

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
ДИСКРЕТНЫМИ СОБЫТИЙНЫМИ СИСТЕМАМИ
НА ОСНОВЕ ИЕРАРХИЧЕСКИХ МОДУЛЬНЫХ
НЕДЕТЕРМИНИРОВАННЫХ АВТОМАТОВ
(Ч. 1. ФОРМАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ)¹**

Аннотация.

Актуальность и цели. Объектом исследования являются автоматные модели, ориентированные на практическое использование в проектировании систем управления иерархическими дискретными событийными системами с параллельными процессами. Предметом исследования являются иерархические модульные недетерминированные автоматы (ИМНДА), являющиеся развитием недетерминированных автоматов, предложенных Н. П. Вашкевичем. Цель – разработка концепции, формального определения и методов моделирования систем управления дискретными событийными системами на основе ИМНДА.

Материалы и методы. Исследования выполнены с использованием теории множеств, теории автоматов и сетей Петри.

Результаты. Предложена концепция ИМНДА, отличающаяся от базовой концепции недетерминированных автоматов: а) возможностью иерархической структуризации модели с использованием понятий базисного и составного автоматных модулей; б) учетом короткоживущих («импульсных») сигналов и сигналов в виде уровня. Также разработана методика моделирования ИМНДА с использованием формализма сетевых систем «условие – событие» (NCES).

Выводы. Концепция ИМНДА позволяет использовать структурный подход к проектированию (например, нисходящий и восходящий методы); увеличивает описательную мощность автоматной модели и степень повторного использования артефактов проектирования; расширяет сферу применения автоматного подхода к проектированию дискретных событийных систем. Возможно практическое использование инструментальной системы *ViVe* для моделирования и исследования ИМНДА.

Ключевые слова: дискретные событийные системы, недетерминированные автоматы, управление, модуль, проектирование, моделирование, сетевые системы «условие – событие».

V. N. Dubinin, D. N. Drozdov

**DESIGN AND IMPLEMENTATION OF DISCRETE
EVENT DYNAMIC SYSTEMS CONTROL BASED
ON HIERARCHICAL MODULAR NONDETERMINISTIC
AUTOMATA (PART 1. FORMAL MODEL)**

Abstract.

Background. The research object is automata models directed to practical use in the field of hierarchical discrete event systems control design with parallel processes. The research subject is hierarchical modular nondeterministic automata (HMNA)

¹ Исследование выполнено в Пензенском государственном университете за счет гранта Российского научного фонда (проект № 151110010).

based on Vashkevich's nondeterministic automata. The goal of this work is to develop a concept, a formal definition and tools for discrete event systems control design based on HMNA.

Materials and methods. The research was performed using the set theory, the automata theory and Petri nets.

Results. This paper proposes a concept of HMNA, which is different from the basic concept of nondeterministic automata in the following aspects: a) a possibility of structuring a hierarchical model using the concept of basic and composite automata modules; b) taking into account the short-lived ("pulse") and level signals. Also, the authors have developed an HMNA modelling method using formalism of net-condition event systems (NCES).

Conclusions. The HMNA concept allows to use the structured approach to designing (e.g., top-down and bottom-up techniques); it increases the descriptive power of automata models and the degree of design artefacts re-use, and extends the scope of automata-approach applicability to discrete event systems designing. Practical usage of the ViVe tool is possible for modeling and analysis of HMNA systems.

Key words: discrete event systems, nondeterministic automata, control systems, module, design, modelling, net condition/event systems.

Введение

Быстрое развитие компьютерных и телекоммуникационных технологий, а также технологий автоматизированного управления вызвало широкое распространение нового класса динамических систем – дискретных событийных систем (ДСС) [1, 2]. Данные системы характеризуются дискретностью пространства состояний. Изменение состояний ДСС во времени производится асинхронными дискретными событиями.

Существует два подхода к проектированию систем управления для ДСС: *аналитический* и *конструктивный* [3]. Первый подход является традиционным и во многом основан на опыте и интуиции разработчика. Разработанная система верифицируется [4]. При этом определяются ошибки и проверяется соответствие системы заданным требованиям (спецификациям). Процесс проектирования носит итерационный характер. Второй подход в большой степени базируется на теории супервизорного управления [5]. Несмотря на значительные успехи на втором направлении, оно пока больше является предметом теоретических исследований.

В настоящее время для проектирования управления ДСС в большинстве случаев используются конечные автоматы и сети Петри, а также их расширения. Несмотря на почтенный возраст теории автоматов, автоматный подход является основным в области проектирования систем управления в сфере промышленной автоматизации.

В данной работе в качестве основного формализма выбраны недетерминированные автоматы (НДА) в интерпретации Н. П. Вашкевича (см. например, [5–7]). НДА обладают рядом преимуществ в представлении и исследовании *параллельных процессов* по сравнению с другими автоматными моделями. Это в первую очередь связано с возможностью нахождения автомата сразу в нескольких (локальных) состояниях и возможностью активации сразу нескольких (локальных) переходов. В определенной мере это напоминает функционирование сетей Петри некоторых подклассов, например, сигнально-интерпретированных сетей Петри (SIPN) [8].

НДА особенно удобны при моделировании аппаратного обеспечения вычислительных систем и систем автоматики. Несмотря на довольно существенный объем исследований в области НДА, до сих пор не разработаны методы модульного проектирования систем на их основе. Это значительно сужает область применения этого аппарата, особенно для проектирования сложных вычислительных систем и систем автоматики. Как правило, в литературе рассматриваются «плоские» автоматы для решения отдельных задач. Вышесказанное определяет необходимость введения иерархической структуризации в модель НДА. В теории дискретных систем имеется немало аналогов по иерархической структуризации моделей. В качестве примера можно сослаться на работу [9], в которой вводятся модульные *sNCES*-сети. Следует также отметить, что в работах по НДА не в достаточной мере уделено внимание вопросам расширения формальной модели (для увеличения описательной мощности) и разработки современных инструментальных средств поддержки их проектирования и реализации, что также снижает практическую ценность данного аппарата.

Представленная работа структурирована следующим образом. В разделах 1 и 2 дается формальное определение базисного и составного модулей иерархических модульных НДА (ИМНДА) соответственно. В разделе 3 кратко рассматривается переход к сети базисных модулей ИМНДА – каноническому представлению ИМНДА. В разделе 4 дается определение основных правил функционирования сети базисных модулей. И, наконец, раздел 5 посвящен моделированию ИМНДА с использованием сетевых систем «условие – событие» (NCES), что открывает прямой путь к их исследованию в инструментальной системе *ViVe*.

1. Базисный модуль ИМНДА

Базисный модуль ИМНДА определяется следующим кортежем:

$$MB = (EI, DI, EO, DO, S, \delta, \varphi, \gamma, g_0),$$

где $EI = \{ei_1, ei_2, \dots, ei_n\}$ – множество событийных («импульсных») входов; $DI = \{di_1, di_2, \dots, di_m\}$ – множество информационных («потенциальных», «уровневых») входов; $EO = \{eo_1, eo_2, \dots, eo_p\}$ – множество событийных («импульсных») выходов; $DO = \{do_1, do_2, \dots, do_q\}$ – множество информационных («потенциальных», «уровневых») выходов.

Множества EI , DI , EO и DO образуют интерфейс модуля. На рис. 1 приведено графическое представление интерфейса модуля ИМНДА.

$S = \{s_1, s_2, \dots, s_k\}$ – множество локальных состояний автомата. Совокупность локальных состояний, в которых в некоторый момент времени может находиться автомат, образует глобальное состояние автомата. Обозначим $G \subseteq 2^S$ множество глобальных состояний автомата (2^S означает булеан множества S).

$\Delta \subseteq S \times EI \times 2^{DI} \times 2^{DO} \times 2^S \times S$ – множество переходов между локальными состояниями автомата. Пусть $\delta \in \Delta$ – переход из одного локального состояния в другое. Обозначим $Pr_i(\delta)$ – i -ю проекцию кортежа δ . Тогда $Pr_1(\delta)$ и $Pr_7(\delta)$ – исходное и целевое состояния перехода соответственно; $Pr_2(\delta)$ – побуждающий мгновенный входной сигнал; $Pr_3(\delta)$ и $Pr_4(\delta)$ – множества разрешающих нулевых и единичных потенциальных входных сигналов перехода

соответственно; $Pr_5(\delta)$ и $Pr_6(\delta)$ – множества разрешающих и запрещающих локальных состояний соответственно. Для каждого перехода $\delta \in \Delta$ должны выполняться следующие ограничения: $Pr_5(\delta) \cap Pr_6(\delta) = \emptyset$, иными словами, одно и то же состояние не может быть одновременно разрешающим и запрещающим; $Pr_3(\delta) \cap Pr_4(\delta) = \emptyset$, иными словами, сигнал на потенциальном входе перехода должен быть или единичным, или нулевым.

$\varphi: S \rightarrow 2^{DO}$ – функция, назначающая каждому локальному состоянию комбинацию потенциальных выходов.

$\gamma: \Delta \rightarrow 2^{EO}$ – функция, назначающая каждому переходу комбинацию импульсных выходов.

$g_0 \in G$ ($g_0 \subseteq S$) – начальное состояние автомата.

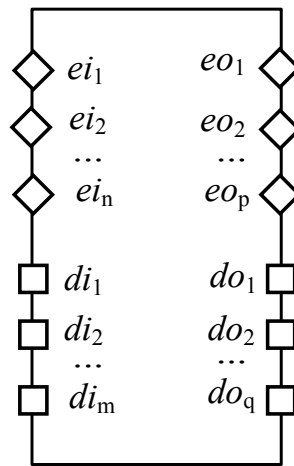


Рис. 1. Интерфейс модуля ИМНДА

Пример графического представления перехода в ИМНДА приведен на рис. 2.

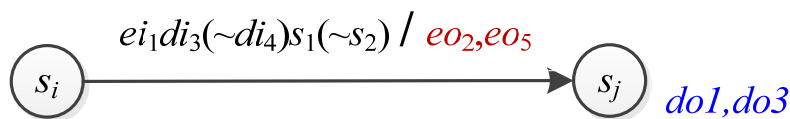


Рис. 2. Переход в ИМНДА

Как видно из рис. 2, автомат является комбинированным в том плане, что сочетает свойства как автомата Мура, так и автомата Мили (относительно выходных сигналов). Подобное комбинирование двух функций выходов можно наблюдать в *C*-автоматах [10] и *CT*-автоматах [11].

Введем обобщенную функцию значений входов и выходов модуля:

$$z: EI \cup DI \cup EO \cup DO \rightarrow \{0,1\}.$$

Будем называть сигналом вход (выход) в совокупности с его (действующим) значением. Множество входных импульсных сигналов в текущий момент времени определяется как $El_c = \{ei_k \in EI \mid z(ei_k) = 1\}$. Множество входных нулевых потенциальных сигналов есть $DIf_c = \{di_k \in DI \mid z(di_k) = 0\}$. Множество входных единичных потенциальных сигналов – $DIt_c = \{di_k \in DI \mid z(di_k) = 1\}$. Очевидно, что

$$DIf_c \cup DIt_c = DI; \quad DIf_c \cap DIt_c = \emptyset.$$

Аналогичным образом определяются множества выходных сигналов.

Обозначим $g_c \in G$ текущее глобальное состояние модуля ИМНДА. Переход в ИМНДА, соответствующий кортежу $\delta \in \Delta$, *разрешен* при g_c, DIf_c, DIt_c , если

$$Pr_1(\delta) \in g_c \wedge Pr_3(\delta) \subseteq DIf_c \wedge Pr_4(\delta) \subseteq DIt_c \wedge Pr_5(\delta) \subseteq g_c \wedge Pr_6(\delta) \subseteq S \setminus g_c.$$

В один момент времени t_i может существовать несколько разрешенных переходов. Обозначим через Δ_E множество переходов, разрешенных при g_c, DIf_c, DIt_c .

Назовем переход $\delta \in \Delta$ триггерным, если $Pr_2(\delta) = \emptyset$, иначе переход $\delta \in \Delta$ называется форсируемым. Обозначим $\Delta_T \subseteq \Delta$ – множество триггерных переходов, $\Delta_F \subseteq \Delta$ – множество форсируемых переходов.

Выделим $\Delta_A \subseteq \Delta$ множество активных переходов. Форсируемый разрешенный переход $\delta \in \Delta_E \cap \Delta_F$ называется *активным*, если выполняется условие $Pr_2(\delta) \in El_c$, т.е. для совершения перехода имеется необходимый мгновенный сигнал. Триггерный разрешенный переход всегда является активным, $\Delta_T \cap \Delta_E \subseteq \Delta_A$. Выполниться (сработать) может только активный переход. Все активные переходы в ИМНДА выполняются бесконфликтно одновременно (синхронно), что является одной из основных особенностей данного вида автоматных моделей (имеются в виду НДА).

2. Составной модуль ИМНДА

Составной модуль представляет определенный уровень абстракции в ИМНДА и определяется следующим кортежем:

$$MC = (EI, DI, EO, DO, SubM, EC, DC),$$

где EI, DI, EO и DO имеют тот же смысл, что и в базисном модуле;

$SubM = \{M_1, M_2, \dots, M_K\}$ – конечное непустое множество модулей ИМНДА;

$$EC \subseteq \left(EI \times \bigcup_{i=1}^K EI^{(i)} \right) \cup \left(\bigcup_{i=1}^K EO^{(i)} \times \bigcup_{j=1}^K EI^{(j)} \right) \cup \left(\bigcup_{i=1}^K EO^{(i)} \times EO \right) - \text{мно-}$$

жество дуг для передачи импульсных сигналов (множество событийных дуг);

$$DC \subseteq \left(DI \times \bigcup_{i=1}^K DI^{(i)} \right) \cup \left(\bigcup_{i=1}^K DO^{(i)} \times \bigcup_{j=1}^K DI^{(j)} \right) \cup \left(\bigcup_{i=1}^K DO^{(i)} \times DO \right) - \text{мно-}$$

жество дуг для передачи потенциальных сигналов (множество информацион-

ных дуг). Верхним индексом в скобках показана принадлежность соответствующего объекта определенному модулю.

Для информационных дуг должно выполняться следующее ограничение:

$$\forall y \in \left(EO \cup \bigcup_{i=1}^K EI^{(i)} \right) [|\{x \mid (x, y) \in DC\}| \leq 1],$$

согласно которому к одному потенциальному входу не может быть подключено более одной информационной дуги. Это ограничение исключает конфликт на входах по потенциальным сигналам и предполагает древовидную организацию топологии сети из информационных линий. В отношении импульсных входов подобное ограничение не применяется, поскольку для этих входов используется логика «аппаратное ИЛИ».

Пример составного модуля ИМНДА представлен на рис. 3.

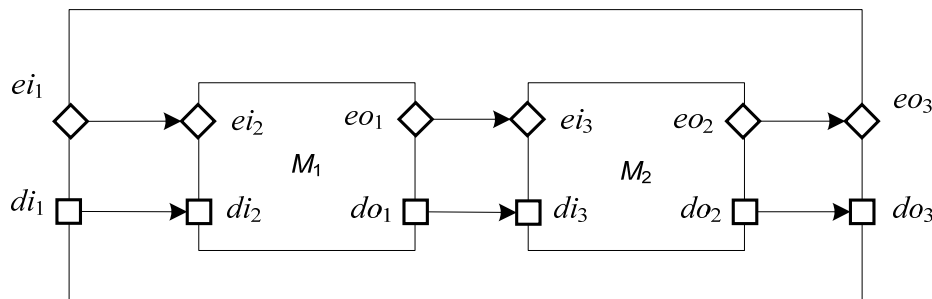


Рис. 3. Пример составного модуля ИМНДА

3. Переход к сети базисных модулей ИМНДА

Составной модуль ИМНДА является виртуальным в том плане, что он определяет не единицу выполнения, а единицу структуризации. Иерархическая многоуровневая система ИМНДА, представленная совокупностью базисных и составных модулей $S = \{MB_1, MB_2, \dots, MB_N, MC_1, MC_2, \dots, MC_L\}$, преобразуется к одноуровневому представлению, включающему только базисные модули ИМНДА $S' = \{MB_1, MB_2, \dots, MB_N\}$ и связи между ними. Составные модули ИМНДА представляют по сути транзитные и коммутирующие элементы между окончательными портами базисных модулей и в ходе построения одноуровневого эквивалента ИМНДА уничтожаются. На их месте возникают прямые связи между выходами и входами базисных модулей.

Предположим, что интерфейс компонентного модуля, вложенного в составной модуль, полностью (с точностью до имен) совпадает с интерфейсом модуля, детализирующего его, и все имена объектов во всей иерархической системе уникальны. Найдем транзитивные замыкания сетей из событийных и информационных линий как

$$EC^G = \left(\bigcup_{j=1}^{N+L} EC^{(i)} \right)^+; \quad DC^G = \left(\bigcup_{j=1}^{N+L} DC^{(i)} \right)^+.$$

Связи из множеств EC^G и DC^G , источниками и приемниками которых являются выходы и входы базисных модулей, представляют связи сети базисных модулей ИМНДА.

4. Динамика ИМНДА

ИМНДА функционирует, переходя от одного глобального состояния к другому, начиная от начального, в дискретные моменты времени t_0, t_1, t_2, \dots

В дальнейшем будем рассматривать каноническую форму модели, представляющей собой сеть базисных модулей ИМНДА. Можно выделить две модели (1 и 2) генерации и учета мгновенных сигналов. В первой модели мгновенный выходной сигнал выдается в том же такте, что и срабатывание самого перехода. Это наиболее полно согласуется с концепцией автомата Мили, но создает определенные сложности при описании работы модуля как автономной единицы, поскольку выданный мгновенный сигнал в одном модуле уже в текущем такте влияет на срабатывание переходов в других модулях. Во второй модели считается, что генерация мгновенного выходного сигнала при срабатывании перехода задерживается на один такт.

Рассмотрим более подробно модель 1. Обозначим $\Delta^{(i)}$ множество переходов в i -м базисном модуле ИМНДА. Определим следующие объекты:

$$\Delta^S = \bigcup_{i=1}^N \Delta^{(i)} \text{ – множество переходов во всех базисных модулях системы.}$$

Верхний индекс S будет определять всю систему;

$$OIE : \bigcup_{i=1}^N EO^{(i)} \rightarrow \bigcup_{j=1}^N EI^{(j)} \text{ – глобальное отображение, ставящее в соответствие множеству выходов модулей множество входов модулей, которыми они связаны.}$$

Определим (ациклическое) отношение связности переходов по «мгновенным» сигналам $EV \subseteq \Delta^S \times \Delta^S$ следующим образом. Переход $\delta_j \in \Delta^{(k)}$ E V -зависим от перехода $\delta_i \in \Delta^{(m)}$, если $OIE(\gamma(\delta_i)) \cap Pr_2(\delta_j) \neq \emptyset$. Отношение связности разрешенных переходов определяется как $EV_E = EV \cap (\Delta_E^S \times \Delta_E^S)$, где Δ_E^S – множество разрешенных переходов во всех модулях системы.

Множество одновременно срабатываемых переходов во всех модулях образует глобальный шаг, определяемый как

$$\xi = Pr_2 \left((EV_E)^+ \cap (\Delta_T^S \cap \Delta_E^S) \times \Delta_E^S \right) \cup (\Delta_T^S \cap \Delta_E^S).$$

При срабатывании перехода $\delta \in \Delta^{(i)} \cap \xi$ выполняется ряд изменений в i -м базисном модуле ИМНДА. Измененные компоненты ИМНДА будем обозначать верхним штрихом. Новое глобальное состояние определяется как $g_c'^{(i)} = \bigcup_{\delta \in \Delta^{(i)} \cap \xi} Pr_7(\delta)$. Множество выходных импульсных сигналов –

$EO_c^{(i)} = \bigcup_{\delta \in \Delta^{(i)} \cap \xi} \gamma(\delta)$. Множество выходных единичных и нулевых потенциальных сигналов – $DOt_c^{(i)} = \bigcup_{s \in g_c^+} \varphi(s)$ и $DOf_c^{(i)} = \bigcup_{s \in S \setminus g_c^+} \varphi(s)$, соответственно.

После срабатывания переходов шага производится пересылка потенциальных сигналов между модулями. Потенциальные единичные и нулевые сигналы для i -го модуля ($i = 1 \dots N$) устанавливаются в соответствии со следующими выражениями:

$$DIr_c^{(i)} = \left\{ di \in DI^{(i)} \mid (do, di) \in DC^G, do \in \bigcup_{j=1}^N DOt_c^{(j)} \right\},$$

$$DIf_c^{(i)} = \left\{ di \in DI^{(i)} \mid (do, di) \in DC^G, do \in \bigcup_{j=1}^N DOf_c^{(j)} \right\}.$$

При необходимости импульсные сигналы для i -го модуля могут быть вычислены как $EI_c^{(i)} = \bigcup_{\delta \in \Delta^{(i)} \cap \xi} Pr_2(\delta)$.

5. Моделирование ИМНДА с использованием NCES

Рассмотрим методику моделирования ИМНДА с использованием модульного формализма сетевых систем «условие – событие» (*Net Condition/Event System – NCES*), являющегося расширением сетей Петри [12]. В дальнейшем это позволит исследовать НДА с использованием существующих инструментальных средств моделирования *NCES*, например системы *ViVe* [13]. Известно, что *NCES*-сети позволяют моделировать асинхронно-синхронные системы и обладают мощностью машин Тьюринга [14]. Кроме того, близость двух формализмов позволяет надеяться на адекватность моделирующего метода. Поскольку в *NCES*-сетях не используются ингибиторные дуги (для проверки на ноль), то для моделирования локальных состояний вводятся две позиции (соответствующие 0 и 1), работающие в противофазе. Основные положения методики следующие:

1. Каждому модулю ИМНДА ставится в соответствие модуль *NCES*-сети (рис. 4). При этом интерфейс *NCES*-модуля формируется следующим образом:

- а) событийные входы и выходы наследуются от модуля ИМНДА;
- б) каждому «потенциальному» входу-выходу модуля ИМНДА ставится в соответствие два информационных входа-выхода *NCES*-модуля, причем один из них соответствует единичному значению сигнала, а другой – нулевому;
- в) добавляется событийный вход *clk* для подачи тактовых импульсов.

2. Каждому локальному состоянию $S_i \in S$ ИМНДА ставится в соответствие две позиции *NCES*-сети, одна из которых ($S_i \in P$) соответствует признаку нахождения системы в этом состоянии, а другая ($\sim S_i \in P$) – признаку

отсутствия, а также два перехода изменения этих признаков. Первый переход ($setS_i \in T$) устанавливает первый признак и сбрасывает второй признак, а другой переход ($resetS_i \in T$) совершает противоположные действия.

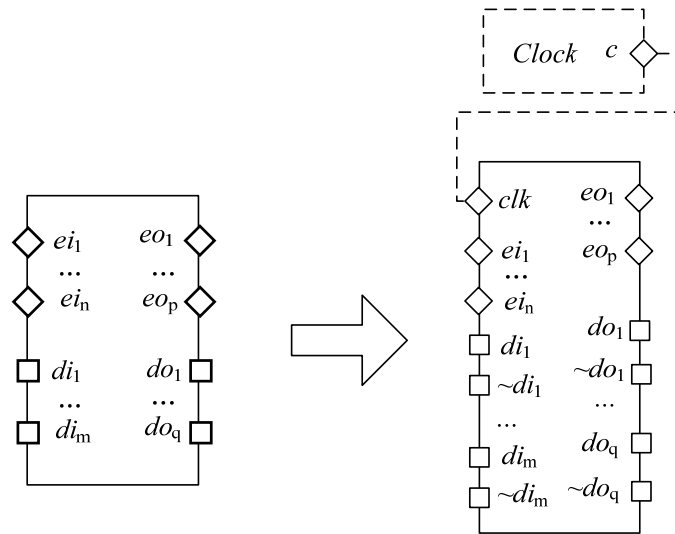


Рис. 4. Преобразование модуля ИМНДА в модуль NCES-сети

3. Переходу НДА, имеющему в общем случае условие в виде конъюнкции сигнальных входов (с отрицаниями и без) и событий (с отрицаниями и без) ставится в соответствие переход NCES-сети с И-логикой по входным событиям, причем позиции, соответствующие локальным состояниям и «потенциальные» сигнальные входы связываются с этим переходом тестирующими дугами, а импульсный сигнальный вход – событийной дугой. Кроме того, на этот переход через вход clk подаются «импульсные» сигналы с тактового генератора. Если при этом переход будет разрешен, то при его срабатывании генерируются импульсные сигналы, которые поступают на переходы $resetS_i$ и $setS_j$, побуждаемые к следующим действиям: сбросу события S_i и установке события S_j . Правило преобразования перехода ИМНДА во фрагмент NCES-сети приведено на рис. 5.

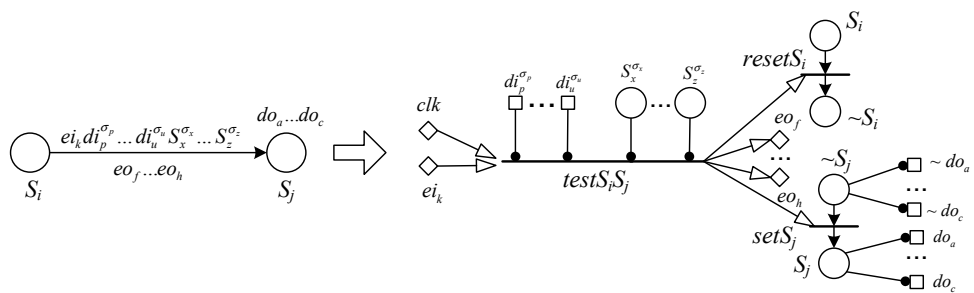


Рис. 5. Преобразование перехода ИМНДА во фрагмент NCES-сети

4. Вводится тактовый генератор, задающий абстрактное время t_0, t_1, t_2, \dots . Тактируется работа всех переходов во всех модулях NCES-сети, которые

представляют переходы НДА (переходы типа *test_* на рис. 5). Тактовый сигнал побуждает к срабатыванию все переходы, на которые он поступил. Модуль тактового генератора (типа *Clock*) приведен на рис. 6.

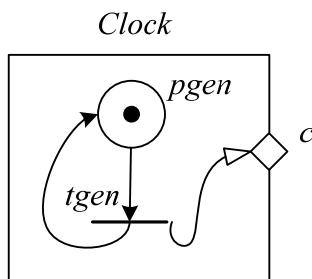


Рис. 6. Модуль генератора тактовых сигналов

Заключение

В работе были рассмотрены концепция и формальное определение ИМНДА, а также методика моделирования ИМНДА на основе *NCES*-сетей. Направлением дальнейших исследований являются разработка методов и средств анализа и эквивалентных преобразований ИМНДА, развитие модели в направлении временных ИМНДА, а также использование ИМНДА для supervisory управления.

Список литературы

1. **Cassandras, C. G.** Introduction to Discrete Event Systems / C. G. Cassandras, S. Lafortune. – Springer, 2008. – 772 с.
2. Unity in diversity, diversity in unity: Retrospective and prospective views on control of discrete event systems / R. Boel, X. R. Cao, G. Cohen, A. Giua, W. M. Wonham, J. H. Schuppen // J. Discrete Event Dynamic Systems: Theory and Application. – 2002. – Vol. 12, № 3. – P. 253–264.
3. **Barbeau, M.** Beyond the verification approach: the synthesis approach / M. Barbeau, R. St-Denis // WorldScientific. – 1999. – № 1. – P. 1–23.
4. Rapid engineering and re-configuration of automation objects using formal verification / V. Vyatkin, H.-M. Hanisch, S. Karras, T. Pfeiffer, V. Dubinin // International Journal of Manufacturing Research. – 2006. – Vol. 1, № 4. – P. 382–404.
5. **Ramadge, P. J.** Supervisory control of a class of discrete-event processes / P. J. Ramadge, W. M. Wonham // SIAM Journal Control and Optimization. – 1987. – Vol. 25, № 1. – P. 206–230.
6. **Вашкевич, Н. П.** Недетерминированные автоматы в проектировании систем параллельной обработки / Н. П. Вашкевич. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2004. – 280 с.
7. **Вашкевич, Н. П.** Формализованное описание и верификация дискретных событийных систем с параллельными процессами / Н. П. Вашкевич, В. Н. Дубинин // Вопросы радиоэлектроники. Сер. ЭВТ. – 2008. – Вып. 5. – С. 51–65.
8. **Frey, G.** PLC Programming for Hybrid Systems via Signal Interpreted Petri Nets / G. Frey // Proceedings of the 4th International Conference on Automation of Mixed Processes ADPM, Dortmund, Germany (September, 2000). – Dortmund, 2000.
9. **Hanisch, H.-M.** Towards a synthesis method for distributed safety controllers based on net condition/event systems / H.-M. Hanisch, J. Thieme, A. Lueder // Journal of Intelligent Manufacturing. – 1997. – № 8. – P. 357–368.

10. **Мищенко, В. А.** Логическое проектирование БИС / В. А. Мищенко, А. И. Аспидов, В. В. Витер и др. ; под ред. В. А. Мищенко. – М. : Радио и связь, 1984. – 310 с.
11. **Полин, Е. Л.** Абстрактные композиционные автоматы / Е. Л. Полин, К. В. Зашчелкин // Труды Одесского политехнического университета. – 2006. – Вып. 1 (25). – С. 88–94
12. **Rausch, M.** Net condition/event systems with multiple condition outputs / M. Rausch, H.-M. Hanisch // IEEE Int. Conf. on Emerging Technologies and Factory Automation. – Paris. 1995. – Vol. 1. – P. 592–600.
13. ViVe – VisualVerifier Tool Framework. – URL: <http://www.fb61499.com/valid.html>.
14. **Starke, P. H.** Analysing Signal-Net Systems / P. H. Starke, S. Roch // Informatik-Bericht 162. – Berlin : Humboldt-Universitaet zu Berlin, 2002. – 136 с.

References

1. Cassandras C. G., Lafortune S. *Introduction to Discrete Event Systems*. Springer, 2008, 772 p.
2. Boel R., Cao X. R., Cohen G., Giua A., Wonham W. M., Schuppen J. H. *J. Discrete Event Dynamic Systems: Theory and Application*. 2002, vol. 12, no. 3, pp. 253–264.
3. Barbeau M., St-Denis R. *WorldScientific*. 1999, no. 1, pp. 1–23.
4. Vyatkin V., Hanisch H.-M., Karras S., Pfeiffer T., Dubinin V. *International Journal of Manufacturing Research*. 2006, vol. 1, no. 4, pp. 382–404.
5. Ramadge P. J., Wonham W. M. *SIAM Journal Control and Optimization*. 1987, vol. 25, no. 1, pp. 206–230.
6. Vashkevich N. P. *Nedeterminirovannye avtomaty v proektirovanii sistem parallel'noy obrabotki* [Nondeterministic automata in parallel processing system design]. Penza: Izd-vo PGU, 2004, 280 p.
7. Vashkevich N. P., Dubinin V. N. *Voprosy radioelektroniki. Ser. EVT* [Problems of radioelectronics. Series: Computing technologies]. 2008, iss. 5, pp. 51–65.
8. Frey G. *Proceedings of the 4th International Conference on Automation of Mixed Processes ADPM, Dortmund, Germany (September, 2000)*. Dortmund, 2000.
9. Hanisch H.-M., Thieme J., Lueder A. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 1997, no. 8, pp. 357–368.
10. Mishchenko V. A., Aspidov A. I., Viter V. V. et al. *Logicheskoe proektirovanie BIS* [LIS logic design]. Moscow: Radio i svyaz', 1984, 310 p.
11. Polin E. L., Zashchelkin K. V. *Trudy Odesskogo politekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Odessa Polytechnic University]. 2006, iss. 1 (25), S. 88–94
12. Rausch M., Hanisch H.-M. *IEEE Int. Conf. on Emerging Technologies and Factory Automation*. Paris. 1995, vol. 1, pp. 592–600.
13. ViVe – VisualVerifier Tool Framework. Available at: <http://www.fb61499.com/valid.html>.
14. Starke P. H., Roch S. Analysing Signal-Net Systems. *Informatik-Bericht 162*. Berlin: Humboldt-Universitaet zu Berlin, 2002, 136 p.

Дубинин Виктор Николаевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра вычислительной техники,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: dubinin.victor@gmail.com

Dubinin Viktor Nikolaevich

Doctor of engineering sciences, professor,
sub-department of computer engineering,
Penza State University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Дроздов Дмитрий Николаевич

аспирант, Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: dmitriidrozдов9@gmail.com

Drozдов Dmitriy Nikolaevich

Postgraduate student, Penza State
University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

УДК 519.71

Дубинин, В. Н.

**Проектирование и реализация систем управления дискретными
событийными системами на основе иерархических модульных недетер-
минированных автоматов (Ч. 1. Формальная модель) / В. Н. Дубинин,
Д. Н. Дроздов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион.
Технические науки. – 2016. – № 1 (37). – С. 28–39.**