

УДК 65.011

Математическая модель автоматизированной системы управления заказами в процессе технологической подготовки производства на предприятиях авиационной промышленности

Ефимова П.Е.¹

*Рыбинская государственная авиационная технологическая академия
имени П. А. Соловьёва*

e-mail: poline_e@pisem.net; valya_kholod@pochta.ru

получена 30 декабря 2009

Ключевые слова: управление потоками работ, технологическая подготовка производства, сети Петри

Проведён анализ автоматизированной системы управления заказами, применяемой в процессе технологической подготовки производства (ТПП) в рамках конструкторского бюро проектирования оснастки, сформулирована её концептуальная модель на основе сетей Петри, разработана математическая модель на основе метода решающих матриц.

1. Введение

Объективной тенденцией развития общества является повышение доли творческого, интеллектуального труда, что в большинстве источников позиционируется как третья научно-техническая революция и формирование «Общества знания» [1]. В соответствии с потребностями нового общества изменяется структура рынка информационных систем. Отмечается [2,3], что при автоматизации производства используются как АСУП (автоматизированные системы управления предприятием), так и АСУТП (автоматизированные системы управления технологическими процессами). При этом уровень автоматизации в рамках АСУП достигает 20%, а в области АСУТП – 60%. Причиной этого являются требования к принятию нестандартных решений, творческий характер работы. Отсюда следует, что основной резерв повышения эффективности заключается в автоматизации процессов управления.

Развитие автоматизированных систем требует в качестве основы адекватного математического аппарата. Первоначально (начиная с 70-х гг.) основой систем автоматизированного управления производством и диспетчерских систем послужили

¹Научный руководитель канд. техн. наук, проф. В.М.Комаров

задачи оптимизации [4], в первую очередь теория расписаний, получившая развитие начиная с работ Конвея, Максвелла [5]. Объективные трудности при решении задач подобного класса (NP-полный случай общей постановки) в теоретических исследованиях привели к созданию квазиоптимальных методов решения задач такого рода (нейронные сети, метод отжига, генетические алгоритмы, алгоритм «муравьиных колоний» [6-8]).

Последние исследования разворачиваются по следующим направлениям: исследование частных, в том числе NP-полных, случаев на основе модификаций теорем и методов теории расписаний (Лазарев, Гафаров [9]), сочетания различных методов (комбинирование алгоритмов путем направления выхода одного из них на вход другого – Прилуцкий [10], «принцип конструктора» – [11]). Однако в практику применения реальных управляющих систем данные методы входят с большим опозданием – преимущественно это системы имитации сигналов и т.д.

Параллельно с этим развивалось иное направление, первоначально преимущественно базирующееся на качественной оценке – использование в целях управления бизнес-моделей – формализованных описаний процессов, отражающих реально существующую или предполагаемую деятельность предприятия. Основой его послужила теория отношений и теория формальных грамматик, что прослеживается в работах создателей стандарта IDEF, а среди отечественных исследователей – Вендрова, Репина, Калянова [12-14]. Упомянутые подходы применимы к любой области деятельности и позволяют сохранять и обрабатывать знания о плохо формализуемых процессах.

Распространённая графическая форма бизнес-моделей сближает их также с теорией графов, в том числе с таким инструментом описания асинхронных процессов, как сети Петри (последнее проявляется, в частности, в том, что для стандарта IDEF3 создан алгоритм перевода его в цветную сеть Петри). Сети Петри как инструмент имитационного моделирования в последнее время получили развитие в работах Аалста, Хейя [15]. Указанные авторы рассматривают сети Петри как возможный концептуальный стандарт одной из высших форм автоматизированных систем управления – систем управления потоками работ (СУПР).

В отличие от строгих методов указанное направление в большей степени отличается влиянием человеческого фактора. Однако и в нем происходит движение к постепенной передаче функций автоматизированной системе, что повышает значимость количественных оценок. От поддержки отдельных функций и фиксации данных происходит переход к системам анализа и прогнозирования [15].

Творческая деятельность в меньшей степени поддаётся нормированию, что вызывает проблемы с её формализованным описанием и автоматизированным планированием и контролем. Разработке математической модели для конструкторского подразделения (КБ) авиационного предприятия посвящена данная работа.

2. Исследование предметной области и анализ применимости методов математического описания и исследования

Рассматриваемое подразделение авиационного предприятия занимается проектированием оснастки по заказам цехов-потребителей. Заказ, направляемый в КБ, представляет собой частично формализованное требование на создание либо изменение оснастки с указанием её типа и наиболее важных технических характеристик. При выдаче заказов цехи руководствуются планами производства изделия, в меньшей степени – внезапно возникшими потребностями. Заказы поступают в управление главного технолога (УГТ), отдел ТПП, где происходит назначение срока их выполнения, распределение по КБ, бригадам и далее по исполнителям. По завершении проектирования заказ вместе с созданными чертежами направляется на инструментальный завод. Изготовленная оснастка апробируется и внедряется в цехе, при необходимости осуществляется её доработка.

Рассматривая предметную область, отмечаем, что, с одной стороны, деятельность КБ сходна с функционированием организаций, относящихся к сферам наиболее успешного применения СУПР (банковское дело, деятельность дистрибьюторских фирм, финансовых и юридических организаций) [15]. Сходство проявляется в следующем:

- существует множество уникальных задач (заказов на проектирование), которые тем не менее характеризуются сходной (однотипной) последовательностью действий по их выполнению;
- задачи выполняются людьми и прикладными программами;
- действия исполнителей асинхронны, параллельны.

С другой стороны, у данной области есть свои особенности: функционирование КБ является планируемым процессом, а план подготовки производства оснастки неразрывно связан с планом освоения нового изделия и должен выполняться таким образом, чтобы при достижении определённого этапа освоения были в наличии все необходимые средства технологического оснащения. План же производства изделий формируется структурой, внешней по отношению к рассматриваемому подразделению. Вследствие этого, важными показателями для деятельности КБ являются приоритет заказов, плановые сроки и их смещение, запаздывание заказов. Данный набор показателей хорошо описывается терминологией теории расписаний [5], и в ней же доказан ряд теорем, указывающих порядок расположения работ при заданных начальных условиях.

Наконец, поступление работ в виде потока заказов требует рассмотрения применимости теории массового обслуживания.

Сравнительная характеристика вышеупомянутых методов исследования приведена в таблице 1.

Таблица 1. Сравнительная характеристика методов математического описания

Метод	Достоинства	Недостатки
Теория массового обслуживания	Хорошо описаны процессы с массовым поступлением работ (заказов). Легко получить средние показатели для системы	Не выполняются многие ограничения на формализованное описание. Не позволяет учесть специфику заказов, проследить состояние конкретных работ
Теория расписаний	Позволяет за счёт разветвлённой классификации задач учесть многие особенности предметной области. Хорошо отвечает подходу теории расписаний целевая функция.	Для реальных данных подразделения размерность задачи огромна. Общие алгоритмы решения подобных задач до настоящего времени не разработаны
Имитационная модель на основе сети Петри	Позволяет учесть асинхронность, параллельность работ, за счёт введения модельного времени и цвета – характерные особенности задачи, отличается легкой реализацией, воспроизводимостью результатов	Нет строгого доказательства оптимальности решения

На основе анализа таблицы 1 и сочетания разных особенностей предметной области заключаем, что при формировании модели процесса, где это возможно, будет происходить обращение к точным методам исследования операций. Успешный опыт подобного сочетания точных и эвристических алгоритмов, точных алгоритмов и имитационного моделирования рассмотрен в работах [10-11]. В связи с этим ставится задача формирования модели, сочетающей компонент имитационного моделирования (сеть Петри), и компонент, предусматривающий обработку с помощью методов исследования операций (массивы данных о планах, трудоёмкости различных типов работ). При этом в рамках компонента, использующего методы исследования операций, исследуются данные с меньшей степенью изменчивости, а сеть Петри позволяет отслеживать случайные возмущения и оперативное изменение ситуации.

3. Обобщённое представление математической модели

Общий вид предложенной модели приведён на рисунке 1.

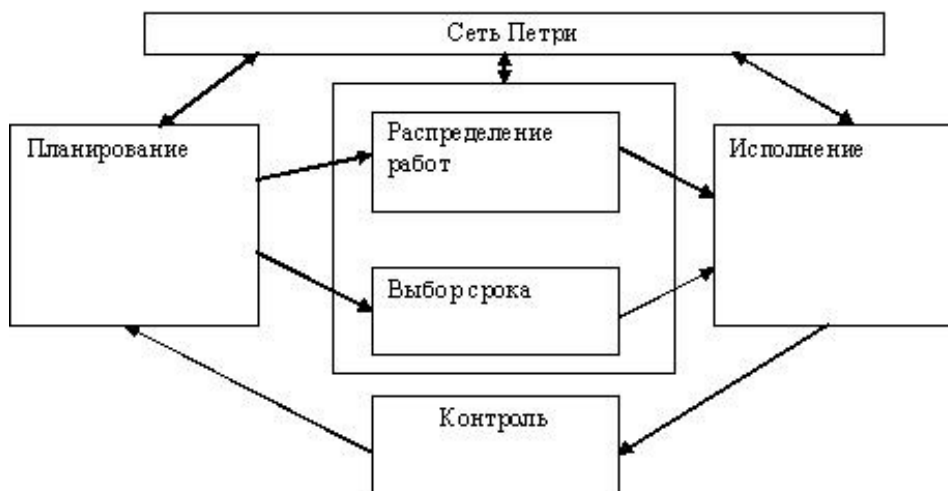


Рис. 1. Обобщённое представление математической модели

Сеть Петри моделирует движение заказов из стадии в стадию с возможными возвратами, «стопорение» заказов вследствие непредвиденных обстоятельств (болезни сотрудника и т.д.), поступление дополнительных работ по ранее выполненным заказам (в случае замечаний), удаление заказов, утративших актуальность. Сеть Петри для управления заказами на уровне подразделения в целом представлена на рисунке 2. Кругами изображены вершины, прямоугольниками – переходы (нотация приведена по работе [15]). По своему типу это цветная сеть Петри с введённым модельным временем.

Разработанная в настоящем исследовании сеть является неизменным ядром системы и соответствует сложившемуся в практике предприятия процессу обработки заказов. В качестве основных характеристик, определяющих «цвет» фишки в сети Петри, рассматриваются тип оснастки, отнесённость к изделию, принадлежность к исполнителю.

Предложенная сеть может быть дополнена вложенной сетью, отражающей работу исполнителя над конкретным заказом (при этом конкретизируется переход t_{40}). Вложенная сеть включает переходы, отвечающие основным стадиям работы конструктора с заказом: «Получена информация от заказчика», «Снята актуальность», «Непосредственно проектирование завершено», «Согласован», «Проверен», «Утверждён». В рамках её предусмотрены возвраты на стадию проектирования с любой из последующих, а также ветвление, предусматривающее изъятие заказа из работы вследствие неактуальности на стадии получения информации или проектирования.

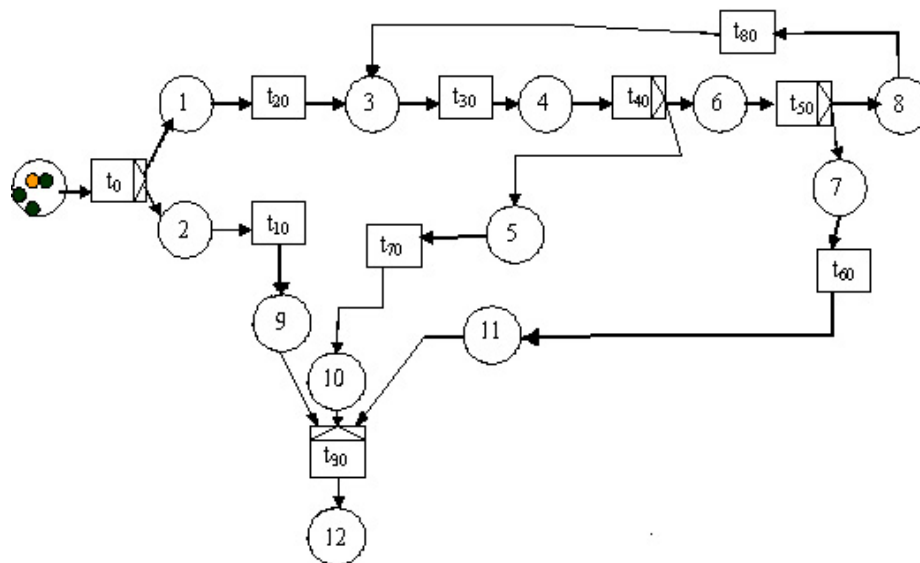


Рис. 2. Сеть Петри для управления заказами на уровне подразделения

Подключение блоков разработанной модели (см. рис. 1) к переходам сети Петри (см. рис. 2) приведено в таблице 2. В скобках указаны переходы, на основании которых корректируется информация блоков (т.е. без скобок – информация «в сеть», в скобках «из сети»).

Работа начинается с блока «Планирование», результаты функционирования которого определяют помещение фишек в начальную позицию и срабатывание перехода t_0 (информация «в сеть»). После срабатывания переходов t_{10} , t_{20} (информация «из сети») часть фишек направляется в позицию 9 и далее в переход t_{90} , то есть в дальнейшем будут рассматриваться только те заказы, выполнение которых признано целесообразным.

Появление фишек в позиции, следующей за переходом t_{20} «Принято решение о выполнении», служит сигналом к началу функционирования блока «Распределение работ». Сформированное распределение может быть изменено, если заказ утрачивает актуальность (переход t_{70}); фактически срабатывание перехода t_{70} означает корректировку загрузки конструктора.

После срабатывания перехода t_{30} «Направлен исполнителю» управление передаётся на блок «Выбор срока», где происходит окончательное установление трудоёмкости и срока выполнения на основе планового. Срок, назначаемый до начала непосредственной работы, служит работнику ориентиром. В дальнейшем он будет сопоставлен с фактическим сроком – моментом срабатывания перехода t_{40} .

Переход t_{50} представляет собой прекращение управленческого воздействия на заказ в данном подразделении. Впоследствии его движение может определяться только внешними указаниями (переход t_{80}).

Последние столбцы таблицы 2 представляют сеть Петри в матричной форме как множества входных и выходных функций переходов. Для определения входных и выходных функций переходов используются следующие показатели:

Таблица 2. Взаимодействие блоков модели через сеть Петри

Процесс	Соответствие блоку схемы	Переходы сети Петри	Смысл (действие с заказом)	Входные функции переходов	Выходные функции переходов
Принятие заказов в УГТ	блок «Планирование»	t_0	Получен в УГТ	n	$p_1 * n, (1 - p_1) * n$
		(t_{10})	Отвергнут и возвращен в цех	$(1 - p_1) * n$	$(1 - p_1) * n$
		(t_{20})	Принято решение о выполнении	$p_1 * n$	$p_1 * n$
Направление исполнителю	блок «Назначение работ»	t_{30}	Направлен исполнителю	$p_1 * n, \nu_8$	$p_1 * n, \nu_8$
		(t_{70})	Снята актуальность	$(1 - p_2) * W$	$(1 - p_2) * W$
Работа с заказами	блок «Выбор срока», «Исполнение» и контрольная операция	t_{40}	Выполнен	$W = p_1 * n + \nu_8$	$p_2 * W, (1 - p_2) * W$
Внедрение оснастки	Возмущающие воздействия	t_{50}	Направлен цеху	$p_2 * W$	$p_2 * p_3 * W, p_2 * (1 - p_3) * W$
		(t_{60})	Принято без претензий	$p_2 * p_3 * W$	$p_2 * p_3 * W$
		t_{80}	Возникли замечания	$p_2 * (1 - p_3) * W$	$p_2 * (1 - p_3) * W$
		t_{90}	Работа завершена	$n - \nu_8$	$n - \nu_8$

- p_1 – вероятность того, что заказ будет принят в отделе ТПП;
- p_2 – вероятность того, что заказ сохранит актуальность в течение срока проектирования;
- p_3 – вероятность того, что чертежи не содержат ошибок, а спроектированная оснастка бездефектна и не потребует доработки.

Величина W , обозначающая количество фишек, поступающее в позицию 3 и далее в переход t_{30} , характеризует общую загрузку основными и дополнительными работами. Величиной ν_8 обозначено количество фишек, поступающее в позицию 3 и далее в переход t_{30} из позиции 8. Фактически величина ν_8 отражает загружен-

ность дополнительными работами (выяснение спорных вопросов по телефону либо с выходом в цех, оформление листков извещения на утверждённые чертежи и т.п.).

Из взаимосвязи переходов видно, что

$$\nu_8 = p_2 * (1 - p_3) * (p_1 * n + \nu_8),$$

откуда

$$\nu_8 = \frac{p_2 * (1 - p_3) * p_1}{1 - p_2 * (1 - p_3)} * n = (1 - \frac{1}{1 - p_2(1 - p_3)})p_1 n.$$

Далее будут рассмотрены количественные показатели, получаемые на основе блоков, и соотношение данных параметров с формируемыми на основе сети Петри.

4. Обработка информации с меньшей изменчивостью

1. Процесс планирования

Рассмотрим теперь блоки, включающие управляющую информацию. Внутри каждого блока данные организованы в виде матриц. Первый блок («Планирование») включает пять базовых матриц, обозначения и смысл которых сведены в таблице 3. В блоке «Планирование» с помощью операций над базовыми матрицами, определяемыми целями предприятия и сложившейся ситуацией («Цех» – «Операция», «Срок» – «Изделие» и др.), осуществляется переход от конечной цели – создания изделия – к плану повышения технологической оснащённости, отображением которого является матрица «Срок» – «Заказ». Данная матрица является прогнозным графиком ТПП.

Определены и осмыслены следующие произведения решающих матриц блока «Планирование»:

- $P = D * C$ – «Изделие» – «Операция» – вероятность того, что при изготовлении изделия будет затребована данная операция.
- $O_d = P * B$ – «Изделие» – «Оснастка» – оснащённость изделия;
- $O_{sc} = C * B$ – «Цех» – «Оснастка» – оснащённость цеха;
- $Pr = A * O_d$ – «Срок» – «Оснастка» – прогнозная потребность в оснастке;
- $Z = A * D$ – «Срок» – «Цех» – прогнозная загрузка цехов;
- $Pr_e = Pr * E = Z * O_{sc} * E$ – «Срок» – «Заказ» – прогнозное расписание заказов.

Обоснование применяемого способа следует из свойств математических объектов. Известно, что элементы матрицы, являющейся произведением двух, вычисляются по формуле (возьмём для примера первое произведение):

$$p_{ij} = d_{i1} * c_{1j} + d_{i2} * c_{2j} + \dots + d_{im} * c_{nj}.$$

Таблица 3. Решающие матрицы блока «Планирование»

Код	Строки	Столбцы	Элементы	Нормировка
$A = \ a_{ij}\ $ – матрица «Срок» – «Изделие»	i_a – анализируемый период	j_a – номер изделия (детали, сборочной единицы)	прирост оснащённости за соответствующий период в долях единицы	$\forall j : \sum_i a_{ij} = 1$
$B = \ b_{ij}\ $ – матрица «Операция» – «Оснастка»	i_b – тип операции (код по классификатору)	j_b – тип оснастки (код по классификатору)	вероятность применения типа оснастки на операции	$\forall i : \sum_j b_{ij} = 1$
$C = \ c_{ij}\ $ – матрица «Цех» – «Операция»	i_c – номер цеха	j_c – тип операции (см. выше)	доля типа операций в трудоёмкости работ цеха	$\forall i : \sum_j c_{ij} = 1$
$D = \ d_{ij}\ $ – матрица «Изделие» – «Цех»	i_d – номер изделия (см. выше)	j_d – номер цеха	доля трудоёмкости работ цеха в трудоёмкости процесса	$\forall i : \sum_j d_{ij} = 1$
$E = \ e_{ij}\ $ – матрица «Оснастка» – «Заказ»	i_e – тип оснастки (см. выше)	j_e – номер заказа	вероятность появления оснастки в требованиях заказа	$\forall j : \sum_i e_{ij} = 1$

Используемая при нахождении каждого элемента результирующей матрицы формула по аналитической записи и содержанию близка формуле полной вероятности, которая имеет вид

$$p(A) = p(H_1)p_{H_1}(A) + p(H_2)p_{H_2}(A) + \dots + p(H_n)p_{H_n}(A) = \sum p(H_i)p_{H_i}(A).$$

Считаем, что в строке i первой матрицы-сомножителя записаны гипотезы, в столбце j второй – исходы, тогда каждый элемент результирующей матрицы есть полная вероятность события «сущности, представленные строкой i и столбцом j , находятся в связи». В качестве гипотез принимается матрица, элементы которой в меньшей степени изменяются во времени.

Расписание, полученное в виде матрицы Pr_e , является расписанием заказов, относящихся к графикам подготовки производства изделия. При сопоставлении фактической и потребной оснащённости цехов (матрица O_{sc}) выявляются отклонения, являющиеся базой для прогнозирования одиночных заказов.

2. Модификация задачи распределения в модели

В рамках модуля «Распределение работ» формируется итоговая матрица I «Исполнитель» – «Заказ», которая является взвешенной суммой матриц, отражающих предпочтения в распределении работ по различным параметрам

$$I = \sum_{j=1}^4 \alpha_j * I_j,$$

где α_j – весовые коэффициенты характеристик,

$$\sum_j \alpha_j = 1,$$

каждая из матриц I_j представляет собой произведение матриц «заказ- $\langle$ характеристика $\rangle$ » и « $\langle$ характеристика $\rangle$ - конструктор». Измерение $\langle$ характеристика $\rangle$ может представлять собой:

- специализацию по типу оснастки (долю заказов данного типа в предшествовавшем опыте конструктора);
- применяемый инструмент проектирования (тот или иной пакет САПР, кульман);
- квалификацию, оцениваемую по категории;
- сводную характеристику непосредственно предшествующих работ.

Последний показатель, в отличие от общей специализации, учитывает настройку на работу. Он рассчитывается по данным массива, элементы которого увеличиваются при каждом совпадении параметров назначенного заказа с заданными ранее. С некоторой периодичностью все элементы массива умножаются на коэффициент $\rho < 1$, что отражает постепенное забывание конструктором особенностей, присущих работе с этими параметрами.

Решаемая задача близка хорошо исследованной задаче о назначениях. Однако при решении данного класса задач каждая работа относится к одному исполнителю и каждый исполнитель выполняет одну работу. Для рассматриваемого случая распределение работ может происходить в виде $1-k$ (у каждого исполнителя несколько заказов) либо даже $l-k$ (у каждого исполнителя несколько заказов, каждый заказ может быть назначен нескольким исполнителям). В связи с этим предлагается отталкиваться от формулировки транспортной задачи, близкой задаче о назначениях. Её особенностью в классе распределительных задач является тождество единиц измерения работ и ресурсов. Для данной задачи ресурсами являются конструкторы, работами – заказы. Используем фонд рабочего времени конструкторов и трудоёмкость заказов, что и позволяет привести измерение к единым величинам – часам. В качестве затрат на выделение ресурса на выполнение заданной работы U_{ij} берутся

величины, обратные совокупной способности успешно выполнить работу (элементам матрицы I). Если оцениваемая способность равна 0 хотя бы по одному из частных показателей, в качестве U_{ij} принимается M (значение недопустимо). Ищется минимум целевой функции.

После распределения заказов по рабочим местам, соответствующим их сложности, включается в работу модуль «Выбор срока», который упорядочивает заказы на рабочем месте и определяет срок, в который они могут быть выпущены. Для работы модуля необходим ряд матриц, сведённых в таблицу 4.

Таблица 4. Матрицы блока «Выбор срока»

Код	Строки	Столбцы	Элементы	Нормировка
$E^T = \ e_{ij}\ $ – матрица «Заказ» – «Оснастка»	i_e – номер заказа	j_e – код оснастки	вероятность наличия типа оснастки в заказе	$\forall i : \sum_j e_{ij} = 1$
$V = \ v_{ij}\ $ – матрица «Оснастка» – «Трудоёмкость»	i_v – код оснастки	j_v – ряд нормированных значений трудоёмкости	вероятность проектирования в течение заданного времени	$\forall i : \sum_j v_{ij} = 1$
$M_{T_n} = \ m_{i1}\ $			принятый ряд планирования трудоёмкости	
$S = \ s_{ij}\ $ – матрица «Заказ» – «Стадия»	i_s – номер заказа	j_s – номер этапа выполнения	прирост готовности заказа на стадии	$\forall i : \sum_j s_{ij} = 1$
$R = \ r_{ij}\ $ – матрица отнесения к рабочему месту	i_r – номер заказа	j_r – код конструктора	доля конструктора в выполнении заказа	$\forall i : \sum_j r_{ij} = 1$
$L = \ l_{ij}\ $ – матрица параллельности работ	i_l – номер заказа	j_l – код конструктора	доля времени, затраченная на заказ в данном периоде	$\forall j : \sum_i l_{ij} = 1$

Матрицы $R = \|r_{ij}\|$, $L = \|l_{ij}\|$ первоначально рассчитываются на основе таблицы, полученной при решении транспортной задачи и включающей количество часов, назначенных конструктору j для выполнения заказа i . Элементы матрицы $L = \|l_{ij}\|$ получаются при делении значений в часах на трудоёмкость заказа, $R = \|r_{ij}\|$ – на фонд рабочего времени конструктора. Впоследствии они корректируются по реальным отчётам конструкторов. На основании данных таблицы 4 рассчитываются следующие показатели:

- $M_T = E^T * V * M_{T_n}$ – математические ожидания трудоёмкости заказов;

- $ST = M_T * S = E^T * V * M_{T_n} * S$ – распределение времени по стадиям работ (стадии перечислены при описании вложенной сети);
- $LI = M_T * L = E^T * V * M_{T_n} * L$ – нагрузка на сотрудников.

Оптимально, если матрица E из блока «Планирование», на основе которой определяется матрица E^T в блоке «Выбор срока», не подвергалась переоценке с момента завершения планирования, однако при нечёткой формулировке требований заказа это не всегда возможно. Именно вследствие недостатка информации матрицы E^T , V относят к данному блоку, наиболее приближенному к исполнению. На более ранних этапах для оценки трудоёмкости заказа принимается величина M_T , ранее рассчитанная для заказа с близкими характеристиками (тип оснастки, изделие).

В блоке «Выбор срока» к заказам применяется следующее многоступенчатое упорядочение:

- по плановому сроку;
- по обобщённому алгоритму SPT [7] – выбор длительность/приоритет, что соответствует отношению M_T/pr_{ij} ;
- по настройке на заказ (сводной характеристике непосредственно предшествующих работ).

С учётом параллельности работ и неопределённости времени выполнения заказа $M_T \pm 3\sigma$ от текущего момента формируется матрица $T = \|t_{ij}\|$ – оцениваемый срок выпуска «Конструктор» – «Срок из КБ». Итоговое распределение заказов по рабочим местам и порядку выполнения отражается транспонированной матрицей $(R * T)^T$ – «Срок из КБ» – «Заказ». Расхождения планируемого и нормативного сроков выявляются из сравнения матрицы $(R * T)^T$ с матрицей E . Качество расписания оценивается функцией

$$q = \sum_{i=1}^h \sum_{j=1}^m f_{ij} \Delta t_{ij},$$

где h – количество периодов (горизонт) планирования; m – количество заказов, для которых оценивается качество расписания (чаще всего – одновременно запускаемых в работу);

Δt_{ij} – превышение срока исполнения, равное разности элементов матрицы $(R * T)^T$ и матрицы E в случае, если элемент матрицы $(R * T)^T$ больше соответствующего элемента матрицы E , и 0 в противном случае;

f_{ij} – штрафы, значения которых определяются по формуле

$$f_{ij} = k * a_{ij}^k,$$

где k – коэффициент пропорциональности (может быть выбран произвольно из соображений удобства расчёта), a_{ij}^k – элемент матрицы «Срок» – «Изделие», для которого i соответствует плановому сроку данного заказа, j – изделию, к которому заказ отнесён («цветам» фишки).

В случае, если результаты сравнения не удовлетворяют нас, рассматриваются матрицы:

- R – доля времени должна соответствовать приоритету работы, в противном случае конструктора следует проинформировать об изменении порядка работ;
- L – при отсутствии у отдельных конструкторов критичных заказов возможно перераспределение работ

либо принимается административное решение о сдвиге сроков.

5. Приведение в соответствие компонентов модели

Между входами/выходами компонентов модели существует количественная зависимость. Взаимодействие блоков и сети Петри можно представить циклом, приведенным на рисунке 3.



Рис. 3. Приведение в соответствие компонентов модели

Управленческие решения в блоке «Планирование» связаны с принятием заказа подразделением и назначением сроков. На основе данных блока «Планирование» осуществляется распределение количества фишек n , появляющихся в начальной позиции (см. таблицу 2), и такта запуска. Значение n (фактически это среднее количество заказов, поступающих в периоде) устанавливается исходя из длительного обобщения опыта. Такт запуска принимается равным периоду, избранному в матрицах Pr , Pr_e . Далее приобретает значение параметр («цвет») «Плановый срок». Наиболее обоснованным плановым сроком для заказа j будет период i , для которого значение элемента pre_{ij} матрицы Pr_e превышает установленное критическое.

Количество фишек n_i с одинаковым значением «цвета» «Плановый срок» (заказов, которые должны быть выпущены в периоде i) определяется на основе элементов матрицы Pr по формуле:

$$n_i = n * \frac{\sum_j pr_{ij}}{\sum_j^{avg} pr_{ij}},$$

где $\sum_j^{avg} pr_{ij}$ – среднее значение $\sum_j pr_{ij}$ в течение горизонта планирования.

Загруженность периодов, следовательно, может быть различна. Количество фишек с одинаковым значением переменной «тип/описание оснастки» n_{ij} пропорционально значениям строк «Оснастка» матрицы Pr , отражающей соотношение оснастки различных типов в i -том периоде.

$$n_{ij} = n * \frac{pr_{ij}}{n_i}.$$

После разметки фишек срабатывают переходы t_{10} , t_{20} , что соответствует принятию решения о возвращении заказа в цех или о его выполнении. Чем больше соответствующее цвету фишки значение элемента матрицы Pr , тем меньше оснований его отвергнуть. Если же лицо, ответственное за принятие решений, всё же отвергает заказ, должен быть предусмотрен резерв времени на случай, если сходный заказ будет повторно направлен цехом. Аналогичный резерв должен быть предусмотрен, если заказов с каким-либо типом оснастки в реальности недостаточно.

В результате срабатывания перехода t_{10} величины n_i изменяются (уменьшаются) и соответственно корректируется загрузка периодов.

После этого предварительно оценивается критичность заказа – соотношение времени, отводимого на его выполнение до планового срока, и оцениваемой трудоёмкости. Желательно, помимо этого, провести выравнивание загрузки – сдвиг работ с наиболее загруженных периодов на более ранние сроки.

Наконец, ответственным лицом, на основании имеющихся данных о плановых сроках и оцененной трудоёмкости, назначаются точки запуска заказа в работу (они соответствуют временным отметкам фишек). Назначаемый момент запуска должен отстоять от планового срока на время, не меньшее трудоёмкости заказов, приходящейся в среднем на исполнителя.

Для успешного функционирования блока перед его использованием для принятия управленческих решений необходима проверка его адекватности в течение нескольких периодов. При этом распределение заказов, получаемое в виде матрицы Pr_e , сопоставляется с фактическим. Если прогноз о поступлении заказов не оправдывается, возможно рассчитать промежуточные матрицы (см. главу 4), сравнить их с имеющимися отчётами и определить, какая из базовых матриц нуждается в корректировке.

Для блока «Распределение работ» характерна «ручная» корректировка матриц. На основе решения, полученного в блоке, руководитель может изменить план, в том числе назначить заказ исполнителю, для которого назначение, согласно модели, заблокировано (к примеру, для обучения). При каждом назначении заказа исходные матрицы «<характеристика> - конструктор» указанного блока пересчитываются, так как их элементы преимущественно определяются как доля работ определённого

типа в предшествующем опыте конструктора – как в целом, так и в непосредственно приближенные по времени периоды. Изменяется степень владения конструктором инструментами проектирования, специализация, недавно выполненные работы. Исключение сделано для характеристики квалификации. По результатам выполнения распределения фишки размечаются цветом «Исполнитель».

В указанном блоке непосредственно учитывается и величина ν_8 , соответствующая доле времени, затрачиваемой на дополнительные работы. Из главы 3 следует, что эта доля (обозначим её β) равна

$$\beta = \frac{\nu_8}{W} = \frac{\nu_8}{p_1 * n + \nu_8}.$$

Доле дополнительных работ (показателю отклонений и возмущений) придаётся большое значение, так как указанный показатель в основном влияет на эффективность функционирования подразделения. Его рост свидетельствует о неблагоприятном положении подразделения, так как меньшее количество часов затрачивается на основную работу, и соответственно для выполнения работ той же трудоёмкости необходимы или сверхурочные, или более интенсивный труд.

Помимо дополнительных работ, на возможность распределения непосредственно влияет утрата отдельными заказами актуальности (переход t_{70}).

Проверка адекватности решающих матриц в блоке «Выбор срока» выполняется по следующим параметрам: количество фишек, находящихся в позициях, отвечающих различным стадиям выполнения заказа, пропорционально элементам матрицы S ; время прохождения фишек между позициями 4 и 6 сети (см. рис. 2) соответствует M_T .

Исполнение работ предполагает отслеживание их состояния. По результатам пересчитывается матрица V – вероятность проектирования типа оснастки в течение определённого времени, сопоставляются фактический и плановый сроки. При осуществлении контроля над ходом проектирования в зависимости от расхождений элементов матрицы S и количества фишек в позициях вложенной сети может быть определён тип управленческого решения. Условно назовём эти типы:

- *технологическое* (требуются меры по улучшению деятельности рядовых сотрудников) – если происходит задержка проектирования (накапливаются фишки в позиции перед переходом «Непосредственно проектирование завершено»). Наиболее простым оперативным решением является переназначение заказа другому исполнителю, однако при частом возникновении подобной ситуации необходимо обучение сотрудников либо иные меры;
- *организационное* (требует лучшей организации управления на нижнем уровне) – если долго осуществляется проверка (накапливаются фишки в позициях перед переходами «Проверено», «Утверждено»). Возможно, следует скорректировать число конструкторов, непосредственно подчинённых одному бригадирю;
- *административное* (необходим выход управленческой инициативы за пределы подразделения) – если работу задерживают заказчики (накапливаются

фишки в позициях перед переходами «Получена информация от заказчика» или «Согласовано»). Сведения из сети Петри могут быть основой для административных документов (служебных записок и т.п.).

Показатели, по которым приводятся в соответствие блоки и сеть Петри, обобщены в таблице 5.

Таблица 5. Ключевые показатели сверки

Показатели	Сеть Петри	Блоки
Периодичность выполнения алгоритма	Такт запуска фишек	Период матриц Pr (Pr_e)
Срок заказа	Количество фишек с одинаковыми параметром «Плановый срок»	Суммы элементов строки «Срок»
Структура работ	Количество фишек с одинаковым параметром «тип/описание оснастки»	Значения строки матрицы Pr , представляющей конкретный период
Отклонения и возмущения	Встречные потоки (ν_8)	Дополнительные работы
Структура процесса проектирования	Распределение фишек в позициях вложенной сети	Матрица S

Использование указанных показателей позволяет увязать разнородные компоненты в единый комплекс.

6. Заключение

Рассмотренная математическая модель представляет собой гибкий комплекс, позволяющий формировать расписание, корректировать его в случае необходимости, предоставлять информацию для принятия управленческих решений.

Система позволяет обеспечить следующие преимущества:

- адекватно описывать состояние и учитывать неопределенность функционирования предметной области;
- за счёт увязки блоков и сети проводить расчёты с малым количеством данных (учитываются только работы в соответствующей позиции), то есть обеспечивать приемлемую размерность задачи для применения точных методов;
- учитывать связь работ без предварительной кластеризации за счёт использования показателя недавно выполненных работ;

- учитывать психологические особенности труда конструкторов (опыт, настройку на работу);
- быстро формировать отчёты: срез по позициям сети Петри позволяет получить отчёт о движении и готовности работ, а результаты функционирования блоков – об использовании имеющихся ресурсов;
- за счёт многомерного (матричного) представления рассмотреть ситуацию с различных сторон, увязать разнородные показатели, дать комплексное представление о проблеме.

Описанная модель реализована в виде информационной системы на основе баз данных, позволяющей обслуживать потребности непосредственных исполнителей и руководителей низшего уровня (бригадиров, начальников КБ). Для создания информационной системы необходимо разработать структуры данных и алгоритмы их обработки, чему и была посвящена дальнейшая исследовательская работа. В результате реализации разработанной модели

- сокращается суммарная трудоёмкость выполняемых работ за счёт повышения коэффициента наследования работ;
- чётко учитывается приоритет работ, что позволяет обоснованно назначать сроки выполнения заказов, уменьшить «авралы», сверхурочные работы;
- планируется загрузка и соответственно повышается ритмичность и качество работ.

Таким образом, предложенная математическая модель позволяет адекватно распределять и учитывать работы, формировать квазиоптимальное расписание, эффективно поддерживать деятельность подразделения.

Список литературы

1. Питер Друкер. Задачи менеджмента в XXI веке: Электронная библиотека экономической и деловой литературы. — Режим доступа: <http://www.lib.ru>, свободный.
2. Автоматизация управления организацией производства газотурбинных двигателей. Часть вторая / И. Д. Юдин, Т. Д. Кожина и др.; Под общей редакцией Т. Д. Кожиной, И. Д. Юдина. М.: Машиностроение, 2005.
3. Карминский А. М., Черников Б. В. Информационные системы в экономике: в 2-х ч. М.: Финансы и статистика, 2006.
4. Моисеев И. Н. Математика ставит эксперимент. М.: Наука, 1979.
5. Конвей Р. В., Максвелл В. Л., Миллер Л. В. Теория расписаний. М.: Наука, 1975.

6. Rudolph G. Convergence analysis of canonical genetic algorithms // IEEE Transactions on Neural Networks. 1994. Vol. 5. N 1. P. 96-101.
7. Тим Джонс. Программирование искусственного интеллекта в приложениях / Пер. с англ. А. И. Осипов. М.: ДМК - Пресс, 2004.
8. Goldberg D. E. Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning. Reading, MA: Addison-Wesley, 1989.
9. Лазарев А. А., Гафаров Е. Р. Теория расписаний. Минимизация суммарного запаздывания для одного прибора / Вычислительный центр им. А. А. Дородницына, 2006.
10. Прилуцкий М. Х., Власов В. С. Метод комбинирования эвристических алгоритмов для конвейерных задач теории расписаний // Электронный научный журнал «Исследовано в России». 2007. 086. С. 901-905
11. Вишневский К. П., Чижиков В. И. Вероятностный полиномиальный алгоритм для решения NP-полных задач // Труды ФОРА, 2007. № 12. С. 31-37.
12. Методы и средства моделирования бизнес-процессов (обзор) / А. М. Вендров // Информационный бюллетень Jet Info. 2004. № 10. С. 3-32.
13. Репин В. В., Елиферов В. Г. Процессный подход к управлению. Моделирование бизнес-процессов. М.: Стандарты и качество, 2004.
14. Калянов Г. Н. Моделирование, анализ, реорганизация и автоматизация бизнес-процессов: Учеб. пособие. М.: Финансы и статистика, 2007.
15. Вил ван дер Аалст, Кейс Ван Хей Управление потоками работ: модели, методы и системы / пер. с англ. В. А. Башкина, И. А. Ломазовой; Под ред. И. А. Ломазовой. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2007.

A mathematical model of an order management automated system within the process of production technological preparation in aviation enterprisers

Efimova P.E.

Keywords: workflow management system, production technological preparation, Petri nets

The article considers the analysis of an order management automated system used within the process of production technological preparation at the construction department of the tool set design, its conceptual model using Petri nets is formulated, its mathematical model based on matrix method is worked out.

Сведения об авторе:

Ефимова Полина Евгеньевна,

Рыбинская государственная авиационная технологическая академия

имени П.А. Соловьёва, аспирант,

ОАО «НПО Сатурн», инженер-конструктор управления главного технолога