

## ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ СЕТЕЙ ПЕТРИ ДЛЯ ИМИТАЦИИ ПОВЕДЕНИЯ СИСТЕМ

В. Л. Коных (Новосибирск)

Отображение взаимодействия элементов системы во времени и пространстве в виде движения маркеров через позиции и переходы сети Петри открывает возможность ставить и решать новые задачи проектирования и модернизации систем. Для временных, стохастических, ингибиторных, приоритетных и цветных сетей Петри устанавливаются разные правила открывания переходов и задержки маркеров в позициях [1]. При вводе в компьютер сеть Петри представляют в виде матриц инцидентности, ингибиторных дуг и кратности дуг, векторов временных задержек, начальной маркировки и приоритетов переходов. Для имитации поведения системы в виде сети Петри разработаны такие программные продукты, как ALPHA/Sim® [2]. Анализ формальных характеристик сети позволяет выявить особенности поведения системы (таблица).

### Использование формальных характеристик сети Петри

Характеристика	Свойство	Пример использования
Достижимость	Маркировка $M$ достижима из маркировки $M_0$ , если существует последовательность переходов, переводящая сеть из $M_0$ в $M$	$M_0$ – исходное состояние системы; $M$ – состояние максимальной производительности
Ограниченность	Заданы максимальные числа маркеров, которые могут появляться в ее позициях	Ограничение на объем бункера или пропускную способность элемента транспортной сети
Безопасность	В позициях сети не может быть больше одного маркера	Достижение максимума заполнения бункера или пропускной способности элемента транспортной сети
Живость	Нет переходов, не участвующих в той или иной последовательности переходов для любой начальной маркировки сети	Возможно возобновление работы системы после устранения отказа в любом ее элементе

В докладе представлен опыт решения некоторых задач имитационного моделирования систем с помощью сетей Петри. Многие из них были поставлены для систем, функционирующих в технологической среде с непредсказуемыми изменениями [3]. Первая из восьми версий имитатора сетей Петри разработана и применена нами в 1988 г. для

предпроектного анализа роботоориентированных технологий добычи полезных ископаемых на большой глубине [4]. Главным требованием было обеспечение работы с имитатором непрограммирующего пользователя, умеющего отображать поведение системы в виде сети Петри. Имитационное моделирование проводилось в последовательности:

- описание технологического процесса;
- расчет времени выполнения технологических операций;
- формирование логических условий процесса;
- составление сети Петри;
- заполнение форм имитатора для матриц инцидентов и ингибиторных дуг, векторов начальной маркировки, временных задержек и приоритетов переходов;
- задание времени и шага имитации;
- пуск имитационного моделирования процесса для исходных данных;
- получение матрицы текущей маркировки и оценка времени движения маркеров;
- проведение имитационных экспериментов путем изменения структуры и параметров модели;
- построение зависимостей технологических показателей от структуры и параметров системы.

### Сравнение технологических структур

Для синтеза вариантов технологической структуры элементы системы соединяют технологической (согласование технологических процессов единиц оборудования), кинематической (объединение единиц оборудования), конструктивной (выполнение одним устройством функций разных единиц оборудования) и управляющей (блокировка команд управления) связями. Разработано 30 вариантов роботизированных технологий добычи полезных ископаемых, каждый из которых представлен временной сетью Петри. Имитационное моделирование применялось для сравнения вариантов по минимуму удельной трудоемкости и продолжительности рабочего цикла при ограничениях на время выполнения  $i$ -й единицей оборудования  $j$ -й операции и стоимость оборудования  $\sum_{i=1}^m C_i$ .

### Повышение степени использования оборудования

Имитационные эксперименты проводились с целью сокращения простоев автономных единиц оборудования в технологическом процессе. Множество позиций сети разбивают на  $S$  подмножеств по числу единиц оборудования. Для  $i$ -й единицы оборудования оценивают коэффициент ее использования во времени:

$$K_i = \frac{\sum_{j=1}^s t_j}{T_i},$$

где  $t_{ij}$  – время выполнения  $j$ -й операции  $i$ -й единицей оборудования.

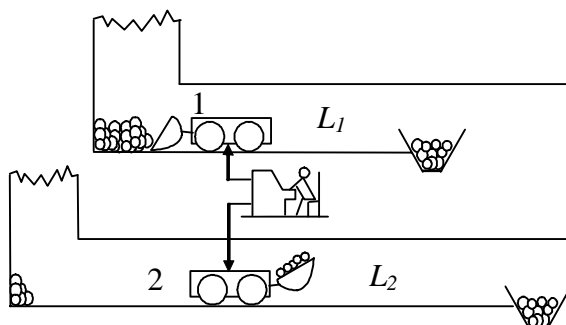
При управлении самоходными машинами без машинистов оператор из безопасного места чередует управление от бортовой системы управления машиной с дистанционным управлением сложными для автоматизации операциями. Если оператор занят управлением одной машиной, то другая машина по окончании автоматического управ-

ления ожидает переключения на дистанционное управление. Задача решалась для управления двумя ковшовыми погрузочно-транспортными машинами, вывозящими руду из опасных мест на большой глубине (рис. 1).

Коэффициент использования машин зависит от соотношения времени работы в режимах дистанционного и автоматического управления:

$$K_i = \frac{T_1 + T_2}{T_1 + T_2 + T_{01} + T_{02}},$$

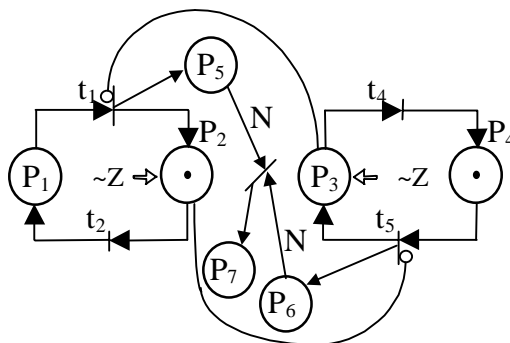
где  $T_1, T_2$  – время работы машин;  $T_{01}, T_{02}$  – время простоя в ожидании оператора.



**Рис. 1. Схема комбинированного управления двумя погрузочно-транспортными машинами от одного оператора:**

- 1 – погрузка в режиме дистанционного управления;**
- 2 – движение в режиме автоматического управления**

Время работы в режиме дистанционного управления зависит от времени погрузки ковша  $Z_n$ , а в режиме автоматического управления – от разности расстояний до места разгрузки  $\Delta L = 2(L_1 - L_2)$ . В сети Петри (рис. 2) позиции  $P_1$  и  $P_4$  соответствуют режимам движения на расстояния  $2L_1$  и  $2L_2$  с учетом разгрузки.



**Рис. 2. Модель управления двумя погрузочно-транспортными машинами**

Если оператор занят, переходы  $t_1$  или  $t_5$  закрываются ингибиторными дугами. Задержки маркеров в позициях погрузки  $P_2, P_3$  задаются по нормальному закону распределения со средним временем погрузки  $\bar{\tau}_n = 10 \dots 60$  с. Длина доставки  $L_1$  задана равной 25 м, а  $L_2$  изменялась от 25 до 100 м. Число рейсов каждой машины подсчитывается в позициях  $P_5, P_6$ . Моделирование заканчивается через  $N$  рейсов, после чего подсчитывается сумма времени задержки маркеров в переходах  $t_1, t_5$ . В результате установлена зависимость  $K_i$  от  $Z_n$  и  $\Delta L$  (рис. 3).

Распределение времени задержек маркеров в позициях таким образом, чтобы они одновременно проходили через переходы  $t_1, t_5$ , позволит найти соотношение числа операторов и управляемых ими машин.

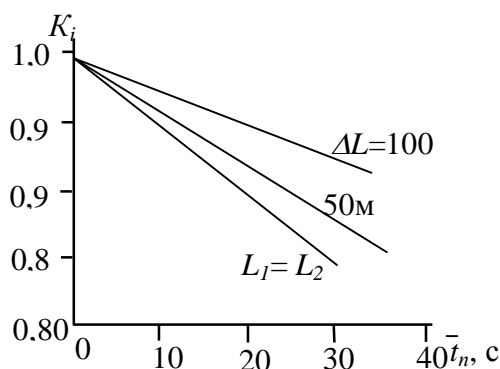


Рис. 3. Изменение коэффициента использования погрузочно- транспортнх машин

### Согласование работы звеньев технологической цепи

Расхождение в производительности участков технологического маршрута приводит к накоплению объемов незавершенного производства. Определение мест задержки маркеров перед позициями позволит изменять производительность участков так, чтобы между ними отсутствовали промежуточные склады.

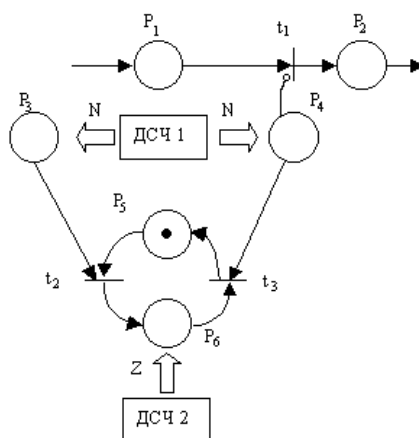
В кольцевой линии роботизированной сборки четыре робота переносят паллеты с элементами электрических выключателей с кольцевого конвейера на позицию сборки и после сборки возвращают паллеты на конвейер. Надо согласовать скорость конвейера и время сборки на каждом участке. Имитационная модель разработана в виде сети Петри с 26 позициями и 18 переходами. В результате имитационных экспериментов выбраны соотношения времени сборки и скорости конвейера.

При открытой добыче полезных ископаемых распределенные на разрезе экскаваторы разной производительности загружают самосвалы разных марок, вывозящие горную массу на обогатительную фабрику, в отвал или на склад. Время погрузки, рейса и разгрузки – случайное. Необходимо найти соотношение экскаваторов и самосвалов, при котором не будут образовываться очереди в местах погрузки и разгрузки. Сеть Петри, введенная в имитатор, содержит 46 позиций и 32 перехода. По окончании имитации на анимированную модель системы «экскаваторы–самосвалы» выводятся коэффициенты использования экскаваторов и самосвалов [ 5].

### Появление и устранение отказов оборудования

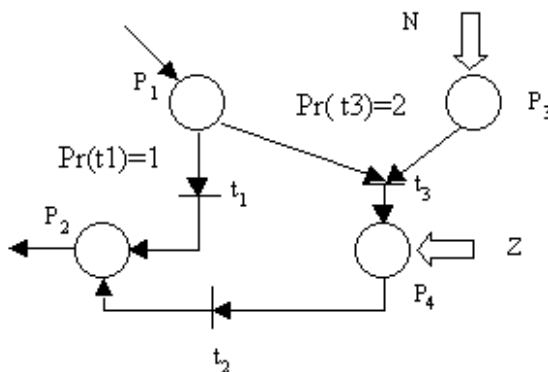
Отказ элемента системы является случайным событием, а его устранение продолжается в течение случайного времени. В переход между позициями начала  $P_1$  и окончания  $P_2$  операции вводят ингибиторную дугу, закрывающую движение маркеров на время появления и устранения отказа (рис. 4).

В нормальном режиме маркеры движутся от позиции  $P_1$  к позиции  $P_2$  через переход  $t_1$ . Среднее число отказов генерируется датчиком случайных чисел ДСЧ 1. При этом в позициях  $P_3, P_4$  появляется  $N$  маркеров и переход  $t_1$  закрывается ингибиторной дугой. Одновременно маркер из позиции  $P_5$  переходит в позицию  $P_6$  устранения отказов и задерживается в ней на случайное время  $Z$  устранения отказа, заданное датчиком случайных чисел ДСЧ 2. После устранения отказа маркер переходит в позицию  $P_5$  и переход  $t_2$  открывается для устранения следующего отказа. Устранение  $N$  отказов приводит к открыванию перехода  $t_2$  и продолжению работы.



**Рис. 4 . Имитация появления и устранения отказов путем ввода ингибиторной дуги**

Имитация отказов возможна также путем ввода приоритетов переходов (рис. 5).



**Рис. 5 . Имитация появления и устранения отказов путем ввода приоритетов переходов**

В нормальном режиме маркеры движутся от позиции  $P_1$  к позиции  $P_2$  через переход  $t_1$ . Отказы элементов имитируются случайным появлением  $N$  маркеров в позиции  $P_3$ . Поскольку приоритет перехода  $t_3$  выше приоритета  $t_1$ , то маркеры из позиции  $P_1$  начинают двигаться через позицию  $P_4$ . Они задерживаются в ней на случайное время  $Z$  устранения отказа, а затем переходят в позицию  $P_2$  нормальной работы.

При проведении имитационных экспериментов задают появление отказа и время его устранения, после чего определяют среднее время прохождения маркеров для ряда экспериментов со средними значениями времени безотказной работы и времени устранения отказа. Затем сравнивают время прохождения маркеров до и после отказов.

#### **Обеспечение отказоустойчивости технологической цепи**

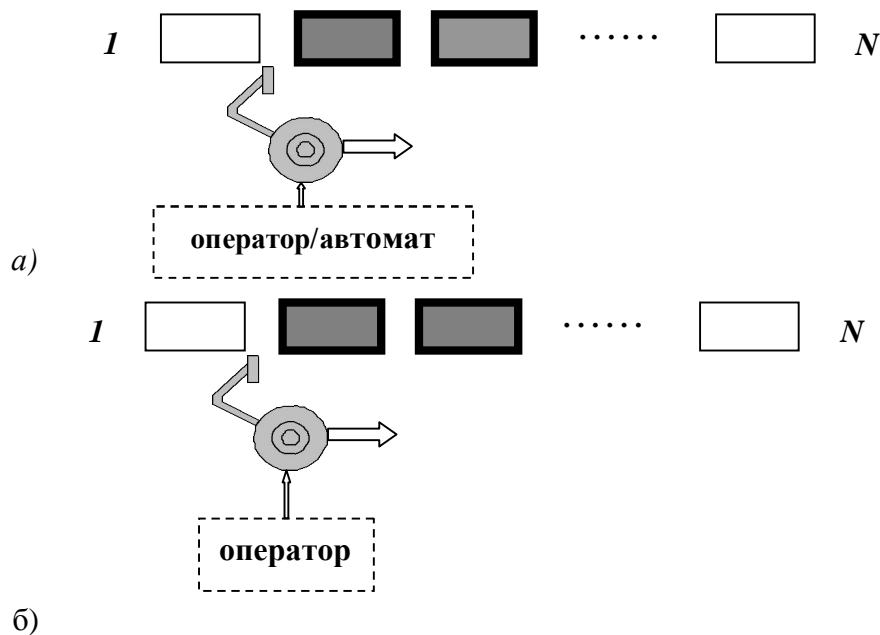
Задача состоит в выборе стратегии продолжении работы на время устранения случайного отказа. В имитационных экспериментах задают случайные место появления отказа и время его устранения, а затем отыскивают время прохождения маркеров для редундантного (ввод резервного оборудования) и кооперативного (обмен программами управления) способов продолжения работы. Сравнение времени прохождения маркеров через позиции сети при нормальной работе и имитация отказов с изменяемыми частотой и временем устранения позволяют узнать потери производительности системы при появлении отказов.

Роботы, размещенные вдоль сборочной линии, ведут последовательную сборку изделия. При случайном отказе одного из роботов оставшиеся роботы должны перераспределить между собой программу его работы так, чтобы сборка продолжалась. Роботизированная сборочная линия представляет собой мультиагентную систему, модель которой разработана в виде сети Петри с 47 позициями и 46 переходами. В имитационных экспериментах вводились случайные места отказов и интервалы между отказами роботов, после чего отыскивались потери производительности при перераспределении программ сборочных операций в прямом и обратном направлениях [6].

### Выбор способа человеко-машинного управления

Человек-оператор может управлять системой в режиме дистанционного управления, чередовать дистанционное и автоматическое управление, передавать общие указания бортовой системе управления или контролировать процесс автоматического управления. Выбор способа управления зависит от частоты появления нештатных ситуаций и продолжительности дистанционного управления.

Вдоль линии  $N$  одинаковых единиц оборудования движется робот, поочередно обслуживающий каждую единицу оборудования (рис. 6).



**Рис. 6. Виды обслуживания единиц оборудования с отказами:  
а – интерактивное управление; б – дистанционное управление**

Управление роботом осуществляется от автомата. Отказ любой единицы оборудования требует перехода к более медленному дистанционному управлению. При частых отказах роботом вместо автомата управляет оператор. Модель системы разработана в виде сети Петри (рис. 7).

В имитационных экспериментах отказы единиц оборудования имитировались появлением случайного числа  $n \{0;N\}$  маркеров в позиции  $P_3$ , случайное время дистанционного управления – задержкой  $Z$  маркера в позиции  $P_5$ . При отсутствии отказа система работает в автоматическом режиме ( $P_1$ ), обслуживает единицу оборудования ( $P_2$ ), переходит к следующей единице ( $P_7$ ) и возвращается к началу ее обслуживания ( $P_1$ ).

При появлении отказа ( $P_3$ ) ингибиторная дуга закрывает переход  $t_1$  и начинается дистанционное управление ( $P_4$ ) отказавшей единицей ( $P_5$ ) в течение времени  $Z$ . Затем происходит возврат к автоматическому управлению следующей единицей ( $P_6$ ).

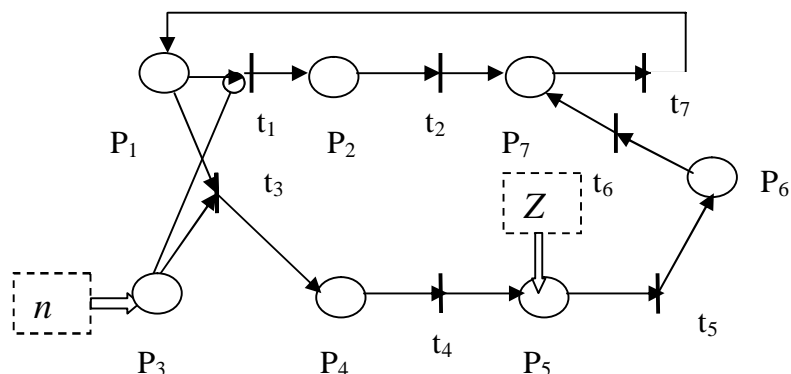


Рис. 7. Модель управления при обслуживании линии единиц оборудования

Граница между типами управления построена при  $N = 5$  из условия одинакового времени прохождения маркеров по сети (рис. 8).

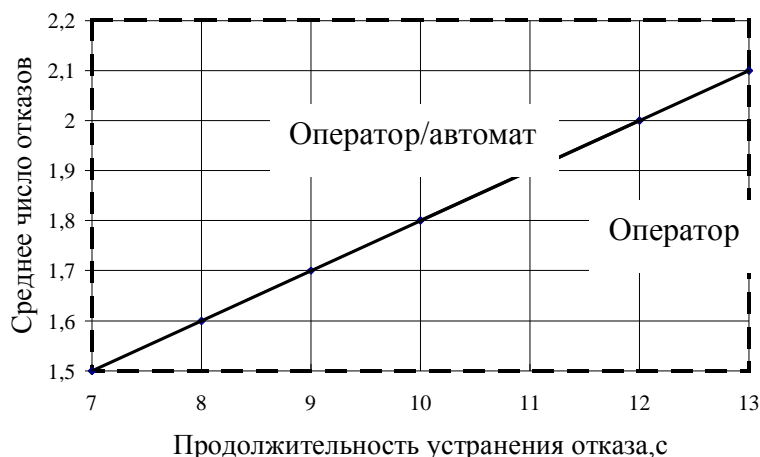


Рис. 8. Выбор типа управления в зависимости от среднего числа отказов  $\bar{n}$  и времени их устранения  $Z$

### Планирование поставок заказчикам

Распределенные в пространстве потребители через случайные интервалы времени подают поставщику заказы. Задан минимальный объем поставки. Поставщик должен выбрать план поставок, обеспечивающий максимальную прибыль. С помощью имитационного моделирования формируется набор сценариев поставки, зависящий от времени поступления заказов, удаленности потребителя и объема поставки [7].

### Поддержка решений диспетчера

Имитационная модель функционирует синхронно с объектом моделирования. Перед выбором решения диспетчер прогнозирует его последствия, ускоряя имитационное моделирование, а затем возвращается к реальному времени. Задача решалась для

конвейерно-локомотивного транспорта угольной шахты, когда выбор неправильного решения диспетчером приводил к блокировке транспортной сети.

### Выбор тактического решения, улучшающего стратегию

Выбор одного из двух решений для отдельного рабочего цикла в случайно изменяющейся среде должен обеспечивать наилучшую стратегию после повторения рабочих циклов.

Задача решалась для дистанционного управления заполнением рудой ковша самоходной машины в опасном месте. Оператор может повторять развороты машины и операции зачерпывания до полного заполнения ковша или же заканчивать погрузку после заданного заполнения ковша с компенсацией неполной загрузки в дополнительных рейсах. Заданное заполнение зависит от времени зачерпывания и движения машины после погрузки. В имитационной модели рабочего цикла (рис. 9) задержка маркера в позиции  $P1$  соответствует операции  $i$ -го ( $i = \{1; n\}$ ) зачерпывания.

После зачерпывания один маркер переходит в позицию контроля заполнения ковша, а другой запускает датчик случайных чисел в интервале  $\{0; 1\}$ . Заполнение ковша, учитывающее повторные зачерпывания, имитируется с помощью фильтра случайных чисел. Задержка маркера в  $P2$  отображает измерение степени заполнения ковша

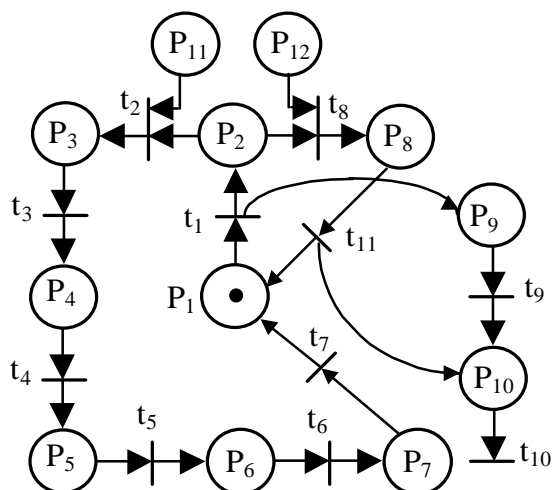
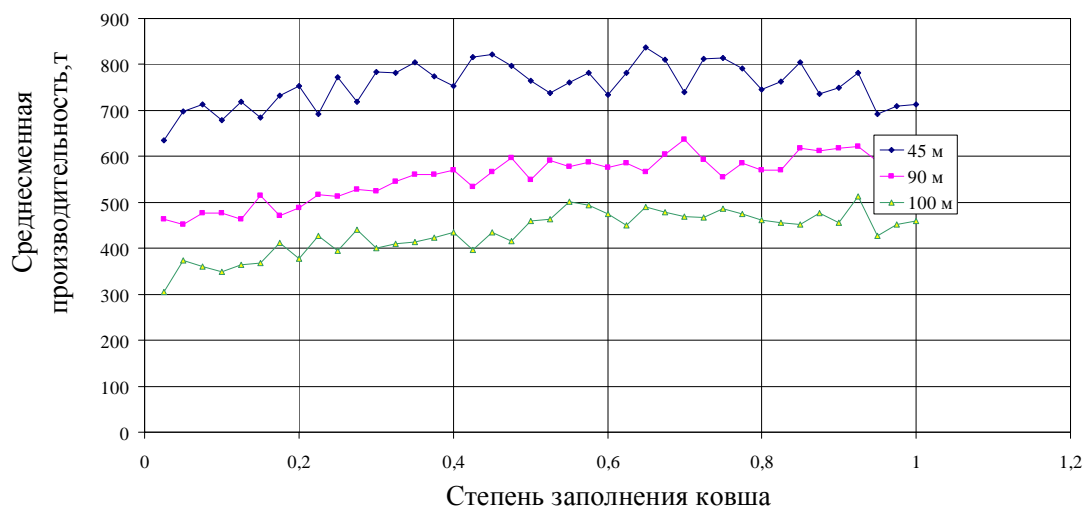


Рис. 9. Имитационная модель рабочего цикла ковшовой самоходной машины

массы [8]. Если заполнение ковша больше заданного, то процесс погрузки заканчивается, ковш поворачивается в транспортное положение, машина выезжает из камеры ( $P3$ ) и движется к месту разгрузки ( $P4$ ), где происходит разгрузка ковша ( $P5$ ). После разворота ( $P6$ ) машина движется к месту погрузки и въезжает в камеру ( $P7$ ). Если же заполнение ковша после зачерпывания меньше заданного, машина отъезжает назад ( $P8$ ) и повторяет зачерпывание ( $P1$ ). Время задержки маркеров в позиции  $P9$  имитирует степень случайного заполнения ковша. В позиции  $P10$  происходит сравнение фактической и заданной степеней заполнения ковша. Если фактическое заполнение меньше заданного, то маркер появляется в позиции  $P12$  и открывается переход  $t8$ . Если фактическое заполнение больше заданного, то маркер появляется в позиции  $P11$  и открывается переход  $t2$ . В имитационных экспериментах для каждой стратегии задавалась одна и та же степень заполнения ковша, после чего оценивалась сменная производительность для расстояний доставки 45 м, 90 м, 120 м. Результаты показали, что наибольшая сменная производительность достигается при заполнении ковша на 65–70% (рис. 10).





**Рис. 10 . Среднесменная производительность погрузочно-транспортной машины**

При этом потери времени на повторные зачерпывания становятся меньше времени на дополнительные рейсы. Для расстояния доставки 45 м при времени зачерпывания 10 с сменная производительность становится на 17 % больше, чем при полном заполнении ковша. В [9] предложено автоматически изменять заданную степень заполнения ковша в зависимости от расстояния доставки.

#### **Управление в нормальных и аварийных ситуациях**

Задача заключается в обеспечении управления при полном множестве технологических ситуаций. Сеть Петри проверяют на живость – возможность прохождения маркеров по сети без захода в тупики. Построение графа достижимости сети позволяет перечислить множество технологических ситуаций, распознаваемых системой управления.

#### **Формирование набора датчиков для распознавания технологических ситуаций**

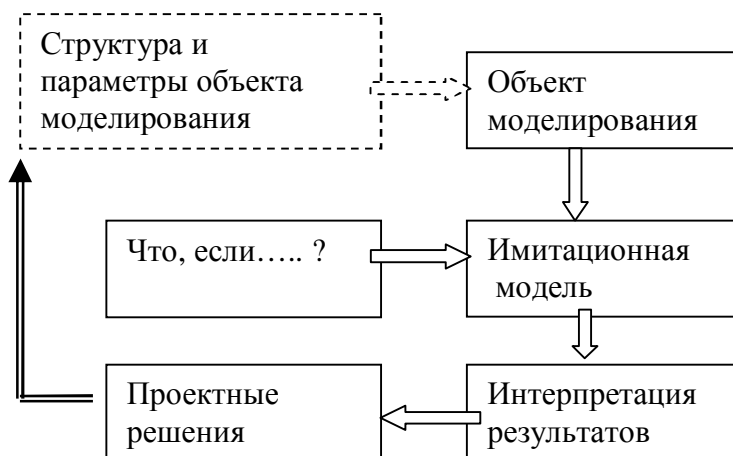
Обозначения позиций в сети заменяют комбинациями датчиков, характеризующими состояние системы. Оценивают сеть на достижимость и строят граф достижимости, вершины которого отображают технологические ситуации в виде наборов состояний датчиков. Проверяют вершины на непротиворечивость состояний. После сокращения набора датчиков сравнивают полученный граф достижимости с предыдущим.

#### **Применение имитационного моделирования для выбора проектного решения**

При проектировании имитационное моделирование может быть применено как с целью выбора проектного решения, так и с целью проверки выбранного проектного решения. Имитационная модель представляет собой последовательность состояний объекта моделирования (рис. 11).

При выборе проектного решения составляют план имитационных экспериментов, в котором входом модели являются различные проектные решения, а выходом – показатели работы объекта моделирования, соответствующие техническому заданию. Цель экспериментов – выявить зависимости показателей функционирования модели от ее структуры и параметров. Результаты имитационных экспериментов интерпретируют как связь показателей системы с ее структурой и параметрами. В результате выбирают

проектные решения, которые лучше всего удовлетворяют требованиям технического задания. С помощью имитационного моделирования подземной сети конвейеров были выбраны пропускная способность сборного конвейера и размеры промежуточных бункеров при случайной работе распределенных источников грузопотоков, найдено время от остановки конвейера до заполнения бункеров, согласованы скорости разгрузки распределенных источников на один конвейер.



**Рис. 11. Схема проектирования методом имитационного моделирования**

Для проверки проектного решения имитируют поведение системы с проверяемым решением и оценивают степень достижения требований технического задания. Проектировщик вводит в окна мнемосхемы технологического процесса условия работы и характеристики выбранных единиц оборудования. После их преобразования в сеть Петри и ввода в имитатор на экран выводится продолжительность процесса. Так, при моделировании работы транспортной сети оценивалось влияние емкости промежуточных бункеров на пропускную способность сборных конвейеров.

Имитация взаимодействия единиц оборудования в виде сети Петри позволяет выбрать структуру технологической системы, согласовать работу единиц оборудования, выявить «узкие места» в технологической цепи, определить емкости промежуточных накопителей, оценить уровень отказоустойчивости системы, определить влияние времени переналадки оборудования на производительность системы, сравнить способы организации сборки, работу в традиционном и «Just-In-Time»- режимах [10].

Работа выполнялась по гранту Научного комитета НАТО OUTR CRG №960628 «Имитация и анимация процессов добычи угля в России» и проекту У0043/995 «Подготовка кадров в области информационных технологий производства для Кузбасса» федеральной целевой программы «Интеграция науки и высшего образования России на 2002–2006 гг.».

### Литература

1. **Мурата Т.** Сети Петри: свойства, анализ и приложения.// Тр. ТИИИЭР, пер. с англ. Т. 77. № 4. 1989. С. 41–79.
2. **Moore K., Chiang.J.** ALPHA/Sim Simulation Software Tutorial // Proc. Of the 1999 Winter Simulation Conference. USA: Phoenix. P. 621–625.
3. **Konyukh V.,Davidenko V.** Petri Nets as a Tool for Mine Simulation // Mineral Resources Engineering. 1999. Vol. 8. № 4. P. 361–371.

4. **Конюх В. Л., Тайлаков О. В.** Предпроектный анализ шахтных робототехнических систем. Новосибирск: Наука. Сиб. отд., 1991. 182 с.
5. **Конюх В. Л.** Компьютерное моделирование динамики горных работ // Горный журнал. Изв. вузов. 2002. № 6. С. 16–24.
6. **Конюх В. Л., Игнатъев Я. Б.** Обеспечение работы роботизированной сборочной линии при отказе робота // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2003. № 9. С. 24–27.
7. **Konyukh V., Sinoviev V., Zhdanov Y., Davidenko V.** Mine Simulation and Animation: the Practical Experience // Mechanizacja i Automatyzacja Gornictwa. 2000. № 4-5 (354). P. 161–166.
8. Способ определения степени загрузки ковша погрузчика / В. Л. Конюх, Э. Чайковский, Е. В. Рубцова – Авт. свид. №1188261, Бюл. 1985. № 40. 3 с.
9. **Konyukh V.** Use of Intelligent Automation for Mine Robot Cars // Proc. of the Third International Symposium on Mine Mechanization and Automation. USA: Golden, Colorado School of Mines, 13-16 June 1995. V. 1, P. 1.45–1.56.
10. **Конюх В. Л.** Имитационное моделирование динамики автоматизированного производства // Автоматизация в промышленности. 2008. № 4. С. 14–16.