Подчиненные сети Петри в задачах логического управления

В.И. Клепиков, ФГУП "Институт точной механики и вычислительной техники им. С.А. Лебедева РАН" (ИТМиВТ)

Рассматривается механизм описания и моделирования дискретных процессов и систем, получивший название подчиненных сетей Петри (СП). Показаны эффективность применения подчиненных СП (ПСП) при описании процессов, характеризующихся свойством подчиненности друг к другу, и механизм преобразования ПСП к СП с запрещающими связями. Инструмент ПСП эффективно используется в ИТМ и ВТ для проектирования ПЛИС и разработки программного обеспечения.

Subordinate Petri nets in tasks of logical control. ***V.I. Klepikov.***

Subordinate Petri nets (SPN) technology was introduced for simulation and programming the tasks of logical control. The effectiveness of SPN was demonstrated for description and simulating of processes characterizing by properties of subordination one to others. The mechanism of transformation of SPN to common Petri nets with inhibitory links was proposed. SPN is used in IPMCE for FPGA development and software design and coding.

Качество функционального описания и моделирования дискретного процесса или системы зависит от того, насколько явно выбранный инструмент моделирования отражает их свойства и особенности поведения. Общим фундаментом практически всех известных моделей дискретных процессов и систем являются теории автоматов и СП [1, 2], которые нашли свое развитие и в языке UML, диаграммы состояний и взаимодействия которого играют одну из ключевых ролей в процессе проектирования и моделирования управляющих систем [3].

Однако, сложность реальных систем, параллелизм процессов, взаимные синхронизации и блокировки, иерархичность и вложенность по-прежнему вызывают необходимость расширения выразительных средств моделирования. Одним из таких расширений теории СП служит введение механизма явного описания свойств подчиненности логических процессов [4]. Это свойство проявляется, когда некоторый дискретный процесс (назовем его подчиненным) функционирует относительно самостоятельно, по своему внутреннему алгоритму, но при этом находится под контролем смежных либо иерархически выше стоящих процессов. Такие процессы, исходя из их собственного алгоритма функционирования, могут запретить подчиненному процессу переход в какие-либо состояния, или, напротив, перевести его в требуемое состояние, либо заблокировать в некотором состоянии, независимо от его внутренней логики работы. Модели, учитывающие свойства подчиненности логических процессов, получили название нейроподобных или подчиненных СП [4, 5].

Применение ПСП открывает возможности построения систем управления на основе иерархической структуры информационно-логических уровней управления [5], каждый из которых может проектироваться независимо от других, интегрируясь в общую систему на основе согласованного протокола взаимодействия.

1. Основные положения аппарата ПСП

Формально ПСП определяется [4] как "девятка" $N = (P, T, Q, \Gamma^+, \Gamma, O, G, V, \mu^o)$, где

1. $P = \{p_1, p_2, \ldots, p_n\}$ – конечное множество позиций;
2. $T = \{t_1, t_2, \ldots, t_m\}$ – конечное множество переходов (множества позиций и переходов не пересекаются – $P \cap T = \varnothing$);
3. $Q = \{q_1, q_2, \ldots, q_r\}$ – конечное множество маркеров;
4. $\Gamma^+: T \to 2^p$, $\Gamma: T \to 2^p$, $O: T \to 2^p$ – отображения множества всех переходов в множества позиций[1], задающие для каждого перехода t_j множества входных разрешающих $\Gamma^+(t_j)$, входных запрещающих $\Gamma(t_j)$ и выходных $O(t_j)$ позиций;
5. $G: Q \to 2^p$ – отображение множества маркеров в множества позиций, задающее для каждого маркера q_k область его действия $G(q_k)$, т.е. подмножество позиций, в которых может находиться маркер q_k;
6. $V = \{v_1, v_2, \ldots, v_m\}$ – конечное множество весовых коэффициентов, определяющее для каждого перехода t_j, $j = 1, \ldots, m$, действительное число v_j;
7. $\mu^\circ = \{\mu_1^o, \mu_2^o, \ldots, \mu_r^o\}$ – начальная маркировка сети – набор позиций, в которые помещены маркеры в начальный момент.

ПСП со входом будем называть тройку $N_I = (N, X, \sigma)$, где N – ПСП; X – множество состояний входа; $\sigma: T \to 2^x$ – функция, которая переходам t_j сети

[1] 2^p – множество всех подмножеств множества P.

(не обязательно всем) ставит в соответствие подмножество состояний $\sigma(t_j)$ входа X.

Изображаются ПСП ориентированным графом, в котором позиции p_i обозначены прямоугольниками, а переходы t_j – жирными черточками. Рядом с переходом укажем его весовой коэффициент (опущенный коэффициент по умолчанию равен единице) и входную функцию, если она определена для данного перехода. Маркеры q_k покажем в виде точек с соответствующими обозначениями, а области действия различных маркеров отделим пунктирными линиями. От позиций к переходам проведем дуги со стрелками (разрешающие связи) или с точками (запрещающие связи); из переходов в позиции могут вести только дуги со стрелками. В начальной маркировке каждый маркер q_k помещается в позицию μ_k°.

Состояние сети определяется ее текущей маркировкой, т.е. размещением маркеров по позициям. Если в текущей маркировке каждая из входных разрешающих позиций перехода t_j содержит маркер, а кроме того все запрещающие позиции этого перехода маркеров не содержат и состояние входа удовлетворяет условию σ, то этот переход считается активным. Активный переход активизирует каждую из своих выходных позиций, причем степень активизации $A(p_i)$ позиции p_i равна максимальному по абсолютной величине весовому коэффициенту для всех активных переходов, которым данная позиция служит в качестве выходной. Каждый маркер q_k сети может перемещаться из одной позиции в другую в пределах области $G(q_k)$ своего действия, и его текущее положение определяется тем, активность какой позиции в пределах $G(q_k)$ максимальна в данный момент, т.е. $\forall p_i \in G(q_k)$, $(A(p_w) > A(p_i)) \rightarrow \mu_k' = p_w$.

В качестве примера на рис. 1 приведена ПСП, для которой $P = \{p_1, \ldots, p_{10}\}$, $T = \{t_1, \ldots, t_{13}\}$, $Q = \{q_1, q_2, q_3\}$, $G(q_1) = \{p_1, p_2, p_3\}$, $G(q_2) = \{p_4, p_5, p_6\}$, $G(q_3) = \{p_7, p_8, p_9, p_{10}\}$, $V = \{1, 3, 1, 2, 1, 1, 1, 3, 1, 1, 1, 1, -3\}$, $\mu^\circ = \{p_1, p_4, p_7\}$.

Работа ПСП складывается из элементарных циклов, каждый из которых состоит из двух шагов. На первом шаге производится проверка активностей всех переходов сети. При этом в текущей маркировке μ последовательно для каждого перехода t_j проверяются наличие маркеров во всех входных разрешающих позициях $\Gamma^+(t_j) \in \mu$, отсутствие маркеров во всех входных запрещающих позициях $\Gamma(t_j) \cap \mu = \varnothing$ и принадлежность текущего состояния входа подмножеству $\sigma(t_j)$. Если эти условия выполняются, то переход считается активным и всем его выходным позициям p_i, активность $A(p_i)$ которых по абсолютной величине меньше весового коэффициента этого перехода, присваивается новое значение активности, равное весовому коэффициенту перехода $\forall p_i \in O(t_j)$, $(|\, v(t_j)\,| \geq A(p_i)) \rightarrow \rightarrow A(p_i) = v(t_j)$. Отметим, что в начале элементарного цикла активности всех позиций равны нулю, поэтому по его окончании, т.е. при проходе по всем переходам, каждой позиции будет назначена активность, соответствующая максимальному по абсолютной величине значению ее входного (активного) перехода.

На втором шаге формируется новая маркировка сети μ', для чего в области $G(q_k)$ действия каждого маркера отыскивается позиция с наибольшей положительной активностью и маркер q_k помещается в эту позицию: $\forall p_i \in G(q_k)$, $(A(p_w) > A(p_i)) \rightarrow \mu_k' = p_w$. Если при этом все позиции области действия маркера q_k имеют нулевую или отрицательную активность, то положение маркера в текущем элементарном цикле не изменяется: $\forall p_i \in G(q_k)$, $(A(p_i) \leq 0) \rightarrow \mu_k' = \mu_k$. Если же две или более позиций в области действия маркера имеют одинаковую положительную активность, то маркер помещается в одну из них произвольным образом в зависимости от алгоритма реализации сети.

Маркер и позиции в области его действия будем называть автоматом. Переходы, имеющие в качестве входных и выходных позиции только одного автомата, назовем собственными. Переходы, связывающие позиции различных автоматов, разделим на четыре класса: синхронизирующие, переключающие, удерживающие и блокирующие.

Синхронизирующий переход t_j может иметь входные разрешающие и запрещающие позиции из различных автоматов, а выходные позиции только

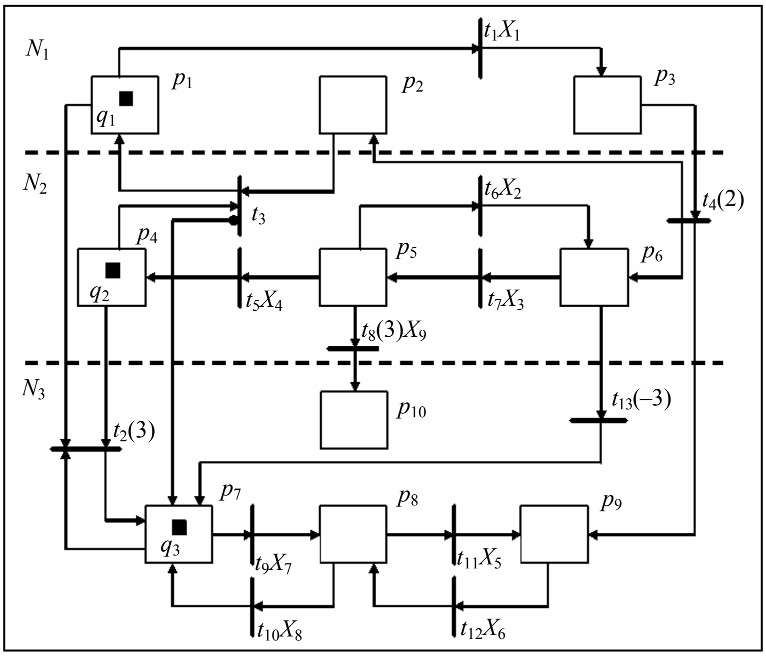

Рис. 1. Пример ПСП

в тех автоматах, в которых он имеет входные разрешающие позиции. Переключающий, удерживающий и блокирующий переходы имеют, по крайней мере, одну выходную позицию в автомате, не содержащем входных позиций для этих переходов. Переключающий переход кроме того содержит, по крайней мере, одну выходную позицию в автомате, содержащем входные для него позиции. Переключающий и удерживающий переходы имеют положительные весовые коэффициенты, а блокирующий переход – отрицательный.

Автоматы, позиции которых являются выходными по отношению к переключающим, удерживающим или блокирующим переходам, назовем подчиненными автоматами (ПА), а содержащие входные позиции таких переходов – главными. Некоторый автомат может оказаться одновременно и главным, и подчиненным по отношению к какому-либо другому автомату. В этом случае будет иметь место взаимоподчиненность процессов, описываемых данными автоматами.

Для иллюстрации работы ПСП рассмотрим работу сети [4], представленной на рис. 1. В этой сети три автомата – N_1, N_2, N_3. Переходы t_2, t_3 – синхронизирующие, t_4 – переключающий, t_8 – удерживающий, t_{13} – блокирующий, остальные переходы принадлежат соответствующим переходам и являются собственными.

В исходной маркировке и при отсутствии входных сигналов X_1 и X_2 активен лишь переход t_2, и, как следствие, позиция p_7 будет иметь активность $A(p_7)$, равную его весовому коэффициенту $A(p_7) = v_2 = 3$. Остальные позиции сети будут иметь нулевую активность $\forall p_i$, $(i \neq 7) \rightarrow A(p_i) = 0$. Позиция p_7 уже содержит маркер, поэтому маркировка сети не изменяется.

При появлении входного условия X_7 станет активен переход t_4, и это изменит активность позиции p_8: $A(p_8) = 1$. Маркировка же сети при этом не изменится, так как активность позиции p_7 будет выше активности позиции p_8, и маркер q_3 останется в позиции p_7.

При появлении X_1 переход t_1 активизирует позицию p_3 ($A(p_3) = 1$), в нее из позиции p_1 ($A(p_1) = 0$) перемещается маркер q_1 и активность позиции p_3 снова становится нулевой ($A(p_3) = 0$). Переход t_4 становится активным, а переход t_2 неактивным, благодаря чему активности позиций p_2, p_6 и p_9 будут равны 2, а активности остальных позиций нулевыми. Следующим шагом в указанные позиции переместятся, соответственно, маркеры q_1, q_2 и q_3, причем q_3 переместится в позицию p_9 независимо от наличия условия X_7, так как вес перехода t_9 меньше веса перехода t_4.

Далее маркировка сети изменяется в соответствии с активизацией собственных переходов автоматов. Работа автомата N_3, однако, находится под контролем автоматов N_1 и N_2. Так, при попадании маркера q_2 в позицию p_6 маркеру q_3 блокирующим переходом t_{13} будет запрещен доступ в позицию p_7. При попадании маркера q_2 в позицию p_5 с одновременным наличием условия X_9 маркер q_3 удерживающим переходом t_8 будет переведен в позицию p_{10}, откуда сможет выйти только при активизации перехода t_2 маркерами q_1 и q_2, когда последние попадут, соответственно, в позиции p_1 и p_4.

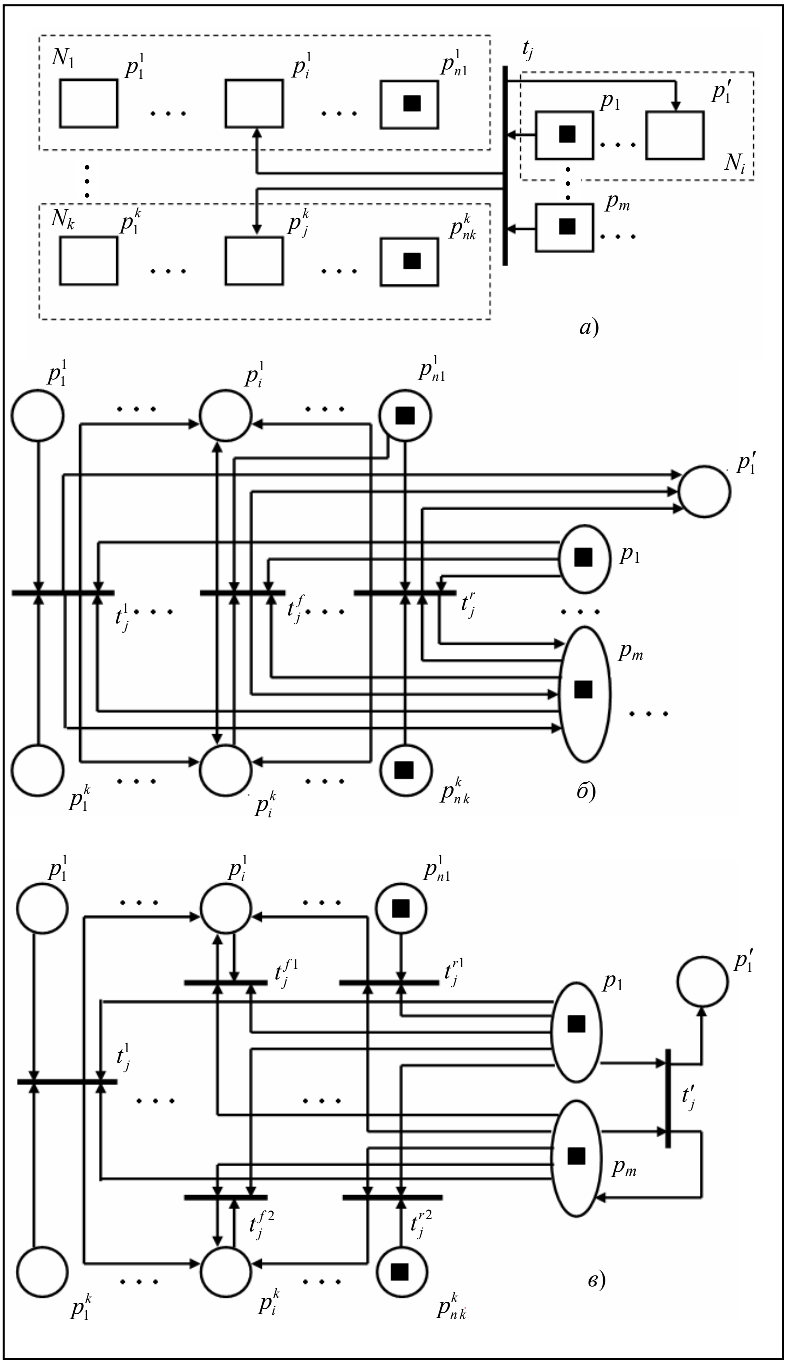

Рис. 2. Преобразование переключающего перехода ПСП в эквивалентную СП: а) исходная ПСП; б), в) эквивалентные СП

2. Соотношения аппаратов СП и ПСП

Формальные положения, показывающие эквивалентность определенных классов ПСП и СП, а также процедуры формального построения эквивалентных ПСП и СП, приведены в [4]. Покажем на примерах, как специфические переходы ПСП преобразуются в конструкции традиционных СП.

Варианты преобразования переключающего перехода проиллюстрированы на рис. 2. В исходной ПСП (рис. 2, *а*) активен переход t_j, в результате срабатывания которого активными станут позиции p_i^1, p_i^k и p_1'. Позиция p_1 потеряет маркер, а позиция p_m сохранит его.

Эквивалентная СП может быть получена (рис. 2, *б*) путем построения r переходов t_j^f, $f = 1 \dots r$, где r в общем случае равно произведению количества позиций автоматов $N_1 \dots N_k$, $r = n_1 * \dots * n_k$. Входными для переходов t_j^f являются как входные позиции перехода $t_j(p_1, \dots, p_m)$, так и все возможные комбинации позиций автоматов $N_1 \dots N_k$. Множество выходных позиций переходов t_j^f состоит из позиций, служащих выходными для перехода t_j, и тех входных позиций перехода t_j, которые содержатся в автоматах, не имеющих выходных позиций этого перехода. Это означает, что в результате срабатывания перехода t_j^f в СП S установится новая маркировка μ_S', совпадающая с маркировкой μ_N' $(\mu_S' = \mu_N')$.

Другой путь получения эквивалентной СП для переключающего перехода ПСП заключается в построении для каждого автомата N_i набора переходов, равного количеству позиций автомата, из которых выполняется переключение. Так, на рис. 2, *в* переходы t_j^f и t_j^r заменены парами переходов t_j^{f1}, t_j^{f2} и t_j^{r1}, t_j^{r2}. Применим и комбинированный подход, как, например, на рис. 2, *в* сохранен переход t_j^1, хотя для него изменяется состав выходных позиций за счет появления перехода t_j'.

Удерживающие переходы ПСП преобразуются в эквивалентную СП следующим образом (рис. 3). Для каждого из выходных переходов позиции ПСП, которая является выходной для удерживающих переходов, в СП строится набор выходных переходов, равный количеству удерживающих переходов ПСП, причем каждому такому переходу в переходах СП ставится в соответствие запрещающая связь. Отметим, что проектирование автомата N_k ПСП может выполняться без использования информации о внешних по отношению к нему процессах.

Преобразование в СП блокирующего перехода ПСП (рис. 4, *а*) демонстрируется на рис. 4, *б*. Переход t_x является блокирующим для позиции p_z, т.е. если позиция p_x содержит маркер, то маркеры из позиций $p_1 \dots p_n$ не могут перейти в позицию p_z. Функция блокировки реализуется в СП с помощью переходов с запрещающими связями. Однако применение блокирующего перехода ПСП позволяет выполнять проектирование автомата N_z без учета возможных внешних его связей.

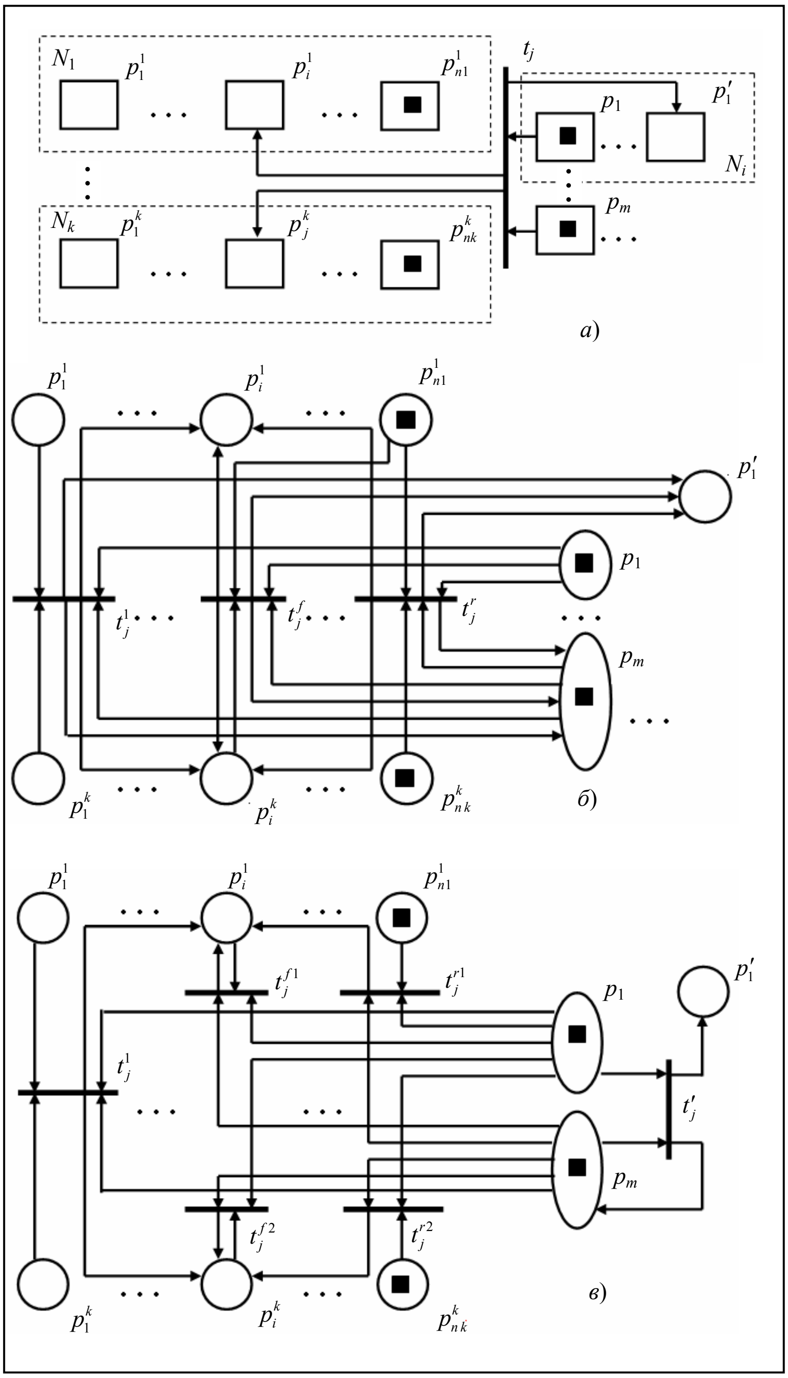

Рис. 2. Преобразование переключающего перехода ПСП в эквивалентную СП: а) исходная ПСП; б), в) эквивалентные СП

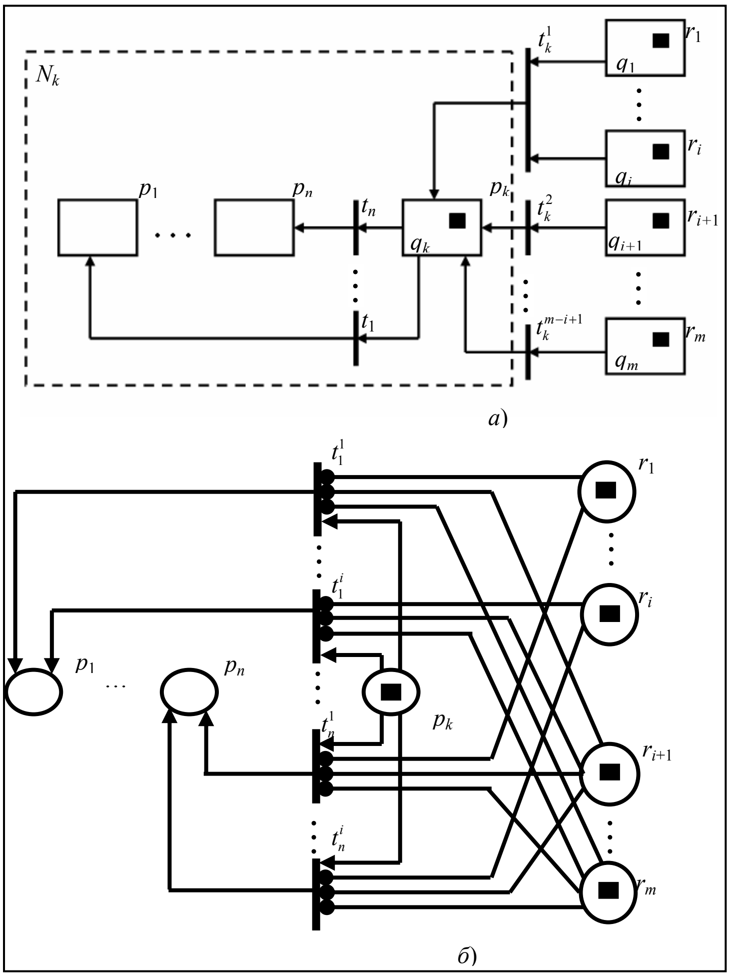

Рис. 3. Преобразование удерживающих переходов ПСП в эквивалентную СП: а) исходная ПСП; б) эквивалентная СП

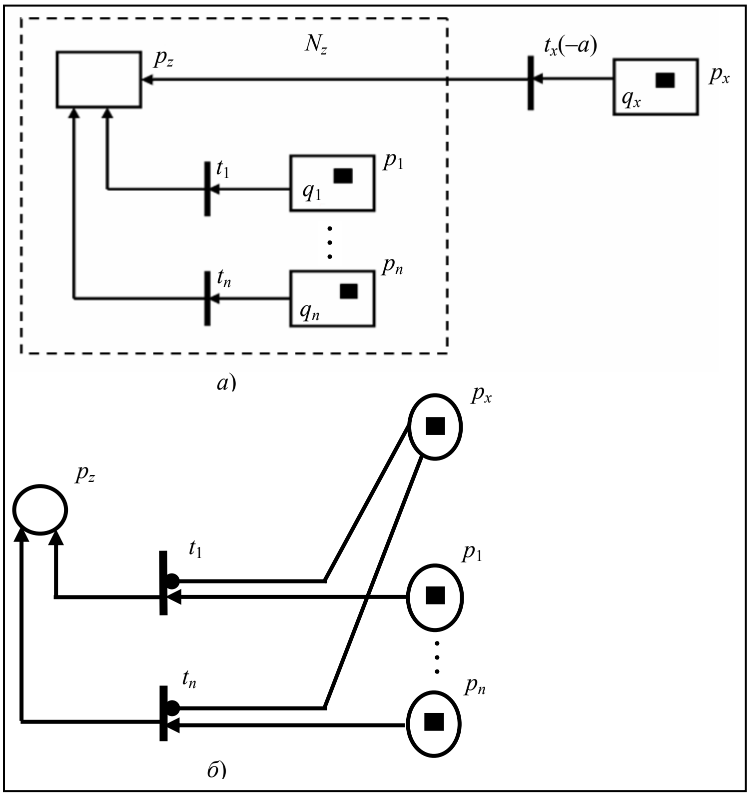

Рис. 4. Преобразование блокирующего перехода ПСП в эквивалентную СП: а) исходная ПСП; б) эквивалентная СП

Заключение

Аппарат ПСП служит эффективным средством описания и моделирования дискретных процессов, характеризующихся свойствами подчиненности. По сравнению с традиционными механизмами моделирования, такими как СП и конечные автоматы, ПСП обеспечивают бо́льшую наглядность и компактность описания, выполняя и поддерживая на этапах проектирования и реализации функциональную декомпозицию системы. Благодаря этому качеству ПСП являются мощным средством описания и моделирования сложных технологических процессов, распределенных иерархических систем управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ***Лазарев В.Г., Пийль Е.И.*** Синтез управляющих автоматов. – М.: Энергия, 1970.
2. ***Питерсон Дж.*** Теория сетей Петри и моделирование систем: Пер. с англ. – М.: Мир, 1984.
3. ***Рамбо Дж., Блаха М.*** UML 2.0 Объектно-ориентированное моделирование и разработка. 2-е изд. – СПб.: Питер, 2007.
4. ***Клепиков В.И., Сосонкин В.Л.*** Структурированные нейроподобные сети как средство моделирования дискретных процессов // АиТ. 1998, № 1.
5. ***Сосонкин В.Л., Клепиков В.И.*** Принцип подчиненного управления в логических системах управления // Приборы и системы управления. 1995, № 12.

Статья поступила в редакцию 29.06.07.