

## Математическое моделирование распределенных контрольных измерений для технологического процесса машиностроительного производства при помощи сетей Петри

## Mathematical modeling of distributed control measurements for engineering process of mechanical engineering using Petri nets

*Рассмотрены возможные варианты математических моделей для описания распределенных контрольных измерений, обоснован выбор сетей Петри. Предложен способ математического моделирования измерительной информационной системы для распределенных контрольных измерений.*

*Several variants of mathematical models for description of distributed control measurements are given, choice of Petri net is justified. Way of mathematical modeling of information measuring system for distributed control measurements is offered.*

**Ключевые слова:** информационная измерительная система, распределенные контрольные измерения, математическое моделирование, сети Петри.

**Keywords:** information measuring system, distributed control measurements, mathematical modeling, Petri nets.

Как и любое другое реальное явление, технологический процесс (в частности, машиностроительного производства) представляет собой сложное сочетание большого количества материальных объектов, средств их преобразования, влияющих факторов и т.п. Имея цель познавать, наблюдать и контролировать какое-либо явление, необходимо прибегнуть к определенному уровню абстракции, выделяя наиболее важные и имеющие влияние факторы и отбрасывая несущественные. Высшим уровнем абстракции является построение математической модели процесса, в которой учтены только те факторы, которые непосредственно влияют на конечный результат. Для обеспечения требуемой точности и надежности технологического процесса для всего многообразия изготавливаемых видов деталей зачастую требуется построение весьма сложных измерительных информационных систем (ИИС), осуществляющих распределенные контрольные измерения, т.е. послеоперационный контроль, распределенный по ходу выполнения технологических операций [1, 2]. Исходя из специфики машиностроительного производства, модель соответствующей ИИС должна обладать следующими характеристиками: асинхронность процесса; одновременный доступ ко всей

информации для нескольких рабочих мест; возможность оповещения о браке в режиме реального времени; список рекомендаций по исправлению брака (исходя из статистики); универсальность применения для любой линейки производства [3, 4]. Схема возможной реализации ИИС для распределенных контрольных измерений выглядит следующим образом: технологический процесс направлен последовательно от одного рабочего места к другому; измерения на рабочих местах проводятся цифровыми измерительными устройствами (цифровые штангенциркули, цифровые индикаторы); вся измерительная информация по каналам передачи передается на сервер, представляющий собой компьютер, выделенный из группы других персональных компьютеров (на рабочих местах), позволяющий выполнять какие-либо обслуживающие задачи без участия человека [5–7]. Для математического описания технологического процесса наиболее разумно рассмотреть следующие виды математических моделей: теория конечных автоматов, цепи Маркова, сети Петри и их расширения.

Конечные автоматы по сути являются чрезвычайно простыми; их реализация, проектирование, визуализация, а также отладка и работа легко осу-

ществимы. Ко всему прочему, теория конечных автоматов хорошо развита. Однако их использование в рамках поставленных задач нецелесообразно по причине присущих им недостатков, главным из которых является высокая сложность проектирования при создании достаточно крупных систем с конечным числом состояний. Именно это привело к отказу от данного вида моделирования в рамках рассматриваемых задач. Помимо этого по своим вычислительным возможностям конечные автоматы ограничены определенными задачами; их нельзя применять для решения задач подсчета; они остаются неизменными в том виде, в каком были спроектированы [8]. Эти недостатки являются причиной отказа от использования конечных автоматов в математическом моделировании ИИС для распределенных контрольных измерений.

Цепи Маркова служат введением в теорию случайных процессов, т.е. теорию простых последовательностей семейств случайных величин, обычно зависящих от параметра, который в большинстве приложений играет роль времени. Они предназначены для полного описания как долговременного, так и локального поведения процесса. Цепи Маркова, однако, лучше подходят для описания диффузионных стационарных процессов, процессов с независимыми приращениями. В качестве математической модели ИИС для распределенных контрольных измерений использование цепей Маркова нецелесообразно [9].

Сети Петри — инструмент исследования систем. В настоящее время их применяют в основном в моделировании на событийном уровне. Определяют действия, происходящие в системе, состояние, предшествующее этим действиям, и будущие состояния после выполнения действий. Выполнение событийной модели в сетях Петри описывает поведение системы. Анализ результатов может сказать о том, в каких состояниях пребывала или не пребывала система, какие состояния в принципе не достижимы [10]. Сети Петри обладают наилучшими возможностями описания параллельных систем, что является причиной выбора их в качестве основы для построения математической модели ИИС для распределенных контрольных измерений. Их использование для моделирования технологического процесса как динамической системы имеет ряд преимуществ по сравнению с цепями Маркова: они удовлетворяют всем характеристикам разрабатываемой ИИС; использование разветвленного алгоритма переходов и условий их осуществления; удобство введения новых алгоритмов при изменении технологического процесса, связи с сервером и вывода сообщений с дальнейшими действиями для операторов при обнаружении брака. Сети Петри, при всех своих достоинствах, имеют очень серьезный недостаток — из-за мгновенности осуществления переходов

отсутствует возможность учета временной составляющей технологического процесса, что сильно ограничивает применение данной математической модели. В этой связи имеет смысл использовать расширение сетей Петри под названием «раскрашенные сети Петри». Оно заключается в добавлении информации к элементам сети, основываясь на которой, при определенных условиях, можно преобразовывать цветные сети в простые. Для этого метки вместо простого обозначения содержимого места преобразуются в объект, который может содержать в себе один или более параметров, каждый из которых может принимать дискретный набор значений. В соответствии с этим метки различаются по типам параметров (переменных). Чтобы отличать метки различных типов их можно окрашивать в разные цвета (поэтому сети называют цветными). Аналогичным образом поступают с местами, дугами и переходами, добавляя в них информацию о том, метки какого цвета могут в них храниться и возбуждать переходы. Также к начальной маркировке сети добавляют информацию о значении переменных, содержащихся в метках [11]. Благодаря перечисленным добавлениям появляется возможность математического моделирования технологического процесса с распределенными контрольными измерениями и автоматическим управлением (информационной обратной связью), где в качестве переменных-параметров, содержащихся в каждой метке, выступают параметры обрабатываемых поверхностей. «Цвет» меток зависит от того или иного сочетания этих параметров. Таким образом, появляется возможность определения конкретного места, в котором произошло недопустимое отклонение одного из параметров детали.

Наглядные математические модели с указанными добавлениями строятся в свободно распространяемой программе CPN Tools, обладающей богатым функционалом [12]. Можно составить модель технологического процесса какой-либо линейки производства (рис. 1). В данном случае позициями являются рабочие места, на которых происходит определенная рабочая операция (обработка, шлифование, фрезерование и т.д.), средства измерения с цифровым интерфейсом, считывающие значение обработанного параметра, а также сервер, на который приходит измерительная информация в виде действительного значения параметра, полученного средством измерения. Также для удобства вводится расширение сетей Петри в виде «цвета» меток. Метка обладает конечным числом параметров, соответствующих обрабатываемым параметрам детали, ее «цвет» задается их соответствием определенным условиям: красный — изначальный цвет метки (в позиции  $P_1$ ), параметры  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  имеют произвольное значение; зеленый — цвет метки, у которой пара-

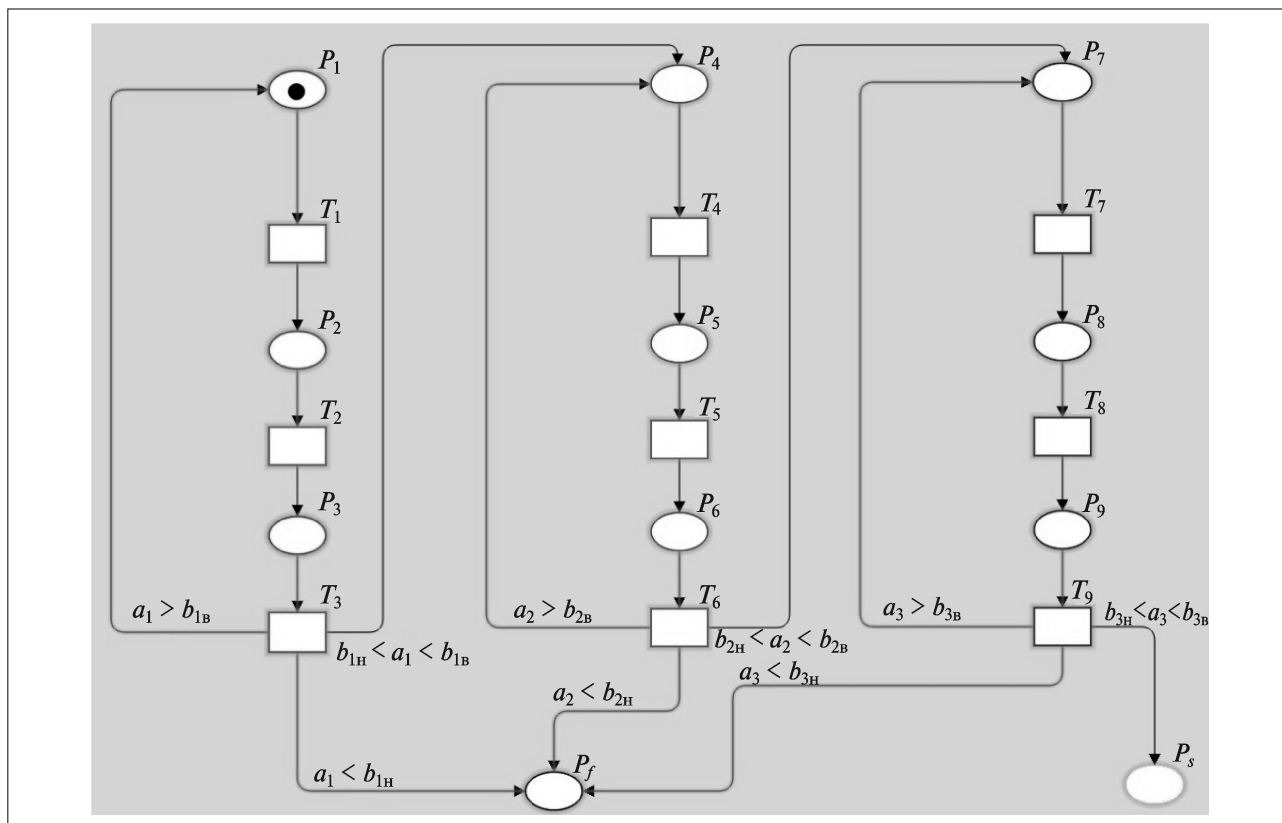


Рис. 1. Математическая модель техпроцесса в программе CPN Tools

метр  $a_1$  находится в пределах  $[b_{1H}, b_{1B}]$ , т.е. в границах допуска; значение остальных параметров произвольное; синий — цвет метки, у которой параметр  $a_1$  находится в пределах  $[b_{1H}, b_{1B}]$ , параметр  $a_2$  — в пределах  $[b_{2H}, b_{2B}]$ , т.е. оба параметра находятся в границах своих допусков; значение параметра  $a_3$  произвольное; желтый — цвет метки, у которой параметр  $a_1$  находится в пределах  $[b_{1H}, b_{1B}]$ , параметр  $a_2$  — в пределах  $[b_{2H}, b_{2B}]$ , параметр  $a_3$  — в пределах  $[b_{3H}, b_{3B}]$ , т.е. все параметры в пределах своих допусков. Таким образом, желтая метка символизирует годную деталь в конце техпроцесса. При этом,  $b_{1H}, b_{1B}$  — нижний и верхний пределы допуска на параметр  $a_1$ ;  $b_{2H}, b_{2B}$  — нижний и верхний пределы допуска на параметр  $a_2$ ;  $b_{3H}, b_{3B}$  — нижний и верхний пределы допуска на параметр  $a_3$ . Каждый переход  $T_n$  соответствует какой-либо операции (обработки, измерения, сравнения), причем переходы  $T_1, T_2, T_4, T_5, T_7, T_8$  являются безусловно открытыми, а переходы  $T_3, T_6$  и  $T_9$  — сравнение входных параметров  $a_1, a_2, a_3$  на соответствие допускам. Если значение входного параметра больше верхнего предела допуска, то метка отправляется обратно в позицию  $P_1, P_4, P_7$  соответственно (исправимый брак изготовления наружного размера) для повторной обработки; если значение входного параметра меньше нижнего предела допуска, то метка отправляется в позицию  $P_f$  (неисправимый брак

изготовления наружного размера). В случае соответствия параметра своему полю допуска метка перекрашивается и направляется на позицию  $P_4$  или  $P_7$  для обработки следующего параметра  $a_2$  или  $a_3$  соответственно. Если все параметры уже соответствуют своим полям допусков — в позицию  $P_s$ . Таким образом, в конце техпроцесса возможны следующие результаты: полученная деталь является годной — метка желтого цвета находится в позиции  $P_s$ ; деталь бракована по одному из параметров — в позиции  $P_f$  находится метка красного, зеленого или синего цвета, при этом цвет метки однозначно позволяет понять, на каком станке и по какому параметру получился брак.

Техпроцесс, смоделированный цветной сетью Петри, реализован следующим образом: изначальная маркировка сети — 1 метка в позиции  $P_1$  (первый станок), остальные позиции не маркированы. Метка в  $P_1$  соответствует необработанной заготовке, установленной в базирующем устройстве станка  $P_1$ , ее параметры  $a_1, a_2, a_3$  произвольны, но их значения больше верхних границ своих допусков  $b_{1B}, b_{2B}, b_{3B}$ , что соответствует красному цвету. Переход  $T_1$  означает обработку параметра  $a_1$  на первом станке, таким образом параметр  $a_1$  меняет свое значение на меньшее. Переход считается открытым при наличии хотя бы одной метки на входе, т.е. метка перемеща-

ется из позиции  $P_1$  в  $P_2$ , изменяя один из своих параметров, но не меняя цвет. Позиция  $P_2$  соответствует базированию детали для измерения параметра  $a_1$  цифровым измерительным устройством с компьютеризированным интерфейсом. Самому процессу измерения соответствует переход  $T_2$ , который также открыт при наличии хотя бы одной входной метки. Во время этого перехода фиксируется значение параметра  $a_1$  и присваивается соответствующий цвет метке в зависимости от этого значения. После этого метка попадает в позицию  $P_3$ , соответствующую серверу с базой данных, имеющей априорную информацию о границах допусков на каждый параметр. Из этой позиции она может попасть в одну из трех других позиций, причем то, куда попадет метка, полностью зависит от ее цвета (т.е. значения параметра  $a_1$ ): в случае исправимого брака (метка не перекрашивалась на предыдущем переходе и осталась красной) — обратно в позицию  $P_1$  для повторной обработки (повторяется технологическая операция обработки параметра  $a_1$ ); неисправимый брак (также неперекрашена на предыдущем переходе) — в позицию  $P_5$ , являющуюся конечной. В случае соответствия параметра  $a_1$  своему полю допуска метка, окрашенная на предыдущем переходе в зеленый, поступает в позицию  $P_4$ , соответствующую базированию детали на втором станке (или том же) для обработки параметра  $a_2$ . Далее процесс повторяется для параметров  $a_2$  и  $a_3$  с учетом цветов метки на соответствующих переходах. В конечном счете метка оказывается либо в позиции  $P_5$  и имеет желтый цвет, либо в позиции  $P_6$ , имея красный, зеленый или синий цвет в зависимости от того, в ходе обработки какого из параметров возник неисправимый брак. Таким образом локализуется место возникновения брака, значительно упрощая процесс технической диагностики, снижаются затраты, связанные с обработкой неисправимого брака. Благодаря гибкости аппарата цветных сетей Петри возможна реализация более сложных правил, например, ввод дополнительных цветовых обозначений для меток, значения одного или нескольких параметров которых лежат близко к границам соответствующих допусков. Таким образом, появляется возможность определения по количеству меток разных цветов в позиции  $P_5$  необходимости проведения подналадки того или иного оборудования. Этого можно добиться, введя дополнительные дуги с соответствующими правилами. В действительности цвет метки является условностью — его можно закодировать в формате RGB, получив, таким образом, более 16 миллионов комбинаций параметров. Этого более чем достаточно для моделирования сколь угодно сложных технологических процессов, и при этом будет безусловно определено место, в котором возникает брак. Важным добавлением является возможность построения иерархических временных раскрашенных сетей Пет-

ри, в которых появляется возможность задать время срабатывания перехода — в случае технологического процесса это время обработки детали, проведения измерительных процедур, отклика сервера и т.д., а также при наличии возможности «свернуть» совокупность трех позиций, соответствующих обработке одного параметра, в одну, не теряя при этом точности моделирования. Это значительно упрощает доработку уже готовой модели при необходимости внесения каких-либо изменений.

Таким образом, наиболее удачной математической моделью для описания технологического процесса с распределенными контрольными измерениями и информационной обратной связью является иерархическая временная раскрашенная сеть Петри. Она полностью удовлетворяет всем поставленным условиям, удобна, функциональна и достаточно развита для моделирования сколь угодно сложных систем благодаря иерархичной структуре. Добавление «цветности» математической модели техпроцесса открывает большой простор для анализа причин брака и локализации проблемных участков, что позволяет оптимизировать техпроцесс и повысить эффективность производства в целом.

#### Библиографический список

1. Акбулатов П.А., Шулепов А.В. О стандартных интерфейсах передачи данных в ИИС для распределенных контрольных измерений // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2013. № 11. С. 18—25.
2. Телешевский В.И., Емельянов П.Н., Пашкин Е.А. К проблеме построения компьютеризированной системы метрологического обеспечения производства на базе CALS-технологий // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2005. № 5. С. 42—47.
3. Григорьев С.Н., Телешевский В.И., Глубоков А.В., Педь С.Е., Глубокова С.В. Проблемы метрологического обеспечения подготовки производства в машиностроении // Измерительная техника. 2012. № 5. С. 27—29.
4. Телешевский В.И., Емельянов П.Н., Шишков Д.Н. Принципы построения компьютеризированной системы метрологического обеспечения производства на базе ИПИ-технологий // Приборы. 2011. № 5. С. 57—62.
5. Телешевский В.И., Шулепов А.В., Роздина Е.М. Методы повышения точности универсальных и инструментальных компьютерных измерительных микроскопов // Технология машиностроения. 2012. № 1. С. 41—44.
6. Теория автоматов / Э.А. Якубайтис, В.О. Васюкевич, А.Ю. Гобземис, Н.Е. Зазнова, А.А. Курмит, А.А. Лоренц, А.Ф. Петренко, В.П. Чапенко // Теория вероятностей. Математическая статистика. Теоретическая кибернетика. — М.: ВИНТИ, 1976. — Т. 13. — С. 109—188.

7. Кельберт М.Я., Сухов Ю.М. Вероятность и статистика в примерах и задачах. Т. II // Марковские цепи как отправная точка теории случайных процессов и их приложения. — М.: МЦНМО, 2009. — 295 с.

8. Лескин А.А., Мальцев П.А., Спиридонов А.М. Сети Петри в моделировании и управлении. — Л.: Наука, 1989. — 133 с.

9. Макаров И.М., Назаретов В.М., Кульба А.В., Швецов А.Р. Сети Петри с разноцветными маркерами // Техническая кибернетика. 1987. № 6. С. 101—107.

10. CPN Tools [Электронный ресурс] / Michael Westergaard, Eric Verbeek. — Режим доступа: <http://www.cpntools.org/download>

---

*Акбулатов Павел Александрович* — магистр техники и технологии, аспирант, преподаватель кафедры измерительных информационных систем и технологий МГТУ «СТАНКИН».

Тел.: 8(926) 539-00-82. E-mail: [p.akbulatov@gmail.com](mailto:p.akbulatov@gmail.com)

*Akbulatov Pavel Aleksandrovich* — Master of science, postgraduate student, Lecturer of the sub-department «Information Measuring Systems and Technologies» of MSTU «STANKIN».

Tel.: +7(926) 539-00-82. E-mail: [p.akbulatov@gmail.com](mailto:p.akbulatov@gmail.com)

---