

УДК 658.5.012+122.011.56

ББК 22.193

СОВРЕМЕННЫЕ МЕХАНИЗМЫ И ИНСТРУМЕНТЫ УПРАВЛЕНИЯ БОЛЬШИМИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМИ СИСТЕМАМИ¹

Федосеев С. А.², Гитман М. Б.³, Столбов В. Ю.⁴
(Пермский государственный технический университет,
Пермь)

Проведен обзор современных механизмов управления сложными производственными системами и приведены некоторые примеры их реализации в условиях заданной иерархии принятия решений при нечеткой и/или неполной информации о состоянии системы и требованиях внешних и внутренних потребителей.

Ключевые слова: производственная система, механизмы и инструменты управления, интеллектуальные элементы, коллективное принятие решений.

1. Введение

Современное производственное предприятие может быть рассмотрено как большая сложная система (*производственная система*), представляющая собой совокупность иерархии целей, иерархии принятия решений и иерархии технологий (*внутренние иерархии*).

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №10-08-00539-а).

² Сергей Анатольевич Федосеев, кандидат физико-математических наук, доцент (fsa@gelicon.biz).

³ Михаил Борисович Гитман, доктор физико-математических наук, профессор (gmb@matmod.pstu.ac.ru).

⁴ Валерий Юрьевич Столбов, доктор технических наук, профессор (svu@matmod.pstu.ac.ru).

Следуя идеям работы [2], под *большой системой* будем понимать совокупность большого числа иерархически связанных сложных систем, состоящих из социальных (групп людей) и технических элементов (машин, агрегатов и технических устройств), обладающих определенной степенью организованности и автономности, объединенных между собой согласно принятой иерархии целей средствами организации и различными связями (энергетическими, материальными, информационными) для обеспечения целенаправленного функционирования всей системы как единого целого.

В соответствии с классификацией систем, предложенной в работе [10], под *сложной системой* будем понимать систему, в модели которой не хватает информации для эффективного управления.

Окружающей средой для производственной системы являются рынки продукции, сырья, труда и инноваций (см. рис. 1). Производственная система взаимодействует с этими рынками, обмениваясь информацией, материальными и трудовыми ресурсами. В общем случае такое взаимодействие можно представить в виде сетевой модели некоторой большой социально-технической системы с быстроменяющимися состояниями отдельных ее элементов и подсистем. При этом производственная система вынуждена постоянно адаптироваться к тем изменениям, которые приходят на рынках, путем модификации и развития своих внутренних иерархий.

Без учета взаимодействия с окружающей средой производственная система может быть рассмотрена как *организационная система* [8], объединяющая людей, совместно реализующих некоторую программу или цель и действующих на основе определенных процедур и правил. С учетом взаимодействия с окружающей средой производственная система может быть рассмотрена как частный случай *большой социально-технической системы*, учитывающий интересы и тех людей (социальных групп), которые находятся вовне этой системы, например, потребителей продукции.

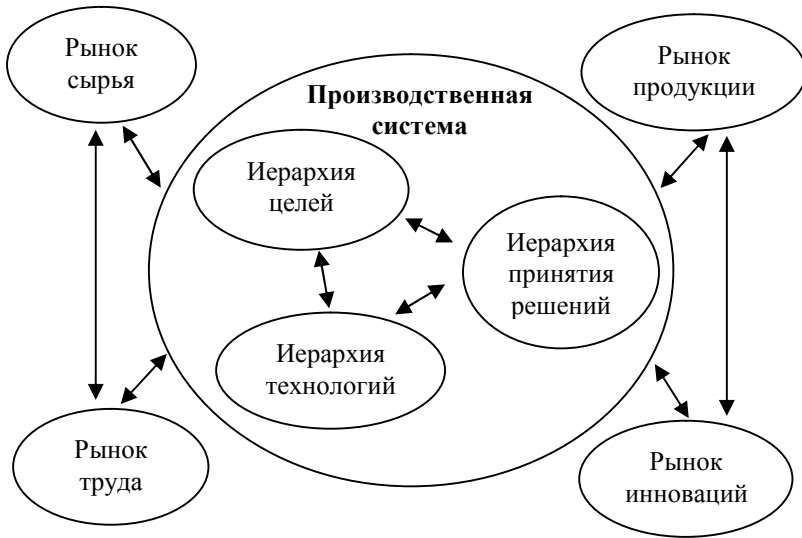


Рис. 1. Структурная модель большой производственной системы

Управление производственными системами связано со значительными сложностями, вызванными неполнотой информации, конфликтами интересов, быстрыми и многочисленными изменениями в окружающей среде.

Для преодоления этих сложностей могут быть использованы различные механизмы и инструменты управления. Согласно [8] под *механизмами управления* будем понимать совокупности процедур принятия управленческих решений. Под *инструментами управления* будем понимать математические и информационные модели, реализующие или поддерживающие соответствующие механизмы управления.

К современным механизмам управления производственными системами можно отнести следующие:

- информатизация управления;
- интеллектуализации управления;
- дальновидная адаптация;

- оптимизация производственного планирования;
- коллективное принятие управленческих решений.

Рассмотрим перечисленные механизмы и реализующие их модели в порядке разрешения тех сложностей управления производственными системами, о которых говорилось выше.

2. Информатизация управления

Проблема неполноты информации, необходимой для принятия эффективных управленческих решений в производственных системах, связана с различными видами неопределенности: объективной и субъективной, внутренней и внешней [8]. В частности, субъективная внутренняя неопределенность связана с неполнотой информации об иерархиях целей и технологий, а объективная внешняя неопределенность связана с неполнотой информации об окружающей среде. Для преодоления всех этих видов неопределенности в современных производственных системах используются разнообразные методологии описательного моделирования и информационные технологии.

Информатизация управления производственными системами, как правило, начинается с описания их бизнес-процессов. Для этого используются разнообразные методологии такие, как *SADT*, *ARIS*, *BPMN* и другие. По существу данные методологии с помощью различных нотаций позволяют создавать описательные модели производственных систем, отображающие:

- функции, которые система должна выполнять;
- процессы, обеспечивающие выполнение указанных функций;
- данные, необходимые при выполнении функций, и отношения между этими данными;
- организационные структуры, обеспечивающие выполнение функций;
- материальные и информационные потоки, возникающие в ходе выполнения функций.

Следующий этап информатизации управления производственными системами обычно заключается в автоматизации описанных на первом этапе бизнес-процессов на базе одной из

существующих *ERP*-систем, таких как *SAP Business Suite*, *Oracle E-Business Suite*, *IFS Applications*, *BAAN*, 1С:Предприятие, Галактика, Капитал *CSE* и т.п. По существу основное предназначение любой *ERP*-системы – это сбор, хранение и обработка информации для руководителей функциональных подразделений предприятия, осуществляющих:

- управление сбытом;
- управление производством;
- управление снабжением;
- управление запасами;
- управление персоналом;
- управление финансами.

Вместо *ERP*-системы или параллельно с ней для автоматизации отдельных бизнес-процессов или функций на предприятиях могут быть использованы следующие системы:

- *CRM* – системы управления взаимоотношениями с клиентами;
- *MES* – системы оперативного (цехового) управления производством;
- *SCM* – системы управления цепочками поставок;
- *WMS* – системы управления складами;
- *HRM* – система управления персоналом;
- *PLM* – системы управления жизненным циклом изделий;
- *EAM* – системы управления основными фондами предприятия;
- *CMMS* – системы управления техническим обслуживанием;
- *ECM* – системы управления информационными ресурсами.

Схема возможного взаимодействия основных модулей информационной системы управления предприятием представлена на рис. 2.

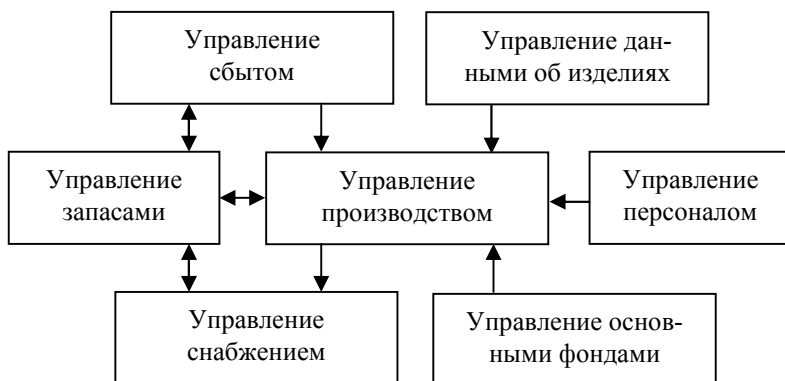


Рис.2. Взаимодействие модулей информационной системы управления предприятием

Для того чтобы выбрать необходимую для данного производства информационную систему (или совокупность систем) и осуществить автоматизацию управления производственной системой, требуется значительное количество информации о предприятии и технологии производства продукции, в частности:

- данные о готовой продукции, комплектующих, сырье и материалах;
- данные о спецификациях изделий;
- данные о технологических маршрутах;
- данные об оборудовании;
- данные о территориальной структуре предприятия;
- данные об организационной структуре предприятия.

Показательной в данном контексте является задача формирования оптимального плана производства под спрос, рассмотренная в работе [5]. С одной стороны, данная задача решается классическим методом линейного программирования, поэтому с математической точки зрения является относительно несложной. Однако, с другой стороны, решение подобных задач на практике сопряжено со значительными трудностями, вызванными необходимостью сбора большого количества информации

обо всех ограничениях на ресурсы предприятия, которые необходимо учесть. Так, если имеется N групп готовой продукции, M типов оборудования и K отслеживаемых материалов, то для решения задачи формирования оптимального плана производства под спрос необходимо знать:

- потребность в мощностях каждого типа оборудования на единицу готового изделия для всех групп готовой продукции R_{ji} , $j = 1, 2, \dots, M$, $i = 1, 2, \dots, N$, задаваемую на основе технологических маршрутов производства (модуль «Управление данными об изделиях»);

- потребность в ключевых материалах на единицу готового изделия для всех групп готовой продукции S_{ki} , $k = 1, 2, \dots, K$, $i = 1, 2, \dots, N$, задаваемую на основе спецификации изделий (модуль «Управление данными об изделиях»);

- общий ресурс в мощностях для каждого типа оборудования P_j , $j = 1, 2, \dots, M$, найденный из расчета средней производительности по всему оборудованию данного типа либо с применением различных эвристик, позволяющих более точно оценить этот показатель (модуль «Управление основными фондами»);

- объем доступных ключевых материалов T_k , $k = 1, 2, \dots, K$, определенный на основе данных о состоянии склада и плана закупок (модули «Управление запасами» и «Управление снабжением»);

- ограничение по рынку сбыта для групп готовой продукции G_i , $i = 1, 2, \dots, N$. Данное ограничение поступает из отдела маркетинга, который его формирует на основании прошлого опыта и анализа текущего состояния рынка сбыта продукции (модуль «Управление сбытом»).

Следует отметить, что на практике порядок величин N , M и K может колебаться в широких пределах от 10^2 до 10^4 . Поэтому без наличия современной информационной системы управления производством для большого предприятия невозможно решать задачи планирования и управления в реальном времени.

Математическая постановка данной задачи оптимизации запишется в следующем виде: найти: такой оптимальный вектор $x \in R^N$, который доставляет максимум критерию оптимальности

$$(1) \sum_i C_i x_i \rightarrow \max$$

при ограничениях на трудоемкость, материалы и продажу готовой продукции

$$(2) \sum_i R_{ij} x_i \leq P_j, \quad j = \overline{1, M},$$

$$(3) \sum_i S_{ki} x_i \leq T_k, \quad k = \overline{1, K},$$

$$(4) \sum_i \alpha_i^q x_i \leq G_q, \quad q = \overline{1, Q},$$

где

$$\alpha_i^q = \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-ый ПГ принадлежит совокупности } q, \\ 0, & \text{если } i\text{-ый ПГ не принадлежит совокупности } q; \end{cases}$$

$$(5) x_i \geq 0, \quad i = \overline{1, N}.$$

Задача (1)–(5) является многопараметрической однокритериальной задачей линейного программирования. Для ее решения может быть использован модифицированный симплекс-метод. Решением задачи является оптимальный вектор x , компоненты которого определяют оптимальные объемы выпуска изделий i -ой номенклатуры.

Для решения задач формирования оптимального плана производства с использованием разработанной модели была написана программа-решатель. Решатель реализует описанный выше метод решения задачи линейного программирования. На основе данного решателя было проведено тестирование как самого метода, заложенного в решатель, так и рассматриваемой модели формирования оптимального объемного плана производства.

Тестовая задача решалась на данных ООО «Рыбинскабель» с помощью ИС «Капитал-CSE». Для тестирования и иллюстрации возможностей созданного программного комплекса силами предприятия был сформирован набор представителей, характеризующих общий перечень продукции, производимой на предприятии ОАО «Рыбинскабель». Для данного номенклатурного набора были проверены и заведены спецификации и

трудовые нормативы, а также указаны рыночные цены продаж. Созданный программный комплекс позволяет на основе этих данных и информации об имеющихся ресурсах: материалах и мощностях (станках, графике их работы и операциях, на них выполняющихся) сгенерировать оптимальный с точки зрения прибыльности объемный план производства.

Приведенные четыре теста показывают влияние ограничений, накладываемых службой сбыта на ОПП.

- *Тест №1.* Отсутствуют ограничения на сбыт продукции и ограничения на материалы.

- *Тест №2.* Отсутствуют ограничения на материалы. Ограничения на сбыт были заданы, руководствуясь опытом службы сбыта за прошлый период.

- *Тест №3.* Руководствуясь результатами, полученными в *тесте №2*, были уменьшены примерно в два раза ограничения на сбыт по двум группам, по которым количество совпало с задаваемым ограничением. Отсутствуют ограничения на материалы.

- *Тест №4.* Еще по двум группам продукции уменьшены в два раза ограничения на сбыт.

На основе этих тестов были построен график, показывающий зависимость прибыльности ОПП (рис. 3) от ограничений на сбыт готовой продукции. Из рис. 3 видно, что при увеличении ограничений на количество планируемой продукции прибыль предприятия резко снижается. На рис. 3 прибыль, получаемая предприятием без ограничений на сбыт продукции (Тест 1), взята за 100%.

Очевидно, что в этом случае в план производства войдут самые прибыльные и наименее ресурсоемкие изделия. Таких представителей групп оказалось 25. Наиболее выгодным с этой точки зрения для предприятия является группа изделий «провода силовые для электросиловых установок». Однако количество этих планируемых изделий с точки зрения службы сбыта слишком велико и согласно плана составляет 195 тысяч километров. Поэтому необходимо ограничить объемы этой продукции. В качестве ограничений были заданы новые условия на сбыт,

руководствуясь опытом службы сбыта за прошлый период, и проведены новые расчеты (Тест 2). В результате был составлен новый оптимальный план, прибыль которого по сравнению с первым снизилась примерно на 20%. При этом появились новые группы изделий, вошедшие в план (5 новых групп), а общее число представителей групп достигло 30. В последующих двух тестах усиливались (уменьшались в 2 раза) ограничения по тем группам, план по которым достигал ограничения на сбыт. В третьем тесте это были группы «автопровода» и «кабели силовые (гибкие)», в четвертом тесте – «шнуры осветительные» и повторно «провода силовые для электросиловых установок».

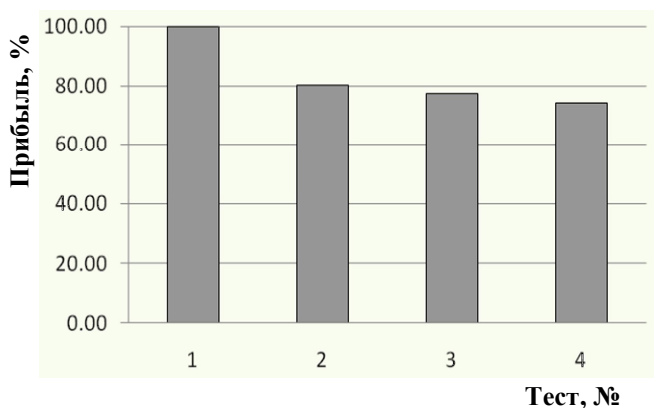


Рис. 3. Зависимость прибыли от ограничений на сбыт продукции

Очевидно, что, имея в своем распоряжении подобный инструмент планирования, топ-менеджмент предприятия достаточно просто и эффективно выберет наиболее оптимальный план производства на заданный период.

3. Дальновидная адаптация

Система управления производственной системой может быть условно разбита на три структурных уровня. Наиболее ответственные для всей системы решения принимаются на

первом, стратегическом уровне. Именно на этом уровне происходит адаптация производственной системы к изменениям, постоянно происходящим в окружающей среде, при этом должны учитываться будущие последствия принимаемых решений, т. е. производственная система должна обладать свойством дальновидности [8].

Механизм дальновидной адаптации рассмотрен в работе [15]. Отмечено, что никакая другая система, кроме адаптивной, не может обеспечить выживание и развитие предприятия в условиях рыночной экономики. Также отмечено, что при адаптивном управлении особенно важно учитывать дальновидность заказчиков и работников предприятия, которые, обладая информацией о процедурах адаптивного управления предприятия, могут выбирать действия, не соответствующие будущим интересам предприятия. Примером реализации механизма дальновидной адаптации может служить модель формирования оптимального портфеля заказов, предложенная в работе [6].

Пусть имеется N заказов. Введем булевый вектор неизвестных $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N)$. Здесь α_i , $i = 1, 2, \dots, N$, определяет включение i -го заказа в портфель по следующему правилу: если $\alpha_i = 1$, то заказ включается в портфель, если $\alpha_i = 0$, то заказ не включается в портфель. Тогда возможные критерии оптимальности портфеля заказов могут быть записаны следующим образом:

- критерий прибыльности

$$\sum_{i=1}^N [\alpha_i q_i (c_i - c_i^*) - (1 - \alpha_i) F(D_i, \gamma)] \rightarrow \max,$$

где q_i – объем i -го элемента; c_i – цена i -го элемента; c_i^* – себестоимость i -го элемента; F – функция штрафа; D_i – отклонение от требуемой даты выпуска; γ – интервал планирования.

- критерий важности

$$\sum_{i=1}^N \alpha_i V_i W_i \rightarrow \max,$$

где V_i – важность производства в срок i -го заказа; W_i – важность клиента, заказавшего i -ый элемент портфеля.

Ограничения задачи

$$(6) \quad H \left[\left(\sum_{i=1}^N \alpha_i S_{ik} \right) / P_k, I_k \right] \geq 0, \quad k = \overline{1, M},$$

$$(7) \quad H \left[\left(\sum_{i=1}^N \alpha_i q_i c_i^* \right) / \left(\frac{\Gamma \bar{C}}{T} \right), I_{M+1} \right] \geq 0,$$

$$(8) \quad \alpha_i D_i^{\text{ббп}} \in [0; 2\Gamma + \gamma], \quad i = \overline{1, N}.$$

где S_{ik} – требуемая потребность в мощностях k -го цеха при производстве i -го элемента; P_k – мощность k -го цеха; I_k – нечеткая переменная, характеризующая важность ограничения для k -го цеха; M – количество цехов; Γ – горизонт планирования, т.е. временной промежуток, который кратен интервалу планирования и на который формируется кластер; \bar{C} – оборачиваемость средств за период времени T ; $D_i^{\text{ббп}}$ – величина временного интервала от момента начала производства рассматриваемого кластера до требуемой даты выпуска элемента.

В ограничениях (6) и (7) использован интегральный индекс ранжирования H [9]:

$$(9) \quad H(A, B) = H_+(A) - H_+(B), \quad H_+(A) = \int_0^1 M(A_\alpha) d\alpha,$$

где A_α – α -уровневое подмножество нечеткого множества A , т.е. $A_\alpha = \{a: \mu_A(a) \geq \alpha\}$;

$$M(A_\alpha) = (a^- + a^+)/2; \quad a^- = \inf_{a \in A_\alpha} a; \quad a^+ = \sup_{a \in A_\alpha} a.$$

Причем, если $H(A, B) \geq 0$ или $H_+(A) \geq H_+(B)$, то $A \geq B$.

Значениями нечеткой переменной I_k в ограничениях (6) и (7) являются нечеткие числа [9], каждое из которых представляет собой совокупность пар вида $A = \{\mu_A(a_1)/a_1; \mu_A(a_2)/a_2; \dots; \mu_A(a_n)/a_n\}$, где $\mu_A(a_i)$ – функция принадлежности элемента a_i , $a_i \in S_A = \{u \in R: \mu_A(u) > 0\}$, S_A – носитель нечеткого числа A .

В ограничении (8) верхняя граница интервала равна $2\Gamma + \gamma$ исходя из предположения о том, что

- любой элемент должен быть запущен в производство в течение временного промежутка Γ ;

- любой элемент имеет длительность производственного цикла, не превышающую Γ ;
- фактический выпуск элемента может быть смещен на интервал планирования γ .

Таким образом, в предложенной модели дальновидность заказчика учитывается посредством функций штрафа, входящей в первую целевую функцию, и параметра важности клиента, входящего во вторую целевую функцию.

На рис. 4 представлены решение двухкритериальной задачи оптимизации, полученное с помощью модели («Модель»), а также решение, фактически использованное предприятием («Завод»). Из рисунка видно, что решение, полученное с помощью модели, обеспечивает несколько большую прибыльность и существенно большую важность портфеля заказов по сравнению с решением, полученным экспертами предприятия.

Таким образом, можно говорить о том, что предложенная модель позволяет значительно повысить дальновидность принимаемых на предприятии решений, в частности сохранить максимальное количество важных для предприятия заказчиков.

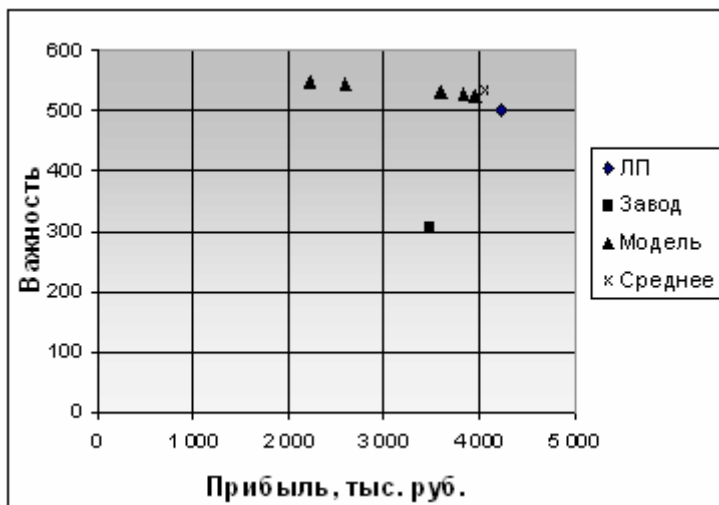


Рис 4. Результаты решения задачи оптимизации портфеля заказов

4. Интеллектуализация управления

В последние годы стали быстро развиваться идеи создания интеллектуального предприятия [15], в котором широко используются автоматизированные человеко-машинные системы поддержки принятия управленческих решений на всех уровнях управления производством. Если при этом достигается совместное использование интеллектуального потенциала экспертов и элементов искусственного интеллекта, реализованных на ЭВМ, то говорят о той или иной степени интеллектуальности механизма управления.

Как показано выше, информационная емкость современных производственных систем весьма значительна. Поэтому лица, принимающие решения (ЛПР), как правило, не в состоянии обработать всю собираемую в этих системах информацию и принять на ее основе достаточное количество адекватных решений за требуемое время. В этом случае выходом может стать выделение в иерархии принятия решений нескольких структурных уровней и использование для каждого из них механизма интеллектуализации, который, по сути, позволяет автоматизировать принятие решений в относительно простых, поддающихся формализации ситуациях.

В работе [13] предложено систему управления производством условно разбить на три структурных уровня:

1. На первом, стратегическом уровне должна решаться задача формирования производственной программы на планируемый период времени с учетом спроса на выпускаемую продукцию, ценовой политики, принятой на данный период, мощности предприятия, возможных действий конкурентов, а также выгоды имеющихся заказов. Результатом решения данной задачи является главный календарный план производства на планируемый период.

2. На втором, тактическом уровне в большей степени учитываются интересы организаторов производства за счет снижения прибыльности планируемой продукции. Вся проблема состоит в том, как учесть все потребности производства, не снизив значительно прибыльность всей продукции. Для этого должна ре-

шаться соответствующая двухкритериальная задача календарного планирования, учитывающая интересы как сбытовиков, так и производителей. В результате решения этой задачи должен быть получен план-график производства, устраивающий обе стороны.

3. На третьем, оперативном уровне должна решаться задача оперативного управления производством, а также вспомогательные задачи календарного планирования ремонтных работ, транспортная задача, задача складирования запасов и готовой продукции. Эти задачи должны учитывать специфику производства, но они не должны в значительной мере влиять на принятый план – график производства.

В работе [13] также отмечено, что каждый уровень управления производством включает несколько связанных между собой математических моделей, которые играют роль интеллектуальных элементов системы управления и за счет обратных связей, могут «подсказывать» как разрешить возникающие между отдельными элементами (подразделениями, сотрудниками) конфликты без большого ущерба для всей системы в целом.

В работе [4] приведен *пример использования интеллектуальных элементов для разрешения конфликта распределения ресурсов между производством под заказ и на склад*. В работе предлагается структурная схема планирования производства, представленная на рис. 5, позволяющая оптимизировать *объемный план производства* (ОПП) для каждого типа стратегии продаж (под заказ или на склад под прогнозируемый спрос).

На схеме представлены три математические модели, важнейшей из которых является модель управления ресурсами. Данная модель, понимается как *интеллектуальный элемент* (ИЭ) и используется для поддержки принятия решений при распределении ресурсов предприятия между позаказным производством и производством под прогнозируемый спрос на этапе формирования ООП.



Рис. 5. Структурная схема формирования объемного плана производства

Для этого вводится вектор ρ , определяющий процентные доли использования ресурсов предприятия при формировании оптимального портфеля заказов. Когда предприятие работает только под заказ $\rho = 1$ и ОПП формируется с помощью единственной модели *оптимального портфеля заказов* (ОПЗ), рассмотренной выше и более подробно в работе [6].

Когда предприятие работает только на склад под прогнозируемый спрос $\rho = 0$ и ОПП формируется с помощью единственной модели *объемного плана производства с учетом конъюнктуры рынка* (ОППС) [5]. Реализация интеллектуального элемента рассматривается в виде двух вариантов: *имитационной модели* и *оптимизационной модели*.


Первый вариант реализации интеллектуального элемента как имитационной модели позволяет ЛПП оценить, какие заказы будут выполнены и какая продукция будет произведена в зависимости от распределения ресурсов ρ . Вектор ρ в имитационной модели задается ЛПП с целью получения Парето-множества вариантов ОПП, которые оцениваются по прибыльности и совокупной важности заказов, вошедших в каждый из вариантов ОПП.


Второй вариант реализации интеллектуального элемента позволяет находить «оптимальные» (рациональные) варианты перераспределения мощностей предприятия. Так как решение подобной оптимизационной задачи в полном объеме является трудноразрешимой вычислительной проблемой, предлагается приближенный поиск оптимальных решений с использованием метода стохастического поиска [16].


Таким образом, предложенные в работе [4] интеллектуальные элементы позволяют ЛПР не только оценить последствия того или иного варианта перераспределения мощностей, но и получить «оптимальное» по заданным критериям решение в виде Парето-оптимального набора ОПП.

Пример работы интеллектуальных элементов приводится на основе данных одного из российских кабельных заводов. Для примера были взяты данные о нормативной базе предприятия, информация о поступивших заказах, а также информация о ценах на выпускаемую продукцию. В качестве критериев оптимальности были выбраны два критерия: по прибыльности и по совокупной важности заказов включенных в ОПП.

На основе этих данных было построено три Парето-фронта для ОПП, изображенных на рис. 6:

1) ОПП, обозначенный , был получен при выделении всех ресурсов предприятия для производства под заказ;

2) ОПП, обозначенный , был сформирован с использованием имитационной модели интеллектуального элемента, в которой оставшиеся от производства на заказ ресурсы были задействованы для производства на склад;

3) ОПП, обозначенный , был получен с использованием оптимизационной модели интеллектуального элемента.

Из рис. 6 видно, что использование оптимизационной модели позволило перераспределить ресурсы предприятия между производством под заказ и на склад таким образом, что в результате удалось увеличить прибыль предприятия более чем на 20% для планов с заказами невысокой важности и на 5–10% для планов с заказами высокой важности.

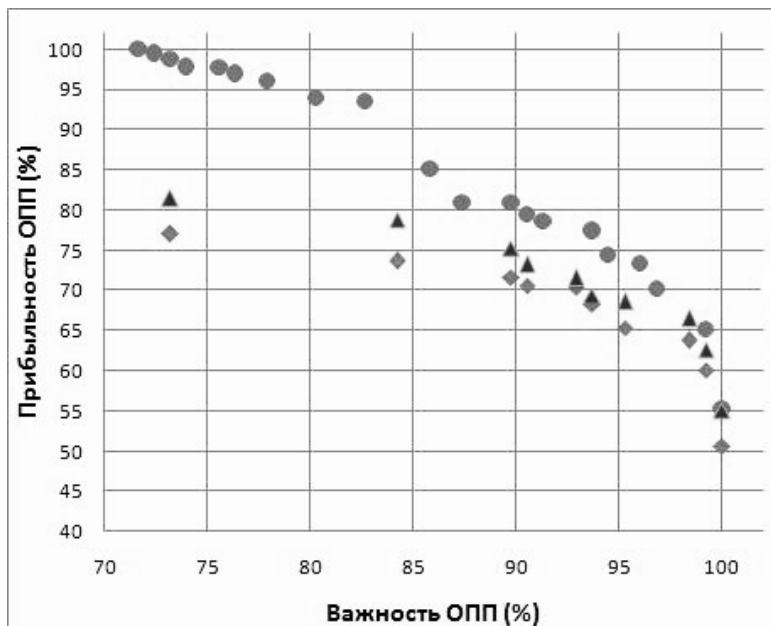


Рис. 6. Результаты формирования ОПП с помощью различных моделей ИЭ

Следует отметить, что интеллектуальные элементы могут стать одним из основных инструментов в управлении производством на интеллектуальных предприятиях, описанных в работе [15], так как именно интеллектуальные элементы способны обеспечить самоорганизацию, обучение и адаптацию работников интеллектуальных предприятий в условиях быстрых изменений.

5. Оптимизация производственного планирования

Использование механизмов дальновидной адаптации на стратегическом уровне управления неизбежно приводит к изменениям в иерархии целей, что, в свою очередь, порождает необходимость решения значительного количества многокритериальных задач оптимизации на тактическом и оперативном уровнях управления.

В работах [7, 11] отмечается, что используемые в *ERP*-системах алгоритмы планирования *MRP*II далеко не всегда адекватны требованиям к точности и скорости выполнения. Это особенно важно для оперативного управления производством, когда необходимо за несколько минут составлять производственные расписания, оптимальные по нескольким критериям и удовлетворяющие всем имеющимся ограничениям.

Основными критериями оптимальности для оперативного управления производством, как правило, являются:

- минимальные отклонения сроков выполнения производственных заказов;
- максимальная загрузка оборудования;
- минимальная длительность производственных циклов;
- максимальная комфортность производства.

В качестве параметров управления обычно выступают размеры запускаемых в обработку партий и их последовательность. При этом учитываются ограничения на ресурсы оборудования и персонала, а также ограничения на сырье и комплектующие.

Подобные задачи могут быть успешно решены с помощью современных методов оптимизации и локального поиска, таких как эвристические алгоритмы, генетические алгоритмы, методы стохастического поиска и др.

Программные продукты, реализующие вышеупомянутые алгоритмы оптимизации для составления детальных производственных расписаний, относятся к классу так называемых *APS*-систем (*Advanced Planning & Scheduling*), среди производителей которых можно выделить такие компании, как компаний *Ortems*, *PeopleSoft*, *Manugistics*, *Synquest*.

Большинство *APS*-систем являются инструментами имитационного моделирования производственной деятельности и применяются для поддержки принятия решений на уровне оперативного управления производством.

Важным отличием систем *APS* от *ERP* является возможность организации обратной связи с производством для учета отклонений, связанных с поломками оборудования, отсутствием требуемого сырья и комплектующих, допущенным браком.

Большинство *APS*-систем могут работать автономно. Однако на практике необходимые для выполнения расчетов данные многие *APS*-системы получают из внешних систем: портфель заказов и графики поставок сырья – из *ERP*, технологическая информация и спецификации изделий – из *PLM*, сведения о ходе производственного процесса – из *MES*, данные о складских запасах – из *WMS*, графики планово-предупредительных ремонтов – из *EAM*.

Таким образом, основным достоинством *APS*-систем является возможность оперативного получения реализуемых производственных расписаний с возможностью моделирования производственного процесса и оценки различных вариантов «что–если».

К недостаткам *APS*-систем можно отнести высокие требования к своевременности и точности исходной информации, поступающей, как правило, из связанных внешних систем.

В работе [1] предложена математическая модель для составления *оптимального плана-графика производства* (ОПГП).

В качестве параметров оптимизации вводится матрица x_{ij}^{kl} , где каждой компоненте соответствует время запуска i -ой партии j -ой операции для k -ой детали (готового изделия) на l -ом станке. Множеству дат можно однозначно сопоставить множество положительных чисел, следовательно $x_{ij}^{kl} \geq 0$. Выполнение операций на станках производится только партиями. Размеры партий могут быть представлены в виде:

$$B = \{b_k: k = 1, N_D\},$$

где b_k – количество штук в партии для детали k ; N_D – обозначает количество типов деталей, принятых в обработку.

ОПГП состоит из множества операций, связанных между собой набором ограничений. Каждая операция обработки детали определяется группой партий. Время, необходимое для обработки партии при операции j для детали k , задается в виде:

$$T = \{t_{jk}: j = 1, N_O; k = 1, N_D\},$$

где N_O – количество операций.

Для каждой операции делается предположение о ее непрерывности, т. е. операция продолжается до тех пор, пока не

закончится. Если это ограничение в какой-либо операции не выполняется, то эту операцию можно разбить на составляющие. Также считается, что если какой-либо операции предшествует несколько операций, то эта операция начнется только после того, как закончатся все операции ей предшествующие. Следует заметить, что операция начнется незамедлительно, разрывов во времени быть не должно. Все операции, которые могут совершаться над любым полуфабрикатом, заранее пронумерованы. Исходя из этого положения, вводится матрица последовательности операций для каждой детали (технологический маршрут):

$$\Omega = \{\omega_{jk}: j = 1, N_O; k = 1, N_D\},$$

где ω_{jk} – порядковый номер выполнения операции j для детали k .

Некоторые из полуфабрикатов являются готовыми изделиями. Из условий задачи производство таких полуфабрикатов необходимо закончить к заданным срокам. Директивные сроки описываются множеством:

$$D = \{d_k: k = 1, N_D\},$$

где d_k – дата, к которой необходимо произвести k -ую деталь.

Дополнительно в задаче составления ОПП учитываются следующие ограничения.

Любой станок в каждый момент времени выполняет только одну операцию:

$$(10) [x_{ij}^{kl}, x_{ij}^{kl} + t_{jk}] \cap [x_{mn}^{pl}, x_{mn}^{pl} + t_{np}] = \emptyset, k \neq p, i \neq m, j \neq n.$$

Спецификации и технологические маршруты готовых изделий представляют собой набор ограничений на последовательность выполнения операций:

$$(11) \max_i x_{im}^{kl} < \min_i x_{in}^{kl}, \text{ если } \omega_{mk} < \omega_{nk}.$$

При этом считается, что партия с большим номером выполняется в более поздний срок:

$$(12) x_{ij}^{kl} < x_{i+1j}^{kl}.$$

К ограничениям (10)–(12) обычно добавляются ограничения на использование только имеющегося оборудования в каждый момент времени, ограничения на использование опре-

деленных станков для разного рода операций, ограничения на производственный календарь.

В качестве критериев предложено использовать минимальное время обработки всех деталей

$$J_1(x) = \sum_{ijkl} x_{ij}^{kl} \rightarrow \min ,$$

а также максимальную комфортность производства, т. е. максимальное количество деталей в партиях, что эквивалентно минимальному числу переналадок оборудования,

$$J_2(x) = \sum_{k=1}^{N_D} b_k \rightarrow \max .$$

В работе [1] приведен пример составления ОПГП.

Пусть на участке производится пять операций и необходимо обработать шесть типов деталей: a, b, c, d, e, f . Нормы штучного времени обработки деталей (в часах), объемы партий и число станков приведены в таблице 1.

Требуется составить оптимальный план-график запуска деталей в обработку.

Таблица 1. Нормы штучного времени и количество станков

Тип детали	Операция					Число деталей
	1	2	3	4	5	
a	1,2	0,3	0	0	1,3	12
b	0	0,5	0	0,2	0,7	20
c	0	0,1	1,1	0,6	0,9	24
d	1,6	0,4	1,4	0	0	6
e	0,8	0	0	0,4	0	30
f	0,6	0	0,5	0,8	0,9	30
Число станков	3	1	2	1	2	–

При помощи специальной эвристики и алгоритма распространения ограничений с требуемой оперативностью удалось получить Парето-оптимальное подмножество планов-графиков, удовлетворяющих ресурсным ограничениям в полном объеме.

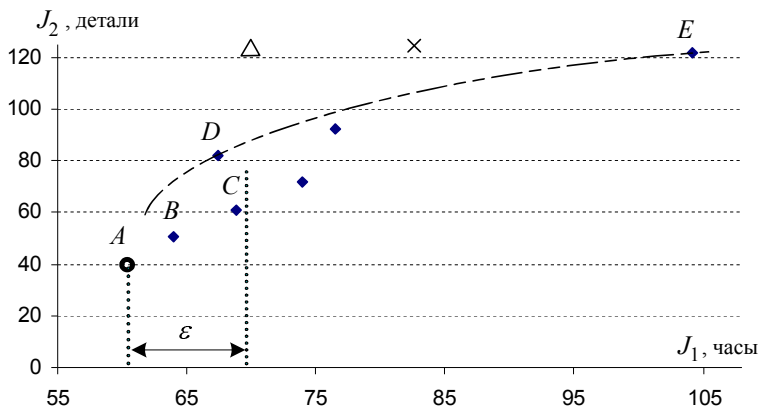


Рис. 7. Результаты решения задачи составления планов-графиков

Результаты решения представлены на рис. 7. При этом использованы следующие обозначения:

- \times – решение, полученное методом Петрова–Соколицина [12], при последовательности запуска деталей d, f, b, a, e, c и максимальном числе деталей в партии дало 82,5 часа общего времени выполнения производственной программы;
- Δ – решение, полученное полным перебором при максимальном размере партий запуска и следующей последовательности обработки деталей c, d, b, a, f, e ;
- \circ – решение с минимальным временем выполнения производственной программы, но удовлетворяющее не всем ограничениям на ресурсы оборудования (точка A на рис. 7);
- \blacklozenge – решения, полученные с помощью модифицированного метода распространения ограничений с учетом всех ограничений на имеющиеся ресурсы оборудования при различных разбиениях деталей на партии (точки B, C, D, E на рис. 7). Например, точка D: общее время выполнения – 67,4 часа, порядок запуска b, f, a, d, c, e , деление на партии для деталей e и f на три части для каждой, а для всех остальных – на две.

Следует отметить, что при получении Парето-оптимального множества планов-графиков (пунктирная линия на рис. 7),

окончательный выбор требуемого плана-графика можно поручить эксперту, а можно сделать автоматически с помощью дополнительного условия уступки по параметру ε . В данном случае под ε можно понимать то максимальное отклонение от минимального времени выполнения производственной программы (точка A на рис. 7), которое ЛПР считает допустимым. Любое решение, входящее в эту ε -окрестность точки A , можно считать субоптимальным.

6. Коллективное принятие управленческих решений

В работе [3] отмечено, что управление организацией – это, прежде всего принятие разнообразных решений. Качество принимаемых менеджерами решений в значительной степени определяет эффективность функционирования любой организаций, в том числе производственной системы.

В работах Р.К. Саха и Дж. Стиглица [17, 18] обосновывается целесообразность построения сложных структур коллективного принятия решений, с целью уменьшения вероятности допущения ошибок отдельными менеджерами. Для организации процесса принятия решений предлагается сформировать одну из трех организационных структур: комитет, иерархию и полиархию. В работах [17, 18] также предложены математические модели для оценки вероятностей допущения ошибок и определения затрат в каждой из перечисленных структур. В результате удается исследовать сравнительную выгодность использования этих структур в зависимости от параметров моделей.

В работе [3] предложена модель для определения оптимальных параметров древовидной иерархии, реализующей процесс планирования деятельности организации. Для этого эффективность иерархии оценивается с помощью однородной секционной функции затрат. При этом удается построить зависимости оптимальных норм управляемости в иерархии от параметров модели, а также зависимости затрат иерархии от уровня специализации менеджеров.

В работе [14] предложен *подход к коллективному принятию управленческих решений, связанный с использованием*

нечетких множеств. Так, на основе частных критериев оптимальности плана производства J_1 (критерий комфортности производства), J_2 (критерий равномерности производства) и J_3 (критерий минимизации риска срыва плана производства) может быть построен обобщенный (комплексный) критерий оптимальности с использованием расширенного нечеткого множества над частными критериями оптимальности $\mathcal{J} = \{\mu_1/J_1; \mu_2/J_2; \mu_3/J_3\}$, где $\mu_i \in [0; 1]$, $i = 1, 2, 3$, – экспертная оценка значимости i -го критерия. Определение значений μ_i , $i = 1, 2, 3$, в данном случае является результатом коллективного принятия решения в форме опроса некоторого количества экспертов, что аналогично использованию такой организационной структуры, как кабинет, предложенной в работах [17, 18], упомянутых выше. Расширенное нечеткое множество \mathcal{J} при необходимости также позволяет учесть мнение руководителя группы экспертов, аналогично использованию иерархии. Для этого достаточно, чтобы руководитель задал интервалы изменения оценок значимости μ_i , $i = 1, 2, 3$, и индекс ранжирования, с помощью которого должны сравниваться обобщенные критерии оптимальности \mathcal{J} .

В работе [6] приведен другой пример коллективного принятия решения при задании нежестких ограничений на мощности предприятия с учетом мнений менеджеров, находящихся на разных уровнях иерархии управления. При этом было использовано нечеткое число A , формализующее термин «важное ограничение» следующим образом: $A = \{0,9/0,6; 0,95/0,8; 0,85/1,0; 0,4/1,2; 0,2/1,4\}$. Элементы данного нечеткого числа показывают, во сколько раз могут быть превышены ограничения на мощности цехов и оборотные средства предприятия, в частности, максимальное превышение возможно в 1,4 раза. Значение функции принадлежности для каждого элемента нечеткого числа характеризуют степень уверенности экспертов в допустимости данного превышения, в частности, максимальное превышение допустимо в 20% случаев.

Ограничения на мощности цехов принимались *очень важными*. Для формализации термина «очень важное ограничение» было использовано нечеткое число

$$A^2 = \bigcup_i \mu_A^2(a_i) / a_i = \{0,81/0,6; 0,9025/0,8; 0,7225/1,0; 0,16/1,2; 0,04/1,4\}.$$

Ограничения на оборотные средства принимались *неважными*. Для формализации термина «*неважное ограничение*» было использовано нечеткое число

$$A^* = \bigcup_i (1 - \mu_A(a_i)) / a_i = \{0,01/0,6; 0,05/0,8; 0,15/1,0; 0,6/1,2; 0,8/1,4\}.$$

Отметим, что для сравнения нечетких чисел был использован индекс ранжирования (9), приведенный выше. Идея этого сравнения заключена в том, что для каждого нечеткого числа вычисляется значение функции (интеграла) H_+ [9], и число, соответствующее максимальному значению этого интеграла, считается максимальным. На рис. 8 представлены нечеткие числа A , A^2 и A^* , для каждого из которых был найден интеграл H_+ . Так, например, при рассмотрении ограничений на мощности в качестве «*очень важных*» при формировании плана производства будет учитываться только 74% мощностей. В результате при производстве, с одной стороны, можно избежать возникновения узких мест, с другой стороны, максимально загружать оборудование наиболее выгодными заказами.

Таким образом, введение нежесткости ограничений посредством использования нечетких переменных позволяет гибко подходить к заданию этих ограничений с учетом мнений всех лиц, заинтересованных в эффективном использовании каждой единицы оборудования. В результате становится возможным превышение верхних границ ограничений и создание страховых запасов для устранения узких мест, которые могут возникнуть при реализации производственного плана.

7. Заключение

В работе проведен обзор современных механизмов управления производственными системами и приведены примеры их реализации в условиях сложного взаимодействия между различными элементами системы.

Рассмотрены современные информационные системы, используемые при управлении производственными системами.

Отмечена возможность применения систем информатизации управления для решения вопросов, связанных с нахождением оптимальных управленческих решений.

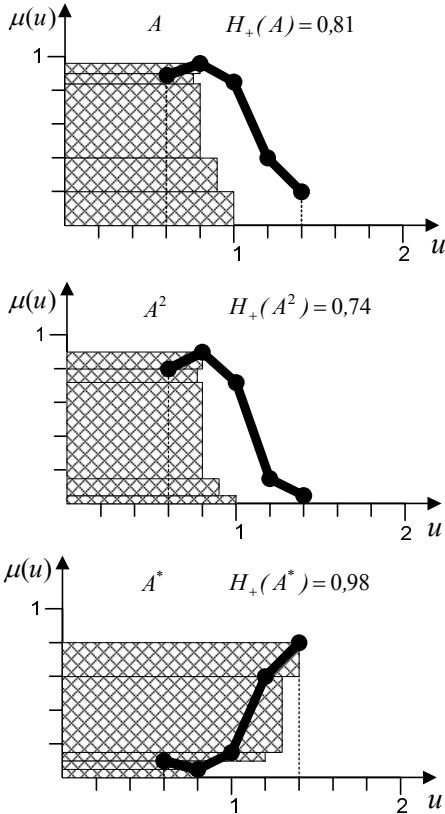


Рис 8. Вид нечетких чисел A , A^2 и A^*

Приведены примеры использования интеллектуальных элементов в управлении производственными системами, а также отмечена важность этих элементов как инструментов управления производством на предприятиях с большой номенклатурой выпускаемых изделий с учетом быстроменяющейся конъюнктуры рынка.

Описаны подходы к построению моделей коллективного принятия управленческих решений. Приведен пример использования нечетких множеств как инструмента формирования коллективного решения при выборе оптимальных производственных планов.

Рассмотренный в данной статье перечень механизмов и инструментов управления производственными системами является, конечно, не полным. Однако, проведенное исследование позволяет по-новому взглянуть на актуальную проблему управления производственными системами в условиях инновационной экономики с быстроменяющимися конъюнктурами рынков труда, сырья, продукции и инноваций. Решение этой проблемы возможно только при разработке новых эффективных механизмов управления и инструментов их реализации.

Литература

1. БЕЛЯЕВ А.А., КОТОВ С.С., СТОЛБОВ В.Ю.. *Модель управления ресурсами предприятия при дискретном производстве* // Проблемы управления. – 2007. – №6. – С. 51–56.
2. ГОРСКИЙ Ю.М. *Системно-информационный анализ процессов управления*. – Нов-к: Наука, 1988. – 327с.
3. ГУБКО М.В. *Математические модели оптимизации иерархических структур*. – М.: ЛЕНАНД, 2006.
4. ЖИРНОВ В.И. *Управление производственными ресурсами в условиях меняющейся конъюнктуры рынка* // VI Всероссийская школа-семинар молодых ученых «Управление большими системами»: Сборник трудов. – Т.1. – Ижевск: ООО Информационно-издательский центр «Бон Анца», 2009. – С.171–178.
5. ЖИРНОВ В.И., СТОЛБОВ В.Ю. *Модель формирования оптимального плана производства как элемент системы поддержки принятия решений на стратегическом уровне управления предприятием* // Теор. и прикл. аспекты информационных технологий. Сб. науч. трудов. – Пермь: Изд-во ГосНИИУМС, 2007. – Вып. 56. – С.87–96.

6. ЖИРНОВ В.И., ФЕДОСЕЕВ С.А., АГАРКОВ А.И. *Модель управления заказами в рамках единой информационной системы предприятия* // Проблемы управления. – 2007. – №6. – С. 57–63.
7. МАЛЯРЕНКО И. *Планирование и оптимизация: от Вергилия до APS-системы* // PC Week/ RE. – 2006. – №27. – С. 29–32.
8. НОВИКОВ Д.А. *Теория управления организационными системами.* – 2-е изд. – М.: Издательство физико-математической литературы, 2007. – 584 с.
9. *Обработка нечеткой информации в системах принятия решений* / А.Н. Борисов, А.В. Алексеев, Г.В. Меркурьева и др. – М.: Радио и связь, 1989. – 304 с.
10. ПЕРЕГУДОВ Ф.И., ТАРАСЕНКО Ф.П. *Введение в системный анализ.* — М.: Высшая школа, 1989. – 360 с.
11. ПИТЕРКИН С.В., ОЛАДОВ Н.А., ИСАЕВ Д.В. *Точно вовремя для России. Практика применения ERP-систем.* – М.: Альпина Паблишер, 2002. – 368 с.
12. *Производственный менеджмент: Учебник* / Под редакцией В.А. Козловского. – М.: ИНФА-М, 2003. – 574 с.
13. СТОЛБОВ В.Ю., ФЕДОСЕЕВ С.А. *Модель интеллектуальной системы управления предприятием* // Проблемы управления. – 2006. – №5. – С.36–39.
14. ФЕДОСЕЕВ С.А., ВОЖАКОВ А.В., ГИТМАН М.Б. *Управление производством на тактическом уровне планирования в условиях нечеткой исходной информации* // Проблемы управления. – 2009. – №5. – С. 36–43.
15. ЦЫГАНОВ В.В., БОРОДИН В.А., ШИШКИН Г.Б. *Интеллектуальное предприятие: механизмы овладения капиталом и властью (теория и практика управления эволюцией организации).* – М.: Университетская книга, 2004. – 768 с.
16. GELFAND S.B., MITTER S.K. *Simulated annealing with noisy or imprecise energy measurements* // Journal of Optimization Theory and Applications. – 1989. – Vol. 62, No.1. – P. 49–62.
17. SAN R.K., STIGLITZ J.E. *The Architecture of Economic Systems: Hierarchies and Polyarchies* // The American Economic Review. – 1986. – Vol. 76, No.4. – P. 716–727.

18.SAH R.K., STIGLITZ J.E. *The Committees, Hierarchies and Polyarchies* // The Economic Journal. – 1988. – Vol. 98, No.391. – P. 451–470.

MODERN MANAGEMENT MECHANISMS AND INSTRUMENTS FOR LARGE MANUFACTURING SYSTEMS

Sergey Fedoseev, Perm State Technical University, Perm, Cand.Sc., assistant professor (*fsa@gelicon.biz*).

Mikhail Gitman, Perm State Technical University, Perm, Doctor of Science, professor (*gmb@matmod.pstu.ac.ru*).

Valeriy Stolbov, Perm State Technical University, Perm, Doctor of Science, professor (*svu@matmod.pstu.ac.ru*).

Abstract: An overview of modern management mechanisms for complex manufacturing systems is presented. Several examples of their implementation under given hierarchy of decision making with fuzzy and/or incomplete information on the system's state and requirements of external and internal consumers are analysed.

Keywords: manufacturing systems, management mechanisms and instruments, intellectual elements, collective decision making.

Статья представлена к публикации членом редакционной коллегии Г. Н. Каляновым