

Создание экспертной системы поддержки технологической подготовки производства для машиностроительных предприятий

© В.А. Шутеев, А.Е. Бром

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Представлены основы создания экспертной системы поддержки подготовки производства с использованием многофакторного подхода к выбору технологического обеспечения производственного процесса для предприятий машиностроительного комплекса с учетом стратегических приоритетов.

Ключевые слова: *экспертная система, подготовка производства, технологическое обеспечение, оснастка, таблица соответствий, режим обработки.*

Одни из главных особенностей машиностроительного производства — многооперационность и большое разнообразие технологических процессов при наличии различного оборудования и оснастки для выполнения определенного типа операций. В рамках технологической подготовки производства любой производственный процесс может быть описан, нормирован и контролируем по трем основным параметрам, влияющим на конкурентоспособность выпускаемых изделий: качество производимой продукции, время выполнения процесса и себестоимость (стоимость) производимой операции (продукции) [1].

В процессе принятия решений по технологической подготовке производства предлагается использовать базу знаний, полученную посредством обработки экспертных мнений группы специалистов-экспертов о функциональных связях между исходными данными и возможными решениями о выборе оборудования.

Для заполнения базы знаний предлагается использовать метод парных сравнений, позволяющий наиболее точным и простым способом выявить мнения экспертов по поводу каждого из рассматриваемых объектов. Объектами оценки являются технологии, приоритеты характеристик заказа и технологических параметров.

Важность каждого технологического параметра или характеристики заказа для производственного предприятия может быть задана вектором приоритета. Его компонентами являются коды факторов, которые наиболее важны в рассматриваемом случае. Порядок расположения компонент соответствует последовательности приоритетов факторов для производителя продукции (первая компонента — код параметра или фактора, который является первичным/важнейшим при выборе технологии обработки, вто-

рая компонента — код параметра или фактора, который будет влиять на выбор технологии во вторую очередь, и т.д.) [2].

Вектор приоритета может быть построен на весь период планируемого производства или на некоторые промежутки времени (например, рабочие смены). Кроме того, в отдельных случаях вектор приоритета может строиться специально для конкретных уникальных заказов.

Блок-схема алгоритма метода формирования приоритетов производственного предприятия представлена на рис. 1.

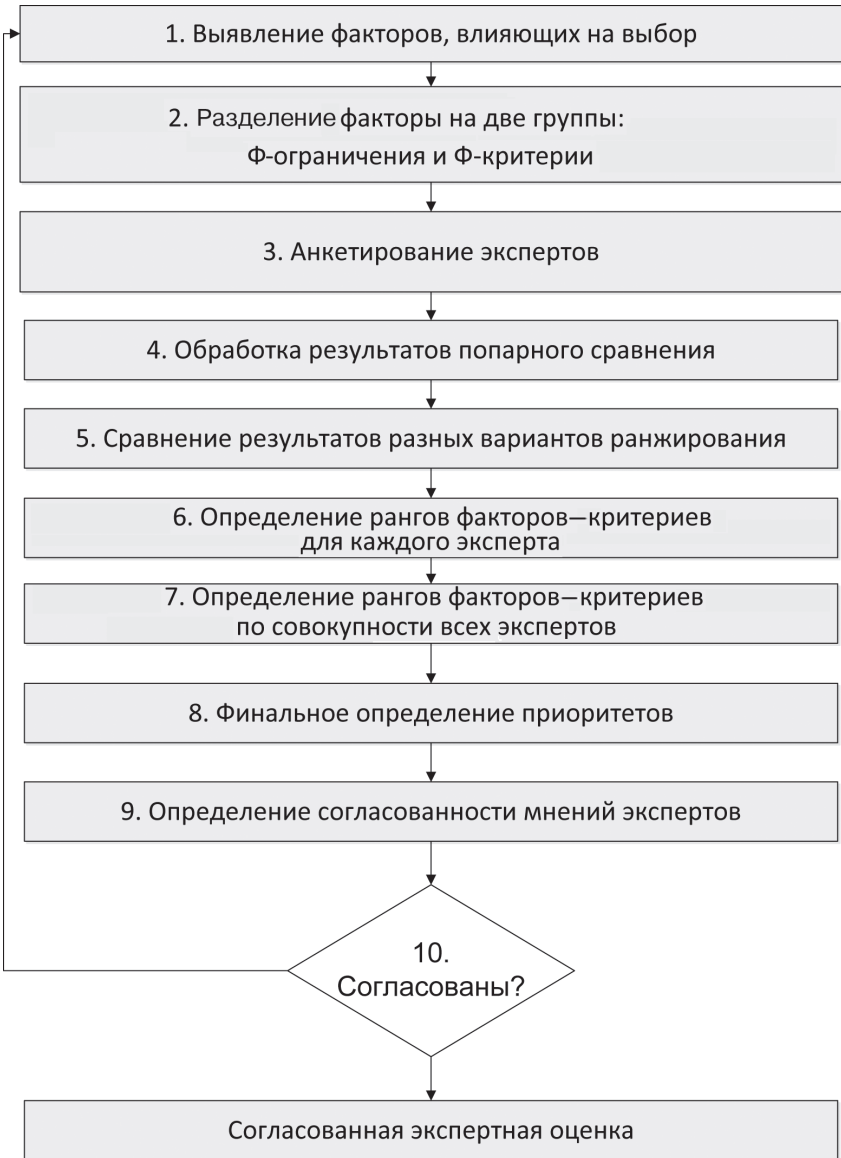


Рис. 1. Блок-схема алгоритма метода формирования приоритетов производственного предприятия

Для осуществления шага 9 (определение согласованности мнений экспертов) определяется коэффициент корреляции Кендалла (Kendall tau rank correlation coefficient) — мера линейной связи между случайными величинами.

$$W = \frac{12}{k^2(n^3 - n)} \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^k R_{ij} - \frac{k(n+1)}{2} \right)^2,$$

где $R_{ij} \in \{1, \dots, n\}$ — ранг i -го элемента в j выборке, k — количество экспертов, а n — количество рассматриваемых технологий, или технологических режимов, для которых определяются экспертные оценки.

Экспертные мнения группы специалистов-экспертов о функциональных связях между исходными данными и возможными решениями представлены в виде плоских реляционных таблиц, или таблиц соответствия, так как они представляют связи между множествами, известные в теории множеств как соответствия [3]. Таблица такого вида позволяет простым образом отображать большое количество сложных данных, описывающих разные характеристики, в компактном виде. Назначение таблиц соответствий заключается в выборе оптимального варианта из нескольких возможных. Ниже представлена структура такой таблицы (рис. 2).

	Множество условий $X = \{X_1, X_2, \dots, X_N\}$ — вектор входных параметров
Множество возможных решений $Y = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_M\}$ — вектор выходных параметров	Связь между условиями и решениями (матрица соответствий)

Рис. 2. Структура таблицы соответствия

В таблице соответствий (ТС) имеются три области разного вида и функций. В левой части таблицы представлено множество возможных решений. Для выбора оптимальной технологии выполнения заданной технологической операции множество возможных решений является множеством технологий; например, для задачи резания материалов существует множество технологических решений: лазерная, плазменная, гидроабразивная, механическая резка. Каждая строка таблицы будет соответствовать одной определенной технологии.

В правой верхней части таблицы соответствий находится множество условий, представляющее различные характеристики обрабатываемого материала и получаемого изделия, влияющие на выбор решения. Примером таких характеристик могут быть: тип материала, толщина материала, качество получаемого изделия. Для вышеуказанных характеристик представлены возмож-

ные значения, которые могут принимать данные характеристики, сгруппированные рациональным образом. Для качественной характеристики примерами групп значений могут быть тип материала — сталь, дерево, резина, а для числовой характеристики — интервалы значений, например, толщины: менее 5 мм; от 5 до 20 мм; от 20 до 200 мм; более 200 мм. Для выбора оптимальной технологии примером множества условий могут служить: тип материала (сталь, дерево, резина), свойства материала (взрывоопасно, пожароопасно, непожароопасно), толщина материала (множество интервалов толщин материалов), качество получаемого изделия (множество числовых параметров шероховатости получаемого изделия). Каждый столбец таблицы будет соответствовать одному определенному качественному или числовому значению характеристики, описывающей обрабатываемый материал или получаемое изделие.

В центральной части таблицы — матрице соответствий с помощью числовых значений отмечают наличие связей между значениями условий и решениями. Если связь существует, то в пересечении столбца и строки будет стоять численное значение, в противном случае значение будет отсутствовать. Каждая строка ТС соответствует одной из альтернативных технологий, рассматриваемых в задаче; столбцы соответствуют группам характеристик обрабатываемого материала или получаемого изделия. Если для какого-то значения признака X_i существует решение из множества Y , то клетка ТС в пересечении соответствующих столбца и строки заштриховывается. Поле таблицы с заштрихованными и незаштрихованными клетками называется ее графиком G и представляет существующие связи между множеством исходных данных для проектирования X и множеством возможных решений Y . Возможные решения представляют пересечения этих множеств.

Поскольку при одних и тех же исходных данных может существовать несколько альтернативных решений, то вводится понятие об эффективности каждого из них, которая определяется группой экспертов по специальной методике и обозначается баллами эффективности. Эти баллы определяются для каждого сочетания значений исходных данных. Решение заносится в таблицу в соответствующую клетку графика. Баллы являются безразмерными величинами, показывающими, насколько эффективно данная технология применима при указанных исходных данных. Значения полей таблицы принимают значения в отрезке $[0, 1]$, где 1 означает наиболее эффективное решение на данный момент, а 0 означает неприменимость рассматриваемой технологии для решения данной задачи.

Выбор технологий на основе ТС осуществляется следующим образом. На основе графика G выбираются те технологии, которые удовлетворяют основным требованиям на обработку. Для этого пересечения строк данных технологий со столбцами, обозначающими

параметры текущего материала, должны быть заштрихованы и иметь числовое значение. Далее на основе значений в пересечении строк и столбцов и весовых коэффициентов, определенных экспертным методом, для каждого решения определяется балл g_y^{cp} (как комбинация значений соответствующих клеток ТС и коэффициентов приоритета характеристик заказа, определенного экспертным методом):

$$g_y^{\text{cp}} = \sum_{i=1}^T v_{iy} \lambda_i \varepsilon_{iy},$$

где v_{iy} — значение поля таблицы, λ_i — коэффициент приоритета соответствующей характеристики заказа, ε_{iy} — булева переменная соответствующей характеристики заказа (принимает значение 1 в случае, если значение характеристики обрабатываемого материала или выходного изделия принадлежит i -й группе этих характеристик, и 0 в обратном случае), T — число условий в матрице соответствия.

При наличии нескольких возможных альтернативных решений из них выбирается имеющее наибольший балл эффективности g_y^{cp} . Таким образом предварительно выбирается технология для выполнения заданной технологической операции. Остальные технологии ранжируются по значению g_y^{cp} . К этому моменту из всего количества технологий определены те, которые могут быть использованы при данных начальных условиях и ранжированы (поставлены в последовательность) по значению g_y^{cp} .

Далее на основе предложенного подхода можно обеспечить выбор режимов обработки.

Для выбора режима обработки используется следующий подход к построению ТС. Поскольку известны требуемые параметры получаемого изделия, а также параметры по каждому режиму обработки, то можно определить для каждого режима его соответствие заданным параметрам. Соотношение задается отношением требуемого значения параметра к тому, который может быть обеспечен данным режимом обработки. Данное значение может быть больше 1, если улучшение значения выражается в минимизации значения числового параметра. Для каждого режима обработки определяется средний балл z_y^{cp} :

$$z_y^{\text{cp}} = \sum_{i=1}^M v_{iy} \lambda_i \varepsilon_{iy},$$

где λ_i — коэффициент приоритета соответствующего технологического параметра, M — число строк матрицы соответствия — количество рассматриваемых режимов обработки.

Из всех возможных альтернативных решений выбирается решение, имеющее наибольший балл эффективности z_y^{cp} . Остальные ранжируются по значению z_y^{cp} . Таким образом определяются оптимальная технология и режим обработки для выполнения заданной технологической операции.

Данный подход применим для каждой технологической операции в рамках технологического процесса. Как было показано выше, выбор технологии обработки и режима обработки для выполнения технологической операции осуществляется на основе анализа экспертных данных по технологиям, теоретических зависимостей и эмпирических данных по режимам обработки, приоритетов характеристик заказа и приоритетов технологических параметров. Решение определяется на основе максимального значения балла эффективности. Поэтому выбор технологий может отличаться у двух производственных предприятий при поступлении идентичных заказов, если значения приоритетов различны. Изменение данных коэффициентов будет напрямую отражаться на значениях g_y^{cp} и z_y^{cp} и в порядке (последовательности) применимости технологического оборудования.

Необходимо отметить, что экспертным методом должны определяться не только характеристики технологий (например, невозможность использования для пожароопасных материалов), но и приоритеты каждого из параметров, рассматриваемых при решении задачи. Приоритеты характеристик заказов определяются на основе выбранной стратегии развития предприятия и текущей ситуацией (специфики заказа), а отвечают за их значения сотрудники планового отдела и руководство компании. Приоритеты технологических параметров определяются инженерами-технологами на основе требований к выполнению заказа (требования к каждой технологической операции) и стратегических приоритетов (приоритетов технологических параметров). Задание указанных приоритетов определит получаемые решения.

Значения клеток в таблице соответствия типа «Параметр изделия» — «Режим обработки» определяются следующим образом:

$$v_{iy} = \frac{v_i^N}{v_i^y},$$

где v_i^N — оптимальное значение параметра обработки i для данной технологической операции, v_i^y — значение параметра обработки i режима обработки y для данной технологической операции. Таким образом, значение v_{iy} всегда положительное и может

быть как больше, так и меньше 1. Значение $v_{iy} > 1$ будет говорить о том, что текущий режим обработки не может обеспечить заданное значение параметра, а при $v_{iy} < 1$, наоборот, даже превосходит его.

В зависимости от рассматриваемого технологического параметра оптимальное значение может быть $\min_{j=1..M}(v_{ij})$, или, наоборот, $\max_{j=1..M}(v_{ij})$. Примером первого случая служит такой параметр, как удельная себестоимость резания, руб./м². Примером второго — скорость резания, м/с. Соответственно, при вычислении суммарной «эффективности» технологии в линейной комбинации значений технологий и приоритетов характеристик заказов/технологических параметров может стоять как прямое значение $v_{iy}\lambda_i$, так и обратное $\lambda_i \frac{1}{v_{iy}}$, где λ_i — коэффициент приоритета соответствующего технологического параметра или характеристики заказа, а v_{iy} — значение, указанное в соответствующей клетке таблицы соответствия.

Ниже приведем пример определения g_y^{cp} для таблицы соответствия, представленной на рис. 3. Данный пример иллюстрирует выбор различных технологий в зависимости от значений приоритетов характеристик заказа.

	Условие 1			Условие 2				
	1	2	3	1	2	3	4	5
Технология 1	0,1	0,8	0,8		0,2	0,1		
Технология 2	0,9			0,1	0,39	0,53	0,17	
Технология 3	0,15	0,3	0,6			0,41	0,28	0,35
Технология 4	0,25	0,9						0,43

Рис. 3. Пример таблицы соответствий для заданной технологической операции

Необходимо выбрать технологии для технологической операции, которая характеризуется тем, что значение условия 1 попадет в группу 2, а значение условия 2 — в группу 3.

Как видно из таблицы, по графику G для данного заказа существует два решения: технология 1 и технология 3.

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 1.$$

Рассмотрим два варианта значений приоритетов характеристик заказа.

1. Приоритет условия 1 равен 1, а приоритет условия 2 равен 2.

$$\lambda_1 = 1, \quad \lambda_2 = 2.$$

Вычислим значение балла эффективности для каждой из технологий:

$$g_1^{\text{cp}} = \sum_{i=1}^2 v_{i1} \lambda_i \varepsilon_i = 0,8 \cdot 1 \cdot 1 + 0,1 \cdot 2 \cdot 1 = 1,$$

$$g_3^{\text{cp}} = \sum_{i=1}^2 v_{i3} \lambda_i \varepsilon_i = 0,3 \cdot 1 \cdot 1 + 0,41 \cdot 2 \cdot 1 = 1,12.$$

Соответственно, осуществляется выбор технологии 3 для выполнения заданной технологической операции.

2. Приоритеты условий 1 и 2 равнозначны, т.е. $\lambda_1 = \lambda_2 = 1$. Вычислим значение балла эффективности для каждой из технологий:

$$g_1^{\text{cp}} = \sum_{i=1}^2 v_{i1} \lambda_i \varepsilon_i = 0,8 \cdot 1 \cdot 1 + 0,1 \cdot 1 \cdot 1 = 0,9,$$

$$g_3^{\text{cp}} = \sum_{i=1}^2 v_{i3} \lambda_i \varepsilon_i = 0,3 \cdot 1 \cdot 1 + 0,41 \cdot 1 \cdot 1 = 0,71.$$

Соответственно, осуществляется выбор технологии 1 для выполнения заданной технологической операции.

Аналогично рассматривается таблица соответствий режимов обработки победившей технологии и определяется наиболее оптимальный режим для осуществления выбранной технологической операции.

Поддержка принятия решений по выбору технологического обеспечения производства должна осуществляться в автоматическом режиме, что позволит наиболее быстрым и эффективным способом выбирать такое оборудование из множества наличного для выполнения заказов, которое позволит достигать стратегических целей, поставленных руководством предприятия.

Это должна быть информационная система (ИС), включающая такую информацию, как потребности заказчика, список существующих технологий на сегодняшний день, набор всех режимов обработки для каждой технологии, знания экспертов об эффективности обработки материалов по различным критериям, стратегические приоритеты предприятия и пр. Класс таких ИС, позволяющий осуществлять принятие решения с учетом суждений экспертов, называется экспертными системами.

Экспертная система, прежде всего — это ее участники и информационные потоки между ними. На рис. 4 показаны основные участники ЭС.

Заказчик полуфабрикатов, деталей и узлов — предприятие, имеющее потребность в получении определенного вида изделия, с известными и формализованными требуемыми характеристиками, являющееся заказчиком продукции.

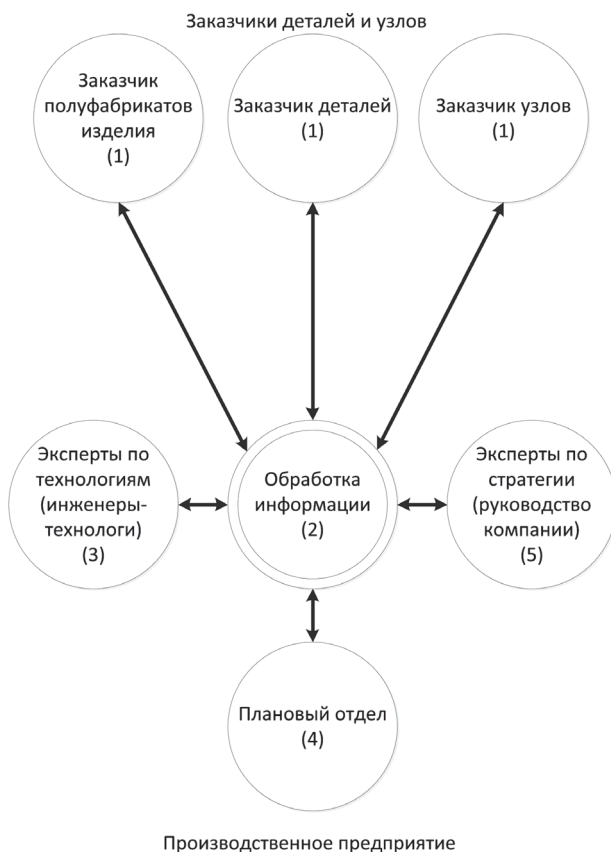


Рис. 4. Экспертная система: участники и информационные каналы между ними

Эксперты по технологиям — множество экспертов-инженеров и технологов, имеющих специальные знания по различным технологиям обработки. Их задача — формализация своих знаний, оценка существующих технологий и их применимости.

Эксперты по стратегии — руководство компании-производителя. Их задачей является определение текущих приоритетов компании, степени доминирования одних целей над другими, что отражается на приоритетах производства.

Плановый отдел — группа специалистов, отвечающих за процессы производства и его контроль. Их задача в рамках ЭС — обеспечение своевременной информацией о загрузке оборудования, существующих планах производства, последовательности запуска изделий в производство и т.д.

Обработка информации — точка сбора и анализа поступающей информации от всех участников ЭС. Задачей является формирование приемлемых решений на базе текущих ресурсов и существующих ограничений. Это модуль ИС, осуществляющий обработку всей входящей информации и формирующий оптимальное решение.

Опишем характер и структуру каждого информационного потока.

1—2: формализованный заказ на производство изделия с определенными параметрами качества, сроком исполнения заказа, стоимостью и другими характеристиками желаемого изделия.

2—1: в случае возможности выполнения заказа при заданных заказчиком условиях и ограничениях предлагается подтвердить полученное решение для отправки заказа на исполнение. В противном случае предлагается несколько вариантов решений, которые могут быть приемлемы при снятии некоторых ограничений. Если решения приемлемы, предлагается подтвердить одно из них.

2—3: запрос формализованных экспертных оценок и матрицы соответствия для различных альтернативных технологий выполнения определенной операции, на основе которых может быть осуществлен выбор альтернативы.

3—2: запрос формализованных экспертных оценок и матрицы соответствия для альтернативных технологий обработки.

2—4: запрос списка оборудования в наличии и графика его загрузки; запрос производственных планов и информации об обязательствах перед другими заказчиками.

4—2: передача производственных планов и информации о доступности оборудования, об обязательствах перед всеми заказчиками.

2—5: запрос текущих приоритетов руководства предприятия для осуществления расчетов и принятия решений в соответствии с ними

5—2: передача формализованных значений приоритетов при построении производственного плана и технологического цикла.

Функциональная схема ЭС приведена на рис. 5.



Рис. 5. Функциональная схема экспертной системы и необходимая информация для принятия решений

Рассмотрим блоки ЭС на данной схеме.

Блок «Получение заказа на производство продукции» отражает внешний спрос на производство продукции предприятия машиностроения, выраженный в поступлении заказа.

Блок «Формализация требований заказчика» переводит требования заказчика к изделию в понятную экспертной системе форму.

Блок «Предварительный отбор технологий, отвечающих требованиям заказчика, для последующего построения решения» определяет множества технологий, которые могут быть использованы для построения оптимального решения.

Блок «Построение приоритетной очереди технологий и технологических режимов обработки» на основе заданных приоритетов определяет наиболее предпочтительные технологии для реализации заказа.

Блок «Построение решений осуществления производственного процесса с помощью технологических альтернатив» — это построение нескольких допустимых решений, которые удовлетворяют требованиям на производство и при этом не нарушают существующие ограничения.

Блок «Проверка возможности осуществления построенных решений, их адаптация к текущим условиям» представляет собой анализ возможности осуществления полученных решений с учетом уже существующих планов производства, загрузки оборудования и приоритетов предприятия-производителя. При отсутствии допустимых решений изменяются приоритеты, граничные условия, и осуществляется попытка найти решения, которые будут близки к граничным.

Блок «Определение приоритетов технических параметров инженерами-технологами» — это определение приоритетов для выбора режима обработки, обеспечивающего наилучшее решение поставленной задачи.

В блоке «Решение задачи осуществления производственного заказа» находится решение для задачи выполнения поступившего заказа с учетом приоритетов производства и требований заказчика к производству изделия.

Предложенный метод позволяет с учетом технологической вариативности на производстве предложить оборудование, позволяющее максимизировать полезность при выполнении данного заказа.

В то же время предприятие может получать ряд заказов, конкурирующих между собой, каждый из которых необходимо оценить, спланировать его выполнение и реализовать (выполнить). Другими словами, при ограниченных производственных ресурсах необходимо таким образом спланировать выполнение заказов, чтобы функция полезности была максимальна. Таким образом формули-

руется задача синхронизации динамики спроса с производственными процессами на предприятии.

Для синхронизации динамики спроса с производственными процессами на предприятии часто нужно определить целесообразность и очередность выполнения поступающих заказов через составление портфеля заказов, производство которых будет осуществлено. В ситуации, когда необходимо выполнить максимальное количество заказов при ограничениях в производственных мощностях, требуется получить механизм оценки приоритета каждого из заказов и выбора наиболее важных (или ценных) в данной ситуации в конкретный момент времени. Интересным и перспективным подходом к решению данной задачи является использование моделей неопределенностей, построенных для определенных областей использования. Модель, использующая данные о распределении вероятностей, представлена ниже. К авторам: где модель?

Существуют математические методы решения данных задач, методы оптимизации. В нашем случае требуется обеспечить эффективное принятие решений по определению приоритетов поступающих заказов и выбору очередности их выполнения на производстве в режиме реального времени, из-за специфики решаемой задачи.

Будем называть поступающие заказы на производство запросами на производство изделий. Необходимо отметить, что в данной задаче существуют неопределенность и изменчивость в поступлении новых запросов на каждом следующем временном шаге и отсутствует информация о возможности их поступления на предыдущих шагах.

Поступление запросов характеризуется случайными процессами, и на каждом временном шаге (в случае, когда время рассматривается дискретно) поступают новые запросы. Идея состоит в том, что при определении приоритета запросов и выбора наиболее ценных на данный момент учитываются не только существующие запросы, но и те, которые должны поступить на следующих шагах. Из-за введения этих «дополнительных запросов» приоритеты могут измениться, что позволит улучшить алгоритм принятия решений. Модели неопределенностей могут быть известны для конкретных областей применения и описаны с помощью, например, скрытых Марковских процессов (Hidden Markov model).

Суть задачи сводится к составлению расписания выполнения запросов, т.е. соответствия запросов каждому моменту времени. Для данной задачи определяется горизонт планирования — временной отрезок, для которого создается расписание. Далее будем обозначать его как H . Существует множество запросов R

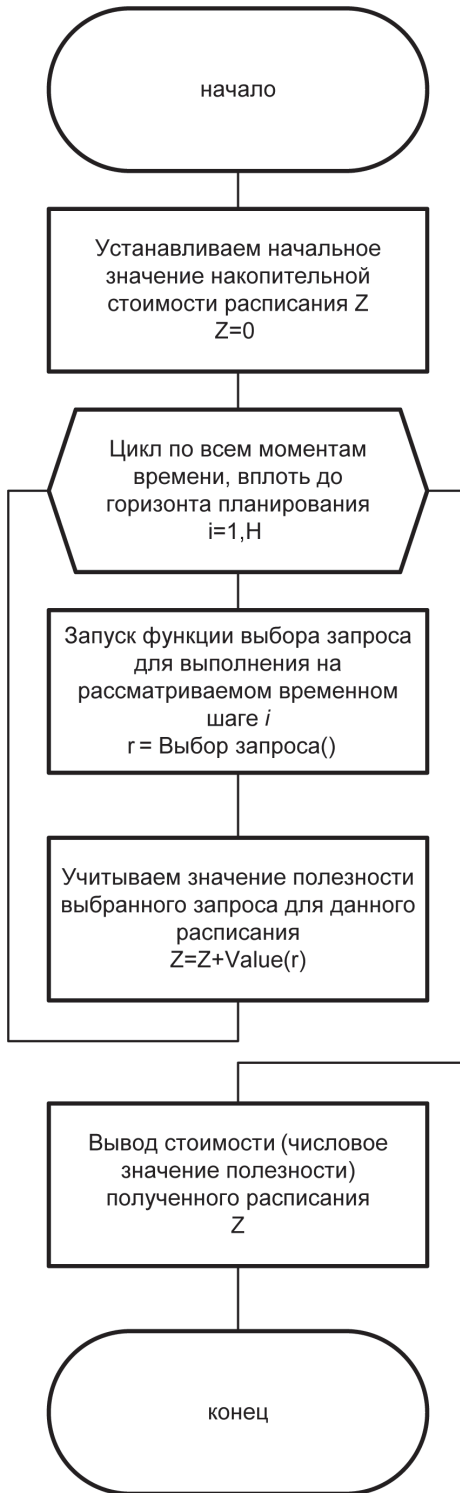


Рис. 6. Блок-схема алгоритма стохастической оптимизации в режиме реального времени

($r \in R$), каждый из которых обладает следующими характеристиками: время поступления и ценность для системы или награда, которую можно получить при обработке данного запроса. Значение награды будем определять как $w(r) \geq 0$. Время прибытия — $a(r) > 0$. Без введения функции награды невозможно построить метод оптимизации. Таким образом, задача состоит в том, чтобы выстроить соответствие каждому моменту времени ($t \in H$) запроса ($r \in R$) так, чтобы при этом сумма значений функций наград запросов, входящих в расписание, была максимально возможной. Другими словами, необходимо максимизировать функцию, где w — функция представления ценности запроса в решении P в момент t :

$$w(P) = \sum_{t \in H} w(P(t)).$$

Также налагаем условие на соблюдение существующих ограничений для каждого запроса. Такими условиями могут быть необходимость обработки запроса до истечения определенного промежутка времени (время актуальности запроса, по истечении которого он теряется), соблюдение очередности обработки групп запросов (например, когда запросы в определенной группе должны быть обработаны строго поочередно, без возможности попутной обработки других запросов, или в случае, когда один запрос должен быть обработан строго раньше другого).

Задача выбора запросов для выполнения из множества существующих в режиме реального времени усложняется тем, что запросы не известны заранее и информация о них появляется только во время их поступления. Задача формулируется так же, как предыдущая — максимизация суммы значений функции полезности для всего набора значений вплоть до шага H , ограничивающего поиск решений.

Общий алгоритм оптимизации в реальном времени может быть представлен следующим образом (рис. 6). Ключевая идея алгоритма стохастической оптимизации состоит в том, что можно использовать информацию о неопределенностях для того, чтобы улучшить эффективность алгоритма принятия решений. При составлении расписания будут учитываться запросы, поступление которых вероятно на следующих временных шагах.

Представленный в статье подход позволяет осуществлять выбор технологического обеспечения для заданных технологических операций и требований к изделию на основе экспертной системы знаний по технологиям и формированию приоритетов, определяемых портфелем заказов и стратегией развития производственного предприятия.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Кузнецов В.А., Черепахин А.А., Колтунов И.И., Пыжов В.В. *Технологические процессы машиностроительного производства*. Москва, Форум, 2010, 528 с.
- [2] Бром А.Е., Шутеев В.А. Многофакторный подход к выбору технологического обеспечения производственного процесса для предприятий машиностроительного комплекса. *Известия вузов. Сер. Машиностроение*, 2012, № 12, с. 75—80.
- [3] Новиков Д.А. *Теория управления организационными системами*. 2-е изд. Москва, Физматлит, 2007, 584 с.

Статья поступила в редакцию 18.10.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Шутеев В.А., Бром А.Е. Создание экспертной системы поддержки технологической подготовки производства для машиностроительных предприятий. *Гуманитарный вестник*, 2013, вып. 10. URL: <http://hmbul.bmstu.ru/catalog/econom/log/116.html>

Шутеев Вячеслав Андреевич — ассистент кафедры «Промышленная логистика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: ibm3@ibm.bmstu.ru

Бром Алла Ефимовна — д-р техн. наук, профессор кафедры «Промышленная логистика» МГТУ им. Н.Э. Баумана.