

КИЕВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

КОВАЛЮК ТАТЬЯНА ВЛАДИМИРОВНА

УДК 658.012.011.56:519.8

АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ  
СИСТЕМ ПЛАНИРОВАНИЯ МЕЛКОСЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА  
В УСЛОВИЯХ РЫНКА

Специальность 05.13.06 - автоматизированные  
системы управления

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Киев - 1992



00819691 (У)

Работа выполнена в К  
кафедре автоматизиров

Научный руководитель:

доктор  
профессор ПАВЛОВ А.А.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,  
профессор МИХАЙЛЕНКО В.М.  
кандидат технических наук,  
доцент МУДРЫЙ А.Н.

Ведущая организация: НИО "Киевский институт автоматизации"  
г. Киев.

Защита диссертации состоится "16" ноября 1992 года  
в <sup>15<sup>00</sup></sup> часов на специализированном Совете по прису-  
ждению ученой степени доктора технических наук Д068.14.07  
в Киевском политехническом институте.

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах), заверенные  
печатью учреждения, просим направлять по адресу:

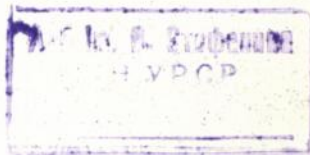
252056, Киев-56, просп. Победы 37, ученому секретарю.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке КПИ.

Автореферат разослан "30" сентября 1992 г.

Ученый секретарь  
специализированного  
Совета

Романенко В.Д.



## АННОТАЦИЯ

Целью диссертационной работы является разработка и исследование эффективных по времени решения и памяти ЭВМ методов и алгоритмов решения задач планирования и упорядочения в АСУ в рамках многоуровневой системы планирования производства.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

- исследование объекта управления и особенностей планового управления мелкосерийным производством, функционирующем в рыночных условиях;
- исследование двухуровневой системы планирования, охватывающей верхний и средний уровни классической системы планирования, выбор критерия эффективности, построение агрегированной модели;
- исследование и разработка алгоритмических средств реализации моделей первого и второго уровней;
- исследование взаимодействия моделей двухуровневой системы;
- исследование и разработка календарного расписания работы сборочного цеха в разрезе бригад;
- проведение вычислительного эксперимента и получение оценок использования оперативной памяти и времени реализации алгоритмических средств.

Автор защищает следующие результаты:

I. Алгоритмическое обеспечение решения задач планирования мелкосерийного производства в двухуровневой системе:

- процедуру сведения задачи первого уровня к задаче агрегированного расписания одного станка по критерию минимизации суммарного взвешенного момента окончания выпуска продукции в рамках двухуровневой модели планирования, предложенной профессором А.А. Павловым и к.т.н. Е.Б. Мисирой;
- вычислительную схему выбора оптимального решения задачи первого уровня для различных структур ориентированного графа, являющихся частными случаями произвольного ациклического графа с оценками  $O(n \log n)$ ,  $O(n^2)$ ;
- методику взаимодействия моделей первого и второго уровней;
- вычислительную схему выбора субоптимального решения задачи второго уровня при распределении производственной программы по подразделениям и плановым периодам на основе приоритетно-упорядоченного агрегированного расписания, полученного на

первом уровне, по критерию максимизации суммарной прибыли при минимизации суммарного взвешенного момента окончания выпуска наиболее приоритетных изделий с оценкой  $O(n*m)$ .

2. Программно-алгоритмическое обеспечение системы календарного планирования (ОКП) сборочного цеха мелкосерийного производства в разрезе бригад :

- систему оперативного планирования работы бригад цеха по критерию минимизации сумм штрафов за задержку изделий относительно директивных сроков при обеспечении равномерности загрузки бригад в пределах нормативной трудоемкости работ с оценкой  $O(n*m)$ ;

- программную реализацию системы ОКП на базе предложенных эвристических алгоритмов.

#### ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В условиях перехода от административных к экономическим методам управления, к регулируемому рынку, расширению прав предприятий и регионов значение планового управления, освобожденного от административного диктата, не только не уменьшается, но играет существенную роль в обеспечении прибыльности предприятия за счет своевременного реагирования на потребности рынка путем изменения стоимости продукции в зависимости от времени выпуска изделий. В многоуровневой системе планирования, включающей объемное, объемно-календарное (ОБКП), календарное (ОКП) планирование, задачи ОБКП и ОКП характеризуются большой размерностью, ограничениями на очередность выполнения отдельных работ, жесткими требованиями к временным характеристикам решения, NP-трудностью решения. В настоящее время не существует универсальных методов для построения распределительных планов, которые учитывали бы все особенности производства. Поэтому необходимо продолжить исследования в области повышения уровня специального математического обеспечения АСУП, разработку алгоритмов решения задач упорядочения в АСУ в рамках многоуровневой системы планирования. Таким образом, проблема, рассматриваемая в работе, является актуальной.

Методы исследования. Используются методы исследования NP-сложных задач оптимизации, предложенные профессором Павловым А.А.; методы и положения системного анализа, методы комбинаторной оптимизации, основанные на подходах, предложенных профессором А.А. Павловым.

Научная новизна исследований состоит в построении агрегированной модели задач планирования, охватывающей как верхний,

так и средний уровни классической системы планирования; в классификации связанных графов, отражающих специфику технологических процессов на производстве, для которых получены полиномиальные алгоритмы решения задачи распределения производственной программы; в методике взаимодействия моделей двухуровневой системы; в вычислительной схеме решения задачи второго уровня, имеющей полиномиальную оценку трудоемкости решения, высокоэффективной по вычислительным возможностям.

Практическая ценность работы. Практическим результатом являются предложенные и реализованные алгоритмы решения задач первого и второго уровней, а также пакет прикладных программ календарного планирования сборочного цеха в разрезе бригад, которые достаточно универсальны и могут быть использованы при создании информационно-управляющих систем различного назначения.

Реализация результатов. Разработанные программные средства планирования работы подразделений использовались при проектировании ИАСУ сборочным производством на Киевском заводе автоматике им. Г.И. Петровского и при разработке месячных планов цехов на Горловском заводе резино-технических изделий. Реализация рассматриваемых в работе вопросов выполнялась в рамках договора "Разработка универсальных программных средств в рамках АСУ ГПС с ГАУ механообработки корпусных деталей" между кафедрой АСУП КПИ и СКБ ММС АН УССР и договора "Разработка АСУ горловским заводом РТИ" между НТТМ "Труд" и Горловским заводом РТИ.

Долевой экономический эффект от применения программных средств составляет 68 тыс. рублей. Указанный экономический эффект достигнут за счет повышения рентабельности и равномерности загрузки оборудования, повышения качества планирования и культуры управленческого труда, экономии материальных и трудовых ресурсов.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

- республиканской конференции "Автоматизированные системы управления и манипуляторы (роботы) на предприятиях горнодобывающей промышленности" (Киев, 1984).

- научно-технической конференции "Проблемы развития АСУ и информационных услуг в новых условиях хозяйствования" (Душанбе, 1989)

- научном семинаре кафедры АСУП Киевского политехнического института "Методы оптимизации и проблемы построения АСУ" (Киев, 1990, 1991 гг.).

Публикации. Основные результаты, изложенные в диссертации, отражены в 8 опубликованных работах.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, выводов по главам и заключения, изложенных на 162 страницах, содержит 8 рисунков и список литературы, включающий 124 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулирована цель работы, дана ее общая характеристика.

В первой главе проведен анализ эффективности функционирования предприятий с мелкосерийным типом производства в рыночных условиях. Определены особенности планового управления мелкосерийным производством в условиях перехода к рынку. Сформулированы задачи агрегирования, представляющие систему планирования в виде двухуровневой системы. Проведен анализ моделей и методов решения задач объемно-календарного и календарного планирования. Обоснована необходимость разработки эффективных алгоритмов для задач первого и второго уровней. Сформулированы цели исследования.

Во второй главе приведена агрегированная модель двухуровневой системы планирования, определены календарно-плановые нормативы, разработаны алгоритмы решения задач первого и второго уровней планирования, исследованы частные случаи общей задачи составления расписания выполнения частично упорядоченного множества операций одним станком при отношении порядка, заданного ориентированным ациклическим графом, по критерию минимизации суммарного взвешенного момента окончания выполнения всех работ. Разработаны алгоритмы их решения. Разработанные алгоритмы позволяют за полиномиальное время построить оптимальную последовательность выполнения работ.

В третьей главе приведены результаты экспериментального исследования разработанных алгоритмов в рамках системы ОКП сборочного цеха мелкосерийного производства. Решена задача планирования работы бригад по критериям минимизации суммы штрафов запаздывающих изделий относительно директивных сроков изготовления и равномерности загрузки бригад. Рассмотрены вопросы программной реализации разработанных алгоритмов в рамках ППП - "Сборка".

В приложении приведены справки о внедрении.

#### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Успешное функционирование предприятия зависит от обоснованности и согласованности управленческих решений, принимаемых на этапах планирования. Сформированная на этапе объемного планиро-

вания производственная программа предприятия должна быть доведена до подразделений. Согласованные между подразделениями программы выпуска цехов определяются на этапе объемно-календарного планирования. Задача усложняется тем, что необходимо обеспечить минимальный дефицит ресурсов по наиболее важным изделиям. Если в первую очередь распределять по подразделениям наиболее приоритетные с точки зрения прибыли изделия, то ограничения по ресурсам на них будут сказываться в меньшей степени.

Модель планирования, охватывающая как верхний, так и средний уровни классической системы планирования, является моделью агрегированного расписания, разработана совместно с научным руководителем профессором А.А. Павловым и к.т.н. с.н.с. Е.В. Мисурой и представляется следующим образом.

Пусть совокупность производственных средств и станков разделена на отдельные автономные производственные ячейки. Примем в качестве планово-учетной единицы ячейкокомплект, который является агрегированным представлением совокупности операций, выполняемых в одной производственной ячейке в рамках одного ячейкозахода по одному изделию. Производство характеризуется длительными и средними технологическими циклами с широкими взаимосвязями между ячейками по передаче продукции.

Необходимо изготовить  $N$  изделий (партий). Общая технология изготовления всех изделий задана в виде ациклического графа  $G$ , состоящего из  $N'$  компонент связности. Граф  $G$  содержит  $N$  конечных вершин, соответствующих  $N$  изделиям. В качестве вершин графа используются ячейкокомплекты, дуги, связывающие ячейкокомплекты, регламентируют технологию изготовления изделий. Граф  $G$  содержит только критические пути изготовления каждого изделия. Все промежуточные вершины, не принадлежащие критическим путям, на графе  $G$  не показаны. Граф  $G$ , таким образом, является агрегированным графом производства  $N$  изделий. Так как прибыль может быть получена только по готовому изделию, то весовые коэффициенты (удельная прибыль) приписываются только конечным вершинам. Общие вершины на графе, соответствующие общим ячейкокомплексам, отражают "узкие места" в производстве, пересечение технологических маршрутов и пр.

Таким образом, задана четверка:  $\langle J, R, G, \Phi \rangle$ , где  $J = \{j_i \mid i = \overline{1, N}\}$  - множество изделий, составляющих производственную программу;  $j = \{a_{jk} \mid k = \overline{1, K_j}\}$  - множество ячейкокомплектов  $j$ -го изделия;  $K_j$  - количество ячейкокомплектов критического пути  $j$ -го из-

делия;  $J_1 \cap J_m \neq \emptyset$ , т.е. разные изделия могут иметь общие ячейкокомплекты;

$R = \{ r_{ia_k} \mid i \in I_k, a_k \in J, j \in J \}$  - множество ресурсов для выполнения производственной программы,  $I_k$  - множество операций критического пути  $a_k$  - го ячейкокомплекта. Каждая  $i$  - я операция  $a_k$  - го ячейкокомплекта реализуется определенным  $r_{ia_k}$  - м ресурсом с трудоемкостью  $q_{ia_k}$ ;

$G = (V, E)$  - ациклический граф, отражающий технологию производства изделий, содержит критические пути каждого изделия;

$V = \{ a_k \mid a_k \in J, j \in J, k = \overline{1, K_j} \}$  - множество вершин (ячейкокомплектов) критических путей графа  $G$ ;  $E = \{ L_j^{kp} \mid j \in J \}$  - множество дуг, составляющих критические пути изготовления всех изделий. С каждой вершиной графа связан удельный вес (удельная прибыль)  $C_j$ .  $C_j \neq 0$  для конечных вершин. Общая прибыль от реализации  $j$  - го изделия является функцией времени:  $C_j(t) = C_j(T_{пл} - T_j^k)$ , где  $T_{пл}$  - период планирования,  $T_j^k$  - конечный срок выпуска  $j$  - го изделия;

$\Psi$  - критерий эффективности плана.

Необходимо сформировать номенклатурно-объемный план каждой структурной единицы (ячейке) предприятия с разбивкой по плановым периодам, учитывающий меняющуюся стоимость продукции в зависимости от времени ее выпуска, технологические условия производства и максимизирующий суммарную прибыль предприятия:

$$j \in \sum_j C_j (T_{пл} - T_j^k) \rightarrow \max \quad (1)$$

при ограничениях на трудоемкости ресурсов ячеек

$$a_k \in \sum_{K_{fs}} i \in \sum_{I_k} q_{ia_k}^{fs} \leq Q_{fs} \quad (2)$$

где  $q_{ia_k}^{fs}$  - трудоемкость выполнения  $i$  - ой операции  $a_k$  - го ячейкокомплекта в ячейке  $f$  в  $v$  - м интервале планирования;

$K_{fs}$  - множество ячейкокомплектов, назначенных ячейке  $f$  в  $v$  - м интервале планирования;  $Q_{fs}$  - наличный фонд трудоемкости ресурсов ячейкокомплектов, назначенных ячейке  $f$  в период  $v$ .

Данная задача относится к классу задач многосетевого планирования с ограниченными ресурсами и в общем случае является NP-трудной в сильном смысле. В работе реализована модель при следующих допущениях: длительность изготовления каждого изделия и ячейкокомплекта определяется его критическим путем; общие ячейкокомплекты различных изделий лежат на их критических путях; ячейкокомплект не передается в другие ячейки до его полного завершения; производительность в каждой группе взаимозаменя-

ёмого оборудования одинакова; все заказы на изготовление изделий поступают одновременно. Реализация задачи осуществляется в рамках двухуровневой системы планирования. На первом уровне производится построение агрегированной модели планирования, в которой предприятие представлено в виде одного станка, определены агрегированные параметры модели. Для сведения задачи первого уровня к задаче одного станка выполнены следующие процедуры агрегирования:

1. Агрегирование операций над одним изделием в рамках одного ячейкокомплекта :

$$a_k^j = \{ i \in U_{I_k}^j \mid a_k \in j, j \in J, k = \overline{1, K_j} \},$$

$I_k$  - множество операций критического пути ячейкокомплекта  $a_k$  изделия  $j$ ;  $K_j$  - количество ячейкокомплектов  $j$ -го изделия;  $o_{i a_k}^j$  -  $i$ -я операция  $a_k$ -го ячейкокомплекта  $j$ -го изделия.

2. Агрегирование оборудования предприятия в один станок:

$$B = \sum_{l \in L} b_{lf}, \text{ где } b_{lf} - l - \text{й тип оборудования } f - \text{й ячейки.}$$

3. Агрегирование длительностей операций и ячейкокомплектов:

$$t_{a_k}^j = \sum_{i \in I_k} t_{i a_k}^j / n_{i a_k}; \quad t_j = T_{пл} * L_j^{кр} / \sum_{j \in J} L_j^{кр},$$

где  $t_{a_k}^j$  - агрегированная длительность ячейкокомплекта  $a_k^j$  для внутризачечного планирования;  $t_j$  - агрегированная длительность производства изделия  $j$ ;  $t_{i a_k}^j$  - длительность  $i$ -й операции ячейкокомплекта  $a_k^j$ ;  $n_{i a_k}$  - количество рабочих мест для выполнения  $i$ -ой операции  $a_k$ -го ячейкокомплекта;  $T_{пл}$  - период планирования.

4. Агрегирование трудоемкости :

трудоемкость  $a_k$ -го ячейкокомплекта  $j$ -го изделия:  $q_{a_k}^j = \sum_{i \in I_k} q_{i a_k}^j$

где  $q_{i a_k}^j$  - трудоемкость  $i$ -й операции  $a_k$ -го ячейкокомплекта  $j$ -го изделия;

трудоемкость  $j$ -го изделия:  $q_j = \sum_{k \in K_j} q_{a_k}^j$  ;

наличный фонд трудоемкости ресурса  $f$  - й ячейки в  $v$ -й интервал планирования:  $Q_{fv} = \sum_{k \in K_{fv}} q_j$  .

В результате преобразования критерия максимизации прибыли

$$\max_{j \in J} \sum_j C_j (T_{пл} - T_j^k) = T_{пл} \sum_{j \in J} C_j - \min_{j \in J} \sum_j C_j T_j^k.$$

получаем критерий минимизации суммарного взвешенного момента окончания выпуска изделий

$$\sum_{j \in J} C_j T_j^k \rightarrow \min. \quad (3)$$

Использование процедур агрегирования приводит к задаче агрегированного расписания в виде задачи одного станка: задано множество изделий  $j \in J$ , частичный порядок в виде ациклического графа

$G(V, E)$ , длительности выполнения ячеек комплектов  $t_{\alpha_k}^j$  и изделий  $t_j$ , веса  $c_j$  конечных вершин; построить расписание, удовлетворяющее условию частичного порядка  $G(V, E)$  и обеспечивающее  $\min_{j \in J} \sum_{\alpha} c_j t_{\alpha}^k$ .

Теоретическое обоснование полиномиальной разрешимости рассматриваемой задачи выполнено на основе анализа схемы решения общей задачи составления расписаний при минимизации суммарного взвешенного момента окончания выпуска изделий в результате совместных исследований с профессором А.А. Павловым и к.т.н. Е.Б. Мисурой. Исследование структур технологических процессов на производстве для отражения специфики задачи позволили выполнить классификацию ориентированных графов, для которых в работе приведены полиномиальные алгоритмы получения упорядоченных последовательностей выпуска изделий. В качестве признака классификации использовалось понятие общей вершины, что соответствует наличию узких мест, промежуточных сборочных ячеек, пересечению технологических маршрутов и т.д. Выделено 6 структур ориентированных графов. Для каждой из структур, являющихся частным случаем ациклических графов, на основе ниже приведенных положений определены структуры решения, основанные на перестановках ячеек комплектов, цепочек, конструкций в соответствии с их приоритетами в последовательностях ячеек комплектов с трудоемкостями  $O(n \log n)$  или  $O(n^2)$ .

Определение 1. Последовательность  $\alpha(j_{[g]}) = (j_{[r]}, \dots, j_{[g]})$  называется цепочкой, если:  $(\forall j_{[1]} \in \alpha(j_{[g]})) (j_{[1]} < j_{[g]} | 1 < g, 1 = r, g-1)$ , где  $j_{[1]}$  - ячейкoкомплект, занимающий позицию 1 в цепочке  $\alpha$ ; символ  $<$  определяет предшествование ячеекoкомплектов.

Определение 2. Приоритетами ячеекoкомплекта и цепочки называются величины  $P_j, P_\alpha$ :  
 $(\forall j_{[g]} \in J_k) (P_{j_{[g]}} = \omega_{j_{[g]}} / l_{j_{[g]}}); P_\alpha = (\Omega_\alpha / L_\alpha | \Omega_\alpha = \sum_{r=1}^g \omega_{j_{[r]}}, L_\alpha = \sum_{r=1}^g l_{j_{[r]}})$ ,  
 $J$  - множество конечных вершин графа;  $\omega_{j_{[1]}}$ ,  $(\Omega_\alpha)$  - веса,  $l_{j_{[1]}}$ ,  $(L_\alpha)$  - длительности ячеекoкомплекта  $j_{[1]}$  (цепочки  $\alpha$ ).

Определение 3. Приоритетно - упорядоченной (p-упорядоченной) называется последовательность  $\sigma = (\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_N)$ , если  
 $\sigma_1 = \{j_{[1]} | j_{[1]} \in \sigma_1, 1 \in K_{\sigma_1}, d=0, P(\sigma_1) = \max_1 P(\sigma_1), i=1, N, \sigma_i \in J\}$ ,  
 $\sigma_k = \{j_{[m]} | j_{[m]} \in \sigma_k, m \in K_{\sigma_k}, d=d_k, P(\sigma_k) = \max_1 P(\sigma_1), i=k, N, \sigma_k \in J \setminus \sigma_1, \dots, \sigma_{k-1}\}$ ,  
 где  $J$  - множество изделий,  $d$  - момент выполнения последовательности  $\sigma_1$ ,  $K_{\sigma_1}$  - количество ячеекoкомплектов последовательности  $\sigma_1$ .

Утверждение 1. Если в допустимой последовательности  $\sigma$

( $\exists J_1 = (J_{\{r\}}, \dots, J_{\{g\}}), \exists J_2 = (J_{\{s\}}, \dots, J_{\{t\}}), r < g$ )

( $\omega_{J_{\{g\}}} / \sum_{k \in r} 1_{J_{\{k\}}} < \omega_{J_{\{t\}}} / \sum_{k \in s} 1_{J_{\{k\}}}$ ), то  $J_2 < J_1$ . т.е. изделие  $J_2$  выполняется раньше изделия  $J_1$  в  $p$ -упорядоченном расписании  $\sigma$ . Рассмотрим некоторые структуры ориентированного ациклического графа.

1). Для графа  $G$ , имеющего  $N$  компонент связности (по числу изделий), при отсутствии общих вершин  $p$ -упорядоченное расписание на основании приведенных определений и утверждений имеет вид

$\sigma = (\sigma_1, \dots, \sigma_m, \dots, \sigma_n)$ :

$\sigma_1 = \{J_{\{k\}} | J_{\{k\}} \in J_1, i \in I, k = \overline{1, K_1}, P(\sigma_1) = \max \omega_{J_1} / L_{J_1}^{kp}\}$ ,

$\sigma_m = \{J_{\{l\}} | J_{\{l\}} \in J_m, m \in I \setminus \{1\}, l = \overline{1, K_m}, P(\sigma_m) = \max P(\sigma_r), \sigma_r \in J \setminus \sigma_1 \dots \sigma_{m-1}\}$ ,  
 $L_{J_1}^{kp}$  - длина критического пути изделия  $J_1$ ,  $I$  - множество индексов изделий,  $K_1$  - количество ячейкокомплектов изделия  $J_1$ ,  $P(\sigma)$  - приоритет последовательности  $\sigma$ .

2).  $P$ -упорядоченное расписание для структуры типа "выходящее дерево" строится на основе утверждений 2,3.

Утверждение 2. ( $\forall J_{\{g\}} \in \sigma_{\text{уп}}^H$ ) ( $\exists$  не более одного  $J_{\{k\}} | J_{\{g\}} \ll J_{\{k\}}$ )

( $\sigma_{\text{уп}}^H = (\text{pr} J_{\{k\}}, J_{\{k\}} | P_{J_{\{k-1\}}} \geq P_{J_{\{k\}}}$ ),  $g, k = \overline{1, N}$ ),

где  $\text{pr} J_{\{k\}}$  - все непосредственные предшественники  $J_{\{k\}}$ .

Утверждение 3. Если  $\sigma^k \in \sigma_{\text{уп}}^H$ ,  $\sigma^k = (J_{\{g\}}, \dots, J_{\{n\}})$  -  $p$ -упорядочена,

$J_{\{g-1\}} < J_{\{g\}}$ ,  $P_{J_{\{g-1\}}} < P_{J_{\{g\}}}$ , то  $J_{\{g-1\}}^g = J_{\{g-1\}} \cup J_{\{g\}}$  с характеристиками:

$\omega_{J_{\{g-1\}}^g} = \omega_{J_{\{g-1\}}} + \omega_{J_{\{g\}}}$ ;  $l_{J_{\{g-1\}}^g} = l_{J_{\{g-1\}}} + 1_{J_{\{g\}}}$ .

Оптимальное решение достигается в результате встраивания ячейкокомплектов  $J_{\{g-1\}}$ ,  $g = \overline{1, N}$  на более поздние в  $\sigma_{\text{уп}}^H$  позиции в соответствии с их приоритетами.

3).  $P$ -упорядоченное расписание для структуры графа, в которой общие вершины имеют предшественников, у приемников общих вершин нет других предшественников, кроме общих вершин строится на основе утверждений 4,5.

Утверждение 4. ( $\forall J_{\{g\}} \in \sigma_{\text{уп}}^H$ ) ( $\exists$  не более одного  $J_{\{k\}} \ll J_{\{g\}}$ )  
 ( $\exists$  не более одного  $J_{\{l\}} | J_{\{g\}} \ll J_{\{l\}}$ ).

Утверждение 5.

( $\exists \sigma_{\text{opt}} | J^g = J_{\{g\}} \cup \text{pr} J_{\{g\}}$ ,  $\omega_{J^g} = \sum_{k=1}^g \omega_{J_{\{k\}}}$ ,  $l_{J^g} = \sum_{k=1}^g l_{J_{\{k\}}}$ ), где

$J_{\{g\}}$  - общая вершина,  $\text{pr} J_{\{g\}}$  - предшественники  $J_{\{g\}}$ ,  $g$  - позиция конечной вершины в цепочке  $\text{pr} J_{\{g\}}$ .

Оптимальная последовательность имеет вид  $\sigma_{\text{opt}} = (\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n)$ :

$\sigma_{opt} = \{(\sigma_1 | j_{[g]} \cup \text{pr} j_{[g]}, j \in J_0), (\sigma_2 | P(\sigma_2) = \max_{i=2, \dots, N} \Omega_i / L_i, \sigma_2 \in J \setminus J_0), \dots\}$ ,  
 $J_0$  - множество, содержащее общую вершину и ее предшественников.

4) Для получения р-упорядоченного расписания для графа, в котором общие вершины и их приемники имеют одних и тех же предшественников, рассмотрим ряд определений и утверждений.

Определение 4. Интервалом эффективного переноса для ячейкокомплекта  $J_{[g]}$  называется величина:

$$(I_{J_{[g]}}^g = \sum_{k=g-1}^g 1_{j_{[k]}} | \max(\omega_{j_{[g]}} \sum_{k=g-1}^g 1_{j_{[k]}} - 1_{j_{[g]}} \sum_{k=g-1}^g \omega_{j_{[k]}}) > 0), \rho = \overline{1, g-1}),$$

для цепочки ячейкокомплектов:

$$(I_{\alpha}^g = \sum_{k=q}^r 1_{j_{[k]}} | \max(\Omega_{\alpha} \sum_{k=q}^{r-1} 1_{j_{[k]}} - L_{\alpha} \sum_{k=q}^{r-1} \omega_{j_{[k]}}) > 0), q = \overline{1, r-1}),$$

где  $\rho, q$  - позиции встраивания ячейкокомплекта  $J_{[g]}$  и цепочки  $\alpha$  в последовательность ячейкокомплектов в соответствии с их приоритетами.

Утверждение 6. Если  $\sigma^1 = (j_{[1]}, \dots, j_{[g-1]})$  - р-упорядочена,  $\sigma^2 = \sigma^1 \cup j_{[g]}$ ,  $\alpha(j_{[g]}) = (j_{[r]}, \dots, j_{[g]})$  - цепочка, для  $\forall j_{[1]} \in \sigma^2 \setminus \alpha(j_{[g]}) \ni j_{[1]} \prec \alpha(j_{[g]})$ , то для получения р-упорядоченного расписания необходимо  $\alpha(j_{[g]})$  встроить на позицию, определяемую  $I_{\alpha}^g$ .

Утверждение 7. Пусть в результате выполнения процедуры  $I_{\alpha}^g$  получена последовательность  $\sigma^3$ :

$(\sigma^3 \ni \beta(j_{[g]}) \in \sigma^3, \beta(j_{[g]}) \prec \alpha(j_{[g]})$ ,  $j_{[1]} \in \sigma^3 \setminus \beta(j_{[g]}) \cup \alpha(j_{[g]})$ ,  $j_{[1]} \prec \alpha(j_{[g]})$ ,  $P_{\beta} \geq P_{\alpha}$ ). Для получения р-упорядоченного расписания  $\sigma^3$  необходимо  $\alpha(j_{[g]})$  встроить на позицию, определяемую  $I_{\alpha}^g$ .

Если  $\beta(j_{[g]}) \ll \alpha(j_{[g]})$ ,  $P_{\beta} < P_{\alpha}$ , то  $\gamma(j_{[f+n_1]}) = \beta(j_{[g]}) \cup \alpha(j_{[g]})$ . Т.к.  $P_{\gamma} \geq P_{\beta}$ , то формируется последовательность  $\sigma^4$  в результате выполнения процедуры  $I_{\gamma}^g$  и смещения  $J_{[k]}$  на более поздние позиции:

$$(\sigma^4 | P_{j_{[1]}} < P_{\alpha} \cdot j_{[1]} \in J_{\alpha}^g \cdot P_{j_{[k]}} < P_{\gamma} < P_{\alpha} \cdot j_{[k]} \in J_{\gamma}^g).$$

Переупорядочив ячейкокомплекты на интервале  $f+n_1-n_2+1, g$  в соответствии с их приоритетами, получаем последовательность  $\sigma^5$ , где  $n_1$  - число ячейкокомплектов цепочки  $\alpha(j_{[g]})$ ;  $J_{\alpha}^g, J_{\gamma}^g$  - множества ячейкокомплектов, смещенных на более поздние позиции в результате процедуры  $I_{\alpha}^g, I_{\gamma}^g$  соответственно;  $\text{card}(J_{\gamma}^g) = n_2$ .

Определение 5. Конструкцией максимального приоритета  $K$  называется допустимая подпоследовательность, имеющая максимальный приоритет из всех возможных допустимых подпоследовательностей:

$K = (\gamma(j_{[f+n_1-n_2]}) \cup j_{[1]}, 1 = \overline{f+n_1-n_2+1, g}, g = \overline{1, n_3})$ , где  $Q, (\text{card}(Q) = n_3)$  - множество ячейкокомплектов, занимающих позиции  $f+n_1-n_2, f+n_1-n_2+n_3$ . Если  $P_K > P_{\gamma}$ , то выполняется процедура  $I_{\gamma}^g$  и формируется  $\sigma^6$ :

$$\sigma^6 = \{j_{\{1\}} \in J_K^9, K \cdot j_{\{q\}} \in Q \mid P_{j_{\{1\}}} > P_\gamma, P_{j_{\{1\}}} < P_K, P_{j_{\{1\}}} > P_\gamma\}.$$

$J_K^9$  - множество ячейкокомплектов, смещенных на поздние позиции в результате  $I_K^9$ . Встроив  $j_{\{1\}} \in J_K^9$  на позиции в соответствии с их приоритетами, получаем  $p$ -упорядоченную последовательность  $\sigma^7$ . При построении конструкций ячейкокомплектов исключается перебор различных вариантов конструкций, что обеспечивает полиномиальность решения.

На основании рассмотренных правил построения  $p$ -упорядоченного расписания допустимой последовательности  $\sigma$  построены алгоритмы  $A_1$  получения  $p$ -упорядоченных последовательностей, удовлетворяющие критерию (3), для случаев, когда отношение порядка задано различными частными структурами ориентированного ациклического графа.

Теорема 1. Для рассмотренных структур (1 - 4) ориентированного ациклического графа алгоритмы  $A_1$  приводят к  $p$ -упорядоченному расписанию.

Теорема 2. Трудоемкость построения  $p$ -упорядоченного расписания с помощью алгоритмов  $A_1$  определяется полиномиальной функцией от числа конечных вершин.

Теорема 3.  $P$ -упорядоченное расписание является оптимальным.

Вычислительная схема решения задачи второго уровня.

Задача второго уровня заключается в распределении производственной программы по плановым периодам между ячейками (подразделениями) предприятия. Задача решается с учетом приоритетов запуска ячейкокомплектов в производство, полученных в результате реализации задачи первого уровня в рамках агрегированной информатики и формулируется как задача составления расписания обработки  $N$  изделий на  $M$  станках при заданных длительностях  $l_{ij}$  обработки изделия  $j$  на станке  $i$ , технологии обработки  $G(V, E)$ , трудоемкости ресурсов  $q_{1j}^s$  в  $s$ -м интервале планирования и приоритетах  $P_j$  изделий. Критерий оптимальности  $j \in \sum_j C_j T_j^k (\sigma) \rightarrow \min$  обеспечивает минимальное время выпуска наиболее выгодных с точки зрения прибыли изделий (ячейкокомплектов) и, значит, максимальную прибыль по всем изделиям  $\max_{j \in \sum_j C_j (T_{пл} - T_j^k)}$ .

Ограничения (2) являются локальными ограничениями по трудоемкости ресурсов ячеек, при этом  $q_{1a_k}^{fs} = r_{1a_k}^{fs} * u_{1a_k}$ , где  $r_{1a_k}$  - интенсивность потребления ресурса на  $i$ -й операции  $a_k$ -го ячейкокомплекта  $i$ -й ячейки в  $s$ -м интервале,  $u_{1a_k}$  - объем ресурсов. Связывающими уровни ограничения являются ограничения на приоритетность запаздывающих (невыполненных) изделий:

$$(\forall j \in J \mid T_{пл} - T_j^k < 0, B > 0, \sum_j P_j \leq B). \quad (4)$$

Взаимодействие моделей 1-го и 2-го уровней осуществляется путем передачи на 2-й уровень приоритетов  $P = (P_k | k \in K_j, j \in J)$  ячейкокомплектов критических путей изделий и  $p$ -упорядоченной последовательности  $\sigma = (\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_N)$  ( $\sigma_j, j = \overline{1, N}$  - подпоследовательности максимального приоритета соответствующих изделий), регламентирующих очередность распределения по интервалам планирования. При невозможности распределить ячейкокомплект  $a_k \in \sigma_j$  в некотором интервале (невыполнение (2)) вся подпоследовательность  $\sigma_j$  переносится на другой интервал и возникает запаздывание в выпуске изделия  $j$ , что проверяется в соответствии с (4). При невыполнении (4) необходимо осуществлять мероприятия по ликвидации "узких мест": увеличение коэффициента сменности оборудования, переход на другие технологические режимы и пр.

Для реализации задачи предлагается эвристический алгоритм, который производит распределение ячейкокомплектов таким образом, что ячейкокомплекты наиболее приоритетных изделий распределяются первыми, и ограничения по ресурсам на них сказываются в меньшей степени, чем на ячейкокомплекты, стоящие на более поздних в  $p$ -упорядоченной последовательности позициях.

Вычислительная схема предусматривает следующие этапы:

1. Инициализация работы.
2. Формирование подпоследовательностей ячейкокомплектов максимального приоритета с учетом всех предшественников для получения полного технологического маршрута производства изделий.
3. Определение ячейки и интервала назначения ячейкокомплекта по критериям наиболее раннего высвобождения ячейки, наличия резерва времени в ячейке и выполнения ресурсного ограничения по трудоемкости.
4. Определение ячейкокомплекта для распределения в выбранную ячейку и интервал планирования по критерию минимального возможного момента начала его выполнения.
5. Формирование производственных планов подразделений (ячеек), множества ячейкокомплектов, готовых к распределению в соответствии с их приоритетностью.
6. Проверка окончания формирования плана.

Результат - месячные (квартальные) номенклатурно-объемные планы (НОП) ячейкам (цехам) предприятия. Параметры, передаваемые на третий уровень:  $\sigma_{fs} = (a_k^{fs} | k \in K_{fs}, f \in P, s \in \{1, T_{пл}\})$  - НОП ячейке  $f$  на период  $s$ .

Теоретическое исследование вычислительной эффективности схемы распределения ячейкокомплектов по подразделениям и интервалам планирования показало:

1. объем памяти, необходимой для решения задачи ограничен

полиномом от размерности задачи:  $O(n \cdot m)$ , где  $n$  - число ячейко-комплектов,  $m$  - число ячеек;

2. число операций по получению подпоследовательностей ячейко-комплектов максимального приоритета с учетом всех предшествующих ограничено полиномом от числа ячейкокомплектов  $O(n \log n)$ .

3. верхняя оценка числа перебираемых вариантов плана ограничена полиномом от размерности задачи.

#### Календарное планирование работ сборочного цеха.

Задача решается в рамках внутрицехового планирования. Поступающее в цех плановое задание формируется на этапе объемно-календарного планирования и подлежит дальнейшей детализации. Необходимо построить календарный план работ цеха на заданный период с распределением бригадокомплектов по бригадам при ограничениях на трудоемкость работы бригад. При этом работы интерпретируются как бригадокомплекты, т.е. совокупность технологических операций, выполняемых последовательно одной бригадой над изделием или его сборочной единицей. Технологические операции, включенные в один бригадокомплект, имеют одинаковую норму времени. Изделие интерпретируется как цехокомплект, т.е. совокупность всех работ (бригадокомплектов), выполняемых в цехе над одной единицей серии изделий. Все бригады разбиты на альтернативные группы. Сеть цехокомплекта представляет собой технологию сборки каждого изделия и задана структурой типа "входящее дерево".

Критерии оптимальности :

1) минимизация суммы штрафов запаздывающих изделий относительно директивного срока:

$$\sum_{j=1}^N P_j \Phi(T_j^k - D_j) \rightarrow \min, \quad (5)$$

$$\text{где } \Phi(T_j^k - D_j) = \begin{cases} 0, & \text{если } T_j^k - D_j \leq 0 \\ 1, & \text{если } T_j^k - D_j > 0 \end{cases}$$

$D_j, T_j^k$  - директивный и фактический сроки окончания сборки  $j$ -го цехокомплекта соответственно;  $P_j$  - штраф за невыполнение  $j$ -го цехокомплекта к директивному сроку.

2) обеспечение равномерности загрузки бригад:

$$\forall i \in I, \quad \left| \frac{TR_1^{ПЛ}}{TR_1^H} - \frac{1}{K_{jq}} \sum_{i=1}^{K_{jq}} \frac{TR_1^{ПЛ}}{TR_1^H} \right| \rightarrow \min, \quad (6)$$

где  $TR_1^{ПЛ}, TR_1^H$  - плановая и нормативная трудоемкости  $i$ -й бригады;  $K_{jq}$  - количество бригад, выполняющих работу  $q$  над цехокомплексом  $j$ ;  $i \in I$  - множество бригад;  $q \in Q$  - множество работ, выполняемых

над изделием  $j$ ;  $D_{jq}$  - директивный срок окончания работы  $jq$ ;  
 $d_{jq}$  - наименьшее время начала работы  $jq$ ;  $w_{jq}$  - длительность выполнения работы  $jq$ .

Задача решается при ограничениях :

- 1)  $R_1^{пл} \leq TR_1^H$  ;
- 2)  $D_{jq} = d_{jq} + w_{jq}$  (отсутствие прерываний работ) ;
- 3)  $d_{j_1 q_1} \leq d_{j_2 q_2} \leq D_{j_1 q_1}$  (одновременность работ);
- 4) альтернативность бригад ;
- 5) равномерность загрузки бригады.

Для решения задачи разработана эффективная с точки зрения памяти ЭВМ и времени решения итерационная процедура оперативного планирования:

- 1). Построение упорядоченной последовательности работ по каждому изделию на основании сортировки работ по трудоемкости, директивным срокам окончания обработки и резервов времени.
- 2 . Построение упорядоченной последовательности изделий к цеху.
- 3). Построение упорядоченной последовательности бригад, приоритетность которых определяется по их загрузке.
- 4). Назначение работ на бригады.

На этапе 2 решается задача одного станка при заданных длительностях, директивных сроках, приоритетах изделий по критериям (5), (6). Для реализации этапа 4 предложен ряд эвристических полиномиальных алгоритмов по критериям минимизации времени выполнения работ и равномерности загрузки бригад. Статистические испытания позволили получить числовые оценки оперативной памяти и времени решения на ЭВМ: при 2000 работах, 100 изделиях, время счета - 20 минут ЕС1045. Объем памяти определяется полиномом от размерности задачи.

#### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ.

В результате решения поставленных в работе задач получены следующие результаты .

1. Выполнен анализ объекта управления, которым является мелкосерийное производство, функционирующее в рыночных условиях. Показана роль прибыли, фактора времени в обеспечении прибыльности предприятия. Определены особенности планового управления мелкосерийным производством.

2. Предложена двухуровневая система планирования мелкосерийного производства по критерию максимизации прибыли в условиях, когда стоимость выпускаемых изделий является линейной функцией

от момента выпуска изделий. С целью решения задачи распределения производственной программы по подразделениям и плановым периодам разработана агрегированная модель, сводящая задачу ОБКП к задаче агрегированного расписания одного станка, в качестве которого представлено предприятие. Сформулирована NP- трудная задача комбинаторной оптимизации в рамках многосетевой задачи календарного планирования с ограниченными ресурсами.

3. Разработана процедура сведения задачи первого уровня к задаче агрегированного расписания одного станка по критерию минимизации суммарного взвешенного момента окончания выпуска продукции, когда технология производства всех изделий задана ориентированным ациклическим графом, содержащим только критические пути всех изделий с весовыми коэффициентами, заданными для конечных вершин графа.

4. Исследованы частные случаи общей модели при различных представлениях технологий обработки изделий в виде различных структур графа, являющихся частными случаями ориентированного ациклического графа. Доказана оптимальность решения задачи первого уровня. Трудоемкость решения частных случаев общей многосетевой задачи календарного планирования оценивается функциями  $O(n \log n)$ ,  $O(n^2)$ . В качестве теоретического обоснования используется подход, расширяющий границы перестановочного приема составления расписания.

5. Разработана методика взаимодействия моделей первого и второго уровней.

6. Сформулирована и решена задача второго уровня - распределение производственной программы по ячейкам и интервалам планирования на основе приоритетно-упорядоченного агрегированного расписания. Разработан полиномиальный эвристический алгоритм по критерию минимизации суммарного взвешенного момента окончания изготовления наиболее приоритетных изделий. Реализация задачи приводит к максимизации суммарной прибыли от своевременного выхода на рынок с наиболее приоритетной продукцией.

7. Разработана модель и вычислительная процедура решения задачи внутрицехового планирования в рамках задачи формирования номенклатурно-объемных планов в разрезе бригадокомплектов для сборочного цеха мелкосерийного производства по критерию минимизации суммы штрафов за запаздывание изделий при обеспечении равномерности загрузки бригад в пределах нормативной трудоемкости.

8. Разработана программная система, реализующая предложенные алгоритмы решения задачи пооперационного календарного планирования.

9. Проведено экспериментальное исследование алгоритмов на точность получаемых решений.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ.

1. Ковалжк Т.В., Гершгорин А.Б., Остапченко К.Б. Об одном алгоритме решения задач планирования в АСУ / В сб. Автоматизированные системы управления и манипуляторы (роботы) на предприятиях горнодобывающей промышленности.- М., ЦНИИТЭИ приборостроения, 1984.- с.36 - 37.

2. Ковалжк Т.В., Гриша С.Н., Гершгорин А.Б., Остапченко К.Б. О реализации средств обеспечения автоматизированного рабочего места при маневрировании ресурсами / Киевский политех.институт Депонир. рукопись в УкрНИИТИ No 104-Ук85 ДЕП 15.01.85.-10 с.

3. Гриша С.Н., Гершгорин А.Б., Ковалжк Т.В., Остапченко К.Б. Об одной задаче межцехового планирования / Киевский политех. институт. Депон. рукоп. в УкрНИИТИ No 162-Ук85 ДЕП 25.01.85.-10с.

4. Павлов А.А., Мисюра Е.Б., Михайлов В.В., Ковалжк Т.В. Планирование выпуска продукции для мелкосерийного производства в условиях хозрасчета / Киевский политех. институт.-Киев, 1989. Деп. в УкрНИИТИ No 1991-Ук89.-11 с.

5. Павлов А.А., Мисюра Е.Б., Михайлов В.В., Ковалжк Т.В. Определение плана выпуска продукции с учетом меняющейся конъюнктуры рынка / Научно-техническая конф. "Проблемы развития АСУ и информационных услуг в новых условиях хозяйствования".-Душанбе, Гос. Комитет Таджикской ССР, 1989 -22 с.

6. Лузан А.В., Ковалжк Т.В., Лысенко Ю.Г., Теленик С.Ф., Елизаров С.В., Цокол С.Л., Завадский Н.В., Петренко В.Л. Опыт планирования АСУ малых предприятий средствами АБДАН / Препринт доклада институт экономики промышленности АН УССР.-Донецк, 1990.-27 с.

7. Павлов А.А., Михайлов В.В., Щербатенко О.В., Ковалжк Т.В. Составление расписания выполнения частично упорядоченного множества работ по критерию минимизации общей длины расписания. / Киевский политех. институт, Киев, 1989, Деп. в УкрНИИТИ No 706-Ук89 от 6.03.89.-11 с.

8. Павлов А.А., Мисюра Е.Б., Ковалжк Т.В. Алгоритмическое обеспечение согласованного планирования многономенклатурного производства с ограниченными ресурсами в условиях рынка / Киевский политех. институт, Киев, 1991. Деп. в УкрНИИТИ No 1297-Ук91 от 27.09.91.-65 с.

Подп. к печ. 18.09.92

Формат 60x84/6 Бумага *мелк.*

Печ. офс. Усл. печ. л. 29

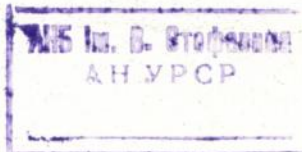
Уч.-изд. л. 26

Тираж 100

Зак. 1-3108 Бесплатно.

---

Киевская книжная типография научной книги. Киев, Репина, 4.



467656

AB 25.775

34