

УДК 519.179, 004.451.24, 004.942

*У статті розглядаються проблеми виявлення помилок при розробці складних систем керування. Пропонується в якості опорної моделі при верифікації програмної системи використовувати модель на основі управляючих мереж Петрі*

*Ключові слова: паралельні процеси, системи керування, модель програмної системи, управляючі мережі Петрі*

*В статье рассматриваются проблемы выявления ошибок при разработке сложных систем управления. Предлагается в качестве опорной модели при верификации программной системы использовать модель на основе управляющих сетей Петри*

*Ключевые слова: параллельные процессы, системы управления, модель программной системы, управляющие сети Петри*

*The problems of detecting errors in the design of complex control systems. Offered as a reference model for verification of a software system using a model based on control of Petri nets*

*Keywords: concurrent processes, control systems, the model of a software system that control Petri net*

# МОДИФИЦИРОВАННЫЕ СЕТИ ПЕТРИ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ

**В. В. Кузьмук**

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой\*

Контактный тел.: 050-352-38-12

E-mail: valeriy\_kuzmuk@ukr.net

**О. А. Супруненко**

Кандидат технических наук, доцент\*

Контактный тел.: 066-187-99-50

E-mail: ra-oks@mail.ru

\*Кафедра программного обеспечения автоматизированных систем

Черкасский национальный университет имени Богдана Хмельницкого

бульв. Шевченко, 79, корп. №3, ауд. 275, г. Черкассы, Украина, 18006

## 1. Введение

При проектировании и реализации сложной системы управления, возникают задачи выбора средств отображения и имитации её модели, формирования и отладки рабочего кода. При этом нужно учитывать, что подавляющее большинство систем управления относится к разряду параллельных или распределённых систем, сложность тестирования которых экспоненциально возрастает с увеличением числа параллельных потоков и их элементов.

Среди возможных вариантов решения этих задач наборы функциональных уравнений, временные диаграммы, таблицы или матрицы состояний, графовые методы и др. [1]. Для верификации программных систем (ПС) в наше время получил широкое распространение метод Model Checking [2]. Его преимуществами являются: более полная проверка выполнения требований спецификаций, производимая на модели ПС; применение средств верификации на ранних этапах проектирования, на которых время и стоимость исправления ошибок минимальны; возможность авто-

матизации процесса верификации, что позволяет применять ее в процессе разработки больших по объёму и сложных по структуре систем. Но основной проблемой в применении данного метода является построение абстрактной модели, на которой и выполняется верификация.

Анализ методов и алгоритмических средств для построения моделей ПС показывает [1], что процесс решения включает в себя построение алгоритма, оперирующего с интересующими исследователя данными и реализуемого в компьютерной системе, а также сопутствующего алгоритма «пошагового обхода» построенной модели, дающего детальную информацию о протекающих параллельных процессах в исследуемой модели. Эффективность исследуемой системы управления является максимальной, когда алгоритмические средства, положенные в основу ее построения, совпадают с алгоритмическими средствами, лежащими в основе построения её моделей.

Основными требованиями к средствам моделирования подобных систем являются адекватность и простота аналитического описания, наглядность ото-

бражения и алгоритмическая надёжность [1]. Данным требованиям в полной мере отвечает аппарат сетей Петри (Petri Netze), разработанный немецким математиком Карлом-Адамом Петри [3] на основе абстрактных конечных автоматов. Он предназначался для моделирования параллельных асинхронных процессов, что позволяет отображать в модели различные аспекты, связанные с построением и функционированием исследуемых систем.

## 2. Выделение проблемы и постановка задачи

Параллельные процессы в моделях управляющих систем всегда являются частично-зависимыми и относятся к классу асинхронных. Они отображаются в алгоритмах, реализуемых на конкретных языках программирования, и не лишены разного рода ошибок. При формировании таких алгоритмов для систем управления, реализующих множество потоков параллельных управляющих сигналов на разветвлённой топологии системы управления, необходимо согласовать определённые сигналы параллельных потоков управления друг с другом. При моделировании данных систем существует ряд проблем [2], связанных с реализацией, верификацией и тестированием алгоритмических моделей. В частности они характеризуются наличием скрытых ошибок, которые возникают в исключительных ситуациях. Такие ситуации обусловлены определённым набором данных и временными характеристиками параллельных процессов, порядком их взаимодействия. Эти ситуации не воспроизводятся и их почти невозможно выявить на этапе тестирования. Потому наиболее реальным инструментом их выявления является верификация.

Выбирая средство моделирования и верификации сложных систем управления, необходимо обеспечить автоматизированную проверку алгоритма формирования управляющих сигналов в статике и в динамике (в режиме имитации). Кроме того, нужно подвергнуть анализу и данные, которые непосредственно относятся к условиям формирования конкретного управляющего сигнала.

Для решения данной проблемы предлагается использовать аппарат сетей Петри, получивший широкое применение для моделирования параллельных процессов, а также для анализа параллельных моделей [4-6].

## 3. Анализ средства решения задачи

На сегодняшний день существует множество интерпретаций и модификаций сетей Петри. Не все они, к сожалению, построены на классической теории, сформулированной К.-А. Петри [3], что не позволяет использовать единый аналитический аппарат для их анализа. В книге [1] рассмотрены интерпретации и модификации сетей Петри, построенные на классической теории. При решении задачи моделирования сложных разветвлённых систем управления теория сетей Петри представляет наглядный инструментарий, состоящий из 4-х базовых элементов: вершин мест (O), вершин переходов (I), направленных дуг и меток

(рис. 1). Граф Петри является двудольным несовместным графом, что не позволяет непосредственно соединять однотипные вершины друг с другом. Например, вершину места  $p_2$  на рис. 1 нельзя непосредственно соединить с вершиной места  $p_3$ , что соответствует невозможности соединения двух условий без выполнения определённого действия, связанного с каждым из них. Размещение меток в местах переходов позволяет «оживить» модель и проследить её функционирование в режиме имитации.

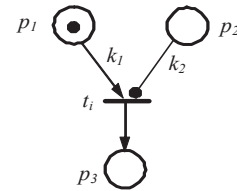


Рис. 1. Переход с положительной и запрещающей дугой

Дополнительным элементом, облегчающим построение и восприятие модели, является запрещающая (inhibit) дуга, которая изображается ребром с крупной точкой на конце. Она позволяет сработать переходу  $t_i$  (рис. 1) тогда, когда вершина места  $p_2$  не размечена. Применение таких дуг позволяет упростить модель (рис. 2,б-в).

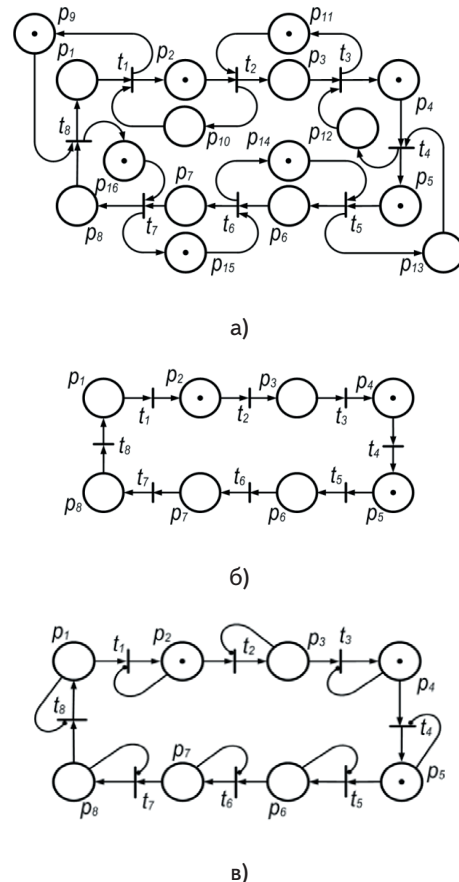


Рис. 2. Варианты модели движения поездов по линии Московского метрополитена

На рис. 2,а построена модель МПСУ движением поездов на линии метрополитена без контроля перемещения поездов, что не позволяет обеспечить без-

опасность движения. На рис. 2,б представлена модель МПСУ с контролем безопасности перемещения поездов на каждой из 8-и станций, а на рис. 3,в – такая же модель, построенная с использованием запрещающих дуг. Прибытие поезда на следующую станцию  $p_{e+1}$  (например,  $p_3$ ) соответствует одновременному появлению меток в местах  $p_{e-1}$  ( $p_{10}$ ) и  $p_{e+1}$  ( $p_3$ ). Задержка какого-либо поезда на одной из станций должна приостановить движение всех остальных поездов.

Наиболее адаптированными среди модификаций сетей Петри для моделирования и верификации систем управления являются управляющие сети Петри, в которых управляющие сигналы в параллельных ветвях отображаются метками по правилам безопасных сетей Петри – в каждой вершине допускается присутствие не более одной метки. В данной модификации сети вершины переходов и вершины мест, предназначенные для согласования в параллельных ветвях управляющего алгоритма, снабжены специальными функциями управления, которые позволяют обеспечить однозначность описания управляющих алгоритмов в узлах модели [1].

Для проверки параллельной модели на наличие критических свойств используются статические и динамические свойства [1] графов Петри. Статические свойства позволяют на этапе построения модели проверять логические цепочки типа «условие-действие-условие» и логику согласования взаимодействий ветвей параллельных частично-зависимых процессов на графе модели. Динамические свойства направлены на проверку живости (безизбыточности), бесконфликтности (непротиворечивости) и безопасности осуществления последовательностей действий алгоритма в процессе компьютерного эксперимента с моделью [1, 7].

#### 4. Пример моделирования управляющей системы

На рис. 3 представлена сеть Петри, для моделирования задачи нахождения значений функций  $\sin\beta$  и  $\cos\beta$  за минимальное время. Входной вершиной модели является вершина перехода  $t_0$ , из которой поступают сигналы для активизации двух параллельных алгоритмов на процессорах МЛА и МПА. В зависимости от объёма вычислений в основном алгоритме  $a$  или  $b$  в вершинах мест  $p_3$  и  $p_4$  выбирается путь к макропереходу  $\tau_b$  – сокращённый или через структуру дополнительного алгоритма  $a^1$  ( $b^1$ ). Алгоритм, который отработает быстрее, передаст результаты в вершину макроперехода  $\tau_b$ , в которой будет ожидать результат работы второго алгоритма, после чего общий результат АВ будет выдан в окно интерфейса.

При построении модели и проведении компьютерного эксперимента сеть Петри позволяет отобразить структуру алгоритма, проследить динамику процесса и исключить часть конфликтных ситуаций, связанных с возникновением ошибок. Данный аппарат позволяет отслеживать и скрытые ошибки, что расширяет возможности проверки надёжности программ, используемых в системах управления. Если при реализации системы управления возможно использовать несколько алгоритмов, различающихся по времени исполнения, алгоритмической надёжности и другим

параметрам, построение моделей данного перечня алгоритмов и имитация на графе Петри позволяет получить значения параметров, позволяющих выбрать оптимальный для заданных условий алгоритм реализации системы.

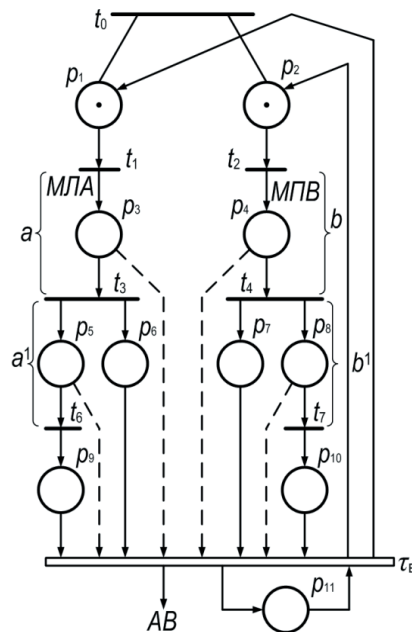


Рис. 3. Управляющая сеть для решения задачи определения  $\sin\beta$  и  $\cos\beta$  с минимальными временными затратами

#### 5. Выводы

Управляющие сети могут быть использованы для алгоритмического описания широкого круга задач и моделирования параллельных частично-зависимых алгоритмов управления. Точное описание и классификация основных свойств Управляющих сетей позволяют, во-первых, предложить методику анализа и синтеза моделей и, во-вторых, сформулировать алгоритмы поиска и устранения критических свойств в сетях.

Сравнение Управляющих сетей с другими алгоритмическими методами [1] показывает их значительное преимущество при описании сложных взаимозависимых параллельных процессов не только перед граф-схемами алгоритмов и графами автоматов, но и другими известными интерпретациями сетей. Они позволяют достаточно эффективно моделировать самонастраивающиеся алгоритмы, уточняющие свою структуру в зависимости от текущего состояния системы.

Аппарат управляющих сетей Петри позволяет моделировать параллельные процессы, которые дополнительно могут реагировать на управляющие сигналы внешних систем и отображать не только реализацию «причинностных» связей между одновременно протекающими параллельными процессами, а и в процессе имитации проверять возможности функционирования исследуемой системы на разные «нагрузочные» режимы взаимодействия с внешними объектами.

Література

1. Кузьмук В.В., Супруненко О.О. Модифицированные сети Петри и устройства моделирования параллельных процессов: Монография. – К.: Маклаут, 2010. – 260 с.
2. Карпов Ю.Г. Model Checking. Верификация параллельных и распределённых программных систем. – СПб.: БХВ-Петербург, 2010. – 560 с.
3. Petri C.A. Kommunikatoin mit Automaten. – Bonn: Institut fr Instrumentelle Mathematik, 1962. – 89 S.
4. W. Reisig. Petrinetze. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden GmBH, 2010, - 247S.
5. Бройнль Томас. Паралельне програмування: Початковий курс: / Пер. з нім. В.А. Святного. – К.: Вища школа, 1997. – 358 с.
6. Касьянов В.Н., Евстигнеев В.А. Графы в программировании: обработка, визуализация, применение. – СПб: БВХ - Петербург, 2003. – 1104 с.
7. Супруненко О.О., Онищенко Б.О. Стандартизація проектів впровадження інформаційних комп'ютерних систем та технологій в медицину. // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2010. – № 5/2 (47). – С. 42-45.

*Запропоновано математичний опис системи штучного мікроклімату. Враховано нелінійність масообмінних процесів підготовки повітря. Може використовуватися спеціалістами із автоматизації для аналізу та настройки параметрів системи керування промислових кондиціонерів*

*Ключові слова: модель, динамічна система, штучний мікроклімат*

*Предложено математическое описание системы искусственного микроклимата. Учтена нелинейность массообменных процессов подготовки воздуха. Может использоваться специалистами по автоматизации для анализа и настройки систем управления промышленных кондиционеров*

*Ключевые слова: модель, динамическая система, искусственный микроклимат*

*The mathematical description of system of an artificial microclimate is offered. A nonlinearity mass-transfer process of preparation of air is considered. It can be used by experts from automation for the analysis and tuning of control systems of industrial conditioners*

*Key words: model, dynamic system, artificial microclimate*

УДК 681.5.015.8:519

# СТРУКТУРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ДЛЯ ШТУЧНОГО МІКРОКЛІМАТУ

**І. М. Голінко**

Кандидат технічних наук, доцент  
Кафедра автоматизації теплоенергетичних процесів  
Національний технічний університет України “Київський  
політехнічний інститут”  
пр. Перемоги 38, м. Київ, Україна, 03056  
Контактний тел.: (044) 332-21-89  
E-mail: igor.golinko@conislab.net

**А. П. Ладанюк**

Доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри  
Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих  
технологій  
Національний університет харчових технологій  
вул. Володимирська, 68, м. Київ, Україна, 01033  
Контактний тел.: (044) 289-52-83  
E-mail: Ladanyuk@nufk.kiev.ua

## Вступ

Сьогодні практично неможливо уявити сучасні технології без систем штучного мікроклімату (СШМ). Спектр СШМ дуже різноманітний - від побутових кондиціонерів до систем мікроклімату (МК) промислових приміщень харчової, фармацевтичної, радіоелектрон-

ної промисловостей із високими вимогами не тільки до стабільності температури та вологості, а низки інших параметрів повітря. Однією із важливих характеристик СШМ є питоме енергоспоживання. З цих причин розробники інтенсифікують процеси тепло- та масопередачі обладнання та вдосконалюють методи керування кондиціонерами.