamkin A.S., Procenko A.S., Tatarnikov A.D. Generaciya testovyh programm dlya mikroprocessorov na osnove specifikacij podsistem pamyati (Generation of test programs for microprocessors based on specifications of memory subsystems) // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Fizika. 2015. Vol. 58. № 11-2. P. 70-74 (in Russian).
- [13] Tatarnikov A.D. Kombinatornaya generaciya testovyh programm dlya mikroprocessorov na osnove formal'nyh specifikacij sistem komand (Combinatorial generation of test programs for microprocessors based on formal specifications of command systems) // Problemy razrabotki perspektivnyh mikro- i nanoelektronnyh sistem (MES). 2016. № 2. P. 38-45 (in Russian).
- [14] Korolev A.S., Egorov I.I. Formal'naya verifikaciya tekhnicheskikh reshenij pri razrabotke programmno-apparatnyh kompleksov (Formal verification of technical solutions in the development of hardware and software systems) // Informatizaciya i svyaz'. 2019. № 5. P. 76-79 (in Russian).

- [15] Kamashev M.A. Specializirovannye modeli dlya razrabotki programnyh prilozhenij na osnove algebraicheskikh specifikacij i sredstv funkcional'nogo programmirovaniya (Specialized models for developing software applications based on algebraic specifications and functional programming tools) // Sistemy upravleniya i informacionnye tekhnologii. 2010. № 4 (42). S. 73-78 (in Russian).
- [16] Polyakov G.A., Lysyh V.V., Tolstoluzhskaya V.V. Funkcional'nyj sintez paralel'nyh neperestraivaemyh specprocessorov s ispol'zovaniem apparata struktur semantiko-chislovoj specifikacii (Functional synthesis of parallel non-tunable special processors using the apparatus of semantic-numerical specification structures) // Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ekonomika. Informatika. 2012. № 13 (132). S. 142-149 (in Russian).
- [17] Korolev A.S., Egorov I.I. Formal'naya verifikaciya tekhnicheskikh reshenij pri razrabotke programmno-apparatnyh kompleksov (Formal verification of technical solutions in the development of hardware and software systems) // Informatizaciya i svyaz'. 2019. № 5. S. 76-79 (in Russian).
- [18] Mal'cev A.I. Algebraicheskie sistemy (Algebraic Systems). M.: Nauka, 1970. 383 s. (In Russian).
- [19] Kalman R. Falb P., Arbib M. Ocherki po matematicheskoj teorii sistem (Essays on the mathematical theory of systems): Per s angl. / Pod red. YA.Z. Cypkina. M.: Mir 1971. 400 s. (In Russian).
- [20] Ivannikov A.D., Stempkovskij A.L. Matematicheskaya model' otladki proektov slozhnyh cifrovyyh skhem i mikrosistem na osnove predstavleniya poslednih v vide semeystva stacionarnyyh dinamicheskikh sistem (A mathematical model for debugging projects of complex digital circuits and microsystems based on the representation of the latter in the form of a family of stationary dynamic systems.) // Problemy razrabotki perspektivnyh mikro- i nanoelektronnyh sistem (MES). 2014. № 2. S. 123-128 (in Russian).
- [21] Roginskij V.N. Osnovy diskretnoj avtomatiki. Statistika i dinamika diskretnyyh avtomatov (The basics of discrete automation. Statistics and dynamics of discrete automata.). M.: Svyaz', 1975. 432 s. (In Russian).
- [22] Ivannikov A.D., Stempkovskij A.L. Formalizaciya zadachi otladki proektov cifrovyyh sistem (Formalization of the task of debugging projects of digital systems.) // Informacionnye tekhnologii. 2014. № 9. S. 3-10 (in Russian).
- [23] Zade L. Ponyatie sostoyaniya v teorii sistem (The concept of state in systems theory) // Obshchaya teoriya sistem. M.: Mir, 1966. S. 49-65 (in Russian).
- [24] Ivannikov A.D. Formirovanie otladochnogo nabora testov dlya proverki funkcyj cifrovyyh sistem (Formation of a debug set of tests for checking the functions of digital systems) // Mekhatronika, avtomatizaciya, upravlenie. 2017. T. 18. № 12. S. 795-801 (in Russian).