

SECTION 4. Computer science, computer engineering and automation.

Valerij Valentinovich Kuzmuk

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Deputy Head of the Division of hybrid modeling and control systems in the energy sector
National Academy of Sciences of Ukraine
Pukhov Institute for Modelling in Energy Engineering

Oksana Aleksandrovna Suprunenko

Associate professor, docent, Docent Departments of Software of automated systems
Cherkassy National University named after Bogdan Khmelnytsky
ra-oks@mail.ru

THE MEANS FOR THE DESCRIPTION OF INFORMATION FLOWS IN DYNAMIC MODELS OF MEDICAL HARDWARE-SOFTWARE SYSTEMS

***Abstract:** Presented the problem of modeling of the interaction of information flow in medical software-hardware systems. As a means of describing such systems is proposed to use the Petri net (PN), which combines the properties of certain interpretations and modifications PN. A classification of Petri nets, a combination of properties of PN to describe medical systems with heterogeneous components. A comparison of models of medical management system, built using UML-diagrams and PN-network, highlighted in benefits.*

***Key words:** Petri nets, classification of Petri nets, UML-model, information flows, dynamic simulation of medical systems.*

УДК 519.179.2 + 004.942

СРЕДСТВА ОПИСАНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПОТОКОВ В ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ МЕДИЦИНСКИХ ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫХ СИСТЕМ

***Аннотация:** Представлена задача моделирования процесса взаимодействия информационных потоков в медицинских программно-аппаратных системах. В качестве средства описания таких систем предложено использовать сеть Петри (PN), сочетающую свойства некоторых интерпретации и модификации PN. Дана классификация сетей Петри, предложена комбинация свойств PN для описания медицинских систем с неоднородными компонентами. Проведено сравнение модели медицинской управляющей системы, построенной с помощью UML-диаграммы и PN-сети, выделены преимущества.*

***Ключевые слова:** сети Петри, классификация сетей Петри, UML-модель, информационные потоки, динамическое моделирование медицинских систем.*

При моделировании медицинских программно-аппаратных комплексов возникает потребность отображения и динамической имитации процесса взаимодействия информационных потоков в оборудовании и программном обеспечении, а также взаимодействии данных потоков с определёнными информативными точками организма человека. Данные задачи моделирования необходимо решать с использованием средств статического и динамического моделирования, к которым относятся аппарат сетей Петри [1, с. 37; 2, с. 11; 3, с. 31].

Теория сетей Петри (Petri Netze, PN) [1, с. 63-64] применяется при моделировании систем, имеющих множество асинхронных параллельных процессов [4, с. 66]. Важным моментом в теории PN является наличие причинностных связей, которые отображаются

как «причина – действие – обозначение» и представляют интерес при моделировании параллельных, параллельно-последовательных и конкурирующих процессов.

Теория сетей Петри основывается на теории автоматов [5, с. 15]. Особенностью *сетей Петри* или *графов Петри* является наличие двух видов несовместных вершин [4, с. 68]: вершин переходов (переходов) t_i и вершин мест (узлов) p_ε , соединенных между собой ориентированными дугами (ребрами) по определенным правилам S . В графах Петри *переходам* t_i соответствовали одноименные *автоматы* A_i , а узлам p_ε – *условия активизации* или *постактивизации* (p_f) автоматов A_i .

Классическая сеть Петри (PN) является специализированным бихроматическим (двудольным) графом

$$G = (P, T, K, S), \quad (1)$$

состоящим из двух типов вершин – вершин переходов $T = \{t_i\}$ и вершин мест (узлов) $P = \{p_\varepsilon\}$, соединённых между собой направленными дугами $K = \{k_q\}$ по функциональным правилам $S = \{w, b, m, L\}$. Элементами функциональных правил являются весовая функция w , функция обозначений b , разметочная функция m и алфавит сигналов управления L .

Весовую функцию запишем в виде $w: K \rightarrow N$, где N – множество натуральных чисел, определяющих кратность дуг $k_q \in K$, т.е. число меток, которое может одновременно передаваться по определённой дуге k_q . Весовая функция w определяет, сколько меток должна содержать входная в переход t_i вершина места p_ε , чтобы он мог быть активизирован. Активизация перехода осуществляется в случае, если во всех входных вершинах мест содержится такое число меток, что они равны или превышают число одновременно передаваемых меток в соответствующих дугах k_q .

Функция обозначения $b: T \leftarrow L$ позволяет связать срабатывание переходов $t_j \in T$ с опросом входных ${}^i x$ и выдачей выходных ${}^i y$ сигналов управления. Функция обозначения указывает дальнейший путь в графе Петри, по которому начнут перемещаться метки. Она позволяет установить приоритет для срабатывания переходов t_j .

Разметочная функция $m: P \rightarrow N \cup \{0\}$ ставит в соответствие каждому месту $p_\varepsilon \in P$ целое число меток N или 0 и определяет его текущую разметку $m(p_\varepsilon) = n_\nu \in N \cup \{0\}$.

Множество $L = X ; Y$ определяет входной $X = \{x_1, x_2, \dots, x_s\}$ и выходной $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_v\}$ алфавиты сигналов управления.

Если вес дуги $w = 0$, то срабатывание перехода t_i может наступить в случае, если разметка места, из которого выходит эта дуга, равна $m(p_\varepsilon) = 0$. Такая дуга называется *запрещающей* (inhibit), начинается она от вершины места, оканчивается крупной точкой в вершине перехода [3, с. 36].

Функциональные правила $S = \{w, b, m, L\}$ определяют элементы, которых строятся интерпретации и модификации сетей Петри. В классических сетях Петри каждая вершина перехода t_i моделирует действие a_i , вершина места p_ε , связанная направленной дугой с t_i , моделирует одно из условий E_ε , при котором может начаться выполнение действия a_i , а одна метка в p_ε указывает на наличие одного частичного условия ${}^i E_\varepsilon \in E$.

На сегодняшний день разработано много различных интерпретаций и модификаций сетей Петри, что обусловлено адаптацией классических сетей Петри к прикладным задачам и стремлением избавиться от части критических свойств [2-3, 6]. *Классическую сеть Петри PN* с помощью модификации определённых структурных или функциональных элементов можно преобразовать к большинству известных интерпретаций [3, с. 35].

Интерпретацией сетей Петри называют [3, с. 34] определённый набор понятий и правил, в основе которых лежит принцип построения размеченных двудольных графов, которые состоят из двух типов вершин – вершин мест $T = \{t_i\}$ и вершин переходов $P = \{p_\varepsilon\}$ – соединённых между собой направленными дугами $K = \{k_q\}$ по определённым функциональным правилам S [6, с. 41]. Модификации сетей Петри представляют собой варианты определённых интерпретаций, в которых дополнены или переопределены некоторые структурные и функциональные элементы с целью их более удобного практического применения.

На сегодня разработаны многочисленные интерпретации и модификации сетей Петри. Их характеристики сочетают определённые свойства базовых классов [6, с. 41]. При классификации сетей Петри в качестве основных классов (интерпретаций) выделены (рис. 1) [3, с. 47-48]:

1) безопасные сети Петри (SPN) – интерпретация сетей Петри (PN), в которой каждая вершина места может содержать не более одной метки ($N \in \{0,1\}$), все дуги имеют единичный вес;

2) оценочные (ограниченные) сети Петри (BPN) – интерпретации PN, в которых вершины мест имеют целое число меток N ($N \geq 1$), а целочисленные оценочные дуги определяют количественное распределение меток в сети после их прохождения через вершины переходов;

3) числовые (EN) и макрочисловые сети (MEN) – интерпретации PN, в которых вершины переходов принадлежат нескольким заранее установленным типам, каждый из которых срабатывает при определённом числе N меток в сети, а вершины макропереходов имеют возможность некоторого изменения своей структуры;

4) цветные сети Петри (CPN) – интерпретации PN, в которых метки в вершинах мест являются механизмом синхронизации и, вместе с тем, средством отображения различной информации в зависимости от назначенного им признака – цвета [3, с. 50; 7, с. 26];

5) временные сети Петри (TPN) [3, с. 164; 8, с. 216] – интерпретации PN, к вершинам мест, вершинам переходов и дуг которых как параметр добавляется время отработки определённой, связанной с элементом, функции. При этом временной параметр может добавляться к вершинам переходов [3, с. 164], которые ассоциируются с действием (функцией), и моделировать время выполнения этого действия. Время также возможно задать и для вершин мест [6, с. 42], в таком случае оно будет отображать время отработки условия или временную задержку, которая может связываться с технологическими особенностями модели. Временные параметры могут назначаться элементам первых четырёх классов (интерпретаций) сетей Петри, что говорит о сочетании свойств этих интерпретаций. Класс временных сетей TPN позволяет отобразить в модели временные параметры, которые важны при моделировании технических устройств, программных и технологических систем [3, с.217, 228].

Классы (интерпретации) сетей Петри можно разделить на две группы [6, с. 41]: базовые и прикладные PN (рис.1). К базовым классам PN принадлежат ближайшие к классическим сетям Петри безопасные и оценочные сети Петри, которые отражают наиболее общую гамму базовых свойств сетей Петри. На границе между базовыми и прикладными классами находятся числовые и макрочисловые сети Петри, создаваемые на основе базовых свойств и правил PN с учётом свойств расширяющих элементов конкретных электрических и микроэлектронных устройств, для моделирования которых они первоначально создавались. К прикладным классам отнесём цветные и временные сети Петри, поскольку они создавались под конкретные задачи [2, с. 112; 6, с. 43; 8, с.221] и могут быть применены к элементам базовых классов в обобщённых моделях различных моделируемых систем.

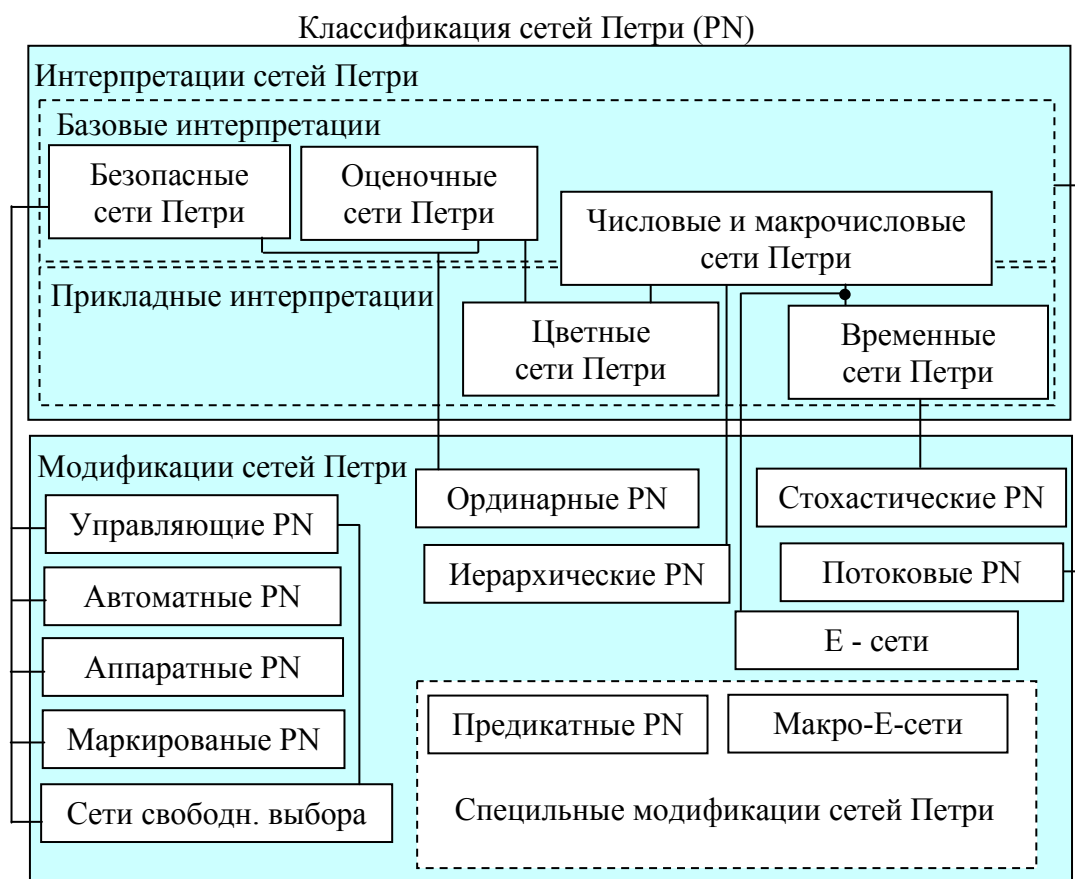


Рисунок 1 - Классификация сетей Петри.

Производной модификацией от числовых/макрочисловых и временных сетей Петри являются E-сети. E-сети (evaluation - "вычисления") – отдельный класс сетей Петри, которые имеют расширенный набор вершин мест и вершин переходов

$$T = (T, E^{(\delta)}, A^{(d)}, F^{(q)}, J^{(c)}, T^{(c, q)}), \quad T = (E^{(\delta)}, A^{(d)}, F^{(q)}, J^{(c)}, T^{(c, q)}),$$

которые созданы с целью отражения разнообразных функций со сложной управляющей составляющей [9, с. 65]. В E-сетях предусмотрены: 1) несколько типов вершин-мест: простые места, места-очереди, позволяющие места; 2) метки могут обеспечиваться набором признаков (атрибутов); 3) с каждым переходом может быть связана ненулевая задержка и функция преобразования атрибутов меток; 4) введены дополнительные виды вершин-переходов; 5) в любую позицию может входить и выходить не более одной дуги. Рассмотренные особенности E-сетей позволяют уменьшить число критических свойств и существенно расширяют возможности для моделирования аппаратных систем с параллелизмом и параллельных процессов в программных системах [6, с. 41; 9, с. 67].

Моделирование динамических систем в медицине предусматривает отображение в модели систем управления оборудованием, организационных элементов схем лечения пациентов и элементов обратной связи для организации процесса мониторинга пациента во время диагностики или лечения. Для моделирования подобных систем могут применяться безопасные сети Петри (SPN) с элементами накопительного типа [3, с. 159], характерными для оценочных сетей (BPN), а также построенные на основе безопасных сетей Петри – управляющая модификация SN со стохастическими временными элементами. На основе этих модификаций сетей Петри удастся построить достаточно простые и удобные для анализа конструкции, некоторые из которых представлены на рис. 2.

Первая конструкция (рис. 2, *a*) представляет выполнения действия, отображённого переходом t_1 , только при наличии выполнения всех условий (представленных во входных вершинах мест). Вторая конструкция (рис. 2, *b*) позволяет осуществить выполнение определённого действия (возможно в пределах цикла) n раз.

Третья конструкция (рис. 2, *c*) позволяет выполнение действия в переходе t_3 только при отсутствии условия в вершине места p_m , что например, может отобразить выполнения воздействия при отсутствии противопоказаний. Четвёртая конструкция (рис. 2, *d*) с использованием макроперехода τ_1 , управляемого вектором X_1 , позволяет осуществлять выбор, например, выбирать программу терапии для пациента по коррекции врача, или использоваться в цикле коррекции терапии по результатам мониторинга состояния пациента. Кроме того, управляющий вектор позволяет моделировать время осуществления моделируемого процесса, в том числе и стохастического типа. Пятая конструкция (рис. 2, *e*) предусматривает выполнение действия, моделируемого вершиной t_1 , только во время выполнения действия в вершине t_2 .

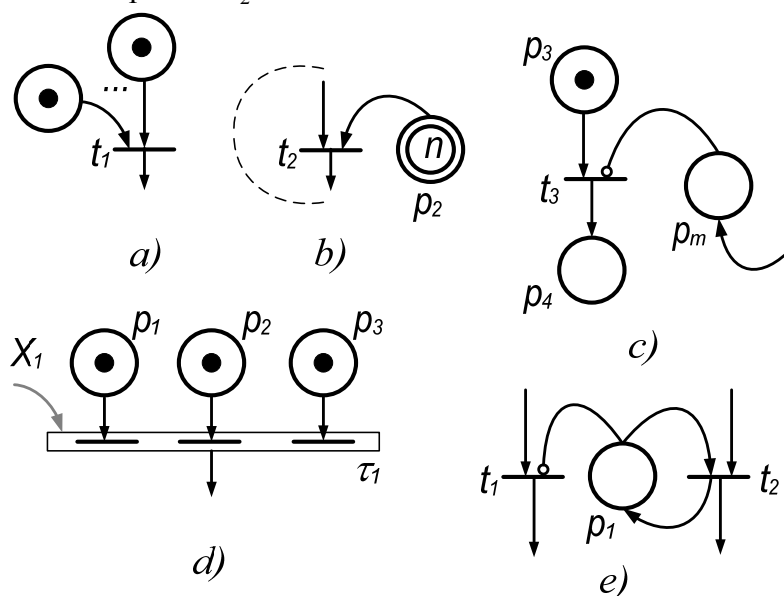


Рисунок 2 - Варианты использования конструкций на основе сетей Петри при моделировании медицинских систем управления.

Например, рассмотрим модель информационного процесса реакции сердца на кардионагрузку. У тренированных людей после первого этапа тренировки, характеризующегося первым утомлением, наблюдается эффект «плато». Этот эффект говорит об удержании нагрузки на выбранном уровне некоторое время, после которого наблюдается эффект «второго дыхания», позволяющий продолжать тренировку с наращиванием нагрузки. У нетренированных людей за коротким эффектом «плато» следует необходимость снижения нагрузки (эффект «второго дыхания» отсутствует) из-за ухудшения физиологических параметров, что говорит о чрезмерности выбранного уровня нагрузки.

Проиллюстрируем варианты моделирования информационного процесса реакции сердца на кардионагрузку виде UML-модели (рис. 3, *a*) и PN-модели (рис 3, *b*).

Как основа для построения UML-модели была выбрана диаграмма деятельности [10, с. 122], которая позволяет описать функционирование информационного процесса в зависимости от существующих условий, хотя она является частью псевдодинамической метамодели [11, с. 64].

После начала работы модели первые действия осуществляются на основе выбора: «начать тренировку?». При утвердительном ответе вводиться номер комплекса упражнений и запускаются два параллельных процесса, первый из которых позволяет контролировать выполнение упражнений выбранного комплекса, а второй – проводить контроль состояния пациента во время упражнений. Если во время выполнения комплекса состояние пациента остается стабильным, продолжается контроль состояния и параллельный цикл тренировки заканчивается, когда вся программа тренировки выполнена. Иначе, если состояние ухудшается, то программа тренировки прерывается (выход из цикла тренировки, который объединяет состояния «Определение нагрузки комплекса n » и «Выполнение комплекса n »), пациент переводится на упражнения с понижением нагрузки. Это позволяет, в зависимости от состояния (выход на конечный узел) и желания (при удовлетворительном состоянии) пациента, соответственно выйти из тренировочного цикла, либо выбрать иную программу тренировки. Если на вопрос: «начать тренировку?», получен отрицательный ответ, тогда переходим к состоянию «Пересмотр карты тренировки». Ряд состояний после выбранного позволяют производить индивидуальное формирование тренировочного комплекса и поддерживающей терапии, после чего выбирать, начинать ли тренировку (или следующий её этап) или выйти из программы контроля реакции сердца на кардионагрузку.

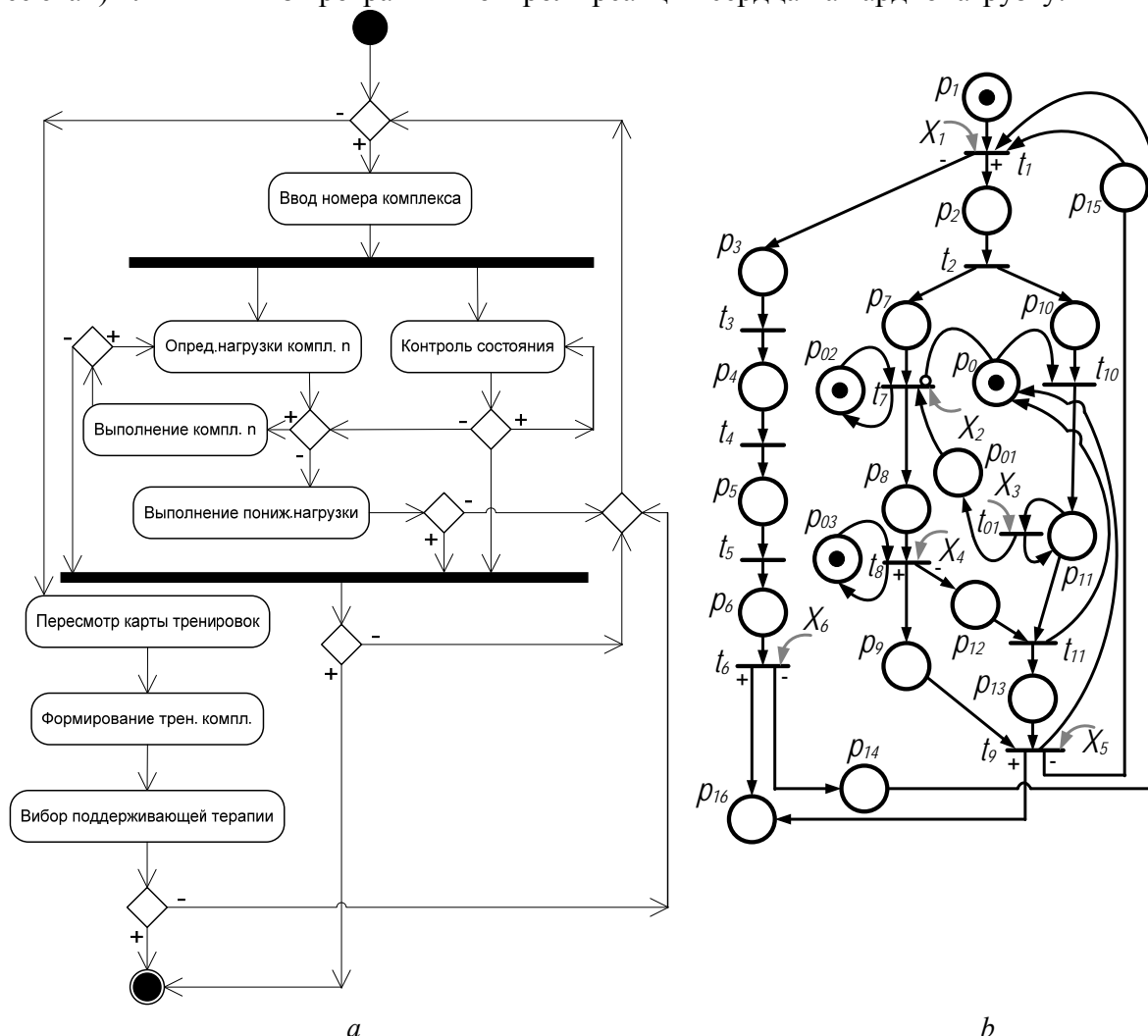


Рисунок 3 - Модель информационного процесса реакции сердца на кардионагрузку:
a – UML-модель, *b* – PN-модель.

В PN-модели есть возможность учёта набора условий для осуществления альтернативных действий, а также она позволяет контролировать взаимозависимые

параллельные процессы и демонстрировать развитие процесса в динамике, которое осуществляется путём проведения компьютерного эксперимента. Построение модели проводилось на базе управляющей модификации безопасной интерпретации сетей Петри. В управляемых вершинах переходов вектор X_i позволяет определить необходимые условия срабатывания перехода (в том числе и временные), а также направление (направления) последующей передачи управляющих сигналов, подобно конструкции, показанной на рис. 2, *d*.

Начинается функционирование модели в начальной вершине p_1 , маркированными в начале запуска модели являются вершины мест p_1 , p_0 , p_{02} и p_{03} (рис 3, *b*). В вершине перехода t_1 , который является управляемым, производится выбор: «начать тренировку?». Для запуска перехода достаточно наличие одной метки в одной из входных вершин p_1 , p_{14} или p_{15} .

Если ответ утвердительный, то вектор X_1 позволяет перейти по положительной дуге, в вершине места p_2 вводится номер комплекса упражнений и в вершине перехода t_2 производится образование двух параллельных процессов, один из которых (начинается от вершины места p_7) моделирует контроль выполнения упражнений комплекса, а другой (от вершины места p_{10}) – контроль состояния пациента. Причём начать контроль выполнения упражнений невозможно без успешного запуска процесса контроля состояния, что обеспечивает запрещающая дуга от вершины места p_0 к вершине перехода t_7 . Метка из вершины p_0 извлекается только при успешном запуске контроля состояния пациента и возвращается в эту вершину после окончания процесса тренировки из вершины перехода t_{11} , который может сработать только после окончания выполнения предусмотренных комплексом упражнений и означать окончание процесса контроля состояния пациента во время выполнения комплекса. При досрочном завершении комплекса (вследствие ухудшения состояния пациента) процесс контроля состояния завершается вместе с прерыванием цикла основных упражнений (в вершину места p_0 метка возвращается из вершины перехода t_9).

В вершине перехода t_7 запускается выполнение комплекса, номер которого был выбран выше. Через вершину места p_{02} выполнение комплекса отслеживается системой до тех пор, пока не закончится набор упражнений или пока не поступит сигнал об ухудшении состояния пациента (из вершины места p_{01}), что свидетельствует о превышении нормативных показателей сердечного ритма, зафиксированных в вершине перехода t_{01} , переданных в вершину p_{01} по срабатыванию управляющего вектора X_3 .

Если выход из вершины t_7 происходит по причине превышения нормативных показателей, то при следовании метки в вершину перехода t_8 запускается цикл $p_{03} - t_8$, который описывает выполнение понижающей нагрузки, а затем через вершину места p_9 идёт запуск перехода t_9 , который обеспечивает в такой ситуации управляющий вектор X_5 , после чего метка переходит в конечную вершину p_{16} .

Иначе, после полного выполнения выбранного комплекса, управление сразу передаётся через вершину места p_{12} вершине перехода t_{11} и далее через вершину p_{13} в вершину перехода t_9 , где с помощью того же вектора X_5 производится выбор: «выход из программы» (переход в конечную вершину p_{16}) или «возврат» для продолжения работы (переход в вершину места p_{15}).

В вершине перехода t_1 может также быть выбран путь к вершине места p_3 , что говорит о возможности просмотра карты тренировок (t_3) и индивидуальное формирование тренировочного комплекса (t_4), а также поддерживающей терапии (t_5). После этой цепочки действий вновь есть возможность выбрать два пути (в вершине t_6): «Выход из программы» или «Начать (продолжить)» контролируруемую тренировку.

Построенная PN-модель позволяет проследить взаимосвязи управляющих процессов в динамике. Так, например, конструкция типа c (рис. 2) позволяет не допустить осуществления основного процесса без мониторинга состояния пациента, управляющие векторы позволяют управлять моделью при сокращении количества управляющих элементов.

Аппарат сетей Петри позволяет алгоритмически описывать динамику протекания параллельных процессов и причинностные связи между ними в сложных моделях медицинских систем, которые отличаются неоднородностью компонентов и их свойств. Элементы преобразования (вершины макропереходов) позволяют организовать интерфейс между неоднородными компонентами, основываясь на общей управляющей информации и характеристиках процессов. Развитие теории сетей Петри при моделировании систем с неоднородными компонентами состоит в создании комплексных элементов, которые позволят пользователям, глубоко не знакомым с теорией сетей Петри, строить модели и проводить на них прикладные исследования, а специалистам – проводить более глубокий анализ построенных моделей на основе статических и динамических свойств [3, с. 67] сетей Петри.

References:

1. Petri C.A. Kommunikatoin mit Automaten. Bonn: Institut für Instrumentelle Mathematik, 1962. 89 S.
2. Кузьмук В.В., Васильев В.В. Сети Петри, параллельные алгоритмы и модели мультипроцессорных систем. К.: Наукова думка, 1990. 216 с.
3. Кузьмук В.В., Супруненко О.О. Модифицированные сети Петри и устройства моделирования параллельных процессов. К.: Маклаут, 2010. 260 с.
4. Кузьмук В.В., Кузьмук А.В., Супруненко О.А., Тараненко Е.А. Модифицированные сети Петри и современные методы моделирования параллельных процессов в сложных системах. // Управління розвитком складних систем. 2011. № 5. С. 66-72.
5. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем. / Пер. с англ. М.: Мир, 1984. 264 с.
6. Кузьмук В.В. Парнюк А.М., Супруненко О.О. Класифікація мереж Петрі та приклади їх застосування для розв'язання прикладних задач. // Восточно-европейский журнал передовых технологий. 2011. № 2/9 (50). С. 40-43.
7. Jensen, K. Coloured Petri Nets: Basic Concepts, Analysis Methods and Practical Use. Vol. 2: Springer-Verlag, 1997.
8. A. Spiteri Staines, Supporting Requirements Engineering With Different Petri Net Classes. // International journal of computers. 2010. Vol. 4. Issue 4. p. 215-222.
9. Кузьмук В.В. Применение модифицированных E-сетей для построения параллельных алгоритмов. // Доклады АН УРСР. Сер. А: Физико-математические и технические науки. К.: Наукова думка, 1985, №8, С.65-68.
10. Рамбо Дж., Блаха М. UML 2.0. Объектно-ориентированное проектирование и разработка. 2-е изд. СПб.: Питер, 2007. 544 с.
11. Rumbaugh J., Jacobson I. and Booch G., The Unified Modeling Language Reference Manual, Addison-Wesley, 1999.