

Модели на раскрашенных сетях Петри для управления техническим обслуживанием компьютерного оборудования предприятия

Орлов С.П., Учайкин Р.А.

Самарский государственный технический университет

Самара, Россия

orlovsp1946@gmail.com, uchaykinra@yandex.ru

Аннотация. Современное индустриальное предприятие имеет большое число компьютеров различных моделей, использующихся для автоматизации производственных процессов и обработки информации. Эффективное и рациональное использование компьютерного оборудования неразрывно связано с временным расписанием процессов и учетом их особенностей. В статье рассмотрены известные подходы и методы управления жизненным циклом обслуживающего информационного сервиса, однако во многих случаях они направлены только на уменьшение стоимости оборудования и снижение эксплуатационных затрат. В настоящей работе предложена оптимизационно-имитационная процедура, заключающаяся в последовательном решении задачи оптимального распределения компьютеров и имитационном моделировании процессов при выполнении производственных задач. Разработана имитационная модель на базе временных раскрашенных сетей Петри. Модель состоит из компонентов, имитирующих техническое обслуживание компьютеров, случайные процессы появления отказов и вывода компьютеров из эксплуатации в ремонт. Рассмотрен пример построения фрагментов сети Петри для процесса конструкторской отработки изделия перед выпуском в производство. Определены условия возникновения конфликтов, рассчитан показатель изменения сроков выполнения задач. Предлагаемая методика построения имитационной модели может быть применена для оптимизации использования парка компьютерного оборудования предприятия.

Ключевые слова: вычислительная техника, техническое обслуживание, время наработки на отказ, имитационное моделирование, временные раскрашенные сети Петри.

ВВЕДЕНИЕ

Система управления жизненным циклом производственных систем (PLM) включает все этапы развития: от концептуального решения, проектирования и до завершения эксплуатации. В настоящее время имеется большое число теоретических и практических работ в области PLM [1, 2]. При этом создан ряд программных систем, поддерживающих технологию PLM [3]. Важнейшую роль в современном машиностроительном производстве играют информационные технологии и компьютерная техника. Комплекс средств вычислительной техники (СВТ) крупного предприятия насчитывает десятки тысяч единиц. В связи с этим возникает задача эффективного использования СВТ как с точки зрения финансовых затрат, так и обеспечения производственных и бизнес-процессов. В настоящее время активно развивается подход ITSLM (IT

Service Lifecycle Management), обеспечивающий оперативность и прозрачность поддержки ИТ-процессов и снижающий стоимость затрат при реализации их на предприятии [4, 5].

Традиционный подход к управлению СВТ на крупном предприятии связан с финансовым и материально-техническим учетом компьютерного оборудования [8]. При этом в стороне остаются проблемы эффективной организации информационно-вычислительных процессов в связи с выполняемыми задачами проектирования, конструирования и производства изделий. Часто возникают ситуации, когда при выходе из строя компьютера уникальной конфигурации в резерве отсутствует оборудование для немедленной замены. Это приводит к сдвигу сроков выполнения производственных задач.

Особенность современного состояния управления СВТ в том, что в процессе их эксплуатации, как правило, управленческие задачи решает отдельное подразделение информационных технологий. В его функции входит анализ потребностей в СВТ и сопровождение технического состояния компьютерного оборудования и программных средств. Вопросы распределения компьютерного оборудования часто решаются административными методами, без учета особенностей выполняемых задач, их временных графиков. Периодичность регламентного обслуживания СВТ и организация ремонта, создание обоснованного резерва СВТ, учитывающих графики календарного планирования бизнес-процессов, выполняются не всегда эффективно.

На многих машиностроительных предприятиях принятие решений о распределении компьютеров между проектными подразделениями происходит без учета производственной программы и конкретных графиков проектных процессов. Не рассматриваются вопросы перераспределения высвобождающихся вычислительных ресурсов. Отсутствует системный подход к использованию новых видов компьютерных ресурсов: облачных технологий, виртуальных сетей, хранилищ данных.

ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ

В работах [6, 7] предлагаются сложные сетевые модели для изучения влияния структуры связи на совместное использование вычислительных ресурсов в Системах систем (SoSs). Эти подходы ориентированы на социотехнические системы.

Задача осложняется высокой степенью неопределенности при учете всех факторов, влияющих на эффектив-

ное использование компьютерного оборудования [9].

Модели и задачи сетевого программирования для оптимизации ИТ-процессов на этапах жизненного цикла рассмотрены в работе [10]. При этом использованы критерии, учитывающие инвестиционные затраты на реализацию ИТ-проектов и изменение операционных затрат на их эксплуатацию.

Подходы к оптимизации доступности и стоимости ИТ-услуг рассмотрены в статьях [11, 12]. В этих работах определяется многокритериальная проблема распределения избыточности для проектирования ИТ-услуг. Используется моделирование сети Петри методом Монте-Карло, при этом оценивается доступность и стоимость конкретного ИТ-продукта. Также здесь рассмотрен адаптированный генетический алгоритм для оптимизации затрат на поддержку ИТ-системы поставщика прикладных услуг.

В работах [13 -14] были предложены оптимизационные модели распределения СВТ, учитывающие технические характеристики компьютерного оборудования и структуру каналов связи. Этот подход был нами развит в работах [15, 16], где была поставлена и решена задача дискретной оптимизации с булевыми переменными. Ограничения задачи учитывали многообразие номенклатуры серверов, рабочих станций, инженерных и офисных компьютеров.

Однако решение статического распределения компьютерного оборудования по подразделениям предприятия не дает информации об эффективном использовании СВТ в течение жизненного цикла. Остаются не рассмотренными условия возникновения конфликтных ситуаций, связанных с недостаточностью вычислительных ресурсов, необходимостью периодического технического обслуживания и выполнения ремонтных работ. Для решения этой проблемы мы предложили использовать оптимизационно-имитационный подход, при котором решение оптимизационных задач распределения на следующем этапе верифицируется на имитационной модели [17, 18].

В настоящей статье рассмотрены имитационные модели на временных сетях Петри, которые применяются для исследования эффективности использования компьютерного оборудования в процессе проектирования и производства промышленных изделий с учетом регламентного технического обслуживания и ремонтных операций СВТ.

ЗАДАЧА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТЕХНИКИ ПО ПОДРАЗДЕЛЕНИЯМ ПРЕДПРИЯТИЯ

Решение задачи базируется на оптимизационно-имитационном подходе, который реализуется в виде итерационной процедуры с двумя последовательными этапами: 1) решение оптимизационной модели ОМ с аналитическими ограничениями R_{AN} , 2) исследование имитационной модели ИМ с алгоритмическими ограничениями R_{AL} (рис. 1).

Оптимизационная модель позволяет получить статическое распределение компьютеров по подразделениям или производственным участкам индустриального предприятия при задании критерия минимальной стоимости оборудования и эксплуатации. На имитационной модели проверяется корректность назначения компьютеров на различные задачи.

Оптимизационная задача задается в виде

$$Y_{OM} = \arg \text{extr}(F(Y)) \quad (1)$$

с аналитическими ограничениями R_{AN} в форме:

$$f_i(Y) \leq 0, i \in I, \quad (2)$$

где F - целевая функция с заданными критериями оптимизации, $Y: X \rightarrow Z$ - возможные распределения единиц вычислительной техники X на работы Z .

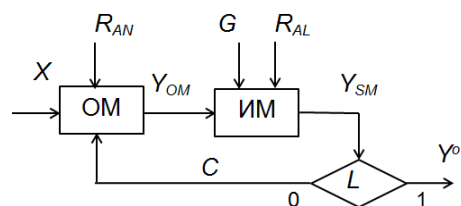


Рис. 1. Оптимизационно-имитационная процедура решения задачи распределения СВТ

В результате первоначального планирования работы определяется диаграмма Ганта, согласно которой задаются времена и последовательность выполнения отдельных задач

$$G = (Z_p, T_p, V_G),$$

где $Z_p = \{z_1, \dots, z_{M_z}\}$ – конструкторские (проектные, технологические, производственные) задачи; $T_p = \{\tau_1, \dots, \tau_{M_z}\}$ – множество заданных длительностей выполнения сроков задач и; V_G – связи между задачами.

Таким образом, после получения решения Y_{OM} оптимизационной задачи (1) – (2) и используя диаграмму Ганта G , следует найти отображение $(G, Y_{OM}) \rightarrow \Psi_{SM}$ в имитационную модель с учетом алгоритмических ограничений R_{AL} .

Искомое распределение Y^0 компьютерного оборудования есть матрица с булевыми переменными $\{y_{ij}\}$, при этом $y_{ij} = 1$, если компьютер с индексом i назначен работе z_j ; $y_{ij} = 0$ – в противном случае.

Условие L проверяет, удовлетворяет ли решение Y_{SM} алгоритмическим ограничениям, и при необходимости передает управление на коррекцию C оптимизационной модели ОМ.

РАСКРАШЕННЫЕ СЕТИ ПЕТРИ ПРИ ИМИТАЦИОННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ КОМПЬЮТЕРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В статье [18] нами была предложена графовая модель взаимодействия комплекса средств вычислительной техники и выполняемых в подразделении предприятия задач.

Модель приведена на рис. 2 и представляет собой двудольный граф с множеством вершин Z задач и множеством вершин U компьютеров. Рассматривается множество из шести компьютеров u_1, \dots, u_6 , которые назначаются для управления и обработкой данных в производственном процессе из шести задач z_1, \dots, z_6 .

Предположим, что было проведено решение оптимизационной модели ОМ и получен булевый вектор Y_{OM} распределения компьютеров для задач. При этом компьютер u_6 находится в резерве.

Компьютер u_2 выходит из строя, выводится из эксплуатации и передается в ремонт **Repair** (дуга *Out*). Тогда резервный компьютер u_6 передается для выполнения задачи z_2 (дуга *Rp*). Компьютер u_2 после ремонта переводится в резерв **Reserve** (дуга *Rt*). Другая ситуация - компьютер

u_3 по регламенту выводится на техническое обслуживание **Maintenance** (дуга Out). Для исключения простоя задачи z_3 необходимо использовать другой компьютер. Однако в резерве свободных компьютеров в данный момент нет. Тогда для задачи z_3 используется компьютер u_4 (дуга Rp) при условии, что задача z_4 еще не начиналась. Компьютер u_3 возвращается из технического обслуживания и, соответственно, компьютер u_4 возвращается для выполнения z_4 . Такая схема распределения компьютерных ресурсов будет работать корректно при выполнении определенных временных условий. Например, задача z_4 может не получить в нужный момент ресурс компьютера u_4 , если будет превышено время технического обслуживания u_3 .

В настоящее время аппарат временных сетей Петри широко используется для имитационного моделирования процессов и систем как в информационных технологиях, так и в промышленном производстве [19, 20]. При изучении объектов, описываемых мультимножествами параметров, целесообразно применять временные раскрашенные сети Петри [21]. С этой целью будем использовать инструментальную программную систему CPN Tools [22].

Раскрашенная сеть Петри - это графоориентированный язык для описания, проектирования и имитации распределенных систем и параллельных процессов.

Временные сети Петри отличаются от классических маркированных сетей введением задержек срабатывания переходов и временными метками для задержки маркеров в позициях. Раскрашенная сеть Петри, кроме того, отличается наличием цветов, приписываемых позициям.

Формальное определение временной раскрашенной сети Петри задается следующим образом:

$$PN_{tc} = (P, T, C, R^-, R^+, \mathbf{\mu}_0, V, S),$$

где P – конечное непустое множество позиций, T – конечное непустое множество переходов, C – множество цветов сети, R^- – блочная матрица инцидентности входящих дуг для переходов, R^+ – блочная матрица инцидентности выходящих дуг из переходов, μ_0 – матрица начальной разметки сети, V – вектор временных штампов позиций, S – вектор задержек срабатывания переходов.

Представленная на рис. 2 схема носит упрощенный характер. В реальных условиях каждой задаче может быть назначен набор различных компьютерных единиц.

В соответствии со структурой данных, принятой при постановке задачи оптимального распределения в [16], будем описывать компьютер кортежем $(n, conf, type)$. Здесь n - индивидуальный номер, $type$ - модель (тип) компьютера и $conf$ - конфигурация заданного типа компьютера. Тогда набор компьютеров для некоторой задачи z_k может быть представлен мультимножеством

$$U_k = \{(n_{1k}, conf_{1k}, type_{1k}), \dots, (n_{ik}, conf_{ik}, type_{ik})\},$$

причем элементы U_k могут повторяться.

Структуры мультимножеств хорошо моделируются в раскрашенных сетях Петри.

На рис. 3 показан фрагмент Z_k раскрашенной сети Петри, которая имитирует выполнение работы **Activity** с назначенным ей набором компьютеров U_k и процессами технического обслуживания Maintenance и ремонта Repair. Из таких фрагментов конструируется вся сеть для производственного процесса с множеством задач Z .

Поскольку моделируемый производственный процесс

циклически повторяется, то имитация в модели сети Петри выполняется многократно. Однако в определенные моменты времени в позициях и появляются маркеры, соответствующие событиям: M - вывод компьютера на техническое обслуживание или F - отказ компьютера и вывод на ремонт. Вывод компьютера из позиции **Uk** приводит к остановке процесса **Activity** до завершения обслуживания и возврата компьютера из позиции резерва **Reserve**.

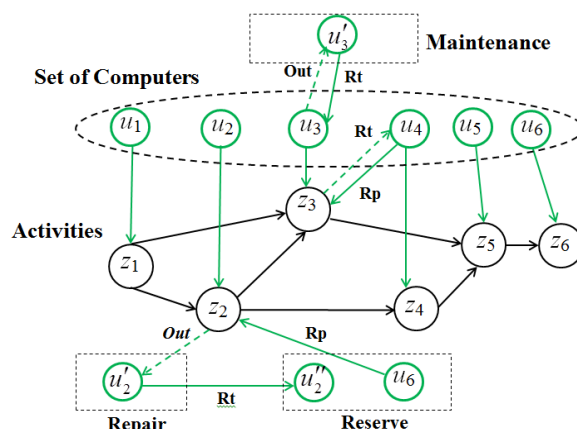


Рис. 2. Графовая модель взаимодействия производственных задач и набора обслуживающих компьютеров

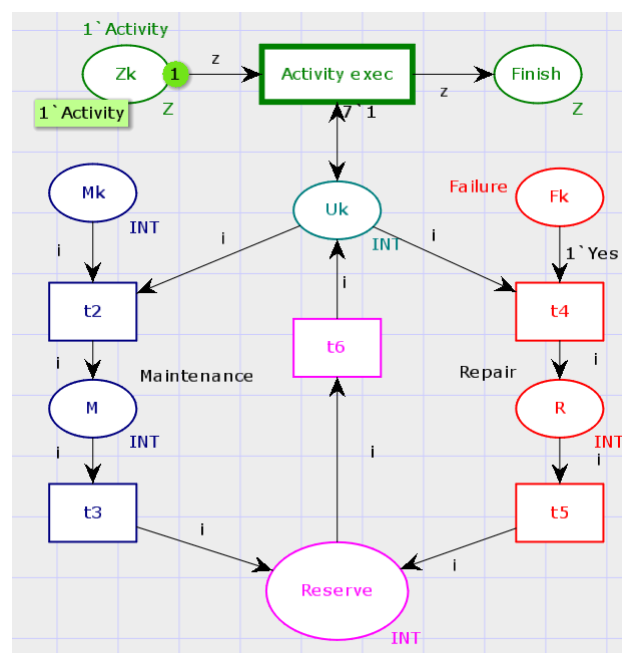


Рис. 3. Фрагмент задачи с набором компьютеров и организаций ремонта или технического обслуживания

Сеть Петри на рис. 4 включает позицию **Uk** с определенным мультимножеством цветов и описывает процесс случайного выбора компьютера, в котором происходит отказ (Failure).

В этом примере предполагается, что задаче назначен набор из четырех компьютеров. В нотации CPN Tools эта информация записывается в виде:

$$1'(1, 2, \text{"Type 1"})@0+++1'(2, 1, \text{"Type 2"})@0+++ \\ +++1'(3, 1, \text{"Type 3"})@0+++1'(4, 5, \text{"Type 4"})@0,$$

где @ - признак временной метки, знак +++ - опера-

ция сложения временных мультимножеств.

Случайный характер появления отказов компьютеров имитируется функцией пуассоновского закона на входной дуге, принимающей маркеры в позицию **Failure**. Техническое обслуживание компьютеров выполняется каждые 100 дней. На рис. 4 показано состояние сети Петри через 186 дней. При этом на 90-м дне произошел отказ компьютера (2, 1, "Type 2"), а через 4 дня он был отремонтирован и возвращен в эксплуатацию.

Компьютер (4, 5, "Type 4") на 100-й день выведен на техническое обслуживание и возвращен в **Uk** через 2 дня, а компьютер (1, 2, "Type 1") на 201-й день будет обслужен и переведен в резерв (позиция **Reserve**).

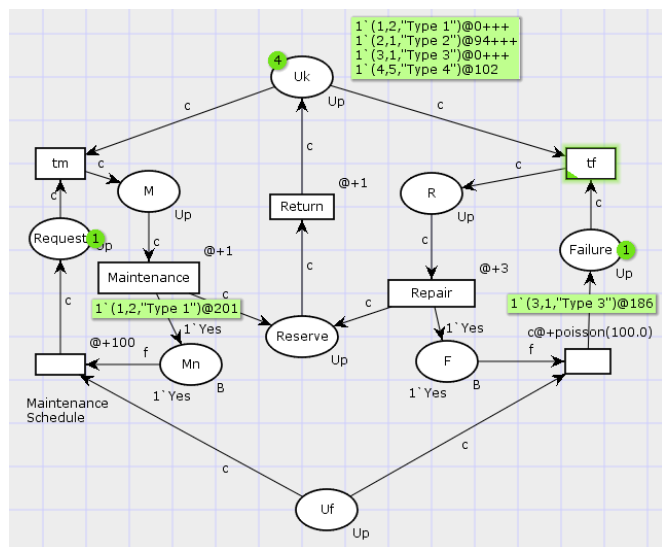


Рис. 4. Генерация отказов и вывод компьютеров на ремонт и техническое обслуживание

Аналогичная логика сети Петри использована при имитации процесса технического обслуживания компьютеров. Отличие состоит в том, что вывод компьютеров на обслуживание производится не случайным образом, а по заранее известному графику. Рассмотренные фрагменты раскрашенных сетей Петри использованы при построении общей имитационной модели для конкретного производственного процесса.

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА

Предлагаемая модель ориентирована на использование на крупном машиностроительном предприятии, на котором существует большое число проектных, конструкторских и производственных процессов.

Будем рассматривать процесс Z конструкторской отработки выпуска некоторого изделия. Пусть в результате иерархической декомпозиции работ получена совокупность частных задач z_k и определена диаграмма Ганта G . Соответствующие данные приведены в табл. 1.

В группу компьютеров, обеспечивающих производственный процесс Z , входят следующие типы: графические рабочие станции Тип 1, Тип 2 и Тип 3 и инженерный компьютер Тип 4. Каждый тип компьютера может иметь несколько конфигураций, различающихся производительностью, объемом памяти и другими характеристиками.

Таблица 1
Данные исследуемых задач производственного процесса

Задача	τ , дни	Содержание	Набор назначенных компьютеров
z_1	20	Анализ образцов изделия	Тип 1, конфигурация 1 Тип 2, конфигурации 1 и 2
z_2	10	Выбор оптимального технического решения	Тип 1, конфигурация 1 Тип 2, конфигурация 1 Тип 4, конфигурация 1
z_3	10	Выбор конструктивных элементов изделия	Тип 1, конфигурация 1 Тип 2, конфигурация 2 Тип 3, конфигурация 1 Тип 4, конфигурация 2
z_4	5	Выбор материалов для изготовления	Тип 4, конфигурации 1 и 2
z_5	20	Разработка конструкции изделия	Тип 1, конфигурация 1 Тип 2, конфигурации 1 и 2 Тип 4, конфигурация 2
z_6	10	Выполнение технической документации и сдача изделия в производство	Тип 1, конфигурация 1 Тип 4, конфигурация 2 Тип 4, конфигурация 2

Будем использовать следующее выражение для описания временного состояния компьютера в модели:

$$u_k(t) = ((n_k, conf_{ik}, type_{ik}), t_M, t_{RUL}), \quad (3)$$

где t_M - оставшееся время до технического обслуживания, t_{RUL} - время наработки на отказ (RUL).

На основе рассмотренных ранее фрагментов сетей Петри сконструирована общая модель процесса Z , представленная на рис. 5. Реализация имитационной модели выполнена средствами системы CPN Tools, в соответствии с языком которой описаны типы множеств цветов и переменных:

```
colset Z=unit with Task timed;
var z: Z;
colset B = bool with (No, Yes) timed;
var b: B;
colset INT=int timed;
colset N= INT;
colset Conf=INT;
colset TYPE=string;
colset Up=product N*Conf*TYPE timed;
var n:N;
var conf: Conf;
var tp: TYPE;
var v: Up;
```

Решение Y_{OM} оптимизационной задачи (1) – (2) дает распределение компьютеров из табл. 1 по задачам с условием выполнения необходимых ограничений. Это распределение на модели отражается в виде мультимножеств в позициях **Uk**.

Переходы tz_1, \dots, tz_6 имитируют выполнение соответствующих задач z_1, \dots, z_6 . Для этого каждому переходу назначена задержка срабатывания τ из табл. 1. Начальные разметки позиций **U1**, ..., **U6** содержат маркеры компьютеров, распределенных на соответствующие задачи. Дуги, соединяющие позиции компьютеров с переходами, двунаправленные, что обеспечивает постоянство маркеров в этих позициях. В результате осуществляется циклический процесс выполнения задач. Кроме того, дугам приписаны условия, показывающие, какие компьютеры должны участвовать в выполнении данной задачи.

Если происходит отказ в компьютере или вывод компьютера на техобслуживание, то маркер этого компьютера изымается из разметки позиции **Uk**. Условие на дуге уже не выполняется и переход не сработает, т.е. выполнение задачи заблокируется до возвращения компьютера в эксплуатацию.

В данной модели используется иерархическая органи-

зация сети Петри. Позиции **Uk** компьютеров, в свою очередь, представлены фрагментами временных раскрашенных сетей, показанных на рис. 4. Эти сетевые фрагменты моделируют случайный пуассоновский поток отказов, а также расписание технического обслуживания компьютеров. Позиция **N** служит для подсчета количества циклов выполнения совокупности задач z_1, \dots, z_6 .

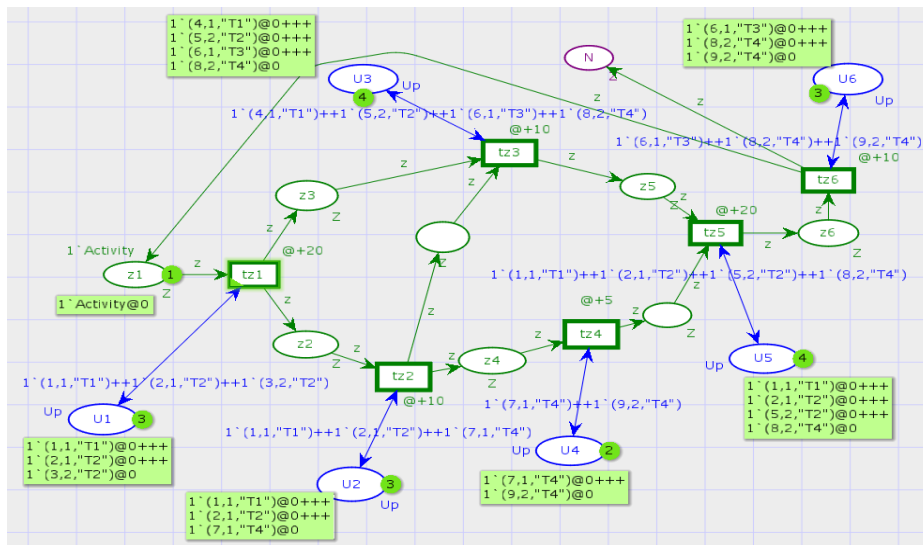


Рис. 5. Имитационная модель на временной раскрашенной сети Петри Z

ОБСУЖДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

В процессе имитации фиксировался коэффициент невыполнения работ в срок:

$$K_Z = \Theta_S(\lambda, t_M, t_O, t_R) / \Theta_Z,$$

где Θ_Z – плановый срок выполнения всей работы Z, рассчитанный по диаграмме Ганта, Θ_S – время выполнения работы Z на имитационной модели, λ – интенсивность отказов, t_M – период между техническим обслуживанием оборудования, t_O – время технического обслуживания, t_R – время ремонта компьютера.

Выход из строя любого компьютера, назначенного задачам на критическом пути, приводит к сдвигу срока выполнения всей работы.

Аналогично, вывод компьютера на техническое обслуживание в момент выполнения задачи, находящейся на критическом пути, также задерживает завершение работы. Эти ситуации моделируются на рассматриваемой имитационной модели.

Моделирование отказов компьютеров проводится в предположении о стационарности, ординарности и отсутствия последствия в потоке событий. Тогда можно использовать распределение Пуассона с интенсивностью λ .

Исходные данные для имитационного эксперимента приведены в Таблице 2.

Таблица 2

Исходные данные для имитационного эксперимента

Параметр	Значения параметра		
Интенсивность λ	0,015	0,022	0,03
Время до технического обслуживания, t_M (день)	75	100	125
Время ремонта компьютеров, t_R (день)	2	4	6

На рис. 6 приведен один из графиков, полученных по

результатам имитации процесса.

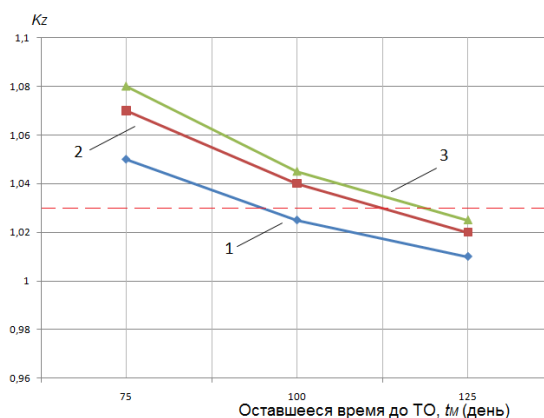


Рис. 6. Диаграмма зависимости коэффициента K_Z от времени до технического обслуживания t_M и времени ремонта компьютеров t_R при $\lambda=0,022$:

1 - $t_R = 2$ дня; 2 - $t_R = 4$ дня; 3 - $t_R = 6$ дней

Допустимое значение сдвига срока выполнения работы было принято $K_Z = 1,03$. Таким образом, при плановом сроке равном 100 дням допускается сдвиг не более, чем на три дня.

Анализ графиков на рис. 6 показывает, что наибольшее влияние имеет частота повторения технического обслуживания. Это обусловлено тем, что при высокой надежности компьютеров слишком частое техническое обслуживание становится причиной приостановки выполнения отдельных задач.

Алгоритм выявления конфликтных ситуаций с ресурсами заключается в следующих операциях.

1. Анализ времени окончания всех задач и вычисление коэффициента K_Z . Если допустимое значение K_Z не пре-

вышено, то выполняется повторение имитации с другими параметрами.

2. В противном случае, определяется, на каком шаге и при выполнении какой задачи был проведен ремонт или обслуживание компьютера.

3. Выполняется коррекция распределения Y_{OM} компьютеров путем нового решения оптимизационной задачи.

Полный анализ результатов имитационного эксперимента позволяет определить:

а) наилучшее значение периода технического обслуживания;

б) максимально допустимое время ремонта компьютеров различных конфигураций;

в) определение оптимального набора компьютеров в резерве;

г) выявить критические задачи и скорректировать предварительное распределение компьютеров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование аппарата временных раскрашенных сетей Петри обеспечивает описание различных факторов, влияющих на совместное выполнение производственного процесса и обработки данных и управления с помощью компьютерной техники.

Дальнейшие исследования предполагается вести в направлении использования прогнозного диагностического обслуживания [23]. В частности, большое значение имеет исследование взаимной связи между предшествующими периодами эксплуатации компьютеров и прогнозируемыми отказами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Chrysosolouris G. Manufacturing systems: Theory and practice / G. Chrysosolouris. – 2nd ed. – New York: Springer Verlag, 2010. – 606 p.

2. Grieves M. Product lifecycle management: Driving the next generation of lean Thinking / M. Grieves. – New York: The McGraw-Hill Education, 2005. – 288 p.

3. Xcelerator – Embrace the Digital Future – URL: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/products/> (дата обращения 20.12.2020).

4. Cannon D. ITIL service strategy, 2011 edition / D. Cannon. – London: The Stationery Office, 2011.

5. Jamous N. Towards an IT service lifecycle management (ITSLM) concept / N. Jamous, S. Bosse, C. Görling, J. Hintsch, A. Khan, F. Kramer, H. Müller, K. Turowski / 4th International Conference on Enterprise Systems (ES) (Melbourne, VIC). – Melbourne, 2016. – P. 29-38.

6. Mosleh M. Resource allocation through network architecture in systems of systems: A complex networks framework / M. Mosleh, P. Ludlow, B. Heydari // Proc. of the 2016 Annual IEEE Systems Conf. (SysCon) (Orlando, FL, USA). – Orlando, 2016. – P. 1-5.

7. Mosleh M. Distributed resource management in systems of systems: An architecture perspective / M. Mosleh, P. Ludlow // System Engineering. – 2016. – № 19 (4). – P. 362-374.

8. Democ V. Proposal for optimization of information system / V. Democ, Z. Vyhnalikova, P. Alac // Procedia Economics and Finance. – 2015. – № 34. – P. 477-484.

9. Gromov Y.A. Determination of information system structure parameters in conditions of uncertainty / Y.A. Gromov, Y. Minin, S. Kopylov, A.A. Habib Alrammahi, F.

Sarit // Proceedings of 1st Int. Conf. on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA. – 2019. – P. 338-343.

10. Zymin A.V. Models and mechanisms for planning service improvements / A.V. Zymin, I.A. Zolin, I.V. Burkova, V.V. Zimin // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2020. – Vol. 865. – 012016.

11. Bosse S. Multi-objective optimization of IT service availability and costs reliability / S. Bosse, M. Splieth, K. Turowski // Engineering & System Safety. – 2016. – Vol. 147. – P. 142-155.

12. Bosse S. Optimizing IT service costs with respect to the availability service level objective / S. Bosse, M. Splieth, K. Turowski // 10th International Conference on Availability, Reliability and Security (ARES) (Toulouse, France). – Toulouse, 2015. – Vol. 1. – P. 20-29.

13. Дидрих В.Е. Задача распределения ресурсов в сетевой информационной системе / В.Е. Дидрих, И.В. Дидрих, Ю.Ю. Громов, М.А. Ивановский // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2016. – Т. 22, № 4. – С. 541-549.

14. Аюад М. Оптимизационные задачи выбора и распределения ресурсов в информационных системах / М. Аюад, В.В. Борщ, А.В. Лазаренко, Ю.В. Минин // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2014. – № 1. – С. 43-46.

15. Учайкин Р.А. Задача распределения средств вычислительной техники на машиностроительном предприятии / Р.А. Учайкин, С.П. Орлов // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2019. – Вып. 4(69). – С. 84-98.

16. Orlov S.P. System models of organization the use of computer equipment for mechanical engineering production / S.P. Orlov, R.A. Uchaikin, A.V. Burkovsky // IOP Conf. Series: Mater. Sci. Eng. – 2020. – Vol. 862. – 042004.

17. Antonova G.M. Modern ability of optimization-simulation approach / G.M. Antonova, A.D. Tsvirkun // IFAC Proceedings. – 2008. – Vol. 41(2). – P. 15811-15816.

18. Uchaikin R.A. Optimization-simulation approach to the computational resource allocation in a mechanical engineering enterprise / R.A. Uchaikin, S.P. Orlov // Journal of Phys.: Conf. Ser. – 2020. – Vol. 1679. – 032015.

19. Silva J.R. Timed Petri nets / J.R. Silva, P.M.G. del Foyo // Petri Nets – Manufacturing and Computer Science. – IntechOpen, 2012. – Chapter 16. – P. 359-378.

20. Pla A. Petri net based process monitoring. A workflow management system for process modeling and monitoring / A. Pla, P. Gay, J. Melendez, B. Lopez // Journal of Intelligent Manufacturing. – 2014. – Vol. 25. – P. 539-554.

21. Jensen K. Coloured Petri nets: Modelling and validation of concurrent systems / K. Jensen, L.M. Kristensen. – Berlin: Springer Berlin, 2014.

22. CPNTools. Modeling with Coloured Petri Nets – URL: <http://cpntools.org/2018/01/16/getting-started/> (дата обращения 20.12.2020).

23. Cachada A. Maintenance 4.0: Intelligent and predictive maintenance system architecture / A. Chachada et al. // 2018 IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA) (Turin, Italy). – Turin 2018. – P. 139-146.

Colored Petri Net Models for Computer Equipment Maintenance Management at an Enterprise

Orlov S.P., Uchaikin R.A.

Samara State Technical University

Samara, Russia

orlovsp1946@gmail.com, uchaykinra@yandex.ru

Abstract. Modern industrial enterprise has many different computer models used for the automation of production processes and information processing. Effective and efficient use of computer hardware is inextricably linked with the schedule of operations and their specific features. The article discusses the well-known approaches and methods of information technology service lifecycle management. Still, in many cases, they aim only to reduce the equipment and operating costs. This paper proposes an optimization-simulation procedure, which consists of the sequential solution of the computer's optimal distribution problem and simulation of processes when performing production tasks. A simulation model has been developed based on timed colored

Petri nets. The model consists of components that simulate extracting computers for maintenance and repair and a random process of failures. An example of the Petri net fragments for the operation of design development of a product before release into production is considered. The conflict occurrence conditions are determined; the completion time shift factor is calculated. The proposed method for constructing a simulation model can be applied to optimize using the enterprise's computer equipment.

Keywords: computer technology, maintenance, remaining useful life, simulation, timed colored Petri nets.