

681.50

П 75



выпуск 21



535200



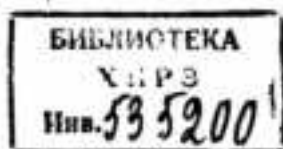
ПРИБОРЫ

И СИСТЕМЫ

АВТОМАТИКИ

ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИКИ

Выпуск 21



535200

ИЗДАТЕЛЬСТВО
ХАРЬКОВСКОГО ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА имени А. М. ГОРЬКОГО
Харьков 1972

В сборнике освещены вопросы, связанные с теорией, разработкой и внедрением в практику производства автоматических систем управления, информационных систем. Даны алгоритмы решения некоторых задач управления производством.

Сборник рассчитан на научных работников вузов и научно-исследовательских институтов, инженерно-технических работников, занимающихся планированием и управлением производства, а также на аспирантов и студентов старших курсов.

Сборник подготовлен редакционной коллегией при Харьковском институте радиолэктроники.

Редакционная коллегия:

проф. Е. Я. Иванченко (отв. редактор), проф. А. А. Волков (зам. отв. редактора), доц. Н. Ф. Осераднейчук (отв. секретарь), чл.-корр. АН УССР докт. техн. наук В. Г. Сергеев, проф. Н. Ф. Котляренко, проф. Н. В. Куцальмин, доц. В. А. Михайлов, доц. А. П. Стахов, доц. А. Н. Ефимов, доц. В. В. Свиридов, проф. Ф. А. Катков, доц. Э. А. Ледиков, канд. техн. наук В. П. Лысач, доц. К. Д. Кановаленко.

Ответственный за выпуск доц. К. Д. Кановаленко.

Адрес редакционной коллегии:

Харьков, пр. Ленина, 14, Институт радиолэктроники.

ВОПРОСЫ СОЦИОЛОГИИ АСУП

А. Я. Шекшув

Харьков

Главная задача автоматизированных систем управления предприятием — повышение производительности управленческого труда, эффективности общественного производства, разработка и осуществление научно обоснованных планов с минимальными затратами трудовых, материальных и денежных ресурсов.

Автоматизированная система управления должна объединить возможности вычислительной техники с работой планово-управленческого аппарата и всего коллектива работающих. Поэтому проектирование и внедрение АСУП не может быть сведено лишь к установке и отладке определенной системы соответствующих вычислительных машин. В такой системе электронная вычислительная машина — далеко не самая главная часть.

Управление общественным производством не может быть сведено к управлению техникой и технологическими процессами. Всякое промышленное предприятие представляет собой сложный жизнедеятельный организм, совокупность взаимосвязанных, тесно переплетенных и взаимодействующих слагаемых. Это и люди, объединенные в коллективы, отделы, цехи, бригады, и техника, механизмы, сырье, производственные здания, транспорт и другие материальные средства. Задача управления — обеспечить оптимальное сочетание различных звеньев данной системы в целях получения наибольшего производственного эффекта при наименьших затратах.

Управление предприятием — это прежде всего управление людьми, общественным трудом людей. Но там, где люди, неизбежно возникают отношения между ними, а следовательно, и социологические проблемы. В связи с этим системный подход к проектированию и внедрению автоматизированных систем управления предприятием предполагает серьезные социологические исследования.

Тот факт, что современная научно-техническая революция все более выдвигает на первый план человека в производстве,

отчетливо осознают и буржуазные идеологи, особенно социологи. Буржуазная социология и социальная психология развивались в последние десятилетия как метод наблюдения, оценки и устранения тех трений и напряжений, которые возникали в модернизирующемся обществе. Исследования в этих областях ограничиваются вопросами, интересующими монополии с точки зрения решения непосредственных практических задач. Социология принята буржуазными правительствами и бизнесом и усердно служит потребностям и интересам современного капитализма.

В странах капитала особенно быстро растет число исследований в области так называемой индустриальной социологии. Ее основу составляет теория «неэкономических факторов». Буржуазные социологи при этом исходят из того, что поведение человека вообще и поведение рабочего на предприятии в частности определяется не только экономическими, материальными интересами, но и престижем, уважением со стороны членов того коллектива, к которому человек принадлежит.

Особое место в индустриальной социологии занимает так называемая «программа человеческих отношений», получившая наиболее широкое распространение в США. Ее активно пропагандируют социологи Э. Мэйо, С. Баркин, Г. Гилман, Ш. Фридман, Р. Джонстон и др. «Люди являются социальными существами, им не чужды чувства привязанности и гордости своими достижениями, для них характерны желание добиться уважения и подобные неэкономические устремления», — пишет Р. Джонстон. Наряду со стремлением работать в силу врожденного чувства достоинства есть, уверяют авторы этой программы, и другие природные качества — потребность в уважении со стороны других людей, склонность к сотрудничеству и т. д. Поэтому они рекомендуют предпринимателям быть «на равной ноге» с рабочими, советоваться с ними по вопросам производства, не выступать против профсоюзов и даже способствовать созданию различного рода «советов» и «комиссий», на которых могут обсуждаться вопросы техники безопасности, заработной платы и т. п. Предприниматели должны оказывать рабочим различные услуги, заботиться о жилище, транспорте, досуге.

Особое место в «программе человеческих отношений» занимают моральные стимулы как одно из важнейших средств повышения производительности труда и, следовательно, усиления эксплуатации трудящихся. Значительное внимание авторы «программы» и другие буржуазные социологи уделяют проблеме преодоления психологической несовместимости и в связи с этим — исследованию взаимоотношений в рабочих коллективах с целью создания в них «микrokлимата» дружбы и взаимной симпатии, что также способствует повышению производительности труда.

Несомненно, что «программа человеческих отношений», как и буржуазная социология в целом, носит реакционный характер, служит экономическим, политическим и идеологическим интересам монополий. Цель ее — создать у рабочих иллюзии партнерства, участия в «общем» деле, воспитать «сознание ответственности перед коллективом предприятия», а не перед его владельцем; поставлять предпринимателям информацию о поведении рабочих; разработать психологические средства воздействия на трудящихся, меры по предотвращению конфликтов и повышению производительности труда. Вместе с тем, не следует игнорировать позитивные стороны «программы человеческих отношений» и других социологических теорий, при условии критического подхода можно использовать все положительное, что есть в них.

В условиях современного буржуазного государства нельзя говорить серьезно о каких-либо моральных стимулах к труду, моральных факторах его эффективности. Такого рода предпосылки возникают и получают свое наиболее полное развитие только в условиях социализма. Советская социологическая наука накопила значительный опыт в исследовании подобных проблем и вопросов, связанных с преодолением психологической несовместимости, с повышением производительности труда, качества продукции, лучшим использованием основных производственных фондов, сырья и других материалов. Исследования в этой области ведутся широким фронтом, однако все еще не отвечают в полной мере непрерывно растущим запросам практики. Социологические исследования применительно к проектированию и внедрению АСУП не ведутся вообще.

Обобщение первых результатов научного поиска, углубленное знакомство с постановкой задач по проектированию и внедрению АСУП на ряде предприятий страны и нашего города дало возможность в порядке первого приближения определить глобальную постановку задачи социологических исследований при проектировании АСУП следующим образом: исследование экономико-социологических предпосылок и последствий разработки и внедрения автоматизированной системы управления предприятием.

Решение этой общей задачи предполагается вести в таких направлениях:

1. Синтез комплекса социологических факторов, представляющих интерес как осознанный, так и неосознанный субъектом. Разработка и внедрение рекомендаций по усилению реальной заинтересованности производственного коллектива в разработке и внедрении АСУП.

2. Исследование зависимости автоматизации управления производством и структурных сдвигов в профессионально-квалификационной характеристике коллектива предприятия.

3. По определению Маркса, управление необходимо для установления согласованности «между индивидуальными работами», при совместном труде, осуществляемом в сравнительно крупном масштабе. Совершенно очевидно, что и «совместный труд», индивидуальные работы, ведущие, вспомогательные участки и подразделения предприятия должны находиться в строго определенном количественном и качественном соотношении. Этим определяется одно из главных направлений экономико-социологических исследований — разработка мер по обеспечению оптимальной пропорциональности различных подразделений промышленного предприятия в качестве важнейшей предпосылки внедрения и функционирования АСУП.

4. Участие трудящихся в управлении предприятием, в борьбе за повышение эффективности производства осуществляется через общественные организации (партийные, комсомольские, профсоюзные), постоянно действующие производственные совещания, научно-технические общества, бюро технического и экономического анализа и др.

В связи с этим ставится задача проведения исследования места и роли общественных и самостоятельных организаций в системе факторов ускорения разработки, внедрения и эффективного использования АСУП.

5. Автоматизация производства и разработка плана социального развития предприятия.

Комплексное решение перечисленных задач предполагает наличие достаточно большого (в несколько десятков человек) коллектива исследователей, и потому непосильно экономико-социологической группе, состоящей лишь из 2 штатных работников. В связи с этим до сих пор предметом исследования были лишь первые два направления. Полученные результаты носят предварительный характер и отнюдь не претендуют на исчерпывающий анализ.

К. Маркс и В. И. Ленин неоднократно подчеркивали, что даже самая хорошая идея, если она не опирается на реальный интерес людей, способна лишь посрамить самое себя.

Люди — существа мыслящие, деятельные. Они трудятся, участвуют в общественно-политической жизни общества под воздействием определенных стимулов, без строгого учета которых невозможно правильно управлять людьми, организовывать их на выполнение той или иной задачи. Вот почему одним из главных условий рационального, на научной основе осуществляемого управления является разработка и строгое соблюдение соответствующей системы стимулирования трудовой и общественной активности людей.

Необходимой предпосылкой выработки рекомендаций по формированию системы материального и морального стимулирования является анализ действующей системы стимулирования. По-

этому социологическая группа на всех этапах работы вела сбор и анализ данных, характеризующих действующую на предприятии систему материального и морального стимулирования. Это позволило разработать социологические анкеты № 1 и 2, предназначенные для опроса всех работающих в одном из цехов завода им. Шевченко и отдельно для инженерно-технического персонала.

Социологическими анкетами предусматривается выяснение отношения работающих к действующей системе материального и морального стимулирования, изучение предложений по ее улучшению, взаимоотношений между рабочими с одной стороны и инженерно-техническим персоналом с другой, т. е. данных, относящихся к микроклимату предприятия.

Одна из центральных задач, стоящих перед системой стимулирования, — преимущественное развитие наиболее эффективных форм общественно-полезной практики человека. При анализе базисных данных завода установлено, что к одной из самых эффективных форм общественно-полезного труда относятся изобретательство и рационализаторство. Об этом свидетельствуют следующие данные. Один рубль затрат на реализованную продукцию приносит 19 коп. прибыли, а один рубль затрат на изобретательство и рационализацию — 18—20 рублей. Однако огромные возможности, заложенные в техническом творчестве, используются далеко не полностью (см. таблицу).

Как видно из таблицы, наименьший удельный вес приходится на предложения, направленные на улучшение условий труда и повышение качества продукции. Между тем повышение надежности конструкций и технологических процессов представляет собой весьма важную предпосылку для

Основные направления рационализаторской и изобретательской работы на предприятии

Годы	Всего исследовано предложений и изобретений	Изменение конструкций	Улучшение технологии	Механизация производственных процессов	Механизация вспомогательных работ	Автоматизация производства	Совершенствование организации производства и труда	Повышение качества продукции	Улучшение условий труда
1960	257	63	126	31	4	16	3	8	6
1967	276	68	127	44	—	20	—	9	8
1968	321	98	133	43	—	23	—	13	11
1969	307	97	159	24	—	14	—	1	12
1970	298	124	122	33	—	6	—	3	10

проектирования и внедрения АСУП, повышения эффективности производства. Но как показал анализ, ныне действующий механизм стимулирования технического творчества не обеспечивает необходимой материальной заинтересованности в разработке таких решений прежде всего потому, что предложения изобретателей и рационализаторов, направленные на повышение качества продукции, в большинстве случаев ведут не к снижению, а к повышению себестоимости продукции, поэтому экономии на издержках производства не дают. В то же время авторское вознаграждение исчисляется в виде определенного процента экономии, полученной от внедрения предложения. Вот почему предложения новаторов, направленные на выпуск новой продукции повышенного качества и не дающие экономии, оплачивают по «действительной ценности». А так как критерии «действительной ценности» не определены, все решается по усмотрению руководителя предприятия. При таких условиях выявить действительную ценность предложения сложно. Не случайно поэтому на практике в большинстве случаев размер вознаграждения по предложениям, которые оплачены по их «действительной ценности», ограничивается минимальной суммой, установленной Инструкцией. Иными словами, действительная ценность в этих случаях не выявляется, а авторы предложений ставятся в относительно худшие материальные условия. За предложение, которое явилось результатом длительного творческого поиска, трудоемкой конструкторской разработки, платят минимум только потому, что оно не дает экономии на снижении себестоимости, и, наоборот, за мелкое изменение азбучного характера, если оно снижает себестоимость, может быть выплачено солидное вознаграждение.

Важным фактором повышения эффективности производства и в то же время необходимой предпосылкой разработки и функционирования АСУП является улучшение условий труда и безопасности производства. Однако прежде всего по отмеченным причинам предложений такого рода на заводе внедряется неоправданно мало.

Все это выдвигает перед группой, занимающейся социологическими исследованиями, задачу разработки таких рекомендаций, осуществление которых позволит обеспечить более точную зависимость между количеством и качеством труда отдельного рабочего или коллектива и величиной его материального вознаграждения. Решение этого вопроса должно быть подчинено принципу: все, что выгодно государству, должно быть выгодно отдельному предприятию, творческому коллективу, автору предложения.

Первые результаты поисковых исследований позволяют сделать следующий общий вывод. Проектирование автоматизированных систем научного управления производством предпола-

гает решение задач технических, экономических и научных в неразрывной связи с задачами социально-политическими, этическими, психологическими. А это значит, что только комплексный подход, разносторонняя разработка этих вопросов, только совместные усилия специалистов самых различных направлений (инженеров, экономистов, социологов, философов, математиков и др.) в тесном союзе с практическими работниками управления могут гарантировать успех.

Целью социологических исследований является синтез комплекса факторов, составляющих социальный микроклимат, определяющих социальную ориентацию отдельного человека, группы людей, коллектива, разработка рекомендаций, призванных повышать реальную заинтересованность коллектива в ускорении проектирования, во внедрении и эффективном функционировании АСУП.

К ВОПРОСУ ОБ ОЦЕНКЕ СЛОЖНОСТИ СТРУКТУР

А. А. Волков, Б. К. Коломиец, В. А. Забродский

Харьков

При описании различных объектов систем управления в качестве одной из основных характеристик широко используется понятие «сложность». Для произвольной системы можно выделить три стороны этого понятия: сложность структуры, сложность функций и сложность языка. Практический опыт указывает на наличие теснейшей связи этих сторон, однако возможность получить единый критерий оценки сложности, не имея подобных критериев каждой из них, представляется маловероятной.

В данной работе рассматривается методика построения критерия сложности произвольных, в том числе и нерархических, структур, приводится ряд требований к данным критериям и несколько соотношений, удовлетворяющих этим требованиям.

Существующие критерии или дают оценки сложности сравнительно простых структур, или являются настолько трудными в вычислении, что практически их невозможно использовать.

Сравним различные подходы к оценке сложности структур.

В работе [1] сложность структур характеризуют следующие признаки: 1) многомерность — большое количество вершин графа (изоморфного структуре); 2) многосвязность — число ребер $m > n + 1$, n — количество вершин; 3) неравномерность, неоднородность структуры; 4) нерархия уравнений; 5) неоднозначность изменения структуры — наличие условий переключения связей; 6) неопределенность условий переключения отдельных участков структуры.

Несколько простых зависимостей для критерия сложности иерархической структуры предлагается в работе [2].

В результате проверки на выдвинутые авторами требования выбирается критерий вида

$$K = \sum_{i=1}^h i \log(m_i + 1),$$

где h — количество уровней иерархии; i — номер уровня; m_i — количество элементов в уровне.

Этот критерий, полученный в результате ряда существенных упрощений структуры, учитывает только 1-й и 4-й из перечисленных признаков.

Эффективность критерия при оценке сложности структуры может быть существенным образом улучшена в результате изменения смысла входящих в сумму членов m_i . Поскольку речь идет о топологических свойствах структуры системы и возможная физическая разнородность составляющих систему частей не принимается во внимание, в дальнейшем слова «структура» и «граф», изоморфный этой структуре, будут использоваться как синонимы. Интересный, с математической точки зрения, критерий оценки сложности графа предложен в работе [3]. Имеется граф X с множеством вершин $V(X)$ и ребер $E(X)$. Рассматривается группа автоморфизмов графа $G(X)$. Каждый автоморфизм графа (изоморфное отображение графа в себя) осуществляет перенумерацию или перестановку части вершин графа. Вся группа автоморфизмов графа осуществляет разбиение $V(X)$ на класс непересекающихся подмножеств — орбит (обычное название «орбиты» — транзитивное множество). Перенумерация вершин при любом автоморфизме возможна только внутри каждой из орбит, иначе нарушается условие изоморфности преобразования графа. Из определения орбиты следуют соотношения $A_i \cap A_j = \emptyset$ для $i \neq j$; $\bigcup_{i=1}^h A_i = V(X)$, где h — количество орбит. Сложность графа оценивается с помощью формулы

$$J_g(X) = - \sum_{i=1}^h p_i \log p_i,$$

где $p_i = \frac{|A_i|}{n}$, $n = |V(X)|$ — количество вершин.

По данному критерию наиболее сложным является граф, группа автоморфизмов которого состоит из единственного тождественного автоморфизма, образно говоря, граф наиболее «сопротивляющийся» преобразованиям (перестановка любых двух вершин изменяет структуру такого графа).

Недостатком выбранного критерия является сложность нахождения орбит, что при большом количестве вершин делает

этот критерий практически неприменимым. Кроме того, есть примеры, когда данным критерием оцениваются как одинаковые по сложности граф, состоящий из простой цепи, и граф с тем же количеством вершин, но с гораздо большим количеством ребер. Сформулируем ряд требований к критерию сложности графа (или структуры), учитывая недостатки критериев в приведенных примерах и признаки сложности структуры, описанные в [1].

Критерий должен быть монотонно возрастающей функцией от количества вершин и количества связей между ними (о терминологии речь будет идти ниже); отражать степень вероятности связей между вершинами; быть функцией от степеней вершин; учитывать неравномерности распределений степеней вершин и вероятностей связей графа; быть простым в вычислении.

Следует отметить нецелесообразность попыток оценить сложность иерархической структуры единым критерием, характеризующим как «горизонтальные разрезы» структуры — сложность отдельных уровней, так и «вертикальный разрез» — сложность всей структуры, с учетом значимости уровней и их количества.

Вместе с тем, для оценки сложности всей иерархической структуры необходимо, чтобы указанные критерии были связаны: полученные оценки сложности каждого уровня должны входить в оценку сложности всей системы с соответствующим «весом», отражающим степень влияния данного уровня на сложность всей структуры.

В качестве исходной информации понадобится матрица связности вершин ненаправленного вероятностного графа (1), обозначаемая $\|p_{ij}\|$,

$$\begin{array}{c|cccc} & 1 & 2 & j & n \\ \hline 1 & p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1j} & \dots & p_{1n} \\ \vdots & & & & & & \\ i & p_{i1} & p_{i2} & \dots & p_{ij} & \dots & p_{in} \\ \vdots & & & & & & \\ n & p_{n1} & p_{n2} & \dots & p_{nj} & \dots & p_{nn} \end{array} \quad (1)$$

где n — количество вершин графа.

Строится матрица (1) аналогично матрице связности детерминированного графа, только элемент p_{ij} есть вероятность связности i, j вершин и $0 < p_{ij} < 1$. При $p_{ij} = 0$ связь между вершинами отсутствует, при $p_{ij} = 1$ связь детерминированная. В дальнейшем, говоря о детерминированном графе и сравнивая его с соответствующим вероятностным графом с тем же количеством вершин, будем задавать его матрицей смежности $\|a_{ij}\|$, полученной из $\|p_{ij}\|$ преобразованием L :

$$\|p_{ij}\| \xrightarrow{L} \|a_{ij}\|, \quad (2)$$

в соответствующие графы для кратности обозначим $\|p_{ij}\|_L$ и $\|a_{ij}\|$, где $a_{ij} = 1$ для всех i, j , для которых $p_{ij} \neq 0$. Нулевые элементы матриц $\|p_{ij}\|$ и $\|a_{ij}\|$ расположены одинаково.

При введении обозначений (в скобках приводится терминология, соответствующая детерминированным графам)

$$\sum_{i=1}^n p_{ij} = p_j, \quad (3)$$

$\sum_{i=1}^n p_{ij}$ — степень связности вершин (степень вершин);

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n p_{ij} = \sum_{j=1}^n p_j = \bar{p}, \quad (4)$$

p_j — суммарная степень связности графа, полученная суммированием всех элементов матрицы (количество ребер детерминированного графа — m).

Для получения набора критериев, удовлетворяющих приведенным требованиям, необходимо регулировать ряд утверждений, отвечающих интуитивным представлениям о сложности структур:

Утверждение 1: Среди множества графов, описываемых матрицами (1) одинаковой размерности и расположения нулевых элементов и отличающихся только величинами (т. е. имеющих один и тот же образ при преобразовании), наиболее сложным является граф с

$$p_{ij} = \text{const} = p_s \quad (5)$$

для всех ненулевых p_{ij} . Тогда критерий, достигающий максимума при условии (5) и отвечающий утверждению (1), может иметь следующий вид:

$$K_1 = n \sum_{i,j=1}^n e^{-\gamma_1 (p_s - p_{ij})^2}, \quad (6)$$

где γ_1 — коэффициент чувствительности критерия к величине отклонения $(p_s - p_{ij})$; суммирование производится по всем ненулевым элементам $\|p_{ij}\|$. При $p_{ij} = p_s$ для всех ненулевых элементов $\|p_{ij}\|$, не учитывая в сумме (6) составляющие с $p_{ij} = 0$, из (6) получаем

$$K_1^{\max} = K_1^1 = nm,$$

где m — количество ненулевых связей графа. Как следует из (6), при $0 < p_s < 1$ сложность детерминированного графа $\|a_{ij}\|_L$, оцениваемая данным критерием, меньше сложности $\|p_{ij}\|_L$. При построении следующего критерия существенное значение будет иметь только наличие связи между вершинами, поэтому для $\|p_{ij}\|_L$ степень связности i -й вершины принимается равной количеству

ненулевых элементов i -й строки, а для $\|a_{ij}\|_L$ — просто количеству элементов соответствующей строки. Тогда критерий, оценивающий сложность графа как функцию от степеней вершин и общего количества связей (ребер) в графе, предлагается в форме аналогичной (6):

$$K_2 = m \sum_{i=1}^n e^{-\gamma(\rho_i - \bar{\rho})^2}, \quad (7)$$

где $\rho_i = \rho_i(n)$ — степень вершины при утверждении II:

Среди графов с различными степенями вершин наиболее сложным является граф с

$$\rho_i = \text{const} = \rho_2(n_2) \quad (8)$$

для данного n_2 — количества неизолированных вершин. При (8) из критерия (7) следует

$$K_{2 \max} = K_2' = m n_2$$

при условии, что составляющие в K_2 из (7) для изолированных вершин $e^{-\gamma \rho_i^2}$ не учитываются в сумме (7).

При учете указанных составляющих

$$K_{2 \max} = K_2^* = m n_2^* > K, \quad n > n_2^* > n_2,$$

что следует из (7).

Объединенный критерий, учитывающий вероятностный характер связей и степени вершин, исходя из утверждений I и II, запишем

$$K_3 = \sum_{i=1}^n e^{-\gamma(\rho_i - \bar{\rho})^2} \sum_{j=1}^n e^{-\gamma(\rho_{ij} - \bar{\rho}_{ij})^2}. \quad (9)$$

Рассматривая вид критерия в точке максимума при выполнении условий (5) и (8), можно написать последовательность соотношений

$$K_{3 \max} = K_3^1 = m n^1 > K_3^* = m n_2^*. \quad (10)$$

Теперь можно учесть сформулированное требование к критерию сложности о влиянии неоднородности графа. Для этого вместо утверждений I и II, вызывающих возражения с точки зрения критерия, учитывающего неравномерность структуры, постулируется утверждение III:

Среди множества графов размерности n с различными степенями вершин ρ_i и различными вероятностями связности ρ_{ij} существует такое распределение степеней вершин ρ_i^3 и такое распределение вероятностей связности ρ_{ij}^3 , что граф с данными ρ_i^3 и ρ_{ij}^3

является наиболее сложным среди рассматриваемого множества графов. Соответствующий критерий представляется соотношением

$$K_4 = \sum_{j=1}^n e^{-\gamma_j (r_j^2 - r_j)^2} \sum_{i=1}^n e^{-\gamma_i (p_{ij}^2 - p_{ij})^2}. \quad (11)$$

При максимальном значении критерия имеет место соотношение, совершенно аналогичное (10),

$$K_{4\max} = K'_4 = m \ln_2. \quad (12)$$

Имеется в виду, что условия достижения максимума критерия K_4 другие, чем для K_3 .

Последний критерий, учитывающий неравномерность свойств графа — одно из труднейших условий, становится и наиболее трудным для вычисления. Трудность заключается в том, что величина K_4 зависит от способа нумерации вершины связей (ребер) или от того, какие p_j и p_{ij} входят в разности $(p_j^2 - p_j)$ и $(p_{ij}^2 - p_{ij})$ (это не имело значения при вычислении критериев K_1 , K_2 , K_3).

Не предлагая здесь конкретных распределений p_j^2 , p_{ij}^2 и способов нумерации вершин и связей, ограничимся пока указанием на принципиальную возможность оценки неравномерности свойства графа (структуры) критерием K_4 , одновременно учитывающего вероятностный характер связей и степени вершин. Вопрос о выборе одного из критериев — K_3 или K_4 — для оценки сложности структуры можно формализовать с помощью энтропии: является ли более сложным граф с неравномерным распределением степеней вершин p_j и вероятностей связности p_{ij}

$$H_p = - \sum_{i,j=1}^n \frac{p_{i,j}}{p} \log \frac{p_{i,j}}{p} < \log \bar{p};$$

$$H_r = - \sum_{j=1}^n \frac{r_j}{m} \log \frac{r_j}{m} < \log m, \quad (13)$$

или же с равномерным распределением указанных величин

$$H_{p, \max} = \log n, \quad H_p = H_p^{\max} = \log \bar{p}. \quad (14)$$

При наличии корреляционной зависимости между p_{ij} и p_j необходимо рассматривать совместную энтропию. Имея набор критериев сложности отдельных уровней иерархической структуры, критерий сложности межуровневых связей (который здесь не рассматривается, но в принципе может быть построен аналогично критерию K_4) и критерий сложности всей структуры в целом, можно оценить сложность всей структуры единым критерием,

включающим в качестве составных частей остальные критерии:

$$\begin{aligned}
 K_1 &= n \sum_{l=1}^n e^{-\gamma_1(\rho_n - \rho_l)^2}; \\
 K_2 &= m \sum_{l=1}^n e^{-\gamma_2(\rho_n - \rho_l)^2}; \\
 K_3 &= k_3 \sum_{l=1}^n e^{-\gamma_3(\rho_n - \rho_l)^2} \sum_{l=1}^n e^{-\gamma_4(\rho_n - \rho_l)^2}; \\
 K_4 &= k_4 \sum_{l=1}^n e^{-\gamma_5(\rho_l^2 - \rho_l)^2} \sum_{l=1}^n e^{-\gamma_6(\rho_l^2 - \rho_l)^2}; \\
 K &= \sum_{l=1}^n e \ln (K_l^e + 1),
 \end{aligned} \tag{15}$$

где n — количество уровней; l — номер уровня, α — номер критерия, которым оценивается сложность структуры уровня; K — критерий сложности всей иерархической структуры (в данном случае приводится измененный критерий из [2]); k_3 и k_4 — коэффициенты. По поводу применимости предлагаемого метода и критериев необходимо сделать несколько замечаний по самому способу построения иерархической структуры, более низкому уровню соответствует граф с большим количеством вершин и связей. Как следует из критерия K , чем меньше уровень, тем точнее должна быть оценена сложность структуры данного уровня. Поскольку наиболее просто для вычисления, но наименее точно с точки зрения предъявляемых требований критерии K_1 и K_2 , то с учетом приведенных замечаний самые нижние уровни имеет смысл оценивать критериями K_3 , K_4 , затем K_5 (с переходом на высшие уровни) и самые высшие уровни — критерием K_6 . Для придания большего веса критериям K_3 и K_4 по сравнению с K_1 и K_2 соответствующие K_3 и K_4 формулы в (13) умножены на коэффициенты k_3 и k_4 , причем

$$1 < k_3 < k_4. \tag{16}$$

Для устранения произвола при выборе типа критерия необходимо четко оговорить применимость того или иного критерия в зависимости от количества вершин и связей графа данного уровня. В результате исследования и сравнения структур реальных систем могут быть приняты конкретные значения величин $\gamma_1, \gamma_2, k_3, k_4$ и вид функции $\rho_s(n)$. Хотя целью данной работы является, в первую очередь, выяснение методики оценки сложности структур и предложенные критерии частично носят иллюстративный характер, демонстрируя возможность выбора зависимостей, отвечающих приведенным требованиям, критерии $K_1, K_2,$

K_3 и (после конкретизации вида p_j^i, p_{ij}^i, p_n) K_4 совместно с общим критерием типа можно практически использовать для оценок сложности структур. Необходимо остановиться еще на вопросе, возникшем при рассмотрении критерия K_3 : нужно ли учитывать составляющие в суммах (6)—(11), соответствующие изолированным вершинам, другими словами, можно ли считать сложность нуля-графа отличной от нуля? Не решая этот вопрос, приведем несколько соображений о необходимости ненулевой оценки сложности нуля-графа. Имеет смысл различать сложность нуля-графа вне иерархической структуры и нуля-графа какого-то уровня указанной структуры, имея в виду обязательные внутренние связи на каком-то из верхних и, возможно, нижнем уровне и связи между уровнями. Иначе, будет считаться, что иерархическая структура, каждый из уровней которой, кроме низшего, описывается нуля-графом (при наличии межуровневых связей), имеет ту же сложность, что и ее низший уровень. Учет изолированных вершин особенно скажется на верхних уровнях. Решить вопрос можно и в другом плане: описать межуровневые связи графом и оценить его сложность специальным критерием. Тогда необходимость учета изолированных вершин отпадает.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Т. Кулик. К-списочное описание структуры сложных систем. Об. «Сложные системы управления», Труды семинара, вып. 1, Киев, 1969.
2. А. И. Черкашин, Э. С. Монастырский. О критерии оценки сложности иерархической структуры управления. Об. «Сложные системы управления», Труды семинара, вып. 1, Киев, 1969.
3. G. Mowshowitch. Entropy and the complexity of graphs. Bulletin of Mathematical Biophysics, 1968, № 3.

ОБ ОДНОМ СПОСОБЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛАНА ПРОИЗВОДСТВА ПО ПЛАНОВЫМ ПЕРИОДАМ

Э. А. Дедиков, С. Г. Ершов, Л. П. Чернина

Харьков

Связующим звеном между планом народного хозяйства и планом отдельного предприятия является техпромфинплан предприятия. Его основной раздел — «План производства и реализации продукции». Своевременное выполнение техпромфинплана есть необходимое условие пропорционального и планомерного развития всех отраслей народного хозяйства.

Показатели техпромфинплана предприятия имеют поквартальную разбивку. Годовой план производства продукции разбивается на квартальные и месячные планы и в объеме всего предприятия, и по отдельным цехам.

При технологической специализации основных цехов машиностроительного предприятия план выпуска продукции зависит от выполнения планов производства всеми цехами, связанными технологической последовательностью обработки каждого изделия. При этом рассчитывать план выпуска готовой продукции имеет смысл только в объеме всего предприятия. При предметной специализации основных цехов о плане выпуска определенной продукции цехами можно говорить как о плане всего предприятия. В обоих случаях поквартальная разбивка годового плана имеет одинаково важное значение для ритмичной работы предприятия. По ряду изделий, которые назовем директивными, из объема годового плана квартальные планы задаются и их выполнение учитывается как по объему производства, так и по номенклатуре. Квартальные планы недирективных изделий могут устанавливаться произвольно, исходя из производственных возможностей предприятия, однако с обязательным условием выполнения годового плана. В связи с этим необходимо распределить производственные ресурсы, обеспечивающие выполнение не только годового плана по всем изделиям, но и квартальных планов по директивным изделиям. Если производственная мощность предприятия позволяет своевременно изготовить все директивные изделия по каждому кварталу, то избыток мощности в кварталах можно использовать для изготовления изделий, производство которых обусловлено только годовым планом. При выполнении всего объема годовой производственной программы резерв мощности можно использовать для дополнительного производства изделий, годовой план выпуска которых допускает известные отклонения. Однако в некоторых кварталах программы директивных изделий не могут быть полностью выполнены из-за недостаточной пропускной способности отдельных видов оборудования, поэтому необходимо изготавливать изделия для них в предыдущих кварталах или использовать производственные фонды рабочего времени, запланированного для недирективных изделий, уменьшая тем самым объем их выпуска в этом квартале. Таким образом, возникает задача оптимальной увязки объемов производства как директивных, так и недирективных изделий для последовательности кварталов планируемого года. В итоге может оказаться, что при наличии фондов рабочего времени оборудования для выполнения годового плана по всем изделиям и квартальных планов по директивным изделиям некоторую часть производственной программы для планируемого года необходимо выполнять в предыдущем году. Важно заранее знать картину использования производственных мощностей предприятия, иметь необходимые данные для взаимной увязки годовых и квартальных планов, добиться максимального использования оборудования в течение всего планируемого периода. Но самое главное при этом — требование своевре-

менного выполнения годовых и квартальных планов для директивных изделий. Оптимальное распределение производственной программы по ряду критериев внутри квартала рассматривалось в работе [1]. Квартальный план не задавался, а определялся в результате решения задачи по имеющимся ресурсам. Полученные квартальные планы обеспечивали выполнение годового плана.

В работе [2] резерв производственной мощности, образовавшийся после выполнения годовой программы, по некоторым критериям оптимальным образом использовался для производства дополнительной продукции. Способ распределения плана производства, предлагаемый в данной статье, позволяет обеспечить выпуск годовой производственной программы и квартальных программ директивных изделий. При этом взаимно увязываются квартальные и годовые планы. Критерии эффективности выбираются с учетом требований, определяемых спецификой производства и поставленной задачей. Возможен выбор функции цели по максимальной загрузке оборудования, по максимальному выпуску продукции, по максимальной прибыли, по минимуму себестоимости выпускаемой продукции и ряду других критериев. Задачу можно решить двумя способами:

1. Проверяются пропускные способности оборудования, начиная с последнего квартала. В этом случае процедура расчета квартальных планов однократная, но возможные резервы мощности окажутся в I квартале, что с производственной точки зрения крайне нежелательно.

2. Проверяются пропускные способности оборудования с I квартала и затем при каждой последующей проверке возвращаются к I кварталу.

Второй способ позволяет все имеющиеся резервы мощности получить в IV квартале. Несмотря на некоторое усложнение, этот способ наиболее отвечает условиям производства.

Постановка задачи

Пусть исходные данные оформлены в виде следующих матриц массивов:

$$M1 = \begin{vmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} & \dots & t_{1n} \\ t_{21} & t_{22} & t_{23} & \dots & t_{2n} \\ t_{m1} & t_{m2} & t_{m3} & \dots & t_{mn} \end{vmatrix} = \|t_{ij}\|;$$

$$M2 = \begin{vmatrix} \phi_1^I & \phi_1^{II} & \phi_1^{III} & \phi_1^{IV} \\ \phi_2^I & \phi_2^{II} & \phi_2^{III} & \phi_2^{IV} \\ \phi_m^I & \phi_m^{II} & \phi_m^{III} & \phi_m^{IV} \end{vmatrix} = \|\phi_i^j\|;$$

$$M3 = \begin{pmatrix} a_1^I a_1^{II} a_1^{III} a_1^{IV} \\ a_2^I a_2^{II} a_2^{III} a_2^{IV} \\ \dots \\ a_n^I a_n^{II} a_n^{III} a_n^{IV} \end{pmatrix} = \|a_j^k\| \text{ и вектора } \vec{a}^k = \begin{pmatrix} a_1^k \\ a_2^k \\ \dots \\ a_n^k \end{pmatrix},$$

где $i = 1, 2, 3, \dots, m$ — номер вида работ (токарные, фрезерные, слесарные, сборочные и т. д.); $j = 1, 2, 3, \dots, n$ — номер условного обозначения изделия; $k = I, II, III, IV$ — номер квартала планируемого года; t_{ij} — удельные трудозатраты по i -му виду работ на единицу j -го изделия; Φ_i^k — наличный фонд времени работы i -го вида оборудования в k -м квартале; a_j^k — количество j -х изделий (директивных), запланированных для производства в k -м квартале; a_j^* — количество j -х изделий, запланированных для выпуска на год (годовой план директивных и недирективных изделий).

Для недирективных изделий определена только годовая производственная программа. Поэтому в матрице $M3$ $a_j^k = 0$ и $\sum_{k=1}^4 \times \times \sum_{k=1}^{IV} a_j^k \neq \sum_{j=1}^n a_j^*$, а разность $\vec{a}^* - \vec{a}^k$ представляет собой годовую программу недирективных изделий. Отметим, что для директивных изделий $\sum_{k=1}^{IV} a_j^k = a_j^*$. Составим вспомогательную матрицу

$$M4 = \begin{pmatrix} \Delta X_1^I \Delta X_1^{II} \Delta X_1^{III} \Delta X_1^{IV} \\ \Delta X_2^I \Delta X_2^{II} \Delta X_2^{III} \Delta X_2^{IV} \\ \dots \\ \Delta X_n^I \Delta X_n^{II} \Delta X_n^{III} \Delta X_n^{IV} \end{pmatrix} = \|\Delta X_j^k\|,$$

элементы которой подлежат определению и имеют смысл приращений количеств изделий (директивных и недирективных), изготавливаемых в каждом квартале до полного использования ресурсов. Поскольку строки матрицы $M3$ для недирективных изделий нулевые, то соответствующие строки матрицы $M4$ можно представить поквартальной разбивкой годового плана недирективных изделий, полученной в процессе решения задачи. Составляющие векторов $\Delta \vec{X}^k$ могут иметь как положительные, так и отрицательные значения, т. е. могут представлять количества изделий, дополнительно изготовленных (для знака $+$) или недоданных (для знака $-$) в k -м квартале по отношению к плану этого квартала. Обозначим элементы векторов $\Delta \vec{X}^k$, принимающие только неотрицательные значения ($\Delta X^k > 0$), через ΔX_+^k , а элементы, принимающие только отрицательные значения ($\Delta X^k < 0$), — через

ΔX_{-}^k . Тогда $\Delta X_{+}^k + \Delta X_{-}^k = \Delta X^k$. Значит, можно представить, что векторы $\Delta \bar{X}^k$ разложены на две группы векторов $\Delta \bar{X}_{+}^k$ и $\Delta \bar{X}_{-}^k$, составляющие которых соответственно имеют только неотрицательные и только отрицательные значения, и при этом $\Delta \bar{X}_{+}^k + \Delta \bar{X}_{-}^k = \Delta \bar{X}^k$.

Обозначим через $\Delta \bar{X}_0^k$ векторы, образованные из векторов $\Delta \bar{X}_{+}^k$ при замене на нуль составляющих, соответствующих недирективным изделиям, т. е. $\Delta X_i^k = 0$ при значениях i , для которых составляющие векторов \bar{a}^k также равны нулю.

Пусть $\Delta \Phi_i^k$ — величины резервных фондов времени работы i -го вида оборудования, оставшиеся после выполнения программы k -го квартала (или недостающие для выполнения этой программы), $F(\bar{C} \Delta \bar{X})$ — линейная функция цели, выбираемая в зависимости от конкретной задачи.

Введем понятия нулевого квартала, т. е. последнего квартала года, предшествующего планируемому, и V квартала, т. е. конца IV квартала планируемого года, для которого имеется остаток производственной мощности после выполнения годовой и квартальных программ. Соответственно обозначать их будем индексами $k=0$, $k=V$. Требуется проверить пропускные способности оборудования по программе каждого квартала и в зависимости от результатов оптимальным образом, согласно выбранной функции цели, перераспределить объем выпуска изделий по кварталам, включая при необходимости и нулевой, с тем, чтобы обеспечить выполнение как годового плана, так и квартальных планов директивных изделий. При этом возможный резерв производственной мощности должен быть отнесен к последнему кварталу.

Математическая модель

Найти векторы $\Delta \bar{X}^k$, оптимизирующие линейную функцию

$$F(\bar{C} \Delta \bar{X}^k) \rightarrow \max (\min) \quad (1)$$

при следующих ограничениях:

$$\|t_{ij}\| \Delta \bar{X}^k < \Delta \bar{\Phi}^k; \quad (2)$$

$$-\bar{a}^{k-1} < \Delta \bar{X}^k < \bar{a}^k - \left(\sum_{k=0}^{k-1} \bar{X}^k + \bar{a}^k - \Delta \bar{X}_0^{k-1} \right), \quad (3)$$

где

$$\Delta \bar{\Phi}^k = \bar{\Phi}^k - \|t_{ij}\| \cdot (\bar{a}^k - \Delta \bar{X}_0^{k-1}), \quad (4)$$

\bar{a}^{k-1} — вектор допустимого сдвига на предыдущий плановый период объема работ k -го квартала. Сформировать векторы, характери-

вующие квартальные выпуски с полной загрузкой оборудования по каждому кварталу:

$$\bar{X}^k = (\bar{a}^k - \Delta \bar{X}_0^{k-1}) + \Delta \bar{X}^k; \quad (5)$$

$$\bar{X}^0 = - \sum_{k=1}^k \Delta \bar{X}^k; \quad (6)$$

$$\Delta \bar{\Phi}^0 = \|t_{ij}\| \bar{X}^0; \quad (7)$$

$$\Delta \bar{\Phi}^v = \sum_{k=1}^{iv} \bar{\Phi}^k - \|t_{ij}\| \sum_{k=1}^{iv} \bar{X}^k. \quad (8)$$

Алгоритм решения задачи

Последовательность решения задачи на основании математической модели задается следующим алгоритмом.

1. Первый квартал ($k = 1$).

1. Проверка на пропускную способность программы I квартала по формуле (4):

$$\Delta \bar{\Phi}^1 = \bar{\Phi}^1 - \|t_{ij}\| (\bar{a}^1 - 0).$$

2. Проверка условия $P(\Delta \bar{\Phi}^1 < 0)$. Если хотя бы одна из составляющих вектора $\Delta \bar{\Phi}^1$ отрицательна, то $P(\Delta \bar{\Phi}^1 < 0) = 1$. Переход к пункту 3 и далее к пунктам 5, 6. Если же все составляющие вектора $\Delta \bar{\Phi}^1$ неотрицательны, то $P(\Delta \bar{\Phi}^1 < 0) = 0$. Переход к пункту 4 и пунктам 5, 6.

3. Решение задачи линейного программирования для I квартала по формулам (1), (2) и (3):

$$F(\bar{C} \Delta \bar{X}^1) \rightarrow \max(\min);$$

$$\|t_{ij}\| \cdot \Delta \bar{X}^1 < \Delta \bar{\Phi}^1;$$

$$-\bar{a}^0 < \Delta \bar{X}^1 < \bar{a}^1 - \bar{a}^1.$$

4. Решение задачи линейного программирования для I квартала по формулам (1), (2) и (3) при $\bar{a}^0 = 0$:

$$F(\bar{C} \Delta \bar{X}^1) \rightarrow \max(\min);$$

$$\|t_{ij}\| \Delta \bar{X}^1 < \Delta \bar{\Phi}^1;$$

$$0 < \Delta \bar{X}^1 < \bar{a}^1 - \bar{a}^1.$$

5. Формирование из вектора $\Delta \bar{X}^1$ векторов $\Delta \bar{X}_0^1$ и $\Delta \bar{X}^1$.

6. Формирование программы I квартала по формуле (5) при $\Delta \bar{X}_0^0 = 0$ и первого приближения нулевого квартала по формуле (6):

$$\bar{X}^1 = (\bar{a}^1 - 0) + \Delta \bar{X}^1;$$

$$\bar{X}_{(1)}^0 = -\Delta \bar{X}_-^1.$$

II. Второй квартал ($k=II$).

1. Проверка на пропускную способность программы II квартала по формуле (4):

$$\Delta \bar{\Phi}^{II} = \bar{\Phi}^{II} - \|t_{ij}\| (\bar{a}^{II} - \Delta \bar{X}_0^1).$$

2. Проверка условия $P(\Delta \Phi^{II} < 0)$. Если $P(\Delta \Phi^{II} < 0) = 1$, переход к пунктам 3, 5 и далее. Если $P(\Delta \Phi^{II} < 0) = 0$, переход к пунктам 5, 4 и далее.

3. Решение задачи линейного программирования для II квартала по формулам (1), (2) и (3):

$$F(\bar{C} \Delta \bar{X}^{II}) \rightarrow \max(\min);$$

$$\|t_{ij}\| \Delta \bar{X}^{II} < \Delta \bar{\Phi}^{II};$$

$$-\bar{a}^1 < \Delta X^{II} < \bar{a}^r - (\bar{X}_{(1)}^0 + \bar{X}^1 + \bar{a}^{II} - \Delta \bar{X}_0^1).$$

4. Решение задачи линейного программирования для II квартала по формулам (1), (2) и (3) при $\bar{a}^1 = 0$:

$$F(\bar{C} \Delta \bar{X}^{II}) \rightarrow \max(\min);$$

$$\|t_{ij}\| \Delta \bar{X}^{II} < \Delta \bar{\Phi}^{II};$$

$$0 < \Delta X^{II} < \bar{a}^r - (\bar{X}_{(1)}^0 + \bar{X}^1 + \bar{a}^{II} - \Delta \bar{X}_0^1).$$

5. Формирование из вектора $\Delta \bar{X}^{II}$ векторов $\Delta \bar{X}_0^{II}$ и $\Delta \bar{X}_-^{II}$.

6. Формирование программы II квартала по формуле (5) и второго приближения нулевого квартала по формуле (6):

$$\bar{X}^{II} = (\bar{a}^{II} - \Delta \bar{X}_0^{II}) + \Delta \bar{X}^{II};$$

$$\bar{X}_{(2)}^0 = -\Delta \bar{X}_-^{II} - \Delta \bar{X}_-^{II}.$$

III. Третий квартал ($k=III$).

1. Проверка на пропускную способность программы III квартала по формуле (4):

$$\Delta \bar{\Phi}^{III} = \bar{\Phi}^{III} - \|t_{ij}\| (\bar{a}^{III} - \Delta \bar{X}_0^{II}).$$

2. Проверка условия $P(\Delta \Phi^{III} < 0)$. Если $P(\Delta \Phi^{III} < 0) = 1$, переход к пунктам 3, 5 и далее. Если $P(\Delta \Phi^{III} < 0) = 0$, переход к пунктам 4, 5 и далее.

3. Решение задачи линейного программирования для III квартала по формулам (1), (2) и (3):

$$F(\bar{C}\Delta\bar{X}^{III}) \rightarrow \max(\min);$$

$$\|t_{ij}\| \Delta\bar{X}^{III} < \Delta\bar{\Phi}^{III};$$

$$-\bar{a}^{II} < \Delta\bar{X}^{III} \leq \bar{a}^r - (\bar{X}_{(2)}^0 + \bar{X}^I + \bar{X}^{II} + \bar{a}^{III} - \Delta\bar{X}_0^{III}).$$

4. Решение задачи линейного программирования для III квартала по формулам (1), (2) и (3) при $\bar{a}^{II} = 0$:

$$F(\bar{C}\Delta\bar{X}^{III}) \rightarrow \max(\min);$$

$$\|t_{ij}\| \Delta\bar{X}^{III} < \Delta\bar{\Phi}^{III},$$

$$0 < \Delta\bar{X}^{III} < \bar{a}^r - (\bar{X}_{(2)}^0 + \bar{X}^I + \bar{X}^{II} + \bar{a}^{III} - \Delta\bar{X}_0^{III}).$$

5. Формирование из вектора $\Delta\bar{X}^{III}$ векторов $\Delta\bar{X}_0^{III}$ и $\Delta\bar{X}_-^{III}$.

6. Формирование программы III квартала по формуле (5) и третьего приближения нулевого квартала по формуле (6):

$$\bar{X}^{III} = (\bar{a}^{III} - \Delta\bar{X}_0^{III}) + \Delta\bar{X}^{III};$$

$$\bar{X}_{(3)}^0 = -\Delta\bar{X}_-^I - \Delta\bar{X}_-^{II} - \Delta\bar{X}_-^{III}.$$

IV. Четвертый квартал ($k=IV$).

1. Проверка на пропускную способность программы IV квартала по формуле (4):

$$\Delta\bar{\Phi}^{IV} = \bar{\Phi}^{IV} - \|t_{ij}\| (\bar{a}^{IV} - \Delta\bar{X}_0^{IV}).$$

2. Проверка условия $P(\Delta\Phi^{IV} < 0)$. Если $P(\Delta\Phi^{IV} < 0) = 1$, переход к пунктам 3,5 и далее. Если $P(\Delta\Phi^{IV} < 0) = 0$, переход к пунктам 4,5 и далее.

3. Решение задачи линейного программирования для IV квартала по формулам (1), (2) и (3):

$$F(\bar{C}\Delta\bar{X}^{IV}) \rightarrow \max(\min);$$

$$\|t_{ij}\| \cdot \Delta\bar{X}^{IV} < \Delta\bar{\Phi}^{IV};$$

$$-\bar{a}^{III} < \bar{X}^{IV} < \bar{a}^r - (\bar{X}_{(3)}^0 + \bar{X}^I + \bar{X}^{II} + \bar{X}^{III} + \bar{a}^{IV} - \Delta\bar{X}_0^{IV}).$$

4. Решение задачи линейного программирования для IV квартала по формулам (1), (2) и (3) при $\bar{a}^{III} = 0$:

$$F(\bar{C}\Delta\bar{X}^{IV}) \rightarrow \max(\min);$$

$$\|t_{ij}\| \Delta \bar{X}^{IV} < \Delta \bar{\Phi}^{IV};$$

$$0 < \Delta \bar{X}^{IV} < \bar{a} - (\bar{X}_{(3)}^0 + \bar{X}^I + \bar{X}^{II} + \bar{X}^{III} + \bar{a}^{IV} - \Delta \bar{X}_0^{III}).$$

5. Формирование из вектора $\Delta \bar{X}^{IV}$ векторов $\Delta \bar{X}_0^{IV}$ и $\Delta \bar{X}^{IV}$.
 6. Формирование программы IV квартала по формуле (5):

$$\bar{X}^{IV} = (\bar{a}^{IV} - \Delta \bar{X}_0^{III}) + \Delta \bar{X}^{IV}.$$

V. Увязка годовой программы с предыдущим и последующим годами.

1. Формирование программы нулевого квартала по формуле (6) (окончательное приближение):

$$\bar{X}^0 = -(\Delta \bar{X}_-^I + \Delta \bar{X}_-^{II} + \Delta \bar{X}_-^{III} + \Delta \bar{X}_-^{IV}).$$

2. Определение потребных фондов рабочего времени оборудования по программе нулевого квартала по формуле (7):

$$\Delta \bar{\Phi}^0 = \|t_{ij}\| \bar{X}^0.$$

3. Определение резервного фонда рабочего времени оборудования в IV квартале по формуле (8):

$$\Delta \bar{\Phi}^V = (\bar{\Phi}^I + \bar{\Phi}^{II} + \bar{\Phi}^{III} + \bar{\Phi}^{IV}) - \|t_{ij}\| (\bar{X}^I + \bar{X}^{II} + \bar{X}^{III} + \bar{X}^{IV}).$$

Пример решения задачи

Для иллюстрации приведенной методики рассмотрим условный пример распределения годовой производственной программы по трем (для упрощения расчетов) плановым периодам. Количество видов работ и типов изделий также взято равным трем. Тогда $i = 1, 2, 3$; $j = 1, 2, 3$ и $k = I, II, III$. Матрицы $M1$, $M2$ и $M3$ имеют вид

$$M1 = \begin{vmatrix} 2 & 2 & 4 \\ 4 & 3 & 2 \\ 3 & 3 & 1 \end{vmatrix}; M2 = \begin{vmatrix} 28 & 28 & 32 \\ 30 & 30 & 33 \\ 27 & 27 & 31 \end{vmatrix}; M3 = \begin{vmatrix} 4 & 4 & 3 \\ 5 & 8 & 4 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}.$$

Вектор

$$\bar{a} = \begin{vmatrix} 11 \\ 17 \\ 10 \end{vmatrix}.$$

Максимизируется функция

$$Z = \sum_i \sum_j t_{ij} \Delta X_i^* = 9\Delta X_1^* + 8\Delta X_2^* + 7\Delta X_3^*.$$

обуславливающая максимальное использование оборудования. Применение рассмотренного алгоритма дает следующее решение:

$$\bar{X}^0 = \begin{pmatrix} 8 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}; \bar{X}^I = \begin{pmatrix} 0 \\ 8 \\ 3 \end{pmatrix}; \bar{X}^{II} = \begin{pmatrix} 0 \\ 8 \\ 3 \end{pmatrix}; \bar{X}^{III} = \begin{pmatrix} 3 \\ 1 \\ 4 \end{pmatrix},$$

что обеспечивает выполнение как годовой производственной программы, так и квартальных планов директивных изделий. При этом использование оборудования наиболее полное:

$$\Delta \bar{\Phi}_{\text{рем}}^I = \bar{\Phi}^I - \|t_{ij}\| \cdot \bar{X}^I = \begin{pmatrix} 28 \\ 30 \\ 27 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 224 \\ 432 \\ 331 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 8 \\ 3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix};$$

$$\Delta \bar{\Phi}_{\text{рем}}^{II} = \bar{\Phi}^{II} - \|t_{ij}\| \cdot \bar{X}^{II} = \begin{pmatrix} 28 \\ 30 \\ 27 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 224 \\ 432 \\ 331 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 8 \\ 3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix};$$

$$\Delta \bar{\Phi}_{\text{рем}}^{III} = \bar{\Phi}^I + \bar{\Phi}^{II} + \bar{\Phi}^{III} - \|t_{ij}\| (\bar{X}^I + \bar{X}^{II} + \bar{X}^{III}) = \begin{pmatrix} 8 \\ 0 \\ 15 \end{pmatrix}.$$

Потребные фонды рабочего времени оборудования по программе нулевого планового периода:

$$\Delta \bar{\Phi}^0 = \|t_{ij}\| \bar{X}^0 = \begin{pmatrix} 224 \\ 432 \\ 331 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 8 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 16 \\ 32 \\ 24 \end{pmatrix}.$$

Блок-схема алгоритма распределения годового плана производства по кварталам представлена на рисунке.

Полученные значения квартальных программ будут нецелочисленными. Однако значительное упрощение вычислений при этом, уменьшение их объема предопределяет выбор данного способа решения задач линейного программирования. Следует подчеркнуть, что описанный алгоритм дает лишь приближенное распределение плана производства по плановым периодам. Основная погрешность возникает вследствие предположения, что последние, в порядке технологической последовательности, виды работ (заключительные операции — доводка, сборка, испытания и т. д.) загружают оборудование с начала планового периода, в данном случае квартала. Поэтому для уменьшения погрешности нужно брать большое количество видов изделий в плановом периоде, а продолжительность самого планового периода должна быть значительно больше продолжительности изготовления большинства из взятых изделий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. Ш. Гафт, Л. Ф. Лучина, Л. З. Коварский, М. П. Новикова. Модели распределения производственной программы машиностроительного завода. «Механизация и автоматизация управления», № 3, Киев, 1968.
2. Л. Ш. Гафт, Л. Ф. Лучина, Л. З. Коварский. Оптимизация производственной программы промышленного предприятия. «Экономика и математические методы», т. III, вып. 6, М., 1967.
3. Н. З. Шор. Применение обобщенного градиентного спуска в блочном программировании. «Кибернетика», № 3, Киев, 1967.

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА НОРМАТИВОВ ПРЯМЫХ ЗАТРАТ НА ИЗДЕЛИЕ

*Э. А. Дедиков, А. В. Панишев, В. И. Скибицкая,
А. Ю. Тихенко*

Харьков

Нормативная калькуляция используется при решении широкого круга плановых, учетных и аналитических задач. Информация, содержащаяся в нормативных калькуляциях, необходима для расчета и обоснования технико-экономических показателей техпромфинплана предприятия и планов отдельных структурных подразделений; на основании нормативов прямых затрат планируется себестоимость, прибыль, рентабельность, рассчитываются цеховые нормативы незавершенного производства, составляются цеховые производственные программы. Готовая продукция цехов складывается из совокупности деталей и узлов, изготовление которых может быть закончено или не закончено.

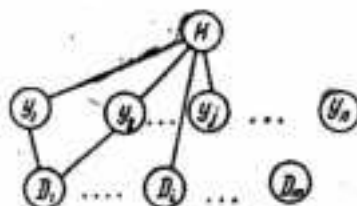


Рис. 1.

Нормативы прямых затрат являются источником информации, необходимой для измерения продукции отдельных цехов, и рассчитывают их исходя из данных структуры изделия. Пусть изделие имеет следующую структуру (см. рис. 1), где y_j — узел $j = 1, 2, \dots, n$; D_i — деталь $i = 1, 2, \dots, m$.

Структуре изделия соответствует прямоугольная матрица S размером $(n+1) \times (m+n+1)$, для которой $S_{ij} = 1$, если с i -го элемента структуры в j -й ее элемент имеется непосредственный путь, и $S_{ij} = 0$ в противном случае.

$$S = \begin{vmatrix} & И & Y_1 & Y_2 & \dots & Y_j & \dots & Y_n & D_1 & \dots & D_l & \dots & D_m \\ И & 0 & 1 & 1 & & 1 & & 1 & 0 & & 1 & & 0 \\ Y_1 & 0 & 0 & 0 & & 0 & & 0 & 1 & & 0 & & 0 \\ \vdots & & & & & & & & & & & & \\ Y_j & 0 & 0 & 0 & & 0 & & 0 & 0 & & 1 & & 0 \\ \vdots & & & & & & & & & & & & \\ Y_n & 0 & 0 & 0 & & 0 & & 0 & 0 & & 1 & & 1 \end{vmatrix}$$

Расчет нормативов прямых затрат на изделие предусматривает получение оценок всех элементов структуры изделия по статьям: материалы, полуфабрикаты, заработная плата, трудоемкость. Предлагается алгоритм, реализующий поставленную задачу. Для удобства все массивы исходной информации представлены в виде матриц.

1. Матрица применимости Y_j на И:

$$\begin{vmatrix} & Y_1 & Y_2 & \dots & Y_j & \dots & Y_n \\ И & a_1 & a_2 & \dots & a_j & \dots & a_n \end{vmatrix}$$

Здесь a_j — применимость j -го узла на изделие.

2. Матрица применимости D_l на Y_j :

$$\begin{vmatrix} & D_1 & D_2 & \dots & D_l & \dots & D_m \\ Y_1 & a_{11} & 0 & & 0 & & a_{1m} \\ Y_2 & a_{21} & a_{22} & & 0 & & 0 \\ \vdots & & & & & & \\ Y_j & 0 & 0 & & a_{jl} & & 0 \\ \vdots & & & & & & \\ Y_n & a_{n1} & a_{n2} & & 0 & & a_{nm} \end{vmatrix}$$

Здесь a_{ij} — применимость i -й детали на j -й узел.

3. Матрица применимости D_l на И:

$$\begin{vmatrix} & D_1 & D_2 & \dots & D_l & \dots & D_m \\ И & b_1 & b_2 & \dots & b_l & \dots & b_m \end{vmatrix}$$

где b_i — применимость i -й детали на изделие.

4. Матрица нормативных затрат по статье материалы на D ,

$$\begin{vmatrix} D_1 & c_1 \\ \vdots & \vdots \\ D_l & c_l \\ \vdots & \vdots \\ D_m & c_m \end{vmatrix}$$

где c_i — затраты в рублях на i -ю деталь по статье материалы
 5. Матрица нормативных затрат по статье полуфабрикаты на D:

$$\begin{vmatrix} D_1 & d_1 \\ D_2 & d_2 \\ \vdots & \vdots \\ D_i & d_i \\ \vdots & \vdots \\ D_m & d_m \end{vmatrix}$$

где d_i — затраты в рублях на i -ю деталь по статье полуфабрикаты.

6. Матрица нормативных затрат по статье заработная плата и трудоемкости на D:

$$\begin{vmatrix} D_1 & b_{11} & b_{12} \\ D_2 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ D_i & b_{i1} & b_{i2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ D_m & b_{m1} & b_{m2} \end{vmatrix}$$

где b_{11} — трудоемкость на i -ю деталь, нормо-часы;

b_{i2} — заработная плата на i -ю деталь, руб.

7. Матрица сборки У:

$$\begin{vmatrix} Y_1 & c_{11} & c_{12} \\ Y_2 & c_{21} & c_{22} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_j & c_{j1} & c_{j2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_n & c_{n1} & c_{n2} \end{vmatrix}$$

где c_{j1} — трудоемкость на сборку j -го узла, нормо-часы;

c_{j2} — заработная плата на сборку j -го узла, руб.

8. Матрица сборки И:

$$| И | p_1 | p_2 |$$

где p_1 — трудоемкость на сборку изделия, нормо-часы;

p_2 — заработная плата на сборку изделия, руб.

Алгоритм, блок-схема которого приводится на рис. 2, позволяет получить нормативы прямых затрат на узлы и изделия в целом путем ряда элементарных операций (сложение, умножение) над массивами исходной информации.

В процессе функционирования предприятия нормативы прямых затрат на изделие, как правило, подвергаются коррекции. При больших количествах деталей и узлов, образующих структуру изделия, важно знать, где и как отразятся внесенные изменения. Предлагаемый алгоритм расчета нормативов прямых затрат на изделие с учетом коррекции представляет собой несколько дополненный исходный алгоритм. К структуре исходного

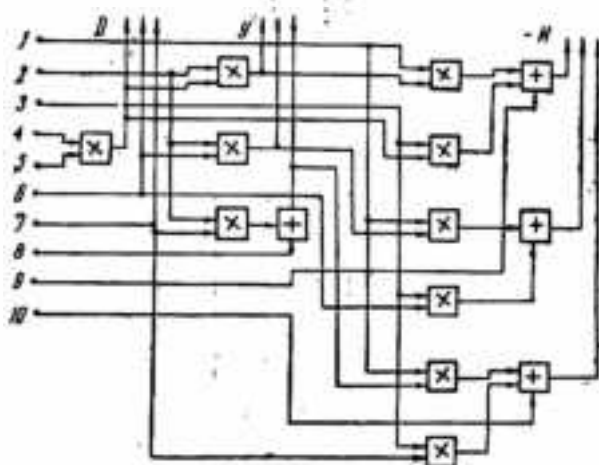


Рис. 2

алгоритма добавляется блок выделения подструктуры изменения нормативов изделия S . Алгоритм предполагает работу только с изменившимися массивами информации. Подструктура изменения нормативов изделия может быть двух видов:

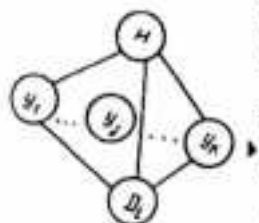


Рис. 3

1. D — вид: произошло изменение нормативов для i -й детали (рис. 3).

2. Y — вид: произошло изменение нормативов j -го узла (рис. 4).

Для обоих видов подструктура изменений нормативов изделий представляет собой результат выделения всех возможных связей изменившегося элемента на структуре S .

Блок-схема алгоритма выделения подструктуры и изменения нормативов изделия S' по матрице структуры изделия S представлена на рис. 5.

В первом блоке анализируются k -й столбец ($k = 1 + m + 1 + n + 1$) матрицы структуры изделия, соответствующий изменившемуся элементу.

При анализе определяется множество p -х строк ($p = 1 + n + 1$), имеющих в k -м столбце ненулевые элементы. Во втором блоке номера p -х строк сравниваются с единицей. В случае их неравенства в третьем блоке анализируются столбцы и определенные p -е строки, аналогично анализу, проведенному в первом блоке.



Рис. 4.

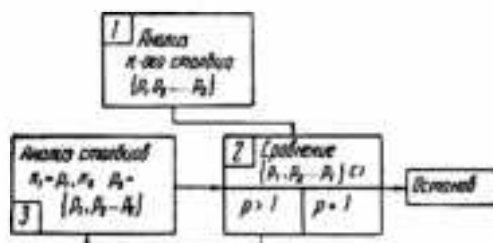


Рис. 5.

Процесс продолжается до тех пор, пока во втором блоке номера всех строк, выделенных в третьем блоке, не сравниваются с единицей.

В результате работы алгоритма будут выявлены все возможные связи изменившегося элемента на структуре. Для внесения изменений в нормативы прямых затрат на изделие необходимо из массивов исходной информации выделить только определенные изменения i и j и произвести над ними операции в соответствии с блок-схемой рис. 2.

ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АСУ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА

Л. И. Заруцкая, К. Д. Коноваленко, В. А. Склепус

Харьков

Автоматизированная система управления технологической подготовкой производства, как всякая система управления, включает в себя такие этапы: планирование, сбор информации о состоянии управляемой системы и воздействие на управляемый объект с целью приведения его в желаемое состояние.

Главный фактор любого управления, его цель и смысл заключены в решениях и тех процессах, которые приводят к принятию решений. Без решения нет управления. Возможности при-

нимать и реализовать решения заключены в обмене информацией между органом и объектом управления. С информационной точки зрения принятие решения — это переработка органом управления всей стекающейся к нему информации, в том числе информации, поступающей от объекта управления по каналу обратной связи. Как результат этой переработки, отдаются распоряжения, подлежащие исполнению в управляемой системе.

С точки зрения системного подхода любое решение практикуется как выбор из множества возможных способов, действий, направленных на достижение поставленной цели, или, поскольку на выполнение любой работы выделяются ресурсы, любое решение — это выбор из множества возможных распределений ресурсов (расстановки сил, распределения средств), а реализация решений — это переход системы в последовательность или ряд новых состояний в процессе достижения цели.

Процесс принятия решений состоит, как правило, из трех актов. Первый — решение перед началом выполнения работ или начальное решение есть не что иное, как план выполнения работ, указывающий, кому, что и в какое время необходимо сделать. В плане указывается распределение ресурсов между участниками выполнения работ. Второй — оценка состояния управляемой системы и среды. Она позволяет составить представление о системе и об окружающей обстановке. Третий акт процесса — собственно принятие решения — осуществляется как результат сопоставления сложившегося представления с целью выполнения работ.

План как модель проведения работ должен отвечать двум основным требованиям: во-первых, отображать логическую последовательность выполнения взаимосвязанных работ, а во-вторых, обеспечивать наилучшее использование имеющихся ресурсов. Помимо этого, в плане указываются частные или промежуточные цели и задачи, достижение которых есть условия достижения общей цели.

Важнейшим ресурсом выполнения любого комплекса работ является время, правильное использование которого в значительной степени зависит от правильности принятия решений при составлении плана работ.

Технологическая подготовка производства представляет собой комплекс технических и организационных мероприятий, обеспечивающих в минимально короткие сроки освоение новых изделий, начиная от окончания конструкторской подготовки до выпуска первой серии.

Основное содержание технологической подготовки производства — проектирование технологических процессов, конструирование всей необходимой технологической оснастки и ее изготовление, испытание оснастки, разработка прогрессивных норм времени, расхода основных и вспомогательных материалов, рас-

чет потребного оборудования, изготовление опытной серии и обеспечение ритмичного выпуска изделий.

Особенностью технологической подготовки является то, что наряду с комплексностью подготовки к изготовлению всей номенклатуры деталей, узлов и изделия в целом прохождению технической документации и процесс изготовления для каждой детали происходят отдельно. Изготовление деталей и сборка узлов должны выполняться в соответствии с конструктивной схемой сборки изделия. В связи с этим к плану подготовки производства как к модели процесса предъявляются дополнительные требования. Во-первых, на стадии изготовления опытной серии в нем должна быть отражена конструктивная схема сборки изделия, а во-вторых, схема движения технической документации для каждого узла и детали в отдельности.

Сетевой график технологической подготовки производства может быть составлен в два этапа. Вначале, до первичной проработки конструкторской документации и составления расцеховки, — в укрупненном виде: комплексы работ по проектированию технологических процессов, проектированию оснастки и т. д. обозначены отдельными укрупненными работами. После первичной проработки конструкторской документации и составления расцеховки на основе конструктивной схемы сборки изделия и схемы движения технологической документации может быть составлен детальный сетевой график, указывающий последовательность и сроки выполнения работы.

Последовательность составления укрупненного и детализированного сетевого графика технологической подготовки производства может быть представлена в виде схемы (рис. 1).

Получив от вышестоящей организации задание по освоению нового изделия, главный инженер приказом назначает ответственных исполнителей по подготовке производства данного вида новой техники. Ответственные исполнители после первичной проработки конструкторской документации составляют перечень работ сетевого графика и передают его в отдел планирования подготовки производства (ОППП). В ОППП на основе перечня работ схемы движения технической документации и конструктивной схемы сборки изделия составляется сетевая модель подготовки производства данного изделия, определяется перечень работ, которые должны быть выполнены тем или другим подразделением, и выдаются задания руководителям подразделений вместе с частными сетевыми графиками.

В подразделениях эти задания и частные графики прорабатываются. В них вносятся необходимые изменения (укрупнения или разукрупнения работ, а также последовательность их выполнения), даются временные оценки по принятой системе, а также потребность ресурсов, и в виде ведомости все это сдается в ОППП.

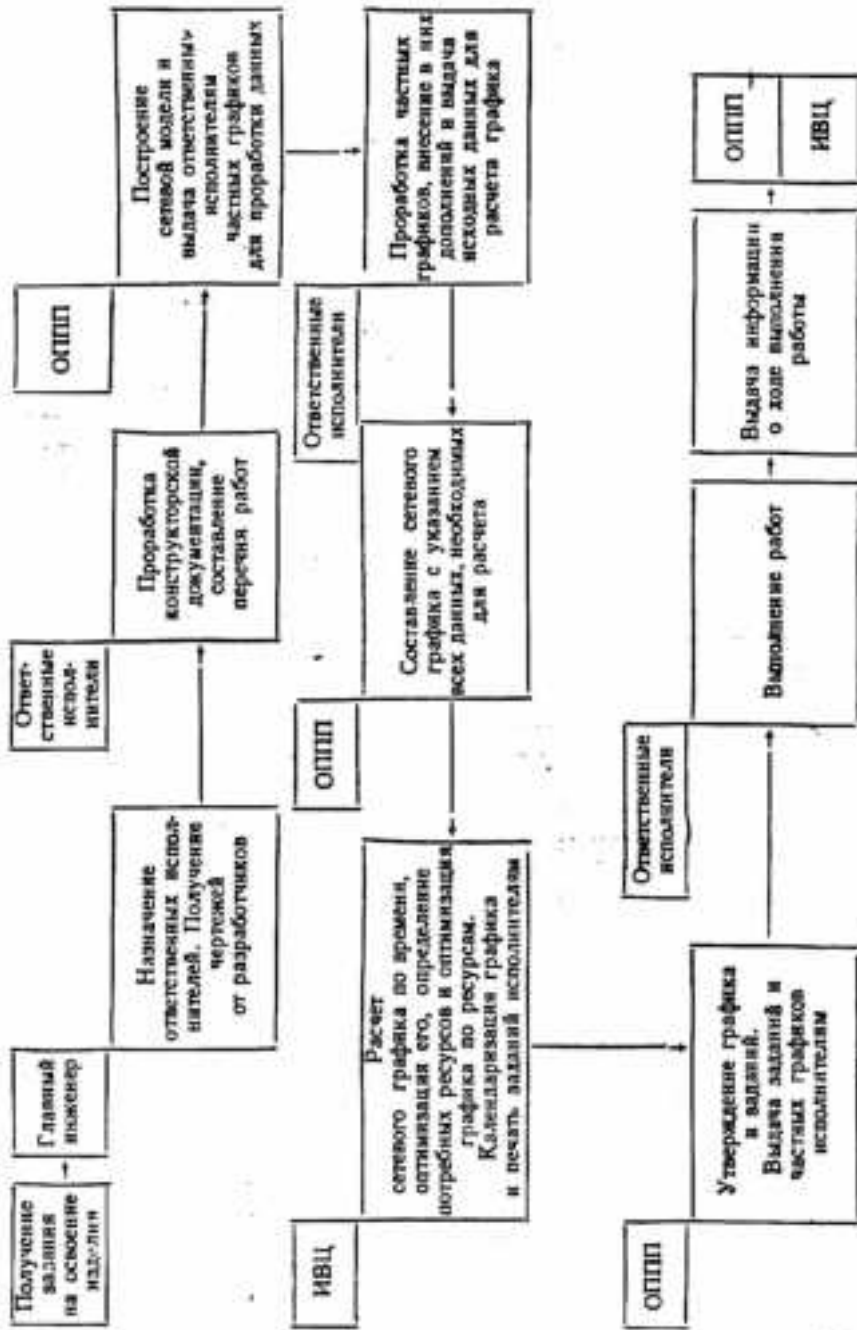


Рис. 1. Схема разработки сетевого графика технологической подготовки производства.

Отдел планирования подготовки производства на основании этих данных вносит необходимые изменения в ранее составленную сетевую модель и в закодированном виде с указанием продолжительности выполнения работ и потребности в ресурсах сдает на ИВЦ.

Расчет сетевых графиков по критерию времени в настоящее время уже не представляет никаких трудностей.

С помощью разработанного для ЭВМ «Минск-22» комплекса программ можно рассчитывать сетевые модели с числом работ до 1960 и числом событий до 1500 по критерию времени с учетом потребных ресурсов. Сети с большим количеством работ и событий рассчитывают по частям.

Для работы этого комплекса программ информация о сетевой модели задается следующим образом. События графика (E_i) кодируются четырьмя десятичными знаками, длительности (d_{ij}) работ (P_{ij}) задаются временными оценками в виде целого десятичного числа, не превышающего 799; исполнители (отделы, цехи и группы, участвующие в технологической подготовке производства) шифруются номерами, не превышающими числа 99; наименования ресурсов кодируются тремя десятичными знаками (не более 999); интенсивность потребления K -го вида ресурса на работе P_{ij} (т. е. ежедневное количество ресурса) задается в виде целого четырехзначного числа и количество видов ресурсов, необходимых для выполнения данной работы, не должно превышать семи.

Машинная обработка информации о сетевой модели осуществляется с помощью библиотеки стандартных программ (БСП). Организуется БСП через управляющую программу, предусматривающую возможность считывания каждой стандартной программы с накопителя на магнитной ленте (НМЛ) и настройки в определенный массив оперативной памяти. Перечень разработанных программ и порядок их вызова с НМЛ указаны в схеме функционирования БСП (рис. 2).

Комплекс программ позволяет осуществлять проверку правильности исходной информации о сетевой модели и выявить следующие ошибки:

а) величина кода предшествующего или кода последующего событиям работы больше предельно допустимого (1499) или равна нулю;

б) совпадение кодов предшествующего и последующего событий работы;

в) совпадение кодов у двух или более работ;

г) наличие тупиков 1-го или 2-го рода;

д) наличие контуров;

е) наличие в памяти ЭВМ более 1960 работ.

В случае отсутствия ошибок в исходной информации производится расчет временных параметров сетевой модели по

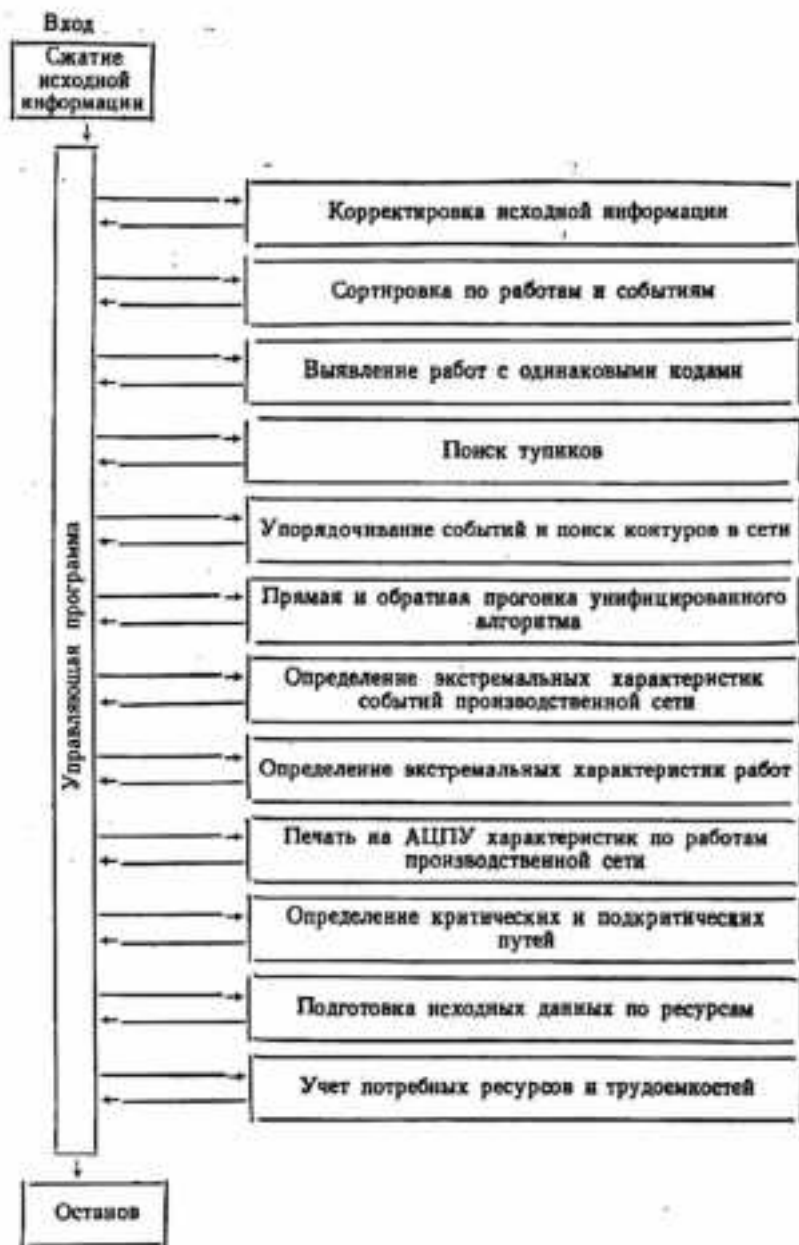


Рис. 2. Схема функционирования БСП.

событиям и работам; выделение работ критического пути и зоны подкритичности; учет количества потребления ресурсов за определенные периоды времени.

Пусть U — множество дуг, образующих сеть проекта; d_{ij} — длительность работы P_{ij} , t_i и t_i^* — ранний и поздний сроки наступления события E_i . Тогда

$$t_1 = 0, \\ t_j = \max_{(ij) \in U_T} (t_i + d_{ij}), \quad j = 2, 3, \dots, n,$$

где (ij) — дуга, идущая из вершины i в вершину j , а U_T — подмножество дуг, входящих в вершину j , \max обозначает, что мы берем максимум по всем дугам, принадлежащим U_T .

Последовательность вершин графа выбирается из массива машинной памяти, отведенного для хранения таблицы порядка событий. Процесс составления таблицы порядка события сводится к тому, что коды событий записываются в нее следующим образом: если в E_i событие входит n работ P_{ij} с начальными событиями E_i , то в таблице код события E_j должен стоять после кодов n начальных событий E_i .

На каждом шаге данного процесса находится совокупность таких событий E_j , для каждого из которых все начальные события E_i уже включены в таблицу порядка. Вычислительный процесс в случае обратной прогонки производится с переадресацией, обеспечивающей выбор элементов указанной таблицы в обратном порядке.

$$t_i^* = \min_{(ij) \in U_T} (t_j^* - d_{ij}), \quad i = 2, \dots, n-1,$$

$t_n^* = t_n$ — срок завершения этого проекта;

$t_1^* = t_1 = 0$ — момент начала работ.

Использование таблицы порядка обеспечивает вычисление длины критического пути t_n и величин t_i и t_i^* за одну прогонку унифицированного алгоритма. Резерв времени событий определяется соотношением $(t_i^* - t_i)$.

Экстремальные характеристики времени начала и окончания работ определяются следующими соотношениями:

- ранний возможный срок начала работы P_{ij} : t_i ;
- поздний допустимый срок начала работы P_{ij} : $t_j^* - d_{ij}$;
- ранний возможный срок окончания работы P_{ij} : $t_i + d_{ij}$;
- поздний допустимый срок окончания работы P_{ij} : t_j^* ;
- полный резерв времени работы P_{ij} : $t_j^* - t_i - d_{ij}$;
- свободный резерв времени работы P_{ij} : $t_j - t_i - d_{ij}$.

Алгоритм определения критических и подкритических путей основывается на том свойстве, что полный резерв времени работ P_{ij} , принадлежащих критическому пути, равен нулю. Путь, ближайший к критическому, проходит через дугу (ij) , полный резерв времени которой является минимальным до заданной величины критичности, но отличным от нуля для всей сетевой модели.

В результате просчета сетевой модели по критерию времени мы получаем возможность учесть потребные ресурсы и трудоемкости по заданным периодам времени. В основе алгоритма, с помощью которого производится такой учет, лежит суммирование объемов потребления каждого вида ресурса по всем работам модели, на которых применяется данный вид ресурса и которые производятся в заданный период времени.

В том случае, если на предприятии одновременно ведется подготовка производства нескольких изделий, чертежи на которые поступили в разное время, используя принципиальные основы изложенного комплекса программ, можно получить суммарную потребность того или другого ресурса в определенные периоды времени по всем графикам.

На данном этапе разработанные программы дают суммарную потребность ресурсов, но не учитывают их загрузки в процессе работы. Это весьма неудобно, так как после сверки потребных ресурсов по срокам с их наличием приходится проводить сложные корректировки в графиках, используя свободные и полные резервы времени работ, а также вводя работы «ожидание освобождения исполнителя». Поэтому сейчас создаются программы с помощью которых ЭВМ при расчете сетевых графиков сама учитывала бы загрузку исполнителей на основе установленного приоритета работ и заказов, назначала последовательность выполнения работ и устанавливала временные характеристики. Но таких программ пока нет и проверку загрузки исполнителей пока можно проводить только вручную. Для этой цели ОППП имеет в своем распоряжении данные о наличии ресурсов в каждом подразделении, участвующем в подготовке производства как исполнителя работ. Эти данные содержатся в виде картотеки карточек.

КАРТА

наличия ресурсов в подразделении
с по
выполняющем работы по подготовке производства
Код выполняемых работ
Код и вид ресурса

ЭВМ выдает на печать перечень работ, которые должно выполнить то или иное производственное подразделение в определенные промежутки времени, и потребность в ресурсах. Перечень

и является тем заданием, которое выдает ОПП исполнителям, участвующим в подготовке производства новых изделий.

Назначение ресурса	Единица измерения	Месяцы												
		Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	
Общее количество Выделяемое для подготовки производства														

Выдачей заданий по подготовке производства начинается стадия оперативного управления освоения новой техники. Функционирование АСУ ТПП на стадии оперативного управления (рис. 3) происходит циклично, т. е. через некоторый промежуток времени цикл выполняемых работ повторяется. Продолжительность цикла определяется сроками сбора с производственных подразделений информации о состоянии выполнения работ сетевых графиков. Его не следует делать слишком коротким (чтобы исполнители, получив новые задания, могли организовать работу по их выполнению и добиться результатов), но и не слишком продолжительным, чтобы не оказались незамеченными нарушения в ходе подготовки производства.

Определить продолжительность цикла функционирования АСУ ТПП на стадии оперативного управления можно по формуле

$$T_{o,y} = T_{п,р} \cdot \frac{100}{\alpha},$$

где $T_{п,р}$ — время принятия решений в днях; α — допустимый процент времени в общем цикле на принятие решений, принимается 10—15%.

При использовании различных технических средств по сбору информации цикл сокращается и управление улучшается.

Сроки подготовки производства и время построения сетевых моделей по освоению новой техники значительно сокращаются при автоматизации выполнения работ по подготовке производства с помощью ЭВМ, таких, как разузлование изделий, составление ведомости заказа и спецификации, разработка подетальных и сводных норм расхода материалов, а также установления маршрутов изготовления деталей и узлов.

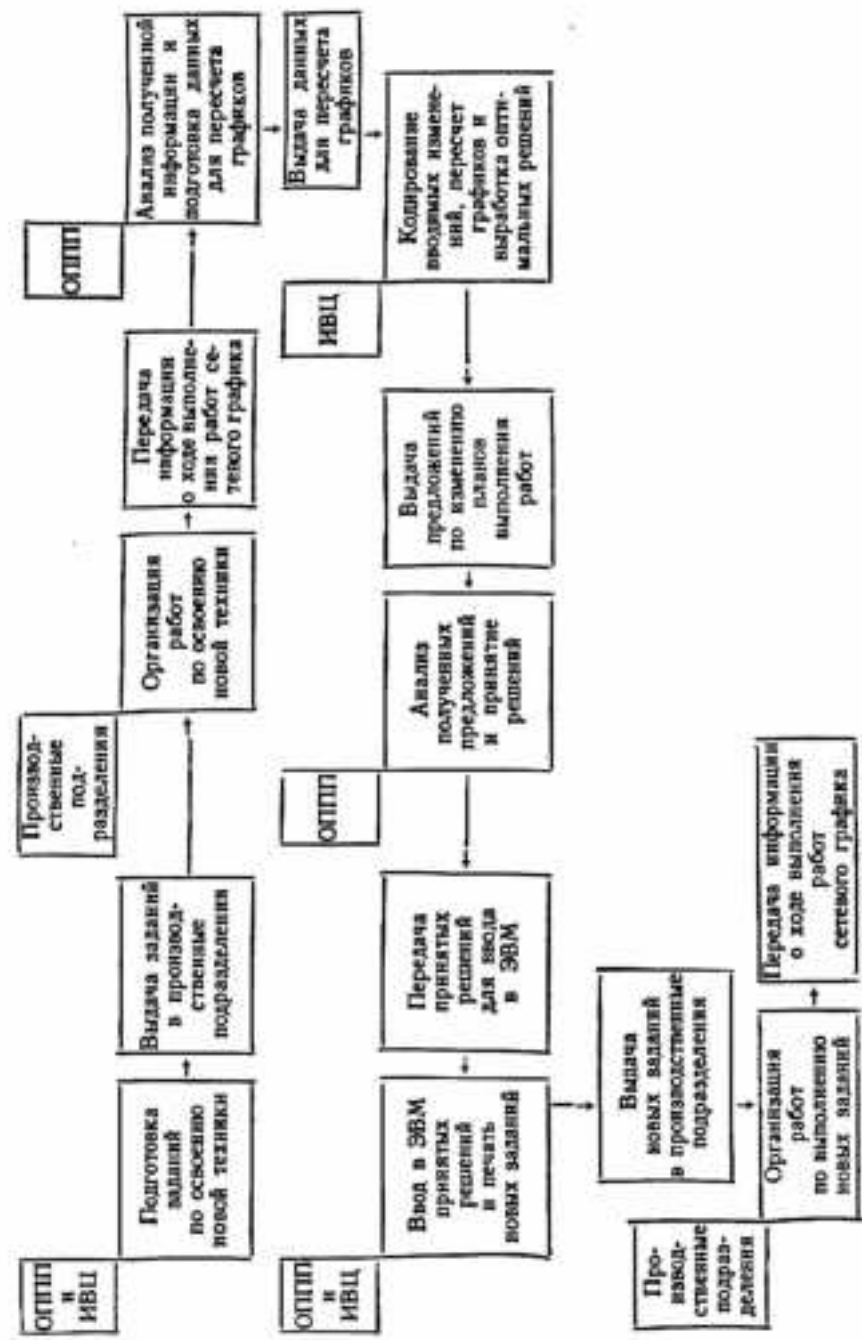


Рис. 3. Схема функционирования АСУ ТПП на стадии оперативного управления.

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ОПЕРАТИВНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПЛАНИРОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ЦЕХА

А. Г. Светличная

Харьков

Внедрение в производство новейших достижений науки и техники способствует непрерывному совершенствованию конструкций выпускаемых изделий, технологических процессов, освоению большого количества новых заказов. Значительную роль в техническом прогрессе, ритмичной работе промышленного предприятия, росте выпускаемой продукции и снижении ее себестоимости играет инструментальное производство, призванное обеспечить производственный процесс всей необходимой оснасткой и инструментом. Поэтому механизация и автоматизация процессов управления инструментальным цехом является важной задачей в подсистеме технической подготовки производства.

От того, как будет спланирована работа инструментальных цехов, зависит цикл освоения и выпуска новых изделий. Система оперативно-производственного планирования в условиях инструментального цеха должна позволить осуществлять решения, которые бы обеспечивали выполнение производственного задания при наиболее эффективном использовании парка оборудования, производственных площадей и рабочего времени и наиболее удачном распределении планируемого объема по участкам с учетом их производственных мощностей.

На ход производственного процесса в инструментальном производстве влияет множество переменных факторов («срочные» заказы, состояние оборудования, квалификация исполнителей и т. д.). Заранее учесть все факторы практически невозможно, а значит, невозможно составить оптимальный оперативный план на длительный срок.

Оперативный план инструментального цеха должен отвечать конкретно сложившейся ситуации и разрабатываться непрерывно. В ходе производства в цехе обращается громадное количество различных заказов, сведений, сводок, отчетов, нарядов, сдаточных накладных и т. д. Достаточно сказать, что портфель заказов ежемесячно содержит до 1000 наименований позиций технологической оснастки. Если же учесть, что оперативное планирование должно предусматривать планирование, учет и контроль выполнения каждой детали-операции, то становится ясно, что переработать такой поток информации вручную практически невозможно.

Для обеспечения комплектного своевременного выпуска технологической оснастки при наиболее эффективном использовании

наличных производственных ресурсов, в первую очередь станочного парка, необходимо иметь динамичную систему оперативного планирования, которая управляла бы повседневной работой цеха и участков и реагировала бы на малейшие изменения факторов, могущих повлиять на дальнейший ход производства.

Автоматизированная система оперативно-производственного планирования для инструментального цеха построена на базе экономико-математических методов и электронно-вычислительных машин. Эта система предполагает расчет календарного плана-графика изготовления технологической оснастки и планирование каждой детали-операции оснастки с помощью картотеки очередности их выполнения. Система должна обеспечить объективное централизованное планирование; планирование сроков изготовления технологической оснастки с точностью до смены с учетом наилучшего использования оборудования в директивные сроки; ежедневное планирование и учет выполнения заданного плана по детали-операциям; ежедневный автоматизированный учет и анализ использования оборудования; оперативный анализ выполнения плана участками и цехом в целом.

Система осуществляет составление плана-графика изготовления оснастки по сменам с помощью ЭВМ, а также выдачу заданий исполнителям с помощью картотеки, в которой находятся наряды по детали-операциям по группам оборудования в порядке их выполнения без прямого обращения к ЭВМ. Принципиальная схема планирования и управления инструментальным производством по предлагаемой системе может быть описана следующим образом.

Отдел главного технолога на основании сроков освоения новых изделий в соответствии с графиком оснащения заказа выдает инструментальному отделу заказ на изготовление оснастки, при этом указывает директивные сроки ее изготовления. Календарный план-график по номенклатуре инструментальный отдел составляет с помощью ЭВМ. Для этого необходима следующая информация: номенклатура оснастки с указанием групп срочности; критические сроки изготовления оснастки; данные о действительном сменном фонде времени по каждой группе оборудования; данные по суммарной трудоемкости по группам взаимозаменяемого оборудования для каждого наименования оснастки.

ЭВМ выдает календарный план-график с указанием порядковых номеров смен изготовления каждого наименования технологической оснастки. Если оказывается, что не вся номенклатура может быть выполнена в заданные сроки в планируемом периоде из-за ограничения ресурсов, необходимо согласовать с инструментальным отделом, для какой оснастки можно перенести срок сдачи.

Составленный таким образом план-график выдается в виде табуляграммы. Он может дополняться заказами на доработки и ремонты за счет выделенного для этой цели фонда времени.

Периодически (например, раз в неделю) вычислительный центр анализирует пропускную способность отдельных групп оборудования. Одним из основных исходных документов для осуществления оперативного планирования является форма ИО-1, содержащая информацию: спецификация деталей, входящих в технологическую оснастку; технологический маршрут изготовления каждой детали по группам оборудования; пооперационные нормы времени.

Эта информация поступает из технологического бюро цеха в бюро технического нормирования. На основе полученных данных о трудоемкости каждой операции плановое бюро рассчитывает норматив опережения. Опережение k -й операции i -й детали относительно срока окончания механической обработки обозначим через Δ_i^k , опережение k -й операции i -й детали относительно следующей $(k+1)$ -й операции через δ_i^k . Величина δ_i^k соответствует величине цикла выполнения операции. Величина Δ_i^k определяется по следующим правилам:

1) для детали-операций, по которым не предусматривается совместная обработка с другими деталями, $\Delta_i^k = \Delta_i^{k+1} + \delta_i^k$, при этом для последней n -й операции технологического маршрута $\Delta_i^{n+1} = 0$;

2) для детали-операций, по которым по технологическому маршруту предусмотрена совместная обработка с другими деталями

$$\Delta_i^k = \max(\Delta_i^{k_1+1}, \dots, \Delta_i^{k_2+1}) + \delta_i^k.$$

Заполненная форма ИО-1 поступает к оператору планового бюро, который вычисляет суммарную трудоемкость по каждой технологической оснастке в разрезе групп оборудования. Эти данные заносятся в форму ИО-2 и передаются на ВЦ. После получения от ВЦ плана-графика с указанными номерами смен выпуска оснастки и имеющегося опережения по каждой детали-операции определяется номер смены запуска детали-операций в производство. Эти номера смен записываются в наряд и указывают на приоритет запуска детали-операций.

Наряды раскладываются в ячейки картотеки по группам оборудования в порядке выполнения их по сменам. Эта картотека дает наглядную отсортированную информацию, необходимую для пооперационного планирования.

В порядке установленной очередности планировщик участка набирает сменное задание каждой группе оборудования. После выполнения работы наряд закрывается БТК и передается в плановое бюро для отметки о выполненной работе в форме ИО-1.

В конце смены закрытые наряды передаются на ВЦ, где ведется учет выполненных работ за каждую смену по группам оборудования, использованной зарплаты и других показателей, характеризующих работу участка за смену.

Математическое описание задачи оперативно-календарного планирования для инструментального цеха

Ставится задача разработать календарный план-график сроков сдачи технологической оснастки по каждому наименованию. Этот график должен обеспечить изготовление оснастки в установленные сроки при равномерной загрузке оборудования на всех отрезках планируемого периода. Эта задача содержит в себе большой объем вычислительных работ, и решить ее вручную не представляется возможным.

Предлагаемая система внутрицехового оперативно-календарного планирования инструментального производства предусматривает реализацию этой задачи на ЭВМ «Минск—22». На магнитной ленте ЭВМ по каждой позиции портфеля заказов инструментального цеха имеется информация о суммарной трудоемкости невыполненных работ по группам оборудования. Эта информация периодически корректируется по ходу выполнения работ и поступления новых заказов.

Кроме суммарной трудоемкости по группам оборудования необходимо иметь номенклатурный график изготовления технологической оснастки по группам срочности, исходя из требований основного производства. В зависимости от конкретной производственной ситуации вся номенклатура инструментального цеха может быть разделена на три группы срочности: заказы аварийные; заказы срочные; заказы обычные.

Такое деление позволяет установить правила приоритета в последовательности выполнения заказов. Внутри групп срочности приоритет выполнения отдельных позиций устанавливается исходя из условий оптимального использования оборудования.

Принимая во внимание особенности инструментального производства, поставленную задачу предлагаем решить следующим образом. Введем обозначения:

a_{ij} — оставшаяся трудоемкость j -го заказа по i -й группе оборудования;

Π_i — действительный фонд времени по i -й группе оборудования;

C_j — общая трудоемкость механической обработки по j -у заказу.

Так как цех располагает определенным ресурсом времени оборудования, должно выполняться следующее условие:

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 + \dots + a_{1m}x_n \leq \Pi_1;$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3 + \dots + a_{2m}x_n < P_2; \quad (1)$$

$$a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + a_{n3}x_3 + \dots + a_{nm}x_n < P_n,$$

где x_j — переменная величина, которая принимает значение $x_j = 1$, если заказ включен в план-график, и $x_j = 0$, если заказ не включен в план-график.

Если бы ставилась задача максимизировать загрузку оборудования только при указанных ограничениях, получилась бы задача целочисленного линейного программирования с целевой функцией $Z = \max \sum C_j x_j$.

Но в условиях инструментального производства следует учитывать требования изготовления каждого наименования технологической оснастки в определенные сроки. Это условие можно выполнить, преобразовав целевую функцию.

Номенклатурный график изготовления оснастки, как говорилось, разбит на три группы срочности — заказы аварийные, срочные и обычные. Для каждой группы срочности введен свой весовой коэффициент K . Так, для заказов первой группы срочности $K_1 = 1$; для второй группы срочности $K_2 < K_1 < 1$; для третьей $K_3 < K_2$.

Абсолютные значения коэффициентов K_2 и K_3 устанавливаются в процессе внедрения системы на основании конкретных данных. С учетом этих коэффициентов целевая функция примет вид

$$Z_i = \max \left(K_1 \sum_{j \in I_1} C_j x_j + K_2 \sum_{j \in I_2} C_j x_j + K_3 \sum_{j \in I_3} C_j x_j \right),$$

где I_1, I_2, I_3 — множества заказов 1, 2, 3-й групп срочности соответственно, или

$$Z_i = \max \sum \tilde{C}_j x_j, \text{ где } \tilde{C}_j = K_j C_j.$$

В результате решения задачи с такой целевой функцией получим план-график инструментального цеха с учетом выполнения заказов в директивные сроки при условии, что пропускная способность цеха позволяет их выполнить. В противном случае для некоторых позиций могут возникнуть отклонения.

Вопрос о переносе сроков для отдельных позиций решается плановым бюро инструментального отдела с учетом сложившейся производственной ситуации.

Принимая во внимание перечисленные особенности, предлагаем динамическую модель решения задачи.

Алгоритм решения

Последовательно из всего портфеля заказов выбираем те заказы, которые наилучшим образом загружают оборудование, и назначаем для них сроки. Условие (1) перепишем в следующем виде:

$$\begin{aligned} b_{11}x_1 + b_{12}x_2 + b_{13}x_3 + \dots + b_{1m}x_m &< b_1^{(1)}, \\ b_{21}x_1 + b_{22}x_2 + b_{23}x_3 + \dots + b_{2m}x_m &< b_2^{(1)}, \\ \dots &\dots \\ b_{n1}x_1 + b_{n2}x_2 + b_{n3}x_3 + \dots + b_{nm}x_m &< b_n^{(1)}, \end{aligned}$$

где

$$b_{ij} = \frac{a_{ij}}{\Pi_j}, \quad b_i^{(1)} = 1.$$

1. Находим

$$\max_i \left(\min_j \frac{b_j}{b_{ij}} \cdot \tilde{C}_i \right). \quad (2)$$

Позиция номенклатурного графика, соответствующая номеру j_0 , для которой достигается максимум выражения (2), включается в план-график как первоочередная.

2. Рассчитываем оставшуюся часть фонда времени по группам оборудования

$$b_i^{(k)} = b_i^{(k-1)} - b_{ij_0}, \quad (3)$$

индекс k обозначает номер шага.

3. После включения в план-график k заказов по 1-й группе оборудования израсходована часть фонда, равная $(1 - b_i^{(k)})$. Определяем $\max(1 - b_i^{(k)})$. Обозначим $\max(1 - b_i^{(k)})$ через $t^{(k)}$.

По этой величине можно установить момент времени, когда j_0 -заказ обеспечен ресурсом оборудования.

При оперативном планировании и управлении инструментальным производством удобнее оперировать временем, выраженным в сменах. Если предположить, что в планируемом периоде n смен, то порядковый номер смены (момент времени обеспечения j -го заказа ресурсом) можно выразить следующим образом:

$$N_{\text{смены}} = [t^{(k)}n] + 1.$$

В предложенной модели фонд времени выделяется непрерывно. В действительности же он распределяется по частям в интервале времени, равном максимальному опережению детали-операций (максимальное опережение по детали-операции определяет цикл механической обработки заказа в целом). Поэтому к

моменту времени обеспечения заказа ресурсом оборудования добавляем величину, равную 0,5 максимального опережения детали-операции. Таким образом, получен планируемый срок сдачи технологической оснастки.

4. Для оставшихся позиций номенклатурного плана решается задача, аналогичная изложенной, до исчерпания ресурса по одной из групп оборудования. В результате получаем календарный план-график выхода оснастки из механической обработки.

Если учесть время на выполнение сборочных операций, можно получить календарный план-график изготовления и сдачи оснастки.

Необходимо заметить, что при решении задачи по изложенному алгоритму проводятся вычисления по формуле (2) столько раз, сколько позиций оснастки включено в номенклатурный план-график. В условиях инструментального производства с достаточно большим количеством позиций по номенклатуре это довольно трудоемкая задача. Но если учесть, что трудоемкости одного заказа b_{ij} по отношению к общему фонду времени, которым располагает оборудование, небольшие, то $b_i^{(k)}$ будет отличаться от $B_i^{(k-1)}$ на незначительную величину.

Основываясь на этом, можно на каждом шаге определять не один заказ, а несколько, которые своей трудоемкостью лучшим образом выравнивают ресурс времени по оборудованию. Это осуществляется следующим образом:

1) для каждого заказа (из еще распределенных заказов номенклатурного списка) определяется величина

$$\lambda_j = \min \frac{b_j}{b_{ij}} \tilde{C}_i;$$

2) упорядочиваются λ_j в порядке убывания их значений;

3) начиная с максимального по трудоемкости набирается группа заказов, общая трудоемкость которых примерно равна дневному фонду времени оборудования;

4) заказы, которые вошли в эту группу, включаются в план-график как первоочередные.

В результате решения получаем календарный план-график изготовления технологической оснастки, предусматривающей наилучшее использование наличных производственных мощностей цеха. Эффект данной системы можно охарактеризовать качественно.

Предлагаемая система позволяет на базе проведения оперативных плановых расчетов обеспечить ритмичную работу инструментального цеха и за счет этого повысить выпуск товарной продукции и сократить цикл изготовления оснастки; обеспечивая равномерную и полную загрузку оборудования, наилучшим образом использовать в каждый момент производственные фонды и трудовые ресурсы; повысить оперативность в принятии

решений при своевременном контроле и учете; снизить объем незавершенного производства, а следовательно, улучшить использование оборотных фондов; освободить начальника цеха и мастеров от большого объема работ по планированию, учету и контролю за прохождением оснастки, что позволит им уделять больше внимания решению технических вопросов, а значит, и качественно улучшить управление; проводить на базе обработанной информации анализ работы инструментального цеха, необходимый для оптимального планирования и прогнозирования, а также для принятия решений по расшивке «узких мест» и улучшения работы участков.

ЗАДАЧИ И ФУНКЦИИ СЛУЖБ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА В УСЛОВИЯХ АСУП

К. Д. Коноваленко

Харьков

Автоматизированная система управления предприятием (АСУП) представляет собой единую управляющую систему, использующую единый комплекс технических средств программного аппарата и схем функционирования, предназначенный для повышения эффективности управления предприятием путем совершенствования информационного обеспечения, оптимального планирования и синхронизации хода производства. Она предполагает активное участие человека в процессе управления. Именно человек принимает окончательные решения на основе оценки различных расчетных вариантов и при этом учитывает имеющиеся в его распоряжении дополнительные данные.

Так же, как и при обычных методах функции управления в АСУП состоят из ряда задач, которые должны быть решены для организации нормального протекания производственного процесса. Во-первых, управление подразделяется на управление технической подготовкой производства и управление производственным процессом.

Управление технической подготовкой производства подразделяется, в свою очередь, на управление конструкторской и технологической подготовкой и производством инструмента. Управление производственным процессом подразделяется на технико-экономическое планирование, оперативно-производственное планирование, материально-техническое снабжение и учет.

Техническая подготовка производства как в обычных условиях, так и в условиях АСУП, обязана подготовить все необходимое для обеспечения производственного процесса и управления им.

Для обеспечения производственного процесса техническая подготовка производства готовит чертежи узлов и деталей, технические условия на них, технологическую документацию, определяющую методы изготовления изделий, необходимые инструменты, оснастку и оборудование, а также контрольный инструмент.

Для управляющей системы подготовка готовит: ведомости заказа, подетальные и сводные нормы расхода материалов, маршрутную технологию, нормы трудозатрат на производство и ряд других нормативно-справочных материалов, которые используются при функционировании всех подсистем.

Задачи и функции подготовки производства по обеспечению производственного процесса при переходе к АСУП почти не изменяются, а вот по обеспечению управляющей системы претерпевают значительные изменения.

При функционировании АСУП основную массу управляющих команд и документации получают с помощью ЭВМ, а следовательно, и данные для ее получения должны готовиться для ЭВМ.

Основным документом является ведомость заказа или, как ее еще иногда называют, «состав изделия». Она нужна для организации технико-экономического и оперативно-производственного планирования, ценообразования, получения сводных норм расхода материалов и ряда других работ, в которых должны использоваться перечень деталей и узлов и порядок их вхождения при производстве изделия.

В условиях АСУП ведомость заказа, полученная из конструкторского бюро, должна быть введена в память машины для использования ЭВМ.

В ведомость заказа желательно ввести как можно больше информации, которую можно было бы использовать в управлении. Количество и вид информации зависят от того, где и как собираются использовать ведомость заказа. В общем случае блок-схема использования ведомости заказа и информация, необходимая для этого, показаны на рисунке.

Возможности современных ЭВМ пока не позволяют ввести всю потребную информацию по каждой детали или узлу для более менее сложных изделий. Кроме того, часть информации можно взять из чертежей, имеющихся в начале технологической подготовки производства, а часть информации, такой как маршрут изготовления деталей и узлов, вес заготовки, площадь покрытия, можно получить только в результате выполнения соответствующих этапов технологической подготовки производства. Поэтому более целесообразно в массиве ведомости заказа записывать только номер детали, ее наименование, номер узла, в который она входит и количество входящих в узел деталей. Для записи остальной информации необходимо иметь другой массив, где будет указан номер детали и вся конструкторская и технологическая нормативная информация.

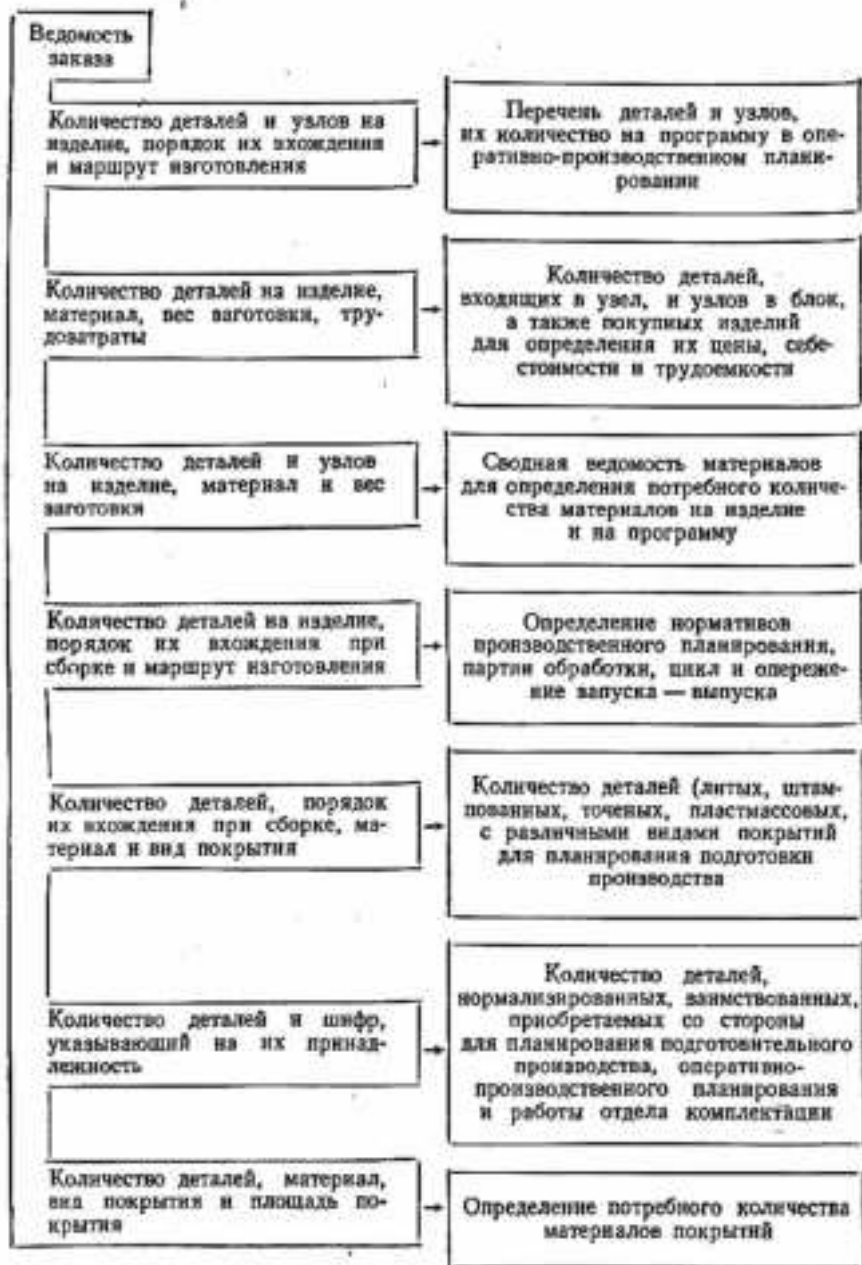


Рис. 1.

Кроме ведомости заказа, служба подготовки производства с целью обеспечения функционирования АСУП должна разработать и передать на ИВЦ следующие документы: маршрут обработки деталей, узлов и изделия; подетальные нормы расхода материалов; пооперационные трудовые нормативы; необходимую оснастку и инструмент; нормативы стойкости инструмента; площади покрытия деталей (узлов), подвергаемых химической обработке и гальваническим покрытиям; площади покрытия деталей (узлов), подвергаемых лакокрасочным покрытиям; типовые технологические процессы гальванических покрытий и химической обработки; типовые технологические процессы лакокрасочных покрытий; удельные нормы расхода анодов и химикатов; удельные нормы расхода лакокрасочных материалов и растворителей.

Маршрут обработки деталей, узлов и изделия необходим для подсистемы оперативно-производственного планирования, которая на его основе выдает планы цехам и контролирует ход производственного процесса, а также для подсистемы технико-экономического планирования, учета и материально-технического снабжения.

Подетальные нормы расхода материалов с указанием шифра материала используются в подготовке производства для получения сводной ведомости расхода материалов на заказ. Подсистема материально-технического снабжения разрабатывает на их основе ведомости расхода материалов по цехам и нормативы материалов, необходимых для обеспечения производства. Подсистема технико-экономического планирования учитывает нормы расхода материалов при определении себестоимости деталей и узлов.

Пооперационные трудовые нормативы, в состав которых входит обозначение профессии, разряда работ, обозначение тарифной сетки, вида норм, штучное время и расценка штучного времени используются в подсистемах оперативно-производственного планирования, технико-экономического планирования и в бухгалтерском учете.

Нормативы стойкости инструмента используются в подсистеме планирования инструментальным хозяйством, а потребный инструмент — в оперативно-производственном планировании и управлении подготовкой производства.

Площади покрытия деталей, подвергаемых гальваническим и лакокрасочным покрытиям, а также удельные нормы расхода анодов, химикатов и лакокрасочных материалов используются при подготовке производства в процессе расчета потребных материалов.

Типовые технологические процессы гальванических покрытий, химической обработки и лакокрасочных покрытий используются в подготовке производства и оперативно-производственном планировании.

Наименование работ	Исполнители
16	17
<p>Комплектация и передача комплекта конструкторской документации [КД]</p> <p>Составление предварительного графика подготовки производства и согласование его в вышестоящей организации [ПГ]</p> <p>Проработка конструкторской документации и передача ее на размножение [ПКД], составл. ведомости заказа [ВЗ]</p> <p>Размножение проработанной конструкторской документации и раздача ее потребителям</p> <p>Запись в память ЭВМ ведомости заказа [МАЗ], создание подетальных перфокарт [ПП], печатание списков деталей для ведения технол. подгот. пр-ва [СД], и ведомости заказа</p> <p>Установление расщелочки в ведомости заказа и определение потребного инструмента [ВЗР]</p> <p>Разработка уточненного графика подгот. пр-ва и выдача заданий исполнителям [УГ]</p> <p>Определение подетальных нормативов расхода материалов [ПН], определение пов-сти покрытий [ППК], разработка технолог. процессов [П]</p> <p>Создание полного комплекта подетальных нормативов на перфокартах [ПKN], печатание сводной ведомости расхода материалов [СВРМ], печатание ведомости матер. покрытий и вспомог. материалов [ВМП]</p> <p>Разработка чертежей спецоснастки и спецн. инструмента [ИСО], изготовление спецоснастки и инструмента [ИСО]</p> <p>Разработка и выдача заданий цехам по изгот. деталей, узлов и издел. [ЗЦ], выдача цехам лимит. карточек и заказывание ведомст. матер. [ПК], разраб. технико-экон. планов и показ. пр-ва [ТЭП]</p> <p>Изготовление установочной партии деталей узлов и изделений [ИИ]</p>	<p>Головная конструкторская организация</p> <p>Отдел планирования подготовки производства [ОППП]</p> <p>Серийное констр. бюро [СКБ]</p> <p>Отдел технической документации [ОТД]</p> <p>Информационно-вычислительный центр ИВЦ</p> <p>Отдел главного технолога ОГТ</p> <p>Отдел планирования подготовки пр-ва ОППП</p> <p>Бюро отдела главного технолога</p> <p>Информ.-вычислительный центр ИВЦ</p> <p>Конструкторское бюро оснастки инструмент. цеха</p> <p>Подсистемы АСУП</p> <p>Цехи</p>

Система создания необходимых нормативных материалов по функционированию всех подсистем АСУ представляет собой сложную и трудоемкую работу.

Нормативно-справочная информационная система, как и всякая система, имеет вполне определенную структуру, качественные и количественные параметры, а ее материальным носителем являются элементы и блоки запоминающих устройств ЭВМ. Эта система является кибернетической моделью реальной системы нормативно-справочной информации, циркулирующей в управляющей системе производства. В ней содержится наиболее массовая информация по трудовым, материальным и стоимостным нормативам, а также справочная информация об элементах производства.

При ручном методе управления все эти данные содержатся в документах, не приспособленных к обработке на ЭВМ. Поэтому при переходе предприятия на АСУ необходимо организовать процесс преобразования документации в определенные машинные документы, а в процессе подготовки производства создавать их в виде, удобном для использования в ЭВМ. Для этого схему технологической подготовки производства и порядок прохождения технической документации целесообразно несколько изменить.

Полученная техническая документация на новое изделие сначала поступает в СКБ для проработки. Вручную составляется ведомость заказа, в которой указывается шифр детали, шифр узла, куда она входит, наименование, количество деталей на заказ, материал детали, вид покрытия и термообработки, принадлежность детали и ее чистый вес, т. е. указывается информация, имеющаяся в чертежах. Такая ведомость поступает на ИВЦ.

На ИВЦ, используя поступившую ведомость заказа, шифр узла, шифр детали, ее наименование и количество на заказ записывают в память машины, а остальную информацию — на заведенную для каждой детали перфокарту. ИВЦ печатает ведомость заказа и передает ее в ОГТ. В бюро расцеховок в ведомости проставляется расцеховка и потребный инструмент.

С помощью перфокарт ИВЦ отдельными списками печатает перечень литых деталей, механической обработки, пластмассовых деталей, деталей из листа, деталей с различными видами покрытий, подвергающихся термообработке. Эти списки передаются в ОГТ и ОППП. В ОГТ они попадают в соответствующие бюро, где на их основе разрабатываются технологические процессы. В нормативном бюро рассчитываются площади деталей, подвергающихся покрытиям. Технологические процессы затем нормируются, размножаются и передаются в цех, а необходимые для ИВЦ данные проставляются на этих же списках и передаются на ИВЦ.

Схема прохождения технической документации в процессе подготовки производства в условиях АСУП представлена на рис. 2. Эта схема значительно упрощена и в ней не все работы указаны.

Даже в условиях АСУП схема подготовки производства в значительной степени зависит от структуры служб подготовки производства, структуры управления предприятием и порядка прохождения технической документации при освоении новой техники.

Однако принципы подхода к решению указаний задачи имеют определенную направленность.

Во-первых, необходимо стремиться как можно больше работ по подготовке производства выполнять с помощью ЭВМ, во-вторых, на ИВЦ должна поступить вся необходимая информационно-справочная документация, необходимая для функционирования всех подсистем АСУП.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рекомендации по организационно-технической подготовке предприятия к внедрению автоматизированных систем управления. М., 1970.
2. НИИНФОРМТЯЖМАШ. Применение математических методов в ЭВМ в технической подготовке производства. М., 1969.

МЕТОДОЛОГИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ХОЛОДНОЙ ШТАМПОВКИ

Н. С. Макурин

Харьков

Наиболее важным и сложным вопросом при автоматизации проектирования технологических процессов на базе использования ЭЦВМ является методическая сторона рассматриваемой проблемы. Отсутствие единой методики создает определенные трудности при решении этой проблемы и делает ее многовариантной.

В данной статье рассматривается методика автоматизации технологического проектирования (АТП) процессов холодной штамповки в условиях приборостроения. Целью АТП является машинная (с использованием ЭЦВМ) разработка и написание технологических процессов, содержание которых составляет последовательный перечень выполнения технологических операций над деталью с одновременной их оптимизацией от процесса получения заготовки до готовой детали [1, 2]:

рациональный (оптимальный) выбор заготовки при условии использования оптимального раскроя материала с учетом имеющихся на заводе возможных способов изготовления заготовок;

рациональный выбор соответствующего оборудования для каждой технологической операции:

выбор технологического оснащения в соответствии с техническими требованиями и возможностями выполнения отдельных технологических операций;

выбор методов контроля и измерительного инструмента;

определение норм времени на выполнение каждой технологической операции с учетом подготовительно-заключительного времени;

определение расценки на каждую технологическую операцию;

выдача на печать карты технологического процесса.

Выбор конкретных целей и первоочередных задач, которые должны решаться в процессе разработки системы АТП и ее алгоритмов,— важная часть работы по обеспечению эффективности автоматизации технологического проектирования в условиях многосвязной деятельности предприятия. Следует отметить, что математическое моделирование умственного труда технолога и программирование составленной модели довольно трудоемко, оно (с учетом последующего расширения области применения алгоритмов) должно рассчитываться на длительное время. При этом не исключаются и такие случаи, когда высокие темпы технического прогресса и смена номенклатуры изготавливаемых деталей будут служить причинами морального старения разрабатываемых алгоритмов и программ, их непригодности к реализации еще до того, как они будут подготовлены к использованию. Поэтому неотъемлемой частью методов разработки алгоритмов для АТП является анализ конкретного предприятия, классификация всех элементов алгоритма на разных уровнях его разработки с выделением групп, составленных на основе различия их значимости и вероятности использования при реализации АТП. Значимость элементов относительно одного или нескольких наиболее существенных критериев оптимальности устанавливаются исходя из конкретных условий предприятия. К наиболее значимым можно отнести элементы таких этапов технологического проектирования, для выполнения которых технолог пользуется обычными методами, затрачивая большее время, или использует упрощенные методы проектирования, что ведет к увеличению себестоимости изготовления продукции.

Всю работу по АТП можно разделить на два этапа: подготовительный и рабочий.

Содержание и сущность первого этапа АТП

Весь комплекс работ по первому этапу сводится к выполнению следующих подэтапов:

1) отбираются комплекты чертежей для анализа и классификации деталей;

2) на основе этого анализа выделяются классы и группы деталей, определяются группы для разработки алгоритмов;

3) составляются характеристики деталей, для которых будут разрабатываться алгоритмы;

4) разрабатывается классифицирующая система холодноштампованных деталей;

5) составляется структурная схема технологического классификатора холодноштампованных деталей;

6) составляется структурная схема технологии изготовления деталей по классам;

7) обуславливается содержание и форма результатов, которые должны получаться после реализации автоматизации проектирования технологических процессов;

8) составляются основы инструкции по кодированию исходной информации;

9) разрабатывается таблица кодированных сведений (ТКС) и составляется инструкция по ее заполнению;

10) разрабатывается методика технико-экономических расчетов (ТЭР) по оптимизации технологического проектирования.

Рассмотрим подробнее сущность каждого подэтапа.

Задача первого подэтапа — отбор наиболее стабильных и перспективных групп деталей, изготавливаемых на предприятии. При этом используются методы математической статистики. В качестве основной совокупности рассматриваются все детали, которые будут изготавливаться на данном предприятии в обозримый промежуток времени (не более 3—5 лет). Для определения вероятности изготовления отдельных типов деталей из одной совокупности делается повторная или бесповторная выборка отдельных объектов производства. Количество чертежей должно быть таким, чтобы можно было сделать выводы о вероятности появления тех или иных типов деталей в процессе производства.

На втором подэтапе анализируется номенклатура деталей: а) из подобранных комплектов чертежей отбираются только детали, характерные для данной отрасли; б) отобранные чертежи распределяются по классам и группам в соответствии с определенными конструктивно-технологическими признаками; в) определяется примерный объем классов деталей холодной штамповки; г) по каждому классу деталей определяется средняя трудоемкость разработки технологического процесса, время для

составления технологических карт и другие данные, по которым можно учесть эффективность АТП.

Третий подэтап. Детали анализируются по соответствующим уровням классификации согласно методике классификации холодноштампованных деталей [3]. Определяются признаки по входу, взаимосвязи между уровнями классификации и т. д. для последующей разработки технологических алгоритмов.

На четвертом подэтапе разрабатывается классифицирующая система холодноштампованных деталей [3]. В основе построения классифицирующей системы: универсальность и гибкость системы, позволяющие расширить систему без существенных изменений ее структуры; полнота, обеспечивающая возможность охвата максимума деталей холодноштамповочного производства; информация, содержащаяся в системе допустимо краткая и легко поддается кодированию; классифицирующая система отвечает всем требованиям, обусловленным ее работой в системе АТП; строгое разделение классов; четкое выделение признаков, характеризующих деталь по уровням классификации; четкое определение «признаков по входу» для каждого класса деталей, позволяющих ЭЦВМ однозначно классифицировать деталь; блочное построение структуры, упрощающее схему и обеспечивающее ее наглядность.

Классифицирующая система сформирована в виде списочной структуры с цепным способом организации списков. Она состоит из подсистемы выделения классов; подсистемы выделения признаков внутри классов и подсистемы формирования технологических процессов изготовления деталей.

На пятом подэтапе согласно методике классификации деталей холодной штамповки [3] составляется структурная схема технологического классификатора и его описание.

На шестом подэтапе разрабатывается схема технологии изготовления деталей по классам, которая является важным связующим звеном в цепи работ по АТП. Она характеризуется наглядностью и показывает, на каком этапе разработки технологического процесса и какая вводится информация, какие ограничения, технико-экономические расчеты и другие данные, необходимые для формирования технологических процессов.

Седьмой подэтап работ по АТП заключается в четком обуславливании результатов, которые должны получаться при выдаче с ЭЦВМ спроектированной технологической документации. Порядок выполнения этой работы следующий: анализируются и отбираются применяемые на заводе технологические документы для заполнения их с помощью ЭЦВМ; корректируется форма отображенных документов применительно к задачам АТП для принятых классов деталей; составляется полный перечень отдельных слов и их комбинаций для последующего использования при алгоритмическом заполнении технологических докумен-

тов; составляются формы технологических документов, которые должны получаться с помощью АЦПУ ЭЦВМ.

На восьмом подэтапе разрабатывается система кодирования исходной информации. Она должна быть простой и удобной не только для осуществления процесса кодирования, но и для разработки алгоритмов, когда карта кодирования рассматривается в качестве таблицы с исходной информацией, необходимой для выполнения алгоритмических расчетов. Это достигается за счет уменьшения размеров кодировочной таблицы и сокращения количества и разнообразия вносимых чисел и кодов.

Задача девятого подэтапа — разработка таблицы кодированных сведений (ТКС), которая представляет собой перечень реквизитов и геометрической информации, выраженной в цифрах и кодах, необходимой для формирования технологического процесса. При этом объем таблицы должен быть минимальным, но достаточным для функционирования системы.

В задачу десятого подэтапа входит разработка методики технико-экономических расчетов по оптимизации технологического проектирования, определяются критерии оптимизации. Этот подэтап очень важен, он является заключительным и характеризует в целом весь подготовительный этап с качественной стороны.

Содержание и сущность второго этапа АТП

Второй этап (рабочий) включает: разработку технологических алгоритмов; составление рабочих программ АТП; автоматический счет на ЭЦВМ; контроль выходной информации.

В задачу второго этапа АТП входит выявление и формулировка закономерностей процесса составления технологии. Суть этой работы сводится к формализации правил и методов проектирования технологических процессов. На этом же этапе разрабатываются алгоритмы и рабочие программы, осуществляется их отладка и реализация на ЭЦВМ.

Вся работа по АТП с учетом обоих этапов заключается в следующем:

- а) выбор цели и задач автоматизации;
- б) выявление общих закономерностей, действующих в рамках поставленной задачи;
- в) выбор системы кодирования и метода описания алгоритмов;
- г) разработка технологических алгоритмов;
- д) составление и отладка программ;
- е) внедрение результатов разработок в конкретных условиях производства.

Из схемы комплекса проводимых работ по АТП (рисунок) видно, что подготовительный этап более трудоемок и продолжителен. Однако для конкретного предприятия он выполняется

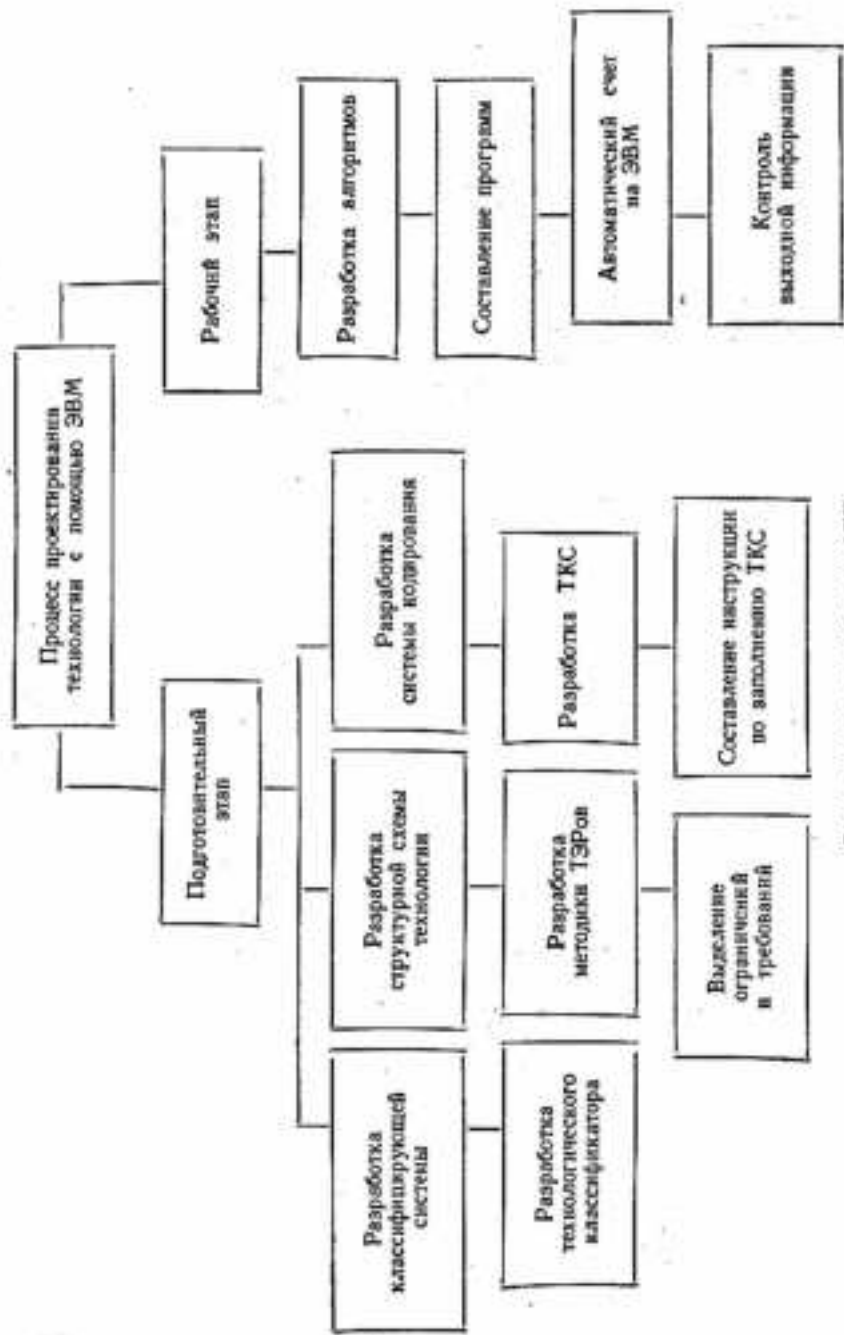


Схема комплекса работ по АТП.

один раз, после этого система может функционировать без существенных затрат на подготовку необходимой информации при освоении новых изделий.

После окончательных работ по первому и второму этапам для работы системы АТП достаточно ввести информацию с рабочего чертежа детали, чтобы система могла выдать на печать разработанный технологический процесс.

Основные положения предлагаемой методики практически могут быть использованы при разработке подобных систем, предназначенных для решения технологических задач в других отраслях промышленности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Автоматизация технологического проектирования при помощи ЭВМ. Изд-во «Машиностроение», 1966.
2. П. Д. Дудко, Н. С. Макурин, М. И. Варсак. Вопросы автоматизации проектирования технологических процессов холодной штамповки. ХЦТИ, 1970.
3. П. Д. Дудко, Н. С. Макурин, М. И. Варсак. Классифицирующая система деталей холодной штамповки при автоматизации технологического проектирования. ХЦТИ, 1970.

СИСТЕМА АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ (АТП) И ЕЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ

Н. С. Макурин
Харьков

Стремление к широкому использованию электронной вычислительной техники в практике проектирования технологии и технико-экономических расчетов предполагает специальную предварительную подготовку всей информационной системы, учитывающей характер и особенности функционирования системы АТП.

Цель создания системы АТП в условиях приборостроения — внесение элементов автоматизации с помощью ЭЦВМ в разработку и написание с учетом технического нормирования технологических процессов изготовления холодноштампованных деталей, в подготовку всех необходимых данных для вычисления себестоимости изготовления деталей и т. д.

Основой информационной совокупности в системе АТП является состав и содержание информации по технологии, техническому нормированию, технологической оснастке, материалам и оборудованию с учетом определенных требований и ограничений. Эти требования можно сформулировать следующим образом:

1) в технологическом процессе должны быть учтены современные достижения науки и практики в области технологического проектирования деталей холодной штамповки;

2) разработанный технологический процесс должен удовлетворять конкретным условиям цеха, производящим детали;

3) содержание технологического процесса должно быть таким, чтобы обеспечить простейшую алгоритмизацию процесса технологического проектирования с учетом его оптимальности;

4) информация для формирования технологического процесса должна иметь минимальную избыточность и обеспечивать достаточную достоверность.

5) библиотека информационных массивов должна содержать такое количество информации, которое укладывалось бы в оперативную память ЭЦВМ;

6) расчет параметров технологических процессов желательно осуществлять по единым унифицированным формулам и зависимостям, что также упрощает алгоритмизацию расчетов в системе АТП.

Все технико-экономические расчеты характеризуются обилием используемой информации, это относится и к проектированию технологических карт и к нормированию. Поэтому прежде всего возникают особые требования к оптимальному формированию информационного массива по минимуму времени обращения. Вся исходная информация должна быть упорядочена таким образом, чтобы обеспечить быстрый поиск необходимой информации. Для этого массив исходной информации $X_0, X_1, X_2, X_3, X_4, X_5 \in M$ разбивается на

X_0 — подмножество, элементами которого являются номера стандартных подпрограмм;

X_1 — подмножество справочных значений по применяемым для изготовления деталей материалам, на основании которых определяется стоимость израсходованного материала, номера карты и чертежа, индекс изделия, код детали, размер партии деталей, код материала, ГОСТы, технические характеристики применяемых листов;

X_2 — подмножество кодов технологической оснастки, оборудования и их характеристики;

X_3 — подмножество, содержащее перечень технологических операций и переходов;

X_4 — подмножество, содержащее разряды работ и расценки;

X_5 — подмножество констант.

Выходная информация Y состоит из

Y_0 — подмножества, основным содержанием которого является марка обрабатываемого материала, ГОСТ, технологическая характеристика;

Y_1 — подмножество словесного и цифрового содержания технологического процесса: номер цеха, шифр и модель оборудования и технологической оснастки;

Y_2 — подмножества нормативных данных: разряд работы, нормы времени, расценки на единицу изделия, справки для отдела технического контроля;

Y_3 — подмножества словесного и цифрового содержания постоянной части (шапки) технологических карт.

$$Y_0 Y_1 Y_2 Y_3 \in M.$$

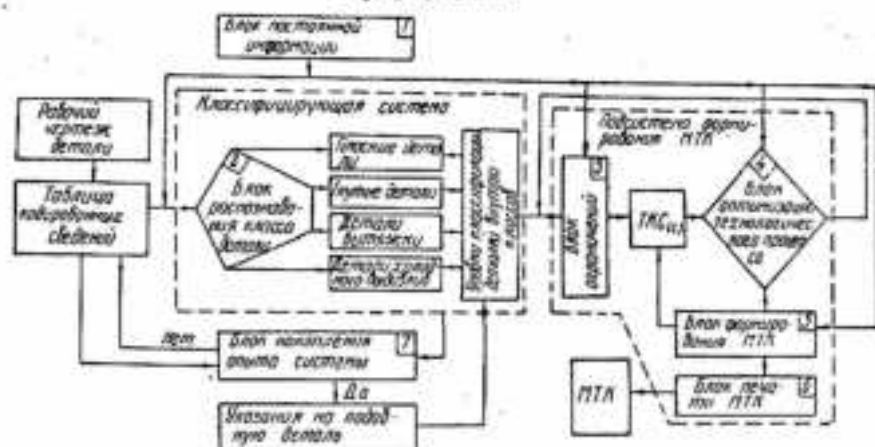


Рис. 1. Структурная схема системы АТП.

Для удобства восприятия полученных данных после проведенных расчетов и формирования технологического процесса они выводятся на широкую печать в виде карт технологического процесса с буквенной и цифровой информацией. В технологической карте приводится краткое содержание каждой операции, а также весь соответствующий ей цифровой материал.

Основным методом АТП в настоящее время является создание информационно-логических систем, алгоритмы работы которых моделируют труд технолога на основе сложившегося технологического опыта. Возможности ЭЦВМ позволяют в широком масштабе решать вопросы оптимизации технологических процессов благодаря применению современных математических методов и современных достижений технологии. Очевидно, что практический интерес представляют именно оптимизируемые системы АТП, позволяющие значительно сократить время проектирования и получить оптимальные технологические карты процессов.

На рис. 1 представлена структурная схема оптимизируемой системы АТП процессов холодной штамповки в приборостроении. Технологический алгоритм проектирования, который реализует система, составлен по методу последовательного многоступенчатого синтеза технологического процесса [1] и содержит множество частных алгоритмов, позволяющих решать более простые технологические задачи.

Рассмотрим подробно работу системы по общему алгоритму проектирования и дадим краткую характеристику ее основных функциональных звеньев. Первичным носителем входной информации служит рабочий чертеж детали. Его данные кодируются и переносятся в таблицу кодированных сведений (ТКС) о детали [2]. ТКС вводится в ЭЦВМ с помощью перфоленты. После ввода ТКС некоторые сведения из нее передаются в классифицирующую систему. Так, например, в ячейки третьего и четвертого уровней классифицирующей системы вносятся данные о количестве элементов наружного и внутреннего контура соответственно. Собственно проектирование начинается с работы блока ограничений. Здесь учитываются все ограничения технологического характера и предварительно решается вопрос о степени совмещенности операций штамповки. Вначале проверяется, есть ли ограничения на применение совмещенного штампа (близость отверстий, диаметры отверстий и т. п.). При наличии ограничений эти элементы исключаются из входной информации ТКС и записываются в отдельные операционные таблицы — ТКС₁. Если ограничений нет, то вопрос совмещенности операций окончательно решается с помощью технико-экономических расчетов (ТЭР-ов) — блок оптимизации. Блок оптимизации имеет обратную связь с блоком ограничений для формирования всех операционных таблиц процесса, необходимых для выбора пресса, штампа инструмента, формулировки технологических операций и переходов.

Формирование всех реквизитов маршрутно-технологической карты (МТК) производится в блоке 5. Блоком 6 осуществляется печать МТК по установленной форме. Маршрутно-технологическая карта, разрабатываемая с помощью данной системы, имеет некоторую особенность: для цеха холодной штамповки она печатается в виде операционной карты, а для остальных цехов (термообработки, лакокрасочных покрытий и т. п.) — в виде маршрутной. Такое упрощение сделано с целью облегчения разработки алгоритмов и программы.

Особый интерес представляет блок 7 (блок накопления опыта системы), служащий своеобразным справочником. Первоначально его назначение состоит в том, чтобы дать ответ на вопрос: проходила ли данная деталь в производстве и в каком месте архива находится соответствующая ей техдокументация. По мере развития и совершенствования системы задачи блока будут усложняться. Предполагается получать ответы и на такие вопросы: какой из ранее освоенных деталей подобна исходная? в какой степени? Иными словами, возможен такой вариант: ранее был спроектирован технологический процесс на пластину размером $A \times B \times \Delta$ с тремя отверстиями диаметром d_1, d_2, d_3 ; затем поступила новая деталь — пластина размером $A \times B \times \Delta$, но с одним квадратным отверстием. Необходимо на эту деталь

спроектировать технологический процесс. Блок опыта системы должен выдать ответ, что деталь эта подобна имеющейся в памяти ЭЦВМ ранее спроектированной детали, и скорректировать технологический процесс на данную деталь.

Описанная система АТП сформирована применительно к ЭЦВМ, снабженных АЦПУ. Блок-схема алгоритма формирования системы представлена на рис. 2. Работа алгоритма начинается с ввода алгоритмов эксплуатации и постоянной информации. Последняя, как правило, сведена в таблицы или формализована с помощью математических и логических зависимостей и записана на магнитную ленту. При этом в оперативной памяти машины формируется массив, позволяющий оперативно вызывать таблицы или формулы из НМЛ. После организации хранения постоянной информации алгоритм переходит к формированию классифицирующей системы и МТК.

Разработанная система АТП предназначена для решения технологических задач в общей системе автоматизации технологической подготовки производства, в частности, автоматизация процесса разработки и написания технологических процессов холоднштампованных деталей в приборостроении. Данная система с небольшими коррективами может быть применена и в других отраслях промышленности.

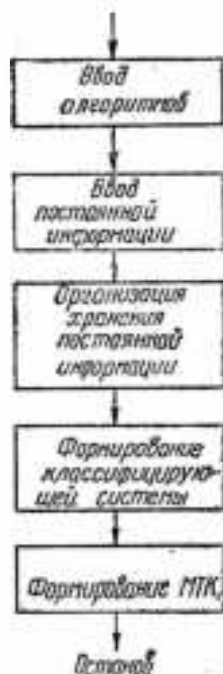


Рис. 2. Блок-схема алгоритма формирования системы АТП.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Д. Цветков. Принципы автоматизации проектирования оптимальных технологических процессов в машиностроении. «Машиностроение», 1965, № 6.
2. П. Д. Дудко, Н. С. Макурия, М. И. Варсак. Вопросы автоматизации проектирования технологических процессов холодной штамповки. ХИТИ, 1970.
3. В. А. Трахтенброт. Алгоритмы и машинное решение задач. Физматгиз, 1960.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВХОДНОГО СИГНАЛА И СИНТЕЗ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ХИМИЧЕСКИМ СОСТАВОМ СЫРЬЕВОЙ СМЕСИ НА ЦЕМЕНТНОМ ЗАВОДЕ

В. Б. Шифрин, Н. Г. Бизюк
Харьков

Применение современной вычислительной техники, в частности управляющих вычислительных машин (УВМ) в системе оперативного управления предприятием, позволяет перейти к автоматизации производства в целом.

Поскольку большинство сигналов, с которыми в этом случае приходится сталкиваться, носит стохастический характер, особую роль играют системы управления, оптимальные в смысле того или иного статистического критерия.

Для управления процессами приготовления сырьевых смесей на цементных заводах используется информация о химическом составе сырьевого шлама, который может колебаться в значительных пределах. Источниками этих колебаний являются неточности и ошибки в дозировке мела (известняка) и глины, нестабильность химического состава исходных материалов. Ошибки в дозировке, в свою очередь, вызываются многими причинами: неполной загрузкой бункера, изменением гранулометрического состава, нестабильностью влажности и др.

Поступление шлама на завод производится порциями, зависящими от наличия мела и глины в достаточных количествах и от состояния и количества работающего оборудования.

Экспериментальная проверка входного сигнала была выполнена с целью проверки, во-первых, гипотезы нормального распределения химического состава сырьевого шлама и определения его параметров: математического ожидания, дисперсии и корреляционной функции; во-вторых, соответствия распределения моментов времени поступления шлама распределению Пуассона. Было действительно выяснено, что химические составы порций шлама подчиняются нормальному закону, причем автокорреляционные функции имеют экспериментальный вид.

Таким образом, входной сигнал представляет собой последовательность импульсов одинаковой длительности τ_n , нормально распределенных по амплитуде, статистически связанных и случайно следующих друг за другом. Для упрощения анализа сигнал $x(t)$ можно представить в виде произведения двух сигналов, как это показано на рис. 1.

$$x(t) = x_1(t) x_2(t).$$

Здесь сигнал $x_1(t)$ принимает значения, сохраняемые постоянными в случайных по длительности промежутках времени,

причем эти значения подчиняются закону распределения исходного сигнала. Сигнал $x_2(t)$ имеет длительность τ_m , может принимать два неслучайных значения $+1$ и 0 и также появляется в случайные моменты времени. Из такого разбиения сигналов следует, что они взаимнонезависимы и, следовательно,

$$m_x = m_{x_1} \cdot m_{x_2},$$

$$R_{xx}(\tau) = R_{x_1 x_1}(\tau) R_{x_2 x_2}(\tau) + m_{x_1}^2 R_{x_1 x_2}(\tau) + m_{x_2}^2 R_{x_2 x_1}(\tau).$$

Значения функции $x_1(t)$ связаны между собой, что характеризуется корреляционной функцией $R_{x_1}(t)$. Вероятность $p(\tau)$ изменения значения функции $x_1(t)$ в любом интервале $t, t + \tau$ зависит только от длительности интервала τ и не зависит от поведения функции вне этого интервала.

События, состоящие в изменении значения функции $x_1(t)$ являются независимыми. Число перемен значения функции $x_1(t)$ на ограниченном временном интервале подчиняется закону Пуассона. Учитывая это, математическое ожидание функции находим по одномерному дифференциальному закону распределения случайных значений этой функции

$$m_{x_1} = \int_{-\infty}^{\infty} x f_{x_1}(x) dx = m_A,$$

где m_A — математическое ожидание, полученное по найденному экспериментально распределению амплитуд.

Корреляционную функцию $R_{x_1 x_1}(\tau)$ найдем по формуле

$$\begin{aligned} R_{x_1 x_1}(\tau) &= m \{ [x_1(t) - m_{x_1}] [x_1(t + \tau) - m_{x_1}] \} = \\ &= \sum_{i=0}^{\infty} p_i m \{ (x_n - m_x) (x_{n+i} - m_x) \}, \end{aligned}$$

где i — разность порядковых номеров промежутков;

n — порядковый номер промежутка, соответствующего величине $x(t)$;

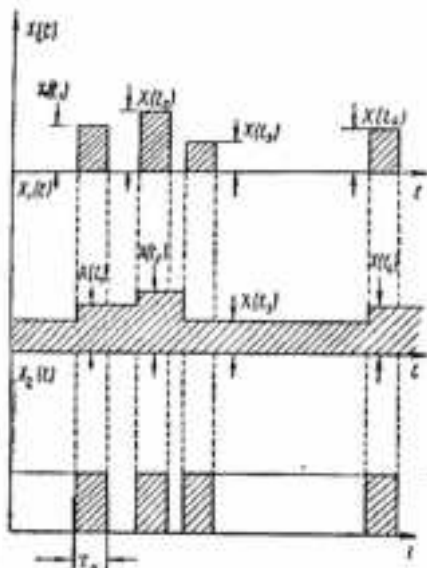


Рис. 1. Изменение химического состава сырьевого шлама при предварительном усреднении.

p_l — вероятность того, что $x(t)$ и $x(t+\tau)$ разделены l промежутками.

$$R_{x_1, x_1}(\tau) = e^{-\frac{\alpha\tau}{2}} \sum_{l=0}^{\infty} \frac{\left(\frac{\alpha\tau}{2}\right)^l}{l!} R_A(l).$$

Сигнал $x_2(t)$ принимает одно из значений $+1$ или 0 , причем вероятность того или иного значения определяется математическим ожиданием числа импульсов, которое равно математическому ожиданию числа перемен значений функции $x_1(t)$ в единицу времени α .

Одномерный дифференциальный закон распределения [2] функции $x_2(t)$

$$f_{x_2}(x) = \alpha\tau_n \delta(x-1) + (1-\alpha\tau_n) \delta(x).$$

Отсюда математическое ожидание функции $x_2(t)$ равно

$$m_{x_2} = \int_{-\infty}^{\infty} x f_{x_2}(x) dx = \alpha\tau_n \int_{-\infty}^{\infty} x \delta(x-1) dx + (1-\alpha\tau_n) \int_{-\infty}^{\infty} x \delta(x) dx = \alpha\tau_n.$$

Двумерный дифференциальный закон распределения случайной функции $x_2(t)$ определяется четырьмя сочетаниями значений этой функции: $+1, +1$; $+1, 0$; $0, +1$; $0, 0$.

Учитывая, что дифференциальный закон распределения соответствует закону Пуассона, после преобразований получаем

$$P_{x_2, x_2}(\tau) = \alpha\tau_n (1-\alpha\tau_n) e^{-2\alpha\tau}$$

при $\tau > \tau_n$, т.е. в случае, когда $x_2(\tau)$ соответствует какому-либо последующему импульсу. В случае $\tau < \tau_n$ оба значения переменной могут попадать на один импульс. Учитывая, что такое событие имеет равномерное распределение на неслучайной длительности импульса, соответствующую корреляционную функцию запишем в виде

$$R_{x_2, x_2}(\tau) = \alpha\tau_n (1-\alpha\tau_n) \left[1 - \frac{\tau}{\tau_n} + \frac{\tau}{\tau_n} e^{-2\alpha\tau} \right].$$

Таким образом, математическое ожидание исследуемого сигнала равно

$$m_x = m_A \alpha\tau_n,$$

а автокорреляционная функция сигнала

$$R_{xx}(\tau) = \left\{ R_A(0) \alpha\tau_n (1-\alpha\tau_n) e^{-\frac{2\alpha\tau}{2} + \frac{\alpha\tau}{2}} e^{-\tau} + m_A^2 \alpha\tau_n (1-\alpha\tau_n) \times \right. \\ \left. \times e^{-2\alpha\tau} \right\} \left[1(\tau - \tau_n) + \left(1 + \frac{\tau}{\tau_n} + \frac{\tau}{\tau_n} e^{-2\alpha\tau} \right) e^{2\alpha\tau} 1(\tau_n - \tau) \right] + \\ + R_A(0) \alpha^2 \tau_n^2 e^{-\frac{\alpha\tau}{2} + \frac{\alpha\tau}{2}} e^{-\tau},$$

где $1(\tau - \tau_n)$ и $1(\tau_n - \tau)$ — единичные функции.

Для $\tau > \tau_n$ (что обычно выполняется в рассмотренных далее системах управления) автокорреляционная функция принимает вид суммы трех экспонент

$$R_{xx}(\tau) = \sum_{k=1}^3 A_k e^{-\lambda_k \tau}.$$

Анализ числовых значений параметров автокорреляционной функции показывает, что, например, для Балаклейского цементного завода с достаточной точностью можно ограничиться одной экспонентой вместо трех.

Рассмотренные методы расчета колебаний химического состава сырьевых шламов основываются на экспериментально определяемых параметрах: среднем m_A , дисперсии σ_A^2 , корреляционной функции $R_A(i)$ или $R_A(\tau)$. Очевидно, что проектирование новой системы управления при модификации уже действующего завода необходимо начинать с определения этих данных, тем более, что они определяются по уже имеющимся заводским контрольным измерениям.

По найденным автокорреляционным функциям возможна техническая реализация систем управления двух простых типов: разомкнутого и замкнутого, а также большого числа сложных: с автоподстройкой, с комбинированным воздействием, с самообучением и др. Два простых типа имеют некоторую аналогию с классическими методами, широко применяемыми на цементных заводах при порционном приготвлении шлама, а именно, метод разомкнутого управления близок с расчетом трех- и четырехкомпонентных сырьевых смесей, а метод замкнутого управления с коррекцией шлама, например, по титру. Однако в этом случае решаются статистические задачи, а на заводах поточного приготвления шлама неизбежна постановка статистических задач динамики.

Расчеты сырьевых смесей для действующих и вновь строящихся цементных заводов, проведенные в институте Южгипроцемент, показали, что задача оптимизации сырьевой смеси может быть решена. Колебания в содержании четырех основных окислов невелики, а их отношение уже обеспечивает смеси с параметрами, близкими к оптимальным.

Функции, связывающие параметры [1] КН, n и p с химическим составом, имеют линейный вид для малых отклонений от средних значений. В этом случае удобно ввести единый параметр $T_r(t)$, также линейно связанный с химическим составом. В частности, это может быть и титр готовой смеси.

Отклонение титра готовой смеси —

$$T_r(t) = T_c(t) + Ay(t),$$

где A зависит от химических составов исходных потоков; $T_c(t)$ — пересчитанное отклонение титра на входе.

Структурная схема объекта, построенная по формулам, показана на рис. 2, а.

Очевидно, что при работе оптимальной разомкнутой системы управления необходимо учесть ошибку измерения химического состава сырьевых шламов $n(t)$ таким образом, чтобы сформированное в звене $W^*(\tau)$ воздействие $y(t)$ возможно точнее компенсировало флуктуации $T_c(t)$.

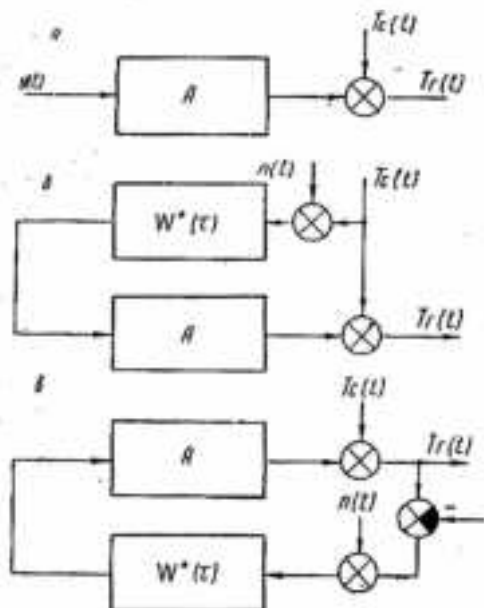


Рис. 2. Структурные схемы систем управления:

а — общая схема, б — разомкнутая система, в — замкнутая система.

необходимо отметить, что расчет в первом случае полностью соответствует задаче, поставленной и решенной Н. Винером [3], так как заключается в нахождении параметров линейного фильтра, имеющего такую импульсную переходную характеристику, что обеспечивается минимум критерия качества [4]

$$e(t) = |Q(t) - q(t)|^2.$$

Здесь $Q(t)$ — желательный, а $q(t)$ — реально существующий выходные сигналы. При выбранных условиях оптимальный фильтр определяется решением интегрального уравнения Винера — Холфа:

$$R_{xQ}(\tau) = \int_0^{\infty} w^*(s) R_{xx}(\tau - s) ds, \quad \tau \geq 0,$$

где $R_{xQ}(\tau)$ — взаимная корреляционная функция входного сигнала и желательного выходного; $w^*(s)$ — оптимальная импульсная

На рис. 2, б показана структурная схема объекта и разомкнутой системы управления. При работе замкнутой системы управления (рис. 2, в) управляющее воздействие формируется в корректирующем звене $W^*(\tau)$, на которое подается сигнал обратной связи и помеха.

Поскольку химический состав с помощью квантометра и титр определяются достаточно часто и быстро — за 10—15 минут — системы управления могут рассчитываться как непрерывные.

Рассматривая расчет оптимальных систем управления по разомкнутому и замкнутому циклам, необ-

переходная функция фильтра; $R_{xx}(\tau - \epsilon)$ — автокорреляционная функция входного сигнала. Поскольку параметры оптимального фильтра зависят от входного сигнала, а значит от режима работы карьерного участка, будут рассмотрены ошибки системы управления в двух случаях: при подстройке оптимального фильтра и без нее. Как показывает сравнение этих ошибок, подстройка параметров оптимального фильтра может не производиться. При этом ошибка поддержания заданной величины химического состава возрастает незначительно.

Для синтеза оптимальной импульсной переходной характеристики $w^*(\tau)$ по уравнению Винера — Хопфа необходимо имеющиеся у нас автокорреляционные функции сигнала и помехи преобразовать. Следуя методике [5] и учитывая данные экспериментальных исследований, введем обозначения:

$R_{QQ}(\tau) = Ae^{-a|\tau|}$ — автокорреляционная функция полезного входного сигнала; $R_{nn}(\tau) = Ne^{-\rho|\tau|}$ — автокорреляционная функция помехи, не коррелированной с полезным сигналом и дисперсией N .

Однако параметр ρ здесь является случайным. Поскольку расчет оптимального фильтра для такой помехи существенно затруднен, было принято следующее упрощение: параметр ρ был принят постоянным и ориентировочно равным $\frac{1}{t_{\text{изм}}}$, где $t_{\text{изм}} \approx 5 \div 6$ мин — минимальное время анализа.

Автокорреляционная функция полного входного сигнала

$$R_{xx}(\tau) = Ae^{-a|\tau|} + Ne^{-\rho|\tau|}.$$

Для рассмотренных сигналов оптимальная система управления, как известно, находится в виде звена с импульсной переходной функцией

$$w^*(\tau) = We^{-a\tau} + M\delta(\tau).$$

Методом неопределенных коэффициентов находим

$$w^* = a\rho \frac{aN + \rho A}{aA + \rho N};$$

$$W = \frac{(w - a)(w - \rho)}{a - \rho};$$

$$M = \frac{w - a}{\rho - a}.$$

Таким образом, оптимальная фильтрация существенно уменьшает влияние помехи $|\epsilon^2 < N|$ в случае, если отсутствует запаздывание при контроле химического состава (например, определяется титр).

Эффективность оптимального управления обеспечивается даже при времени измерения порядка двух часов. Следовательно,

при использовании современных методов анализа оптимальное управление тем более рационально.

В отличие от рассмотренной разомкнутой системы управления замкнутая система, кроме своей основной функции — стабилизации химического состава готового шлама при изменении химического состава сырьевых, позволяет частично компенсировать любые изменения в параметрах сырьевого передела.

Как и при разомкнутой системе управления, в данных химического анализа содержится уже описанная шумовая помеха. Этих данных достаточно для расчета оптимальной замкнутой системы управления по методам, рассмотренным в [6, 7]. Выполняя преобразования с нашими сигналами, получаем, что для нахождения оптимальной импульсной переходной характеристики корректирующего звена необходимо преобразовать структурную схему системы.

Соответствующие преобразования были выполнены и позволили получить оптимальную импульсную переходную функцию звена $w^*(\tau)$, обрабатывающего информацию о химическом составе и управляющего расходом шлама.

$$w^*(t) = Z^{-1}W^*(p) = \frac{1}{D}Z^{-1}W(p) = \\ = \frac{M}{D(1-M)} + \frac{W e^{-(M+\frac{W}{M-1})t}}{D(1-M)^2}$$

Для случая немгновенного определения химического состава шлама в структурную схему системы управления необходимо внести еще одно звено, отражающее свойства объекта, — звено идеального запаздывания.

Соответствующее изображение искомого оптимального корректирующего звена

$$W^*(p) = \frac{1}{D} \frac{M \cdot \frac{W}{p+\infty}}{1 - \left(M + \frac{W}{p+\infty}\right) e^{-p^2 \text{мин}}}$$

Рассмотренная в статье методика позволяет по минимальному количеству данных о карьере (или о работе карьерного участка) получить достаточно полное статистическое описание колебаний химического состава промежуточных шламов и на основе этих данных перейти к синтезу оптимальной системы управления.

Синтез и анализ оптимальных систем показали, что управление приготовлением шламов заданного химического состава может производиться с помощью оптимальных систем управления, рассчитанных на «средний» режим работы сырьевого передела.

ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник по производству цемента. Госстройиздат, 1965.
2. Н. А. Лифшиц, В. Н. Пугачев. Вероятностный анализ систем автоматического управления. Изд-во «Сов. радио», 1963.
3. N. Wiener. Extrapolation Interpolation and Smoothing of Stationary Time Series. The Technology Press of the Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass, 1949.
4. К. У. Мернем. Теория оптимизации и расчет систем управления с обратной связью. Изд-во «Мир», 1967.
5. Д. Х. Лэинг, Р. Г. Беттин. Случайные процессы в задачах автоматического управления. ИЛ, 1958.
6. М. Пелегрен. Статистический расчет следящих систем. ИЛ, 1957.
7. Техническая кибернетика, часть 2. Под ред. В. В. Солодовникова. Изд-во «Машиностроение», 1968.

ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ В АСУ

А. Ф. Панов

Харьков

Передача информации в АСУ имеет ряд существенных особенностей, которые необходимо учитывать при синтезе помехоустойчивых систем связи. Если в общем случае система передачи информации в связи состоит из приемного и передающего устройств, соединенных между собой однородной линией связи (эфир, кабельная линия и т. п.), то современная автоматизированная система управления крупным предприятием или экономическим районом имеет сложную иерархическую структуру [1, 3].

Структура каналов передачи информации в АСУ представляет собой весьма разветвленную сеть линий связи, разнообразных по протяженности, по помехоустойчивости (рядом с некоторыми линиями связи могут находиться мощные электроустановки), по типу линий связи (высоковольтные линии электропередачи, кабельные линии связи, радиолинии, специальные линии и т. д.), по трудности прокладки их на территории предприятия.

По сравнению с информацией в связи информация в АСУ имеет сложный характер по объему, по ценности, по достоверности передачи. Носители информации в АСУ, даже в одном и том же комплексе, имеют разные формы, так как датчики информации, а также получатели информации, могут быть различными по принципам действия (аналоговые, дискретные, частотные, непрерывного действия, разового действия и т. д.).

В связи носитель информации строго одного типа для данной системы (в телефонии — речевые сигналы с определенной полосой частот; в телеграфии — сигналы, отображающие 32 буквы или другое определенное количество знаков; в радиосвязи — тем или иным способом модулированные сигналы).

В АСУ информация, как правило, состоит из адресной и смысловой частей. В общем случае каждая часть образует множество кодовых блоков, причем адресная часть представляет n -мерный вектор, а смысловая часть — двухмерный вектор (в системах управления производственными процессами). В объектах с малым числом параметров смысловая часть также представляет собой кодовый блок, имеющий единицы разрядов, а для объекта с множеством параметров (управляемых или контролируемых), каждый из которых в общем случае может иметь множество значений, — n -мерный вектор. Таким образом, информация в АСУ представляет собой кодовые комбинации, состоящие из нескольких разных по длине кодовых блоков (адрес объекта, параметр объекта, значение параметров и т. д.). Эта «разнотипность» создает определенные затруднения при использовании корректирующих кодов.

До недавнего времени считалось, что избыточное кодирование является эффективным средством борьбы с помехами. Действительно, согласно теореме Шеннона, для канала с шумом, если энтропия источника информации H меньше пропускной способности канала C , то существует такой способ кодирования, что сообщения источника могут быть переданы по каналу с произвольно малой частотой ошибок [2]. Однако применение избыточного кодирования в АСУ не всегда рационально, так как, во-первых, аппаратура сбора, обработки и передачи информации (включая ЭЦВМ), как правило, является типовой и не предусматривает дополнительных мер по борьбе с помехами. Стыковать такую аппаратуру с аппаратурой избыточного кодирования, не переделывая некоторые ее узлы, невозможно. Разработать всю аппаратуру АСУ с самого начала также нерационально из-за экономических соображений. Во-вторых, кодовые блоки телемеханической информации во многих случаях, как было указано, имеют единицы разрядов и очень часто — даже два разряда (информация типа «да» и «нет»). Как показывает статистика [4], ошибки имеют групповой характер; длина пакета ошибок составляет от нескольких сот до нескольких тысяч разрядов. Поэтому, если мы даже применим для передачи телемеханической информации оптимальный код, который корректирует наибольшее число ошибок в пределах длины кодового блока и если длина пакета ошибок будет больше длины кодового блока, то этот код может оказаться неэффективным на фоне помех в виде длинных пакетов. Отсюда следует, что для передачи телемеханической информации применение избыточного кодирования не всегда является лучшим вариантом организации систем связи.

В АСУ крупного предприятия следует считать, что доля внешних помех значительно выше. Действительно, в АСУ крупного предприятия внешние помехи по сравнению с внутренними имеют тенденцию к возрастанию. Это связано с тем, что в систе-

мах связи применяется более совершенная аппаратура, следовательно, вероятность внутренних ошибок уменьшается; во-вторых, растет энерговооруженность предприятий, что потенциально увеличивает вероятность внешних (индустриальных) помех. При автоматизации управления сложными промышленными комплексами, оперирующими многочисленными и многообразными вещественными, энергетическими и информационными потоками, выполнение информационно-логической и вычислительной операций полностью или частично возлагается на ЭЦВМ или другие электронные устройства, которые, как правило, предполагают безошибочную передачу информации. Поэтому достоверность передачи информации в АСУ должна быть значительно выше, чем в связи. Указанные особенности передачи информации в АСУ ставят вопрос об исследовании методов помехоустойчивой передачи информации.

Проанализируем метод борьбы с внешними аддитивными помехами, относительно легко сочетающийся с изложенными особенностями АСУ.

Сущность этого метода сводится к введению в линию связи дополнительной структурной избыточности с единственной целью — тем или иным способом фиксировать на приемном пункте наличие внешней помехи.

На рисунке, а приведена упрощенная блок-схема канала связи. Пусть U_0 — сигнал на выходе передатчика (на входе линии связи); U_1 — сигнал на входе приемника (на выходе линии связи); e_n — аддитивная помеха, наводимая в линии связи. Тогда на входе приемного устройства имеем

$$U_1 = U_0 + e_n. \quad (1)$$

Уравнение (1) имеет два неизвестных U_0 и e_n . Для блок-схемы рисунка, а второго уравнения, дополняющего (1) до полной системы уравнения с двумя неизвестными, не существует.

Введем в систему связи (рисунок, а) структурную избыточность — дополнительную линию связи L_2 с линейными блоками ЛБ на обоих концах таким образом, чтобы линии связи L_1 и L_2 были симметричными по отношению к внешним помехам в том смысле, что любой источник внешних помех наводит в линиях связи L_1 и L_2 идентичную помеху (рисунок, б).

Если связь организована так, что по линии связи L_1 принимается передаваемый сигнал U_1 , а по линии L_2 — помеха e_n (теми же способами, что и сигнал U_1), то в такой системе сигнал и помеха связаны следующими соотношениями:

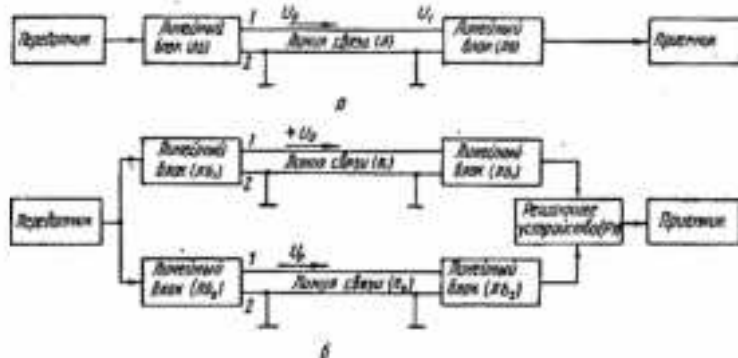
$$\begin{aligned} U_1 &= U_0 + e_n; \\ U_2 &= e_n. \end{aligned} \quad (2)$$

Так как U_1 и U_2 — фиксированные на приемном пункте значения, то соотношения (2) представляют из себя систему урав-

нений с двумя неизвестными U_0 и e_n . Решая ее, можно найти как U_0 , так и e_n .

Отсюда можно сделать вывод, что система связи, организованная по схеме рисунка, б, позволяет выделить передаваемый сигнал при любой внешней аддитивной помехе. Действительно, из (2) имеем

$$U_0 = U_1 - U_2. \quad (3)$$



В идеальном случае, который характеризуется абсолютной симметричностью линий \mathcal{L}_1 и \mathcal{L}_2 по отношению к сигналу U_0 и внешней аддитивной помехе e_n , разность $U_1 - U_2$, как следует из (3), не зависит от e_n . Следовательно, приемник, выполняющий операцию $U_1 - U_2$ и соединенный с передатчиком по схеме рисунка, б, при любой внешней помехе будет выделять только полезный сигнал U_0 .

Ввиду того, что помеха e_n в общем случае является сложным сигналом и имеет широкий спектр частот, а также носит случайный характер, в приемном пункте нецелесообразно принимать отдельно сигнал помехи e_n и производить операцию $U_1 - e_n$. Технически более целесообразно следующее. По линии \mathcal{L}_1 и \mathcal{L}_2 одновременно передаются разнополярные, но одинаковые по амплитуде сигналы (в принципе форма сигналов произвольна). Тогда система уравнений (2) примет вид

$$U_1 = U_0 + e_n; \quad (4)$$

$$U_2 = -U_0 + e_n.$$

Не касаясь вопроса технической реализации, будем считать, что приемное устройство может выполнять операции сложения сигналов $U_1 + U_2$, а также вычитания $U_1 - U_2$. Для приемного устройства со сложением имеем

$$U_1 + U_2 = 2e_n, \quad (5)$$

т. е. в этом случае амплитуда обнаруживаемой помехи возрастает в два раза. Это связано с тем, что в приемном устройстве со сложением происходит сложение амплитуд помехи и вычитание амплитуд сигнала; а в приемном устройстве с вычитанием — наоборот:

$$U_1 - U_2 = 2U_0. \quad (6)$$

т. е. на входе приемного устройства имеем удвоенную амплитуду сигнала.

В системе связи с выполнением операции (5) для выделения полезного сигнала необходимо параллельно с выполнением операции сложения сигналов U_1 и U_2 оперировать одним из слагаемых, например, U_1 . При этом U_1 считается тождественным с переданным сигналом U_0 , если $U_1 + U_2 = 0$, и принятым с ошибкой, если $U_1 + U_2 \neq 0$. Поэтому систему связи с выполнением операции (5) будем называть системой с обнаружением ошибок. В то же время систему с выполнением операции (6) будем называть системой с исправлением ошибок.

Систему с исправлением ошибок можно организовать по двум алгоритмам:

а) с детализацией комбинаций соотношения амплитуд сигналов U_1 и U_2 ;

б) с выполнением операции вычитания в соответствии с (6).

Сущность детализации комбинаций сводится к следующему. Действие внешней помехи выражается одной из последних 10 ситуаций таблицы. Все эти ситуации являются запрещенными, так как в них сумма $U_1 + U_2 \neq 0$. Если на приемное устройство наложить дополнительное требование логической обработки соотношения амплитуд сигналов U_1 и U_2 , то устройство может исправить любую ошибку, вызванную внешней помехой. Эта обработка состоит в следующем (см. таблицу).

I. Если $U_1 < 0$, $U_2 < 0$ или один из них равен 0, то:

а) при $U_1 < U_2$ был передан код «1» (ситуации 3, 4);

б) при $U_1 > U_2$ был передан код «0» (ситуации 7, 8).

II. Если $U_1 > 0$, $U_2 > 0$ или один из них равен 0, то:

а) при $U_1 > U_2$ был передан код «1» (ситуации 5, 6);

б) при $U_1 < U_2$ был передан код «0» (ситуации 9, 10).

III. Если $U_1 = U_2$, то передача отсутствует, в линии действует помеха (ситуации 11, 12).

IV. Если $U_1 = -U_2$, то в линии идет передача при отсутствии помех; при $U_1 > 0$ и $U_2 < 0$ имеет место код «1» (ситуация 1); при $U_1 < 0$, $U_2 > 0$ — код «0» (ситуация 2).

Как показывает анализ, вариант приемного устройства с детализацией комбинаций принимаемых сигналов значительно сложнее, чем вариант выделения полезного сигнала на основе соотношения (6), поэтому рассмотрим его более детально.

Номер ситуаций / Признак ситуаций		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Амплитуда и полярность помехи		$-e_n$	$+e_n$	$-e_n$	$+e_n$	$-e_n$	$+e_n$	$-e_n$	$+e_n$	$-e_n$	$+e_n$	$-e_n$	$+e_n$
Передаваемый разряд кода		1	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
Амплитуда и полярность переданного сигнала		$+U_0$ $-U_0$	$-U_0$ $+U_0$	$-U_0$ $+U_0$	$+U_0$ $+U_0$	$+U_0$ $+U_0$	$+U_0$ $+U_0$	$+U_0$ $+U_0$	$-U_0$ $+U_0$	$-U_0$ $+U_0$	$-U_0$ $+U_0$	$-U_0$ $+U_0$	$-U_0$ $+U_0$
Соотношение амплитуд сигнала и помехи		$e_n = 0$	$e_n > U_0$	$e_n > U_0$	$e_n = U_0$	$e_n > U_0$	$e_n = U_0$	$e_n > U_0$	$e_n = U_0$	$e_n > U_0$	$e_n = U_0$	$e_n > U_0$	$e_n > 0$
Амплитуда и полярность принятого сигнала		$+U_1$ $-U_1$	$-U_1$ $+U_1$	$-U_1$ $+U_1$	0 $+U_1$	0 $+U_1$	0 $+U_1$	0 $+U_1$	$-U_1$ 0	$-U_1$ 0	$+U_1$ 0	$+U_1$ 0	$+U_1$ $-U_1$
Соотношение амплитуд сигналов U_1 и U_2		$U_1 = -U_2$	$U_1 < U_2$	$U_1 < U_2$	$U_1 < U_2$	$U_1 > U_2$	$U_1 > U_2$	$U_1 > U_2$	$U_1 < U_2$	$U_1 < U_2$	$U_1 < U_2$	$U_1 = U_2$	$U_1 = U_2$
Сумма амплитуд сигналов $U_1 + U_2$		0	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Исправленный разряд кода		1	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0

Соотношения (5) и (6) справедливы для идеального случая, когда обе линии связи являются идентичными. На самом деле они не идентичны и имеют некоторый разброс параметров, и поэтому коэффициенты передачи k_1 и k_2 линий связи L_1 и L_2 будут отличны друг от друга:

$$k_2 = k_1 + \Delta k,$$

где Δk — величина, зависящая от асимметрии линий связи.

Тогда соотношения (5) и (6) примут вид

$$U_1 + U_2 = (k_1 + k_2) e_n + \Delta U; \quad (5a)$$

$$U_1 + U_2 = (k_1 + k_2) U_0 + \Delta e_n, \quad (6a)$$

где

$$\begin{aligned} \Delta U &= (k_1 - k_2) U_0; \\ \Delta e_n &= (k_1 - k_2) e_n. \end{aligned} \quad (7)$$

Из соотношений (5a) и (6a) следует, что в системе с обнаружением ошибок необходимо выделить напряжение помехи на фоне сигнала, а в системе связи с исправлением ошибок — напряжение сигнала на фоне помехи. Отметив, что, во-первых, с практической точки зрения система связи с выделением сигнала на фоне помех имеет прямой смысл; во-вторых, обе системы в математическом плане абсолютно эквивалентны, будем рассматривать только систему с выделением сигнала на фоне помех (соотношение (6a)).

Таким образом, на выходе решающего устройства имеем сумму сигнала и помехи:

$$U_{\text{вых}} = (k_1 + k_2) U_0 + \Delta e_n, \quad (8)$$

где полезный сигнал определяется первым слагаемым, а помеха — вторым. Отношение сигнал-помеха ρ на выходе решающего устройства с вычитанием (РУ-) равно отношению первого и второго слагаемых в выражении (8):

$$\rho = \frac{(k_1 + k_2) U_0}{\Delta e_n},$$

или, используя (7), имеем:

$$\rho = \frac{(k_1 + k_2) U_0}{(k_1 - k_2) e_n}. \quad (9)$$

Если $\rho_0 = \frac{U_0}{e_n}$ — отношение сигнал-помеха в обычной двухпроводной линии связи (рисунок), то выигрыш N в отношении сигнал-помеха в системе связи с избыточностью в линии связи равен

$$N = \frac{\rho}{\rho_0} = \frac{k_1 + k_2}{k_1 - k_2}. \quad (10)$$

Из (10) следует, что при абсолютной симметричности линий связи, когда $k_1 = k_2$, выигрыш $N = \infty$.

Выведем соотношение (9), используя собственные параметры проводных линий связи. Пусть линии L_1 и L_2 имеют следующие первичные параметры [5, 6]:

R_1 и R_2 — распределенное сопротивление;
 L_1 и L_2 — распределенная индуктивность;
 C_1 и C_2 — распределенная емкость;
 G_1 и G_2 — распределенная проводимость.

Для определенности предположим:

$$\begin{aligned} R_1 &= R_2 + \Delta R, \quad \Delta R > 0; \\ L_1 &= L_2 + \Delta L, \quad \Delta L > 0; \\ C_1 &= C_2 + \Delta C, \quad \Delta C > 0; \\ G_1 &= G_2 + \Delta G, \quad \Delta G > 0. \end{aligned} \quad (11)$$

Как было отмечено, форма сигналов в принципе может быть произвольной. Для простоты будем считать, что передача ведется синусоидальным сигналом амплитуды U_0 , частоты ω_0 , начальной фазы φ .

Таким образом, в начале линии связи L_1 и L_2 приложены напряжения $U_0 \sin(\omega_0 t + \varphi)$ и $-U_0 \sin(\omega_0 t + \varphi)$; на выходе линий L_1 и L_2 имеем:

$$\begin{aligned} U_1 &= U_{01} \sin(\omega_0 t + \varphi_1); \\ U_2 &= -U_{02} \sin(\omega_0 t + \varphi_2). \end{aligned} \quad (12)$$

Ввиду условий (11)

$$\begin{aligned} \Delta U &= U_{02} - U_{01}, \quad \Delta U > 0; \\ \Delta \varphi &= \varphi_2 - \varphi_1, \quad \Delta \varphi > 0. \end{aligned} \quad (13)$$

Выразим числитель соотношения (9) через параметры сигнала (12). Известно, что линейные комбинации нескольких синусоидальных величин с одной и той же частотой есть синусоидальная величина с той же частотой [7]:

$$U = A_0 \sin(\omega_0 t + \varphi),$$

где

$$\begin{aligned} A_0 &= \sqrt{U_{01}^2 + (U_{01} + \Delta U)^2 + 2U_{01}(U_{01} + \Delta U) \cos \Delta \varphi}; \\ \varphi &= \arctg \frac{U_{01} \sin \varphi_1 + U_{02} \sin \varphi_2}{U_{01} \cos \varphi_1 + U_{02} \cos \varphi_2}. \end{aligned} \quad (14)$$

Нас будет интересовать только амплитуда A_0 , определенная соотношением (14); его можно преобразовать к виду

$$A_0 = U_{01} \sqrt{2(1+a)} \sqrt{\frac{a^2}{2(1+a)} + 1 + \cos \Delta \varphi}, \quad (15)$$

где

$$a = \frac{\Delta U}{U_{01}}. \quad (16)$$

Дальнейшая задача заключается в выражении величины a , $\Delta\varphi$ через собственные параметры линий связи R , L , C , G . Для этого воспользуемся решением телеграфного уравнения [5, 6, 8]. Для случая согласованной нагрузки имеем

$$U = U_0 e^{-\alpha(l+\beta)}, \quad (17)$$

где U_0 и U — напряжение в начале и в конце линии связи соответственно;

l — длина линии связи;

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{RG - \omega_0^2 LC + \sqrt{\omega_0^4 L^2 C^2 + \omega_0^2 L^2 G^2 + \omega_0^2 R^2 C^2}}; \quad (18)$$

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\omega_0^2 LC - RG + \sqrt{\omega_0^4 L^2 C^2 + \omega_0^2 L^2 G^2 + \omega_0^2 R^2 C^2}}. \quad (19)$$

Из (17) — (19) следует, что затухание сигнала зависит от коэффициента затухания α и не зависит от коэффициента фазового сдвига β ; и наоборот, сдвиг по фазе зависит от β и не зависит от α . Поэтому для нахождения зависимости a от параметров линии связи необходимо рассматривать выражение

$$U = U_0 e^{-\alpha l}, \quad (20)$$

а для зависимости $\Delta\varphi$ — выражение

$$U = U_0 e^{-\beta l}. \quad (21)$$

Из соотношений (13), (16), (20) и (21) следует, что

$$\Delta\varphi = \beta_2 l_2 - \beta_1 l_1; \quad (22)$$

$$a = e^{-\alpha_2 l_2 - \alpha_1 l_1} - 1, \quad (23)$$

где l_1 и l_2 , β_1 и β_2 , α_1 и α_2 — длина, коэффициенты фазового сдвига, коэффициенты затухания линий L_1 и L_2 соответственно.

Из (15), (22) и (23) можно вывести:

$$A_0 = U_{01} \sqrt{2(1+a)} \sqrt{\operatorname{ch} \Delta\alpha + \cos \Delta\varphi}. \quad (24)$$

Выражение (24) определяет числитель соотношения (9).

Точно так же для знаменателя соотношения (9) можно вывести:

$$(k_1 + k_2) e_n = e_{n1} \sqrt{2(1+a)} \sqrt{\operatorname{ch} \Delta\alpha - \cos \Delta\varphi}. \quad (25)$$

Из (9), (10), (24) и (25) находим выражение для выигрыша N в отношении сигнал-помеха в системе связи с избыточностью в линии связи:

$$N = \sqrt{\frac{\operatorname{ch} \Delta\alpha + \cos \Delta\varphi}{\operatorname{ch} \Delta\alpha - \cos \Delta\varphi}}. \quad (26)$$

Кратко рассмотрим свойства функции (26). В (26) подкоренное выражение всегда положительно. Действительно, $\operatorname{ch} \Delta\alpha$ изменяется от $-\infty$ до 1 при изменении $\Delta\alpha$ от $-\infty$ до 0 и от 1 до

$+\infty$ при изменении Δx от 0 до $+\infty$ (7). Величина $|\cos \Delta \varphi| < 1$. Следовательно, $|\operatorname{ch} \Delta x| > |\cos \Delta \varphi|$. Поэтому в подкоренном выражении числитель и знаменатель всегда одного и того же знака.

При $\Delta x = 0$ и $\Delta \varphi = 0$ $N = 0$. Отсюда следует, что при абсолютной симметрии линий связи L_1 и L_2 мы имеем бесконечно большой выигрыш в помехоустойчивости.

На интервале значений аргументов $-\infty < \Delta x < +\infty$, $-\infty < \Delta \varphi < +\infty$ значения N определяются интервалом $0 < N < \infty$.

При $-\frac{\pi}{2} < \Delta \varphi < +\frac{\pi}{2}$ значение N независимо от Δx всегда больше 1. Отсюда следует, что при асимметрии линий L_1 и L_2 , не превышающей по $\Delta \varphi \pm \frac{\pi}{2}$ радианов, метод структурной избыточности в линии связи всегда обеспечивает большее значение ρ , чем обычная двухпроводная.

Как видно из (18), (19), (26), N не зависит от амплитуды передаваемого сигнала и сигнала наводимой помехи и зависит только от параметров проводной линии связи и от частоты ω_0 передаваемого сигнала.

Необходимо отметить следующее. Амплитуда помехи на выходе обычной двухпроводной линии согласно соотношению (24) равна

$$e_n = e_{n1} \sqrt{1 + \frac{e_2 - e_1}{e_1}} \sqrt{\operatorname{ch} \Delta x - \cos \Delta \varphi},$$

где e_1 и e_2 — амплитуда помехи в проводах 1 и 2 соответственно.

Из (22) и (23) совершенно очевидно, что при абсолютной симметричности обоих проводов $e_n = 0$. Поэтому на первый взгляд покажется, что метод структурной избыточности в линии связи не имеет никакого преимущества по помехоустойчивости перед обычной двухпроводной.

Следует отметить, что в двухпроводной линии связи для уменьшения помехи необходимо достигнуть максимальной симметричности параметров двух проводов. В исследуемом методе такая симметричность не обязательна. Метод предусматривает две идентичные пары двух необязательно симметричных проводов. Эта задача технически значительно проще в смысле симметрирования линий и имеет выигрыш в отношении сигнал-помеха, определяемый соотношением (26).

ЛИТЕРАТУРА

1. А. И. Кухтенко. Основные направления развития теории управления сложными системами. Сб. «Сложные системы управления», вып. IV. Киев. Изд-во «Наукова думка», 1968.

2. К. Э. Шеннон. Математическая теория связи. «Работы по теории информации и кибернетике». ИЛ, 1963.

3. И. Н. Ентушенко. Телемеханика в автоматизированных системах управления на промышленных предприятиях. Изд-во «Энергия», 1970.

4. Статистика ошибок при передаче цифровой информации. Перев. с англ. Изд-во «Мир», 1966.

5. И. И. Гроднев, Н. Д. Курбатов. Ливейные сооружения связи. Изд-во «Связь», 1968.

6. И. А. Кошечев. Основы теории электрической связи. Изд-во «Связь», 1966.

7. И. Н. Бронштейн, К. А. Семендеев. Справочник по математике. Гостехиздат, 1953.

8. Андре Анго. Математика для электро- и радиопромышленников. Изд-во «Наука», 1966.

ОБ ОДНОМ СПОСОБЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ С МИКРОФИЛЬМА В КОД ДЛЯ ПОСЛЕДУЮЩЕГО ВВОДА В ЭВМ

*В. П. Романов, А. А. Чистюхин, М. А. Кузьмичев,
И. Ф. Огороднейчук, А. В. Шатохин, Э. А. Денисенко, В. В. Сычев*
Харьков, Москва

Один из важных вопросов создания технических средств современных автоматизированных систем обработки данных — разработка устройств автоматического ввода информационных документов в электронно-вычислительные машины (ЭВМ). Содержанием информационных документов является текст, графики и чертежи. При увеличении скорости работы ЭВМ и объема обрабатываемой информации резкое отставание скоростей предварительной обработки и поиска необходимой документации становится все более ощутимым. В ряде случаев, когда требуется длительное хранение большого количества документов с их многократной выборочной обработкой, а также большая скорость ввода информации в ЭВМ, в качестве технического носителя информации используется микрофильм, на котором сфотографированы первичные документы.

В связи с этим в настоящее время возникла необходимость в разработке устройства преобразования изображения микрофильма (фотопленки) в код для последующего ввода в ЭВМ. Это можно осуществить, используя принцип последовательного разложения фотоснимка при помощи фотоэлектрического преобразователя на просвечивающей электронно-лучевой трубке (ЭЛТ) и фотоумножителя (ФЭУ) [1, 2, 3, 6].

Основными требованиями к генераторам развертки, обеспечивающими перемещение развертывающего пятна на экране просвечивающей ЭЛТ, являются возможность программного управления разверткой; высокая разрешающая способность; большое быстродействие и точность установки луча по адресу; возможность сканирования произвольного участка изображения.

Существующие системы с разверткой изображения при помощи генераторов телевизионной развертки не удовлетворяют перечисленным требованиям, поэтому для кодирования изображений авторами был выбран простой способ «космотра» фотоизображения прямоугольным точечным растром ЭЛТ. При этом изображение с микрофильма разбивается на элементы, каждый из которых кодируется «1», если поле микрофильма черное, и «0», если поле микрофильма белое. Этот способ был реализован при помощи электронно-оптического устройства преобразования изображений в электрические сигналы (рис. 1). Устройство состоит из сканирующей системы на ЭЛТ, оптической системы и блока обработки видеосигнала. В состав сканирующей системы входит ЭЛТ с высокой разрешающей способностью и очень коротким послесвечением, фокусирующе-отклоняющий комплекс, усилители отклоняющих токов и специальные схемы, формирующие токи параболической формы, необходимые для коррекции геометрических искажений раstra и динамической фокусировки луча, а также корректирующие схемы для юстировки электронного луча.

При помощи блока управления на экране ЭЛТ формируется растр, который в зависимости от режима работы блока коммутации представляет собой либо дискретный растр — 1024×1024 элемента разложения, либо последовательность полос шириной в 32 элемента и длиной 1024 элемента. Управление сканирующим растром осуществляется при помощи цифровой развертки, состоящей из двух десятиразрядных счетчиков $S_{чх}$, $S_{чy}$, двух десятиразрядных прецизионных преобразователей «код—напряжение» — $ПКН_x$ и $ПКН_y$ и усилителей отклоняющего тока, нагрузкой которых является отклоняющая система ЭЛТ. Световой поток пятна (координаты его задаются блоком управления) проецируется с уменьшением в 1,5 раза при помощи оптической системы на кадр 35-миллиметрового перфорированного микрофильма. Оптическая система состоит из объектива, светоделительной призмы, осуществляющей расщепление светового потока на две части (одна — основной, для просвечивания пленки, другой — вспомогательный, для выравнивания яркости пятна по всему раstrу), и двух конденсоров.

Перемещение луча по сканируемому кадру приводит к модуляции яркости луча на темных и светлых местах фотоизображения, которая воспринимается фотоблоком из двух дифференциально включенных фотоумножителей: измерительного — $\PhiЭУ_{изм}$ и опорного — $\PhiЭУ_{оп}$. Видеосигнал, полученный на выходе $\PhiЭУ_{изм}$, пропорционален плотности изображения в той точке, где находится в данный момент сканирующее световое пятно. Этот видеосигнал усиливается дифференциальным усилителем, на второй вход которого поступает сигнал от $\PhiЭУ_{оп}$, используемый для компенсации неравномерности свечения экрана ЭЛТ и

предохранения люминофора трубки от прогорания при остановке развертки [1].

При совпадении импульса усиленного видеосигнала и импульса опроса порогового каскада срабатывает пороговый каскад и на его выходе формируется потенциал, соответствующий плотности сканируемой точки изображения. При сканировании квантованные на два уровня видеосигналы поступают на вход 32-разрядного регистра сдвига, который используется в качестве оперативной памяти и буферного устройства, предназначенного для формирования 32-разрядной цифровой матрицы, соответствующей плотности сканируемого участка изображения. Особенностью сдвигового регистра является то, что после выдачи кода цифровой матрицы первый разряд регистра устанавливается в положение «1» и выдается сигнал разрешения на запуск счетчиков цифровой развертки от генератора тактовых импульсов.

При дифференциальном включении ФЭУ изменения яркости светового пятна из-за неоднородности люминофора экрана ЭЛТ, нестабильности источников питания, непостоянства параметров носителя незначительно сказываются на выходном сигнале. Кроме того, для стабилизации яркости пятна используется вспомогательный фотоумножитель ФЭУ_{ов}, вырабатывающий напряжение обратной связи, которое после усиления в стабилизаторе яркости подается на управляющий электрод ЭЛТ и компенсирует неравномерность свечения экрана ЭЛТ, обусловленную как свойствами оптической системы при больших углах отклонения луча, так и изменения яркости во времени. При проектировании устройства использовались результаты теоретических и экспериментальных исследований [1—5] по выбору и расчету оптимальных режимов работы отдельных узлов фотозлектрического преобразователя, преобразователей «код — напряжение», выходных каскадов развертки.

Для повышения аппаратной надежности устройства все логические блоки, счетные регистры управления, сдвиговые регистры были выполнены на потенциально-логических элементах «Мир—1», разработанных в Институте кибернетики АН УССР.

Для повышения быстродействия развертки, работающей на индуктивную нагрузку, преобразование цифрового кода в пропорциональный отклоняющий ток ЭЛТ осуществляется в два этапа: сначала цифровые коды координат x , y преобразуются в аналоговые напряжения с последующим преобразованием этих напряжений в ток отклоняющей системы ЭЛТ при помощи линейных широкополосных усилителей постоянного тока с глубокими отрицательными обратными связями по току. Это позволяет обеспечить высокую стабильность их параметров, а также осуществить различного рода коррекции (динамическую фокусировку электронного луча ЭЛТ, устранить астigmatизм электронно-оптической системы). В преобразователях «код — напряже-

ние» ПКН₂ и ПКН₃, источники эталонных напряжений в каждом разряде преобразователей подключаются к декодирующей сетке на прецизионных резисторах двух номиналов $R - 2R$ при помощи двухтранзисторных переключателей, в качестве которых используются транзисторы $p-n-p$ и $n-p-n$ проводимости. Для преобразования выходных напряжений ПКН₂, ПКН₃ в токовые сигналы, необходимые для работы отклоняющей системы ЭЛТ, применяются выходные каскады развертки, состоящие из усилителей отклонения и смещения начала развертки. Усилители отклонения и смещения, выполненные по схеме дифференциального УПТ с эмиттерными повторителями, нагружены на отдельные катушки отклонения и смещения, включенные таким образом, чтобы создаваемые ими магнитные поля были направлены встречно.

Отклоняющие и смещающие катушки отклоняющего комплекса включены в эмиттерные цепи выходных транзисторов, выполненных по схеме составного транзистора, так как такое включение позволяет получить лучшую температурную стабильность и линейность выходной характеристики каскада по сравнению со схемой включения отклоняющей системы в коллекторные цепи. Для уменьшения амплитуды выбросов при переходном процессе отклоняющие катушки зашунтированы резисторами. Экспериментальное исследование переходной характеристики выходного каскада развертки показало, что для используемой в устройстве отклоняющей системы ОС ($L = 400 \text{ мкГн}$, $R = 0,9 \text{ Ом}$, $C_{\text{к}} = 280 \text{ пФ}$) время установления переходного процесса ОС составило 160 мксек . Переходный процесс установления отклоняющего тока зависит от размещения элементов фокусирующе-отклоняющего комплекса, что можно объяснить взаимодействием полей рассеяния отклоняющей системы с магнитопроводом фокусирующей катушки. Точность преобразования цифрового кода в ток отклоняющей системы определяется точностью ПКН, линейностью усилителей отклонения и для описанного преобразователя составляет $0,05\%$ от размера раstra.

Высокая разрешающая способность по всему раstrу обеспечивается применением специального фокусирующе-отклоняющего комплекса, схем корректировки aberrаций электронно-оптической системы, определяющим видом которых являются кривизна поля и астигматизм отклоняющей системы. Для уменьшения aberrационных искажений — кривизны поля в сканирующем устройстве — применяется схема коррекции фокусирующего тока, вырабатывающая корректирующие токи параболической формы катушек динамической подфокусировки

$$I_{\text{двн. } x} = kX^2, \quad I_{\text{двн. } y} = kY^2.$$

Блок-схема устройства коррекции кривизны поля приведена на рис. 2.

Для исправления астигматизма при цифровом отклонении в схеме фокусирующе-отклоняющего комплекса применяются катушки динамической правки астигматизма, корректирующие

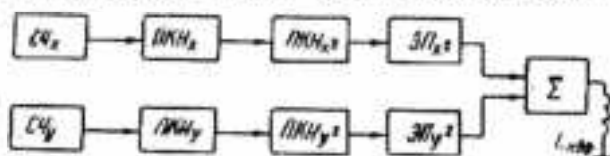


Рис. 2. Блок-схема устройства коррекции кривизны поля:

Cx, Cy — счетные регистры для отклонения пятна по координатным осям x, y ;

$ПКН_x, ПКН_y$ — преобразователи цифрового кода в аналоговое напряжение по координатным осям x, y ;

$ПКН_{x^2}, ПКН_{y^2}$ — преобразователи аналогового напряжения $ПКН_x$ и $ПКН_y$ в напряжения квадратичной формы;

$ВП_x, ВП_y$ — преобразователи напряжения $ПКН_{x^2}$ и $ПКН_{y^2}$ в ток параболы квадратичной формы;

Σ — суммирующее устройство;

$L_{длф}$ — катушка динамической подфокусировки.

токи через которые определяются известными выражениями как функции координат пятна [7]:

$$I_1 = a_0 + a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4y^2;$$

$$I_2 = b_0 + b_1x + b_2y + b_3(x - y)^2 + b_4(x + y)^2,$$

где $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, b_0, b_1, b_2, b_3, b_4$ — коэффициенты астигматизма отклоняющей системы; x, y — координаты отклоненного электронного пятна на экране ЭЛТ.

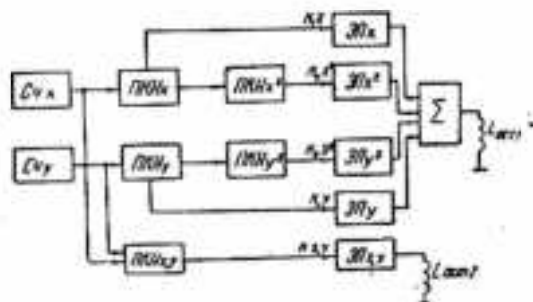


Рис. 3. Блок-схема устройства исправления астигматизма отклоняющей системы.

Блок-схема устройства для исправления астигматизма электронно-оптической системы приведена на рис. 3. В этом устройстве коды координат пятна, задаваемые счетчиками Cx и Cy при помощи преобразователей $ПКН_x, ПКН_y$ и $ПКН_{xy}$ преобразуются

в аналоговые напряжения k_1x , k_2y , k_3xy . Аналоговые напряжения с ПКН_x, ПКН_y являются источниками эталонных напряжений для преобразователей ПКН_x и ПКН_y, кода координат в напряжении параболической формы k_1x^2 , k_2y^2 . В схемах преобразователей декодирующие сетки $R - 2R$ коммутируются к эталонным напряжениям при помощи транзисторных ключей. Аналоговые напряжения с преобразователей преобразуются в точки катушек исправления астигматизма через эмиттерные повторители ЭП_x, ЭП_y, ЭП_{xy}, ЭП_{x'}, ЭП_{y'} и суммирующее устройство Σ .

Основные технические данные устройства:

Число элементов разложения сканирующего раstra:	
в режиме строки	1024 × 1024
в режиме малого раstra — сканирование полосой	32 × 1024
Размер сканирующего раstra, мм ²	36 × 48
Неравномерность яркости по полю раstra, %	— 2
Число уровней квантования	— 2
Частота тактового генератора, кГц	— 200

ВЫВОДЫ

1. В быстродействующих системах преобразования информации с микрофильма в код для последующего ввода в ЭВМ целесообразно использовать программно-управляемую развертку фотоснимка при помощи электронно-оптических сканирующих устройств на ЭЛТ и ФЭУ.

2. Построение сканирующей системы с преобразованием цифрового кода в ток отклоняющей системы ЭЛТ при помощи УПТ с отрицательной обратной связью по току позволяет производить изменение масштаба сканирующего раstra, смещение начала развертки и вводить коррекции кривизны поля и исправление астигматизма электронно-оптической системы.

3. При дифференциальном включении фотоумножителей ФЭУ_{лам} и ФЭУ_{оп} изменения яркости светового пятна из-за неоднородности люминофора экрана ЭЛТ, нестабильности источников питания незначительно сказываются на выходном сигнале фотоэлектрического преобразователя.

4. Устройство считывания информации с микрофильма может быть применено для анализа и кодирования изображений различной природы фотоснимков объектов и диаграмм.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. И. Рыбак, О. Ф. Цурни. Фотоэлектрический преобразователь устройства обработки оптической информации с помощью ЭВМ. «Распознавание образов и конструирование читающих автоматов», вып. 1. Изд-во ИК АН УССР, 1968.
2. А. И. Петренко. Автоматизация ввода графиков в ЭВМ. Изд-во «Энергия», 1968.
3. В. П. Романов. Анализ одной схемы преобразования изображений в электрические сигналы. «Автоматическое чтение текста». Изд-во ВИНТИ АН СССР, 1967.
4. Б. Б. Смолов, Н. А. Смирнов. Полупроводниковые кодирующие и декодирующие преобразователи напряжения. Изд-во «Энергия», 1967.
5. А. М. Тищенко, Б. М. Лебедев и др. Расчет и проектирование импульсных устройств на транзисторах. Изд-во «Сов. радио», 1964.

6. Л. П. Ярославский. Устройства ввода — вывода изображений в ЭВМ. Изд-во «Энергия», 1968.

7. Н. И. Берлин, А. А. Горелов, Б. М. Кац, М. Г. Маркович, Е. К. Овчинников, И. И. Цуккерман. Высокочастотная измерительная телевизионная система. «Техника кино и телевидения», 1970, № 3.

ОБ ОДНОМ СПОСОБЕ УВЕЛИЧЕНИЯ ДОСТОВЕРНОСТИ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ В АСУП

В. В. Свиридов, А. Ф. Панов

Харьков

При проектировании автоматизированных систем управления производством (АСУП) наряду с другими проблемами возникает вопрос о достоверности передачи информации. В принципе можно проектировать системы связи с любой наперед заданной достоверностью передачи [1], однако реальные системы имеют относительно низкую помехозащищенность. Это связано с тем, что у систем с высокой достоверностью передачи сложная аппаратура реализации, и поэтому они не находят практического применения. Практический интерес представляют системы, обеспечивающие достаточно высокую достоверность передачи при относительно простой аппаратурной реализации. Предлагаем одну из таких систем связи.

В дискретных системах связи с временным разделением сигналов несмотря на относительно большую информационную избыточность часто применяется достаточно просто реализуемый позиционный код [2].

$$F(n) = C_n^1,$$

где n — количество разрядов в кодовом блоке; C_n^1 — сочетания символов из n по 1.

Код, определяемый выражением C_n^1 , обычно называют простым распределительным или простым позиционным. Он обнаруживает все ошибки, кроме некоторых двойных. При этом могут возникнуть затруднения, связанные с обеспечением заданной достоверности передачи. Для повышения достоверности передачи позиционным кодом предлагается использовать решающую обратную связь (РОС) совместно с информационной обратной связью (ИОС) с посимвольным сравнением. При этом сохраняется основное преимущество передачи позиционным кодом — простота технической реализации. Такую обратную связь назовем информационно-решающей (ИРОС). В отличие от комбинированной обратной связи (КОС), при которой в зависимости от степени «сомнительности» принятого кодового блока меняются роли приемника и передатчика в определении решения о пра-

вильности принятой приемником информации [3], в ИРОС роли приемника и передатчика постоянны: приемник принимает единственный символ и передает его обратно передатчику; передатчик принимает решение — единственный символ принят приемником правильно или неправильно. В то же время после приема n единичных символов приемник производит проверку правильности принятого кодового блока (прием в «целом» [4]).

Применение такой обратной связи в общем случае обеспечивает несколько меньшую достоверность передачи по сравнению с КОС, но аппаратура ИРОС с применением позиционного кода значительно проще, мало отличается от аппаратуры, в которой используется простой позиционный код.

Рассмотрим вероятность ошибочного приема для ИРОС и сравним ее с вероятностью ошибочного приема для простого позиционного кода с применением РОС.

Нетрудно убедиться, что при действии помех в системе связи с использованием простого позиционного кода ошибочный прием информации имеет место тогда и только тогда, когда будет подавлена информационная единица и появится ложная на любом из $n - 1$ разрядов.

Пусть $P_{дв}$ — вероятность любой двойной ошибки. Если N_1 — число всех возможных двойных ошибок, N_2 — число двойных ошибок, поражающих один определенный разряд, то вероятность P_1 поражения данного конкретного разряда двойной ошибкой, очевидно, равна

$$P_1 = \frac{N_2}{N_1} P_{дв}. \quad (1)$$

Число всех возможных ошибок N_1 равно [5]

$$N_1 = C_n^2 = \frac{n(n-1)}{2}. \quad (2)$$

Как легко убедиться,

	i разрядов	j разрядов	
	000 ... 000	000 ... 000	— передаваемый кодовый блок
	$n = (i + j + 1)$ разрядов		
C_1^1 строк	000 ... 0011	000 ... 000	Возможные двойные ошибки с поражением данного разряда
	000 ... 0101	000 ... 000	
	010 ... 0001	000 ... 000	
	100 ... 0001	000 ... 000	
C_1^1 строк	000 ... 0001	100 ... 000	
	000 ... 0001	010 ... 000	
	000 ... 0001	000 ... 010	
	000 ... 0001	000 ... 001	

число двойных ошибок поражением определенного разряда равно

$$N_2 = C_i^1 + C_j^1,$$

или, учитывая, что $i + j = n - 1$, имеем

$$N_2 = n - 1. \quad (3)$$

Из (1), (2) и (3) находим

$$P_1 = \frac{2}{n} P_{\text{дв}}. \quad (4)$$

Это и есть вероятность ошибки, не обнаруживаемой проверкой на приемном конце системы с ИРОС. Это же выражение определяет вероятность ошибки в простом позиционном коде с применением РОС.

Вероятность ошибки $P_{\text{ед}}$, не обнаруживаемой проверкой с посимвольным сравнением на передающем конце при передаче единичного разряда, согласно теореме о повторении независимых опытов равна [6]

$$P_{\text{ед}} = p_1 p_2, \quad (5)$$

где p_1 и p_2 — вероятности единичного искажения в прямом и обратном каналах соответственно.

В подавляющем большинстве практических случаев

$$p_1 = p_2 = p. \quad (6)$$

При ИРОС ошибочный прием возможен только при одном определенном виде ошибок, поражающих данный разряд. Вероятность этого события P_2 равна:

$$P_2 = \frac{2}{n} P_{\text{ед}}, \quad (7)$$

или с учетом (6)

$$P_2 = \frac{2}{n} p^2. \quad (7a)$$

(Вывод соотношения (7) аналогичен выводу соотношения (4)). Так как проверки на приемном и передающем концах в системе с ИРОС производятся независимо, то вероятность ошибочного приема $P_{\text{ИРОС}}$ при ИРОС равна произведению вероятностей P_1 и P_2

$$P_{\text{ИРОС}} = \frac{4}{n^2} p^2 P_{\text{дв}}. \quad (8)$$

Для случая независимых ошибок вероятность появления двойной ошибки равна [5]:

$$P_{\text{дв}} = C_n^2 p^2 (1 - q)^{n-2}, \quad (9)$$

где C_n^2 — число сочетаний из n по 2;

$q = 1 - p$ — вероятность правильного приема единичного символа.

В случае несовпадения переданного по прямому и принятого по обратному каналам разрядов РУ выдает сигнал сброса, который останавливает всю систему. Таким образом, передатчик осуществляет проверку правильности приема информации по принципу информационной обратной связи с посимвольным сравнением. После принятия всех n разрядов, приемник производит проверку соответствия числа информационных единиц в накопителе H . В случае необходимого соответствия РУ выдает сигнал разрешения на дешифрацию принятой кодовой комбинации и сигнал квитации на передающий пункт; в случае несоответствия — сигнал сброса всей системы.

Вполне очевидно, что в случае стирания одного из разрядов в прямом или обратном каналах, система будет находиться в режиме ожидания, который в принципе может длиться бесконечно длинный промежуток времени. Для этого случая на обоих пунктах предусмотрены счетчики времени СВ, которые в случае затягивания процесса приема — передачи свыше расчетного времени останавливают всю систему связи (блок сброса Сб выдаст импульс сброса).

На рисунке блоки запуска Z осуществляют установление приемно-передающей системы в исходное состояние (набор комбинаций в передатчике, запуск распределителей и счетчиков времени, а также формирование продвигающего импульса для распределителя в приемнике). Коммутатор K осуществляет селекцию информационной единицы и запись ее в накопитель H . Линейные блоки (передающей ЛБ_{прд}, приемный ЛБ_{прм}) в общем случае выполняют функции усиления, согласования и фильтрации. Выходная информация снимается с дешифратора ДШ.

Данная система отличается аппаратурно от системы передачи с использованием простого позиционного кода наличием счетчиков времени на обоих пунктах и решающего устройства на передающем пункте; все это составляет незначительную часть по сравнению со всей аппаратурой. В то же время существенно возрастает помехоустойчивость системы связи.

ЛИТЕРАТУРА

1. К. Шеннон, Связь при наличии шума. «Труды по теории информации и кибернетике». Перев. с англ. под ред. А. Н. Колмогорова. ИЛ, 1963.
2. В. Н. Силаев. Новый тип структуры временной селекции и ее реализация на неуправляемых диодах $p-n-p-n$ структуры. «Техническая кибернетика». Изд-во «Наука», 1965.
3. Э. Л. Влох. Помехоустойчивость систем связи с переспросом. АН СССР, 1963.
4. К. А. Мешковский, Н. Е. Кириллов. Кодирование в технике связи. Изд-во «Связь», 1966.
5. П. А. Котов. Повышение достоверности передачи цифровой информации. Изд-во «Связь», 1966.
6. Е. С. Венцель. Теория вероятностей. Изд-во «Наука», 1969.

О СОКРАЩЕНИИ ВРЕМЕНИ И ПОВЫШЕНИИ ТОЧНОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ ДЕПРЕССИОННЫХ СЪЕМОК

А. Г. Евдокимов

Харьков

Ю. С. Деордица

Ворошиловград

Надежное проветривание шахт, обеспечение безопасности труда горнорабочих, расчеты вентиляции при проектировании новых шахт, реконструкции старых и объединение нескольких шахт в единую систему, вскрытие на шахтах новых глубоких горизонтов требуют четкого и эффективного контроля проветривания и оперативного получения данных, необходимых для расчета вентиляции. В настоящее время наиболее действенным методом контроля проветривания и источником получения реальных аэродинамических характеристик горных выработок и вентиляционных сооружений являются депрессионные и анемометрические съемки. При этом предполагается, что для шахтной вентиляционной сети действительны законы Кирхгофа и она может быть представлена как сильно связанный ориентированный граф, i -й дуге которого поставлены в соответствие аэродинамическое сопротивление r_i , возможно, активный источник и две переменные величины: расход воздуха q_i и потеря напора (депрессия) h_i — связанные между собой соотношением

$$h_i = r_i |q_i| q_i - h_i^{(0)}(q_i) \quad (i = 1, \dots, m). \quad (1)$$

Здесь m — число дуг графа; h_i — напорная характеристика активного источника (вентилятора) i -й ветви, которая с достаточной точностью может быть аппроксимирована полиномом второй степени вида

$$h_i^{(0)} = \phi_{0i} + \psi_{1i} q_i + \psi_{2i} q_i^2. \quad (2)$$

Выражение (1) позволяет определить аэродинамическое сопротивление r_i i -й дуги, если известны q_i , h_i и $h_i^{(0)}$,

$$r_i = \frac{h_i + h_i^{(0)}(q_i)}{|q_i| q_i}. \quad (3)$$

Таким образом, депрессионная съемка заключается в экспериментальном определении составляющих q_i и h_i ($i = 1, \dots, m$) m -мерных векторов \vec{q} и \vec{h} , характеризующих состояние воздухо-распределения, с дальнейшим определением аэродинамических сопротивлений по формуле (3).

Законы Кирхгофа позволяют сократить число замеров в два раза, а именно, достаточно произвести s замеров воздуха и $n-1$

замер депрессии, где n — число вершин графа, а $s = m - n + 1$ — его цикломатическое число. Значения остальных m переменных можно найти по формулам, описывающим первый и второй законы Кирхгофа, например [1],

$$q_i = \sum_{r=1}^s k_{2r,i} q_r \quad (i = s + 1, \dots, m); \quad (4)$$

$$h_r = - \sum_{i=s+1}^m k_{2r,i} h_i \quad (r = 1, \dots, s). \quad (5)$$

Здесь k_2 — цикломатическая матрица для ветвей дерева графа при специальной нумерации (связи занумерованы от 1 до s , а ветви дерева от $s + 1$ до m).

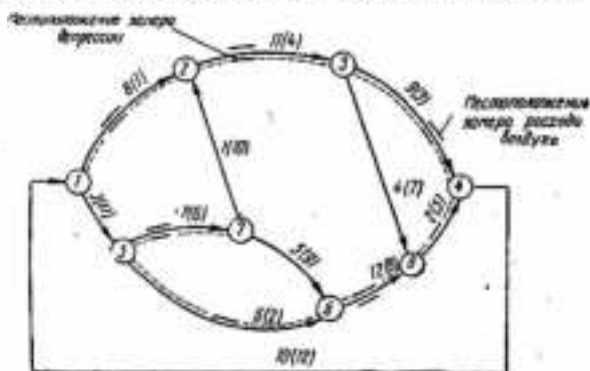
Анемометрические замеры (съемки) являются неравнозначными с точки зрения их точности. Реальное состояние горных выработок на шахтах таково, что в одних выработках затруднительно, а порой невозможно точно измерить скорость воздуха, в других — поперечное сечение выработки. К первой группе выработок нужно отнести такие, по которым скорость воздуха ниже пределов чувствительности измерительных приборов (анемометров, термоанемометров), а также выработки с конвейерной откатки или выработки, в которых находятся другие работающие механизмы. Ко второй группе следует отнести выработки с неправильной формой сечения, а также имеющие пустоты по бокам и кровле, незатянутые и т. д.

Точность замера депрессии во многом определяется выбранным маршрутом, поскольку имеются горные выработки с потерей депрессии в них, соизмеримой с величиной погрешности прибора. Существующая в настоящее время методика депрессионных съемок предполагает проведение замеров расходов воздуха и депрессий в каждой выработке. Половина из этих замеров (s для воздуха и $n - 1$ для депрессии) произвольно принимается за независимые переменные, по которым, на основании законов Кирхгофа, уточняются остальные, не совпадающие, как правило, с замеренными вследствие погрешности измерения. Таким образом, в принятой методике депрессионных съемок количество замеров вдвое больше необходимого, отсутствует выбор замерных станций по критерию точности, что не позволяет произвести полный комплекс измерений с минимальной погрешностью и трудоемкостью.

В статье излагается методика проведения депрессионной и анемометрической съемки, позволяющая значительно повысить точность получаемых параметров горных выработок и вентиляционных сооружений и существенно сократить время, необходимое для производства съемок.

1. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ДЕПРЕССИОННОЙ И АНЕМОМЕТРИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ

1. Исследуются горные выработки с целью определения весовых критериев по замеру воздуха и депрессии. В результате исследования каждой ветви будет поставлено в соответствие два натуральных числа. Значение первого из них характеризует номер ветви в порядке убывания погрешности измерения по воздуху (нумерация ветвей на рисунке), а значение второго — номер ветви в порядке возрастания погрешности измерения по депрессии (нумерация ветвей на рисунке в круглых скобках).



2. Выбирается s независимых по расходу воздуха ветвей с максимальными весами по первому критерию и $(n - 1)$ независимая по депрессии ветвь с минимальным весом по второму критерию.

Математически такая задача формулируется следующим образом. Для ориентированного графа, каждой дуге которого поставлено в соответствие два веса, определить два дерева минимальной длины (по первому и второму весу соответственно). Здесь под деревом минимальной длины [2, 3] подразумевается такое дерево графа, сумма весов ветвей которого минимальна. Выбирая дерево минимальной длины по первому критерию, каждой дуге графа, которая стала связью, присвоим признак замера по воздуху, а выбирая дерево минимальной длины по второму критерию, присвоим признак замера по депрессии для тех дуг графа, которые стали ветвями дерева. В результате получим информацию о местах расположения замерных станций воздуха и о маршруте замера депрессии.

В качестве иллюстрации решения приведенной задачи определим места замерных станций воздуха и маршруты замера депрессии для схемы вентиляционных соединений (рисунок), используя любой из графических методов, реализующих процедуру

поиска дерева минимальной длины по Краскалу [2] или Приму [3].

Согласно [2], определение дерева минимальной длины сводится либо к последовательному выбору ($n - 1$)-го ребра в соответствии с возрастанием их весов и отбрасывании тех из них, которые образуют цикл с ранее выбранными, либо к выбору последовательности ребер в соответствии с убыванием их весов с целью отбрасывания тех z из них, которые не приводят к нарушению связности графа.

Процесс определения дерева минимальной длины [3] основан на следующих принципах:

а) всякая вершина, еще не вошедшая в процессе решения задачи в какое-либо кратчайшее поддерево, соединяется со смежной вершиной кратчайшим ребром;

б) всякое кратчайшее поддерево соединяется с вершиной, смежной вершинам этого поддерева, кратчайшим ребром.

По любому из изложенных методов определяем дерево минимальной длины по первому критерию, а именно, дерево, содержащее дуги $\{1, 2, 3, 4, 5, 6, 10\}$, а затем — дерево минимальной длины по второму критерию, т. е. дерево, образуемое дугами $\{(1), (2), (3), (4), (5), (6), (8)\} = \{8, 6, 9, 11, 2, 7, 12\}$. Следовательно, замерные станции по воздуху необходимо расположить в ветвях $\{7, 8, 9, 11, 12\}$, а маршруты замера депрессии должны пройти по ветвям $\{8, 6, 9, 11, 2, 7, 12\}$ (рисунок).

3. Выполняются полевые работы по производству замера воздуха и депрессии в выработках, определенных в пункте 2.

4. На основании законов Кирхгофа вычисляются значения расходов воздуха и депрессий в остальных выработках и определяются аэродинамические сопротивления по формуле (3).

Предлагаемый выбор точек замера расхода воздуха и депрессии позволяет значительно сократить сроки проведения депрессионных съемок и повысить точность измерений, а процесс вычисления месторасположения этих точек (пункт 2) и обработка полученных результатов (пункт 4) могут быть легко автоматизированы с помощью цифровых вычислительных машин. Рассмотрим ряд алгоритмов, позволяющих наиболее эффективно реализовать процедуру вычислений по пунктам 2 и 4 на цифровых вычислительных машинах.

II. ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕРЕВА МИНИМАЛЬНОЙ ДЛИНЫ

Рассмотрим численный метод поиска дерева минимальной длины, реализующий процедуру Прима, более простой и компактный, чем в [3]. В качестве исходной информации примем множество A ребер (узловых пар), расположенных в порядке

возрастания их весов. Каждое ребро представляет собой подмножество, состоящее из двух элементов: вершин, являющихся его концевыми точками.

Алгоритм 1

Определяются номера узлов, принадлежащих первому, т. е. кратчайшему, ребру, и запоминаются как элементы множества $N_T = N_T^{(1)}$ вершин, принадлежащих первому текущему поддереву. Ребру A_1 присваивается пометка (признак) ветви дерева.

На втором шаге находится кратчайшее ребро, одна вершина которого принадлежит множеству N_T , а вторая — множеству $X \setminus N_T$, где X — множество вершин графа ($N_T \subset X$). Ребру присваивается признак ветви дерева, а множество N_T преобразуется к виду

$$N_T^{(2)} = N_T^{(1)} \cup A_1^{(2)},$$

где l — номер ребра, помеченного признаком ветви дерева на втором шаге.

Затем процесс повторяется на третьем, четвертом и $(l-1)$ -м шаге. В результате $(l-1)$ -го шага множества N_T будет преобразовано в множество X , а ребра, помеченные признаками, образуют дерево минимальной длины.

Вообще процедура поиска очередной ветви кратчайшего поддерева на k -м шаге алгоритма заключается в определении кратчайшего (т. е. первого по порядку) ребра $A_k^{(k)} = [N_T^{(k-1)}, (X \setminus N_T^{(k-1)})]$, присвоении этому ребру признака ветви дерева и преобразовании множества N_T в соответствии с текущим кратчайшим поддеревом

$$N_T^{(k)} = N_T^{(k-1)} \cup A_k^{(k)}. \quad (4)$$

III. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТОРАСПОЛОЖЕНИЯ ТОЧЕК ЗАМЕРА

Исходная информация задается в виде множества A узловых ориентированных пар (дуг ориентированных ребер), расположенных в соответствии с их нумерацией, т. е. в соответствии с возрастанием по первому весу, и m -мерного вектора \bar{X} , номер компоненты которого соответствует номеру дуги, а значение — номеру дуги в круглых скобках (рисунок). Дуга представляет собой подмножество, состоящее из двух элементов: первый — номер начальной вершины дуги, второй — конечной.

Производя вычисления согласно алгоритму 1, выберем дерево минимальной длины по первому весу и присвоим ветвям этого дерева первый признак, равный единице. Очевидно, что измерные станции по воздуху будут расположены в связях, т. е. дугах графа с первым признаком, равным нулю.

Затем расположим множество узловых пар в соответствии с возрастанием по второму весу, т. е. преобразуем множество A в множество $A(\bar{X})$, k -я узловая пара которого соответствует узловой паре множества A с номером, равным номеру компоненты вектора \bar{X} со значением k . Снова следуя алгоритму 1, получим дерево минимальной длины по второму весу и присвоим ветвям этого дерева второй признак, равный единице. Это свидетельствует о том, что маршруты депрессионных съездов должны пройти через дуги, имеющие второй признак, равный единице.

Выводя на печать узловые пары с соответствующими им двумя признаками, определяем месторасположение точек замера (00 — замер по воздуху; 01 — замер по воздуху и депрессии; 10 — замера нет; 11 — замер по депрессии).

IV. О КОМПАКТНЫХ АЛГОРИТМАХ ЧИСЛЕННОЙ РЕАЛИЗАЦИИ ПЕРВОГО И ВТОРОГО ЗАКОНОВ КИРХГОФА

1. Определим значения компонент вектора \bar{q} , соответствующих ветвям дерева, по исходным данным, представленным в виде множества A узловых ориентированных пар, помеченных признаком ветви дерева (1) или связи (0), и компонентам этого же вектора \bar{q} , соответствующим связям.

Алгоритм 2

Решение рассматриваемой задачи распадается на $(n-1)$ шаг. На первом шаге среди узловых пар A , соответствующих ветвям дерева, т. е. помеченных единичным признаком, выбирается дуга (например, i), которая содержит висячую вершину (например, j). Критерием последней является ее принадлежность только одной ветви дерева. Затем среди дуг, соответствующих связям (помеченных нулевым признаком), фиксируются те, которые инцидентны вершине j . Определяется их ориентация по отношению к этой вершине. Признак дуги i изменяется на нулевой, а значения расхода воздуха, соответствующего i -й дуге графа (величина i -й компоненты вектора \bar{q}) определяется по формуле

$$q_i = \sum_{k \in A_j} q_k - \sum_{k \in B_j} q_k \quad (5)$$

где A_j — множество дуг с нулевым признаком, инцидентных вершине j и ориентированных относительно нее в направлении, противоположном направлению ориентации дуги i ; B_j — множество дуг с нулевым признаком, инцидентных вершине j и ориентированных в том же направлении, что и дуга i .

На втором шаге повторяется вычислительная процедура первого при условии, что i -я дуга помечена нулевым признаком

(известно значение составляющей q_i), т. е. число дуг, помеченных единичным признаком (соответствующих текущему дереву), сократилось на единицу. После $(v - 1)$ -го шага такого процесса все дуги графа будут помечены нулевым признаком и будет определено воздухораспределение (вектора \bar{q}), удовлетворяющее первому закону Кирхгофа.

2. Вычислим значения составляющих вектора \bar{h} , соответствующих связям, по исходным данным в виде множества \bar{h} узловых ориентированных пар, помеченных признаком ветви дерева (1) или связи (10), и составляющим этого же вектора \bar{h} , соответствующим ветвям дерева. При этом используем следующее соотношение:

$$h_r = - \sum_{k \in (B_r \setminus r)} \text{sign } k \cdot h_{|k|}. \quad (6)$$

Здесь r — номер дуги, соответствующей связи, т. е. помеченной нулевым признаком; B_r — r -й фундаментальный цикл (подмножество дуг графа, содержащее r -ю связь и ветви дерева, образующие единственную простую цепь, соединяющую начальную и конечную вершины этой дуги), математически представленный как подмножество, элементами которого являются номера дуг графа, принадлежащих r -му циклу, взятые со знаком «+», если направление дуги в цикле совпадает с направлением r -й связи, и со знаком «-» в противном случае. Совокупность s фундаментальных циклов (по числу связей) образует множество фундаментальных циклов B ; $B_r \setminus r$ — подмножество ветвей дерева, принадлежащих r -му фундаментальному циклу с учетом их ориентации в цикле.

Решение задачи сводится к s независимым шагам, на каждом из которых определяется множество $B_r \setminus r$ для очередной r -й дуги графа, помеченной нулевым признаком. Вычисления проводятся по формуле (6).

Алгоритм 3

Рассматривается множество λ узловых пар F_r ($F_r \subset A$), содержащее r -ю связь и все ветви дерева. Определяются и исключаются узловые пары, множества F_r , соответствующие дугам с висячими вершинами (дуги, содержащие вершину, не принадлежащую другим узловым парам множества F_r). Аналогичному анализу подвергается множество $F_r^{(1)}$ ($F_r^{(1)} \subset F_r$) оставшихся узловых пар. Процесс преобразования продолжается до получения множества узловых пар F_r^f , не содержащих ни одной висячей вершины, критерием чего является принадлежность любого оставшегося узла двум узловым парам полученного множества. Множество $F_r^{(j)}$ соответствует фундаментальному циклу,

образованному r -й связью совместно с ветвями дерева, но представленному в виде узловых пар.

Формируется множество $B_r \setminus r$ на основе полученного подмножества узловых пар, соответствующих данному фундаментальному циклу. Первым элементом подмножества B_r будет номер узловой пары из $F_r^{(j)}$ соответствующей ветви дерева и содержащей узел, равный второму узлу связи, взятый со знаком «+», если связь и ветвь дерева одинаково направлены, и «-» в противном случае. Второй элемент — номер дуги, содержащей общий узел с дугой, выбранной на предыдущем шаге, со знаком, равным знаку предыдущей дуги, если дуги одинаково направлены, и с противоположным знаком при встречной ориентации и так далее. Процесс формирования множества $B_r \setminus r$ продолжается до тех пор, пока текущая выбранная дуга, соответствующая ветви дерева, не будет содержать узел, равный начальному узлу связи.

Дуги, принадлежащие множеству $F_r \setminus r$ и исключаемые в процессе формирования множества $B_r \setminus r$, помечаются текущим дополнительным единичным признаком, ликвидируемым по завершении шага. В результате шага по формуле (6) определяется значение r -й составляющей вектора \vec{h} , а r -я связь помечается дополнительным единичным признаком.

V. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ДЕПРЕССИОННОЙ И АНЕМОМЕТРИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ

Исходная информация задается в виде, выданном для определения точек замера и дополнительного массива m чисел, представляющего собой результат измерений и расположенного в определенной последовательности (результаты замера располагаются в соответствии с дугами, в которых эти замеры производились; если дуге соответствует два замера, то первым заносится замер по воздуху).

Алгоритм 4

Массив m чисел преобразуется к массиву, содержащему $2m$, а именно, к вектору \vec{q} , компоненты которого, соответствующие связям, равны измеренным, а остальные 0, и к вектору \vec{h} с нулевыми компонентами для связей, определенными в результате депрессионных съемок для ветвей дерева.

Последовательно, следуя алгоритмам 2 и 3, заполняются нулевые компоненты векторов \vec{q} и \vec{h} и вычисляются значения аэродинамических сопротивлений согласно формуле (3).

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Волков, А. Г. Евдокимов. Математическое описание установившихся процессов воздухораспределения в вентиляционных сетях шахт. «Изв. вузов, Горный журнал», № 2, 1965.
2. Т. В. Кузак. On the shortest Subtree of a Graph and the Travelling Salesman Problem. Proc. Amer. Math. Soc., 7. 1956, 48—50.
3. Р. К. Прим. Кратчайшие связывающие сети и некоторые обобщения. «Кибернетический сборник», № 2, 1961.

ВЫБОР СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ УГОЛ — ВРЕМЕННОЙ ИНТЕРВАЛ — КОД

В. А. Михайлов, В. Е. Тырса
Харьков

В работе [1] описан безлифтовый кодовый теодолит (БКТ) с преобразователем угол — временной интервал — код. В качестве постоянно вращающегося чувствительного элемента в преобразователе используется синхронный электродвигатель, управляемый генератором квантующих импульсов.

Исследования показали, что синхронный двигатель для преобразователя должен удовлетворять следующим требованиям: простота конструкции, малый вес и габариты; возможность питания от однофазной сети переменного тока без дополнительных пусковых устройств; минимум потребляемой энергии питания; минимальная амплитуда качаний ротора для обеспечения требуемой точности преобразования угла во временной интервал; относительно низкая скорость вращения выходного вала при отсутствии механического редуктора и частоте напряжения питания порядка сотен герц.

Повышенные скорости вращения чувствительного элемента требуют повышения частоты следования квантующих импульсов и быстродействия первых каскадов счетчика. Например, при скорости 100 об/сек для обеспечения шага квантования в 10 угловых секунд требуется частота следования квантующих импульсов свыше 10 мГц.

Применение механического редуктора приводит к увеличению погрешности преобразования за счет неточностей выполнения редукторов.

Принципиально в преобразователе угол — временной интервал — код может быть использован синхронный двигатель любой конструкции: с возбужденными полюсами, реактивный или гистерезисный. Двигатели с возбужденными полюсами для преобразователя угол — код непригодны из-за наличия двух источников

питания (переменного и постоянного), скользящих контактов, а также из-за сложности схемы пуска.

В случаях, когда требуемая мощность привода незначительна, как правило, следует использовать синхронные реактивные или гистерезисные двигатели [2, 3].

К однофазным двигателям относятся реактивные синхронные типа колеса Ла-Кура и гистерезисные типа двигателя Уоррена [2]. В последних для получения приемлемой скорости вращения выходного вала обязательно применяется механический редуктор, так как синхронная скорость ротора велика. Колесо Ла-Кура описано в [2]. Двигатели, основанные на принципе колеса Ла-Кура, выпускаются отечественной промышленностью серийно. Например, двигатель ДСМ2-П220 имеет скорость вращения без редуктора 6,25 об/сек при частоте питающего напряжения 50 гц. Потребляемая мощность 4 ва. Двигатель устойчиво работает с маховиком, имеющим радиус инерции около 4 см и вес около 100 г (момент инерции $J = 1,6 \text{ г} \cdot \text{см} \cdot \text{сек}^2$).

Рассмотрим моменты, действующие в двигателе с маховиком в процессе преобразования угла в код. Точно учесть все факторы, влияющие на процесс движения ротора с маховиком, весьма трудно. Поэтому в ходе анализа будет сделан ряд допущений, не имеющих, однако, принципиального значения.

Известно [3], что реактивный момент синхронного реактивного двигателя (СРД) пропорционален мощности, подводимой к обмотке статора,

$$M_p \equiv P. \quad (1)$$

Учитывая, что мгновенное значение мощности, согласно [5], выражается как

$$P_1 = UI [\cos \varphi_1 - \cos (2\omega_1 t - \varphi_1)], \quad (2)$$

уравнение мгновенных значений реактивного момента запишем

$$M_p = kUI [\cos \varphi_1 - \cos (2\omega_1 t - \varphi_1)], \quad (3)$$

где k — коэффициент пропорциональности, учитывающий размерность, скорость вращения к. п. д.;

U, I — действующие значения напряжения и тока;

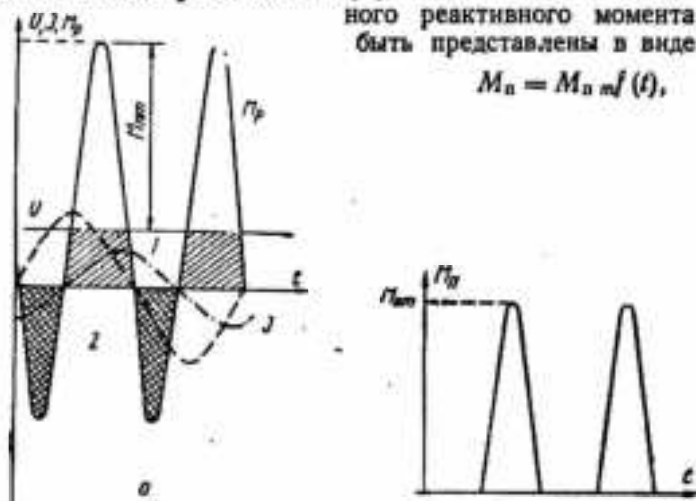
$\cos \varphi_1$ — коэффициент мощности;

ω_1 — круговая частота напряжения питания.

График уравнения (3) представлен на рисунке (а). Из анализа уравнения (3) видно, что при различных значениях угла φ_1 кривая реактивного момента по-разному расположена относительно оси абсцисс. В частном случае, когда $\varphi_1 = 0$, вся кривая расположена выше оси абсцисс. Реально СРД имеет коэффициент мощности $\cos \varphi_1 = 0,2 \div 0,35$. Очевидно, что положительная полуволна (α, I) вращает ротор СРД, а отрицательная (2) тормозит.

Часть положительной полуволны компенсирует тормозящую полуволну. Полезный реактивный момент показан на рисунке (б). При этом, если $\cos \varphi_1 = 0,3$, то максимальное значение полезного реактивного момента $M_{\text{п.м}}$ равно приблизительно амплитуде косинусоиды $kUI \cos 2\omega_1 t$. Согласно [4], мгновенные значения полезного реактивного момента могут быть представлены в виде

$$M_{\text{п}} = M_{\text{п.м}} f(t), \quad (4)$$



где

$$f(t) = \begin{cases} \sin \omega t & \text{при } \frac{2n\pi}{\omega} < t < \frac{(2n+1)\pi}{\omega}, \\ 0 & \text{при } \frac{(2n+1)\pi}{\omega} < t < \frac{(2n+2)\pi}{\omega}, \\ n = 0, 1, 2, \dots; \omega = 2\omega_1 \end{cases}$$

Изображение $f(t)$ по Лапласу имеет вид

$$F(p) = \frac{\omega}{p^2 + \omega^2} \quad (5)$$

Если соединить ротор СРД с маховиком при помощи эластичной муфты, то уравнение движения маховика запишется так:

$$J \frac{d^2\varphi}{dt^2} + B \frac{d\varphi}{dt} + C\varphi = M_{\text{п}} - M_{\text{с}}, \quad (6)$$

где $J = \frac{GD^2}{4g}$ — момент инерции маховика (моментом инерции ротора пренебрегаем);

G — вес маховика;

D_s — диаметр инерции маховика;

φ — угол поворота маховика относительно вала ротора в процессе движения маховика (угол закручивания муфты, в состоянии покоя $\varphi = 0$);

B — вязкое сопротивление трению;

C — жесткость эластичной муфты;

M_{nm} — полезный реактивный момент по уравнению (4);

M_c — момент сопротивления, возникающий в результате трения маховика о воздух, и трения в подшипниках маховика в установившемся режиме.

Уравнение (6) в операторной форме:

$$\varphi J p^2 + \varphi B p + \varphi C = M_{nm} \frac{\omega}{p^2 + \omega^2} \frac{1}{1 - e^{-\frac{\pi}{\omega} p}} - \frac{M_c}{p}. \quad (7)$$

Для отыскания оригинала уравнения (7) выражение $1 - e^{-\frac{\pi}{\omega} p}$ разложим в ряд Тейлора. Ограничиваясь двумя первыми членами разложения, ввиду быстрой сходимости ряда получим

$$1 - e^{-\frac{\pi}{\omega} p} = \frac{\pi}{\omega} p. \quad (8)$$

После подстановки (8) в (7) и соответствующих преобразований

$$\varphi(p) = \frac{M_{nm}}{\pi J} \frac{1}{p^2 + \omega^2} \frac{1}{p \left(p^2 + \frac{B}{J} + \frac{C}{J} \right)} - \frac{M_c}{J} \frac{1}{p^2 + \frac{B}{J} p + \frac{C}{J}}. \quad (9)$$

Оригинал (9), согласно [4], имеет вид

$$\begin{aligned} \varphi(t) = & \frac{M_{nm} - \pi M_c}{\pi C} + \frac{M_{nm}}{\pi J \sqrt{\left(\omega^2 - \frac{C}{J}\right)^2 + \omega^2 \frac{B^2}{J^2}}} \sin\left(\omega t + \right. \\ & \left. + \arctg \frac{C - J\omega^2}{B\omega}\right) + e^{-\frac{B}{2J}t} \left[\frac{M_{nm}}{\omega^2 \sqrt{\left(\frac{C}{J} - \frac{B^2}{4J^2}\right)(F^2 + H^2)}} \times \right. \\ & \times \sin\left(\sqrt{\frac{C}{J} - \frac{B^2}{4J^2}} t + \arctg \frac{H}{F}\right) - \frac{M_c}{C \sqrt{1 - \frac{B}{4JC}}} \times \\ & \left. \times \sin\left(\sqrt{\frac{C}{J} - \frac{B^2}{4J^2}} t + \arctg \sqrt{\frac{4JC}{B^2} - 1}\right) \right], \quad (10) \end{aligned}$$

где

$$F = \frac{3}{2} \frac{BC}{J^2} - \frac{B^3}{2J^2} - \frac{B}{2J} \omega^2;$$

$$H = \sqrt{\frac{C}{J} - \frac{B^2}{4J^2}} \left(\frac{C}{J} - \omega^2 - \frac{B^2}{J^2} \right).$$

Полагая в (10)

$$\frac{M_{nm}}{\pi J \sqrt{\left(\frac{C}{J} - \frac{B^2}{4J^2}\right) (F^2 + H^2)}} = A; \quad \frac{M_c}{C \sqrt{1 - \frac{B^2}{4JC}}} = E,$$

а также

$$\operatorname{arctg} \frac{C - J\omega^2}{B\omega} = \psi_1; \quad \operatorname{arctg} \frac{H}{F} = \psi_2;$$

$$\operatorname{arctg} \sqrt{\frac{4JC}{B^2} - 1} = \psi_3$$

и упростив в соответствии с этим (10), получим

$$\varphi(t) = \frac{M_{nm} - \pi M_c}{\pi C} + \frac{M_{nm}}{\pi J \sqrt{\left(\omega^2 - \frac{C}{J}\right)^2 + \omega^2 \frac{B^2}{J^2}}} \sin(\omega t + \psi_1) + D e^{-\frac{B}{2J}t} \sin\left(\frac{C}{J} \sqrt{1 - \frac{B^2}{4JC}} t + \theta\right), \quad (11)$$

$$D = f_1(A, E, \psi_2, \psi_3);$$

где

$$\theta = f_2(A, E, \psi_2, \psi_3).$$

Уравнение (11) содержит три члена, из которых два первых соответствуют установившемуся режиму движения маховика, а третий — переходному. Проанализируем уравнение (11), начиная с переходного процесса. Из множителя при аргументе t под знаком синуса третьего члена (11) $\sqrt{1 - \frac{B^2}{4JC}}$ видно, что когда $\xi =$

$= \frac{B^2}{4JC} < 1$ (сопротивление $B < 2\sqrt{JC}$), переходный процесс выражается затухающей синусоидой. В этом случае переходный процесс будет слабо демпфированным. Когда $\xi > 1$ (сопротивление $B > 2\sqrt{JC}$), переходный процесс сильно демпфирован. Колебания отсутствуют. Первый член уравнения (11), представленный в виде

$$\varphi_1(t) = \frac{M_c}{C} \left(\frac{M_{nm}}{\pi M_c} - 1 \right), \quad (12)$$

показывает, что угол закручивания муфты в процессе вращения маховика пропорционален моменту сопротивления и обратно пропорционален жесткости муфты. При этом, согласно [3], имеется в виду, что для двигательного режима

$$2 > \frac{M_{nm}}{\pi M_c} > 1.$$

Второй член уравнения (11) показывает, что в процессе вращения маховика возникают незатухающие колебания с частотой ω и амплитудой

$$A = \frac{M_{n.m}}{\pi J \sqrt{\left(\omega^2 - \frac{C}{J}\right)^2 + \omega^2 \frac{B^2}{J^2}}},$$

вносящие погрешности в определение начала и конца временного интервала, в который преобразуется угол. Известно [6, стр. 81], что плотность вероятности такого рода погрешностей подчинена закону арксинуса

$$p(\varphi_2) = \frac{1}{\pi \sqrt{A - \varphi_2^2}} \quad (13)$$

с дисперсией

$$\sigma^2 = \frac{1}{2} A^2, \quad (14)$$

где $\varphi_2 = A \sin(\omega t + \psi_1)$ — второй член уравнения (11) (считается, что моменты начала и конца отсчета временного интервала не зависят от фазы ψ_1). Общая среднеквадратическая погрешность определения величины временного интервала, обусловленная качаниями маховика в установившемся режиме движения,

$$\sigma_2 = \sqrt{2\sigma^2} = A. \quad (15)$$

Полагая в (11) сопротивление $b = 0$, при принятых ранее $J = 1,6 \text{ г/см} \cdot \text{сек}^2$; $\omega = 628 \text{ 1/сек}$, имеем

$$\sigma_2 = A \approx \frac{M_{n.m}}{\pi J \omega^2} = 0,5 \cdot 10^{-6} M_{n.m} \text{ рад}. \quad (16)$$

Для двигателя ДСМ2-П220 $M_{n.m}$ не превышает 20 г. см. При этом условии

$$\sigma_2 \approx 10^{-5} \text{ рад}.$$

В реальном случае наличие сопротивления B неизбежно и σ_2 будет меньше, чем определено в (16).

ВЫВОДЫ

1. Для преобразователя угол — время — код необходимо подбирать серийно выпускаемые однофазные синхронные реактивные микроэлектродвигатели типа колеса Ла-Кура со снятым механическим редуктором.

2. Для обеспечения требуемой точности преобразования угла в код момент инерции маховика должен быть максимальным.

3. Поскольку амплитуда вынужденных колебаний маховика обратно пропорциональна квадрату удвоенной частоты питающего напряжения, желательно подбирать двигатель с повышенной частотой питания.

1. В. А. Михайлов, В. Е. Тырса. Безлимитный кодовый теодолит на основе преобразователя угол—временной интервал—код. Разработка месторождений полезных ископаемых. (Вопросы геологии и маркшейдерского дела), вып. 19. Киев. Изд-во «Техніка», 1970.
2. Ф. М. Юферов. Электрические двигатели автоматических устройств. Госэнергоиздат, 1959.
3. Ю. С. Чечет. Электрические микромашины автоматических устройств. Изд-во «Энергия», 1964.
4. В. А. Диткин, Н. И. Кузнецов. Справочник по операционному исчислению (основы теории и таблицы формул). Гостехиздат, 1951.
5. П. Л. Калантаров, Л. Р. Нейман. Теоретические основы электротехники (теория цепей переменного тока). Госэнергоиздат, 1959.
6. П. В. Новжикий. Основы информационной теории измерительных устройств. Изд-во «Энергия», 1968.

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЛАПЛАСА ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СУММЫ НЕЗАВИСИМЫХ СЛУЧАЙНЫХ ВЕЛИЧИН

В. А. Михайлов, В. Е. Тырса, А. Г. Романова

Харьков

При анализе погрешностей измерительных устройств часто возникает задача построения функции распределения двух или нескольких независимых случайных величин (н. с. в.). Если среди суммируемых н. с. в. нет доминирующих, а число их больше пяти, распределение суммарной случайной величины можно считать нормальным на основании центральной предельной теоремы. Однако если распределения н. с. в. существенно различны, а число их невелико, применять классические методы [1] нахождения суммы н. с. в. довольно трудно. В связи с этим были найдены простые приближенные методы [2—5]. Во многих случаях они дают удовлетворительные результаты, но не всегда удобны. Так, например, в результате графического интегрирования [2, 3] распределение суммы н. с. в. имеет вид кривой, а могут понадобиться численные значения распределения (для аналитических расчетов, для изменения масштаба графика и т. п.). В этом случае возможна дополнительная потеря точности. Метод моментов с аппроксимацией нормальным распределением [4] применяется при известных жестких ограничениях. Метод, предложенный в [5], дает возможность построить интегральную функцию распределения и не позволяет построить плотность распределения (исключая те редкие случаи, когда области существования исходных распределений могут быть разбиты на одинаковые интервалы).

Мы предлагаем еще один метод, который при некоторых обстоятельствах может оказаться полезным.

В теории вероятностей для теоретических исследований широко применяются операторные методы: производящие и характеристические функции (преобразование Фурье), преобразование Лапласа [6]. Полезность применения операторных методов состоит главным образом в мультипликативном свойстве

$$a^{-\lambda(x+y)} = a^{-\lambda x} \cdot a^{-\lambda y}. \quad (1)$$

Сопоставляя прямое одностороннее преобразование Фурье

$$F(it) = \int_0^{\infty} f(x) e^{-itx} dx \quad (2)$$

с преобразованием по Лапласу

$$F(s) = \int_0^{\infty} f(x) e^{-sx} dx \quad (3)$$

(где $s = \sigma + it$), видим, что первое есть частный случай второго при $\sigma = 0$ и $s = it$.

Для обоих типов преобразований существуют теоремы о свертке [6], т. е.

$$f_{\gamma}(x) = f_1(x) * f_2(x) \equiv F_1(s) \cdot F_2(s) = F_{\gamma}(s). \quad (4)$$

Но характеристические функции (преобразование Фурье) в теории вероятностей нашли более широкое применение, так как многие аналитические выражения для случайных величин, будучи преобразованными по Фурье и проинтегрированными в комплексной плоскости, являются функциями действительного аргумента t . Например, для нормальной плотности

$$f_n(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}x^2} \text{ при } |x| < \infty,$$

характеристическая функция имеет вид

$$\varphi_n(t) = e^{-\frac{1}{2}t^2}.$$

Для равномерной плотности

$$f_D(x) = \begin{cases} \frac{1}{2l} & \text{при } |x| < l \\ 0 & \text{вне.} \end{cases}$$

Соответственно

$$\varphi_D(t) = \frac{\sin lt}{t}.$$

Однако в некоторых практических случаях характеристические функции не обладают таким преимуществом по сравнению с преобразованием Лапласа.

1. Плотности распределения н. с. в. заданы гистограммами (ступенчатыми линиями). Для этого случая (рис. 1, а, б) изображения по Лапласу запишутся в виде [7]

$$F_1(s) = \sum_{l=0}^m \frac{\delta_{1l}}{s} e^{-x_{1l}s}, \quad (5)$$

$$F_2(s) = \sum_{j=0}^n \frac{\delta_{2j}}{s} e^{-x_{2j}s}. \quad (6)$$

Здесь δ_{1l} и δ_{2j} последовательные ступени (приращения) ординат гистограммы, а x_{1l} и x_{2j} — их абсциссы.

После перемножения (5) (6) и перехода к оригиналам

$$f_{\gamma}(x) = \sum_{l=0}^m \sum_{j=0}^n \delta_{1l} \cdot \delta_{2j} [x - (x_{1l} + x_{2j})] \quad (7)$$

при

$$x_{1l} + x_{2j} \leq x < x_{1m} + x_{2n}.$$

2. Плотности распределения н. с. в. аппроксимируются наклонными прямыми (рис. 1, а, з). Этот случай возможен тогда, когда функции плотностей распределений суммируемых н. с. в. описываются сложными аналитическими выражениями, которые не могут быть проинтегрированы непосредственно.

Изображения по Лапласу плотностей распределений, представленных на рис. 1, а, з, запишутся в виде

$$F_1(s) = \sum_{l=0}^m \frac{k_{1(l+1)} - k_{1l}}{s^2} e^{-x_{1l}s}; \quad (8)$$

$$F_2(s) = \sum_{j=0}^n \frac{k_{2(j+1)} - k_{2j}}{s^2} e^{-x_{2j}s}. \quad (9)$$

Здесь k_{1l} ; $k_{1(l+1)}$; k_{2j} ; $k_{2(j+1)}$ — угловые коэффициенты отрезков прямых, аппроксимирующих соответствующие распределения; x_{1l} и x_{2j} — абсциссы точек начала этих отрезков.

После перемножения (8) и (9) и перехода к оригиналам имеем

$$f_{\gamma}(x) = \sum_{l=0}^m \sum_{j=0}^n \frac{(k_{1(l+1)} - k_{1l})(k_{2(j+1)} - k_{2j})}{3!} [x - (x_{1l} + x_{2j})]^2 \quad (10)$$

при

$$x_{1l} + x_{2j} < x < x_{1m} + x_{2n}$$

Полагая

$$k_{1(l+1)} - k_{1l} = \Delta_{1l};$$

$$k_{2(j+1)} - k_{2j} = \Delta_{2j}$$

и учитывая, что распределений может быть несколько, запишем

$$f_1(x) = \sum_{l=0}^m \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^p \dots \frac{\Delta_{1l} \Delta_{2j} \Delta_{3k} \dots}{(\alpha-1)!} [x - (x_{1l} + x_{2j} + x_{3k} + \dots)]^{\alpha-1} \quad (11)$$

при

$$x_{1l} + x_{2j} + x_{3k} + \dots < x < x_{1m} + x_{2n} + x_{3p} + \dots$$

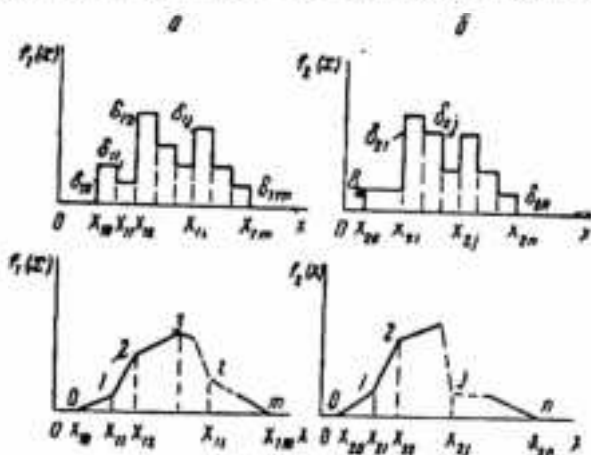


Рис. 1.

Здесь i, j, k — номера (начиная с нулевого) точек пересечения отрезков прямых, аппроксимирующих распределения.

Параметр α в общем случае является степенью оператора у изображения по Лапласу [7] степенных функций

$$\frac{1}{s^\alpha} = \frac{1}{(\alpha-1)!} x^{\alpha-1}. \quad (12)$$

Для изображения плотности распределения, заданной в виде гистограммы, степень у $\alpha = 1$; для изображения композиции двух распределений н. с. в., заданных гистограммами, $\alpha = 2$. Для композиции двух распределений н. с. в., аппроксимированных наклонными прямыми, $\alpha = 4$ и т. д. Очевидно, что в случае построения композиции двух распределений н. с. в., плотности

которых заданы гистограммой и кривой, аппроксимированной отрезками прямых, формула для построения композиции имеет вид

$$f_{\gamma}(x) = \sum_{l=0}^m \sum_{l=0}^n \frac{\delta_{1l} \Delta_{2l}}{2^l} [x - (x_{1l} + x_{2l})]^{\beta} \quad (13)$$

при

$$x_{1l} + x_{2l} < x < x_{1m} + x_{2n}.$$

Для случая композиции нескольких распределений н.с.в., заданных по-разному, можно использовать формулу (11), учитывая, что сомножители в знаменателе дроби состоят из δ_{xil} и Δ_{xil} . Для определения параметра α можно использовать следующую формулу:

$$\alpha = \beta + 2\gamma, \quad (14)$$

где β — количество н.с.в., распределения которых представлены гистограммами;

γ — количество н.с.в., распределения которых аппроксимированы отрезками прямых.

Очевидно, что формулы (7), (11), (13) могут быть получены с помощью преобразования Фурье или других методов. Выбор вида преобразования определяется удобством его применения (вычисление обратного преобразования, форма записи).

Преобразование Лапласа в рассмотренных случаях более приемлемо, так как для вычисления F_2 и $f_{\gamma}(x)$ не надо производить интегрирования в комплексной плоскости, а можно воспользоваться имеющимися таблицами [7]; форма записи и операции перемножения изображения по Лапласу проще, чем для преобразования Фурье, поскольку смысл оператора $s = \sigma + i\omega$ при операциях с преобразованием Лапласа не раскрывается.

На наш взгляд, немаловажно и то обстоятельство, что широкий круг специалистов более знаком с преобразованием Лапласа, поскольку оно нашло большое применение в операторных методах решения дифференциальных уравнений.

Рассмотрим формулы (7), (11) и (13).

Одной из характерных составляющих погрешности электрических измерительных устройств является погрешность от наводки на вход прибора синусоидального напряжения, изменяющегося по закону

$$x = X_m \cos \omega t. \quad (15)$$

Плотность распределения погрешности, обусловленной синусоидальной наводкой, при $X_m = 1$ описывается законом арксинуса [4] и имеет вид

$$f_1(x) = \frac{1}{\pi \sqrt{1 - (x-1)^2}} \quad (16)$$

$$\left(\sigma_A = \frac{X_m}{\sqrt{2}} \text{ или при } X_m = 1 \sigma_A = 0,707 \right).$$

Будем считать сумму остальных погрешностей измерительного устройства нормально распределенной

$$f_2(x) = \frac{1}{\sigma_H \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-1,2)^2}{2\sigma_H^2}}, \quad (17)$$

$\sigma_H = 0,4$ и не зависит от погрешности наводки. Графики (16) и (17) показаны на рис. 2, а и б.

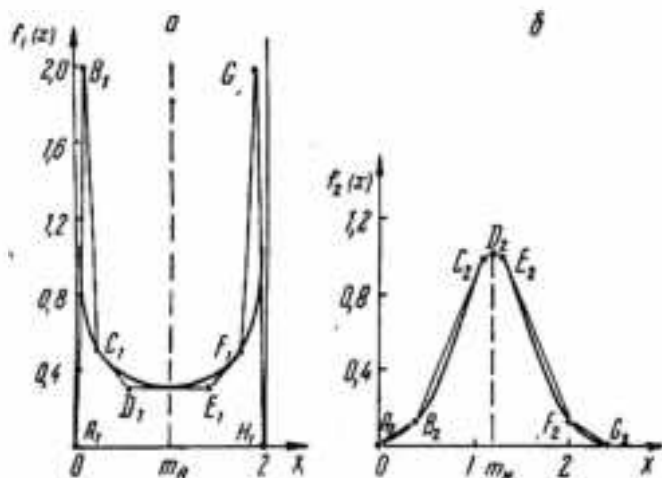


Рис. 2.

Математические ожидания распределений (16) и (17) $m_A = 1$; $m_H = 1,2$. Композиция этих распределений классически выражается через высшие трансцендентные функции и строится численно [4].

Применим для построения композиции этих распределений формулу (11). Для этого кривую на рис. 2, а аппроксимируем ломаной прямой с точками излома $A_1(0; 0)$; $B_1(0,1; 2,0)$; $C_1(0,2; 0,5)$; $D_1(0,6; 0,3)$; $E_1(1,4; 0,3)$; $F_1(1,8; 0,5)$; $G_1(1,9; 2,0)$; $H_1(2,0; 0)$, а на рис. 2, б — с точками излома $A_2(0; 0)$; $B_2(0,4; 0,125)$; $C_2(1,1; 0,965)$; $D_2(1,2; 0,998)$; $E_2(1,3; 0,965)$; $F_2(2,0; 0,125)$; $G_2(2,4; 0)$.

Точки излома выбираются так, чтобы ломаная точнее соответствовала кривой, а площадь под нею равнялась единице. В соответствии с (14) $\alpha = 4$. Вычисления $f_n(x)$ удобно производить по таблице (табл. 1). Произведения $\Delta_{1i} \Delta_{2j}$ делятся на $3! = 6$ в виде «доби», числитель которой соответствует $\frac{\Delta_{1i} \Delta_{2j}}{(\alpha - 1)!}$, а знаменатель

$x_{1i} + x_{2j}$, заносятся в клетки таблицы против выбранных строки и колонки. После приведения подобная формула композиции плотностей распределений (16) и (17) имеет вид:

$$\begin{aligned}
 f_3(x) = & 1,04167x^2 - 1,82292(x-0,1)^2 + 0,75521(x-0,2)^2 + \\
 & + 2,95833(x-0,4)^2 - 5,17708(x-0,5)^2 + 2,17093(x-0,6)^2 + \\
 & + 0,07396(x-1,0)^2 - 2,90000(x-1,1)^2 + 2,87500(x-1,2)^2 - \\
 & - 1,15250(x-1,3)^2 + 3,50604(x-1,4)^2 - 2,10250(x-1,5)^2 - \\
 & - 0,07250(x-1,7)^2 + 0,77407(x-1,8)^2 - 1,89542(x-1,9)^2 + \\
 & + 4,00000(x-2,0)^2 - 5,17708(x-2,1)^2 + 4,28978(x-2,2)^2 - \\
 & - 5,17708(x-2,3)^2 + 4,00000(x-2,4)^2 - 1,89542(x-2,5)^2 + \\
 & + 0,77407(x-2,6)^2 - 0,07250(x-2,7)^2 - 2,10250(x-2,9)^2 + \\
 & + 3,50604(x-3)^2 - 1,15250(x-3,1)^2 + 2,87500(x-3,2)^2 - \\
 & - 2,90000(x-3,3)^2 + 0,07396(x-3,4)^2 + 2,17093(x-3,8)^2 - \\
 & - 5,17708(x-3,9)^2 + 2,95833(x-4)^2 + 0,75521(x-4,2)^2 - \\
 & - 1,82292(x-4,3)^2 - 1,04167(x-4,4)^2. \quad (18)
 \end{aligned}$$

Прежде чем вычислять значения $f_3(x)$ по формуле (18), необходимо иметь в виду, что если распределения суммируемых н. с. в. суть симметричны, то и распределение суммарной с. в. также симметрично. Поэтому в табл. 2 внесены только первые 18 членов. Математическое ожидание распределения суммы $m_3 = 2,2$. Для контроля правильности вычислений $f_3(x)$ найдена и для $x = 2,3$, так как $f_3(x = 2,1) = f_3(x = 2,3)$. График $f_3(x)$ показан на рис. 3.

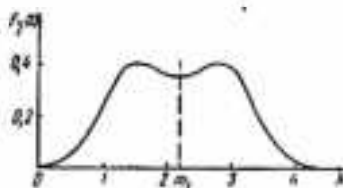


Рис. 3.

Построение интегральной функции распределения суммы н. с. в. $F_3(x)$ производим после интегрирования (18). Для этого необходимо все числа в клетках табл. 2 разделить на 4 (степень аргумента после интегрирования) и умножить каждое на соответствующие каждой строке и колонке значения аргумента, а затем просуммировать в колонках полученные величины.

В заключение следует отметить, что преобразование Лапласа в общем случае дает плавные кривые. Если две или более н. с. в. описываются плавными кривыми и могут быть преобразованы по Лапласу и если после перемножения изображений легко перейти к оригиналу, который описывается несложной функцией, то, очевидно, такое решение задачи является точным и нет необходимости в аппроксимации исходных распределений прямыми [6].

Таблица 1

x_{1l}	x_{2l}	$f_{1l}(x)$	$f_{2l}(x)$	k_{2l}	$\frac{\Delta_{1l}}{x_{1l}}$	$\frac{\Delta_{2l}}{x_{2l}}$	$\Delta_{1l} = k_{1l}(l+1) - k_{2l}$	0	0,1	0,2	0,5	0,6	1,4	1,8	1,9	2,0
		$f_{1l}(x)$	0	2,0	0,3	0,3	0,5	0,5	-0,5	0	0,5	15	-20			
		k_{1l}	20	-35	14,5	0,5	14,5	0,5	14,5	0,5	14,5	-35	20			
		$\Delta_{1l} = k_{1l}(l+1) - k_{2l}$	20	-35	14,5	0,5	14,5	0,5	14,5	0,5	14,5	-35	20			
		$\frac{\Delta_{1l}}{x_{1l}}$	0	0,1	0,2	0,6	0,2694	0,02604	0,75521	0,2	0,6	1,4	1,4	1,8	1,9	2,0
		k_{2l}	0	0,1	0,2	0,6	0,2694	0,02604	0,75521	0,2	0,6	1,4	1,4	1,8	1,9	2,0
0,4	0,125	0,3125	2,95833	-5,17708	2,14489	0,07396	2,14489	0,07396	2,14489	2,14489	2,14489	2,14489	2,14489	2,14489	-5,17708	2,95833
			0,4	0,5	0,6	1,0	1,8	2,2	2,3	2,4						
1,1	0,965	1,2000	-2,90000	5,07500	-2,10250	0,07250	0,07250	0,07250	-2,10250	2,9	2,9	3,0	3,1	3,1	5,07500	-2,90000
			1,1	1,2	1,3	1,7	2,5	2,5	2,9	3,0	3,0	3,1	3,1	3,1	3,1	3,2
1,2	0,998	0,3300	-2,20000	3,85000	-1,59500	0,05510	0,05510	0,05510	-1,59500	2,6	2,6	3,0	3,2	3,2	3,85000	-2,20000
			1,2	1,3	1,4	1,8	2,6	2,6	3,0	3,1	3,1	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2
1,3	0,965	-0,3300	-2,90000	5,07500	-2,10250	0,07250	0,07250	0,07250	-2,10250	2,7	2,7	3,1	3,3	3,3	5,07500	-2,90000
			1,3	1,4	1,5	1,9	2,7	2,7	3,1	3,1	3,1	3,2	3,3	3,3	3,3	3,3
2,0	0,125	-1,2000	2,95833	-5,17708	2,14489	0,07396	2,14489	0,07396	2,14489	2,14489	2,14489	2,14489	2,14489	2,14489	-5,17708	2,95833
			2,0	2,1	2,2	2,6	3,4	3,4	3,8	3,9	4,0					
2,4	0	-0,3125	1,04167	-1,82292	0,75521	0,02604	0,75521	0,02604	0,75521	0,02604	0,02604	0,02604	0,02604	0,75521	-1,82292	1,04167
			2,4	2,5	2,6	3,0	3,8	3,8	4,2	4,3	4,4					
			2,4	2,5	2,6	3,0	3,8	3,8	4,2	4,3	4,4					

Таблица 2

x	0,1	0,2	0,4	0,5	0,6	1,0	1,1	1,2	1,3
$\Delta f_{\eta}(x)$									
1,04167 x^2	0,00104	0,00833	0,06667	0,13021	0,22500	1,04167	1,38646	1,80000	2,28555
-1,82292 ($x - 0,1$) ²	—	0,00182	0,04922	0,11667	0,22786	1,22891	1,82292	2,42631	3,15000
0,75521 ($x - 0,2$) ²			0,00604	0,02039	0,04833	0,38667	0,55055	0,75521	1,00518
2,95833 ($x - 0,4$) ²				0,00296	0,02367	0,63900	1,01471	1,51467	2,18662
-5,17708 ($x - 0,5$) ²				—	0,00618	0,64714	1,11825	1,77574	2,65066
2,17093 ($x - 0,6$) ²						0,13894	0,27137	0,46892	0,74463
0,07396 ($x - 1,0$) ²							0,00007	0,00069	0,00200
-2,90000 ($x - 1,1$) ²							—	0,00290	0,02320
2,87500 ($x - 1,2$) ²									0,00268
-1,15250 ($x - 1,3$) ²									—
3,50604 ($x - 1,4$) ²									
-2,10250 ($x - 1,5$) ²									
-0,0725 ($x - 1,7$) ²									
0,77407 ($x - 1,8$) ²									
-1,89542 ($x - 1,9$) ²									
4,00000 ($x - 2,0$) ²									
-5,17708 ($x - 2,1$) ²									
4,28978 ($x - 2,2$) ²									
$f_{\eta}(x)$	0,00104	0,00651	0,02349	0,03689	0,06396	0,23023	0,28199	0,33444	0,37600

x	1,4	1,5	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3
$4I_1(x)$									
$1,04167x^3$	2,85834	3,51554	5,11772	6,07502	7,14481	8,33333	9,64690	11,09170	12,67400
$-1,82292(x-0,1)^3$	4,00496	5,00209	7,46667	8,95600	10,63127	12,50341	14,58336	16,88206	19,41045
$0,75821(x-0,2)^3$	1,30500	1,65920	2,54683	3,09334	3,71035	4,40438	5,17998	6,04168	6,99400
$2,95833(x-0,4)^3$	2,95833	3,93754	6,49945	8,11766	9,98436	12,11732	14,53428	17,25298	20,29118
$-5,17708(x-0,5)^3$	3,77409	5,17708	8,94599	11,37404	14,20591	17,47264	21,20532	25,43499	30,19273
$2,17093(x-0,6)^3$	1,11152	1,58261	2,88951	3,75137	4,76953	5,95703	7,30689	8,89213	10,66578
$0,07396(x-1,0)^3$	0,00472	0,00924	0,02537	0,03787	0,05392	0,07396	0,09844	0,12780	0,16249
$-2,90000(x-1,1)^3$	0,07830	0,18550	0,62640	0,99470	1,48480	2,11410	2,90000	3,85990	5,01120
$2,87500(x-1,2)^3$	0,02300	0,07762	0,35938	0,62100	0,98612	1,47200	2,09588	2,87500	3,82662
$-1,18250(x-1,3)^3$	0,00115	0,00922	0,07376	0,14406	0,24894	0,39531	0,59008	0,84017	1,15250
$3,50604(x-1,4)^3$		0,00351	0,09466	0,22439	0,43826	0,75730	1,20257	1,79509	2,55590
$-2,10250(x-1,5)^3$			0,01682	0,05677	0,13456	0,26281	0,45414	0,72116	1,07648
$-0,0725(x-1,7)^3$				0,00007	0,00058	0,00196	0,00464	0,00906	0,01566
$0,77407(x-1,8)^3$					0,00077	0,00619	0,02090	0,04954	0,09676
$-1,89542(x-1,9)^3$						0,00895	0,01516	0,05118	0,12131
$4,00000(x-2,0)^3$							0,00400	0,02900	0,10800
$-5,17708(x-2,1)^3$								0,00518	0,04142
$4,28978(x-2,2)^3$									0,00429
$I_1(x)$	0,40242	0,41137	0,40528	0,38501	0,38212	0,36233	0,35714	0,35422	0,35717

Предлагаемый метод суммирования н. с. в. также не вносит дополнительных погрешностей, если исходные распределения заданы гистограммами. При аппроксимации распределений н. с. в. наклонными прямыми описанный метод построения композиции является приближенным. Очевидно, что за счет увеличения числа вводимых интервалов аппроксимации и, следовательно, увеличения объема вычислений точность построения композиции может быть достаточно высокой.

Предлагаемый метод построения композиций н. с. в. оказывается весьма полезным при информационном анализе сложных измерительных систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Е. С. Вентцель. Теория вероятностей. Изд-во «Наука», 1964.
2. В. Г. Махровский. О построении распределения суммы случайных погрешностей с неизвестной плотностью вероятности. Тр. ВНИИМ, вып. 12 (72), 1951.
3. Л. А. Дрягина. Графический метод построения кривой распределения композиции двух или нескольких распределений. «Измерительная техника», № 5, 1967.
4. Г. Г. Абезгауз, А. П. Тронь, Ю. Н. Копенкин, И. А. Коровина. Справочник по вероятностным расчетам. Воениздат, 1966.
5. И. А. Грачев, С. Г. Рабинович. Приближенный способ построения функций распределения композиции нескольких распределений. «Измерительная техника», № 1, 1968.
6. В. Феллер. Введение в теорию вероятностей и ее приложения, т. 1, 2. Изд-во «Мир», 1967.
7. В. А. Диткин, П. И. Кузнецов. Справочник по операционному исчислению (основы теории и таблицы формул). Гостехиздат, 1951.

К ВОПРОСУ ОБ ИССЛЕДОВАНИИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ РЕШЕНИЯ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫХ ЗАДАЧ НЕКОТОРОГО КЛАССА ПРИ ВАРИАЦИЯХ ВЕСОВЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ЛОКАЛЬНЫХ КРИТЕРИЕВ

Б. Е. Кухарев

Харьков

Решение задачи по глобальному критерию «минимум суммарных потерь оптимальности» требует прежде всего получения функции, имеющей смысл потери оптимальности по каждому из локальных критериев. Такая функция запишется в виде [1]:

$$\Phi_j(x) = \frac{|f_j(x_j^0) - f_j(x)|}{f_j(x_j^0) + f_j(x)}, \quad (1)$$

где $f_j(x)$ — математическая запись j -го локального критерия;
 x_j^0 — значение координат оптимального решения по j -му локальному критерию.

Функция $\Phi_j(x)$ является безразмерной, диапазон ее изменения один и тот же для локального критерия любого вида $[0, 1]$ и не зависит от того, минимизируется или максимизируется $f_j(x)$. Она имеет смысл потери оптимальности по j -му критерию, так как равна нулю в точке оптимума целевой функции и равна единице в точке полной потери оптимальности.

На основании изложенного локальные критерии можно оценить в зависимости от их важности по одной шкале безразмерными коэффициентами λ_j , которые могут иметь значения в диапазоне $[\lambda_{\min} \div \lambda_{\max}]$. Тогда глобальный критерий «минимум суммарных потерь оптимальности» с учетом весовых коэффициентов примет вид:

$$Q(x^*, \lambda) = \min_x \left[\sum_{j=1}^K \lambda_j \Phi_j(x) \right], \quad (2)$$

где x^* — значение координат компромиссного решения по глобальному критерию;

K — количество локальных критериев в задаче.

Как правило, для весовых коэффициентов λ_j известны не точные значения, а некоторые возможные диапазоны их изменения в связи с вероятностной природой их получения (обычно они получаются на основании экспертных оценок).

Под анализом чувствительности нелинейной задачи в дальнейшем будет пониматься исследование величины смещения оптимума глобального критерия (2) в малой окрестности точки компромиссного решения (x^*) при вариациях λ_j .

Анализ чувствительности решения нелинейной задачи с ограничениями-равенствами

Метод изложим в соответствии с понятиями, установленными в [2]. Разделим независимые переменные (x_i) на две группы — переменные решения и переменные состояния (d_p и s_m соответственно). Первые можно изменять произвольно, а основная задача переменных состояния — удерживать точку решения в заданной области Ω . Для этого выделим наибольшее число ограничений, уравнения которых образуют линейно-независимое множество. Таких уравнений будет M (очевидно $M < N$, если N — количество переменных x_i). Количество ограничений в этом случае можно интерпретировать как количество связей в задаче, а число $P = N - M$ — как количество степеней свободы. Отсюда количество переменных решения — P , а переменных состояния — M . Для исследования поведения функции цели в области Ω достаточно исследовать ее первые производные по переменным решения (однако они должны учитывать и переменные состояния, чтобы исключить выход за область задания функции). Такая производная называется условной и обозначается $\frac{\partial Q(x)}{\partial d_p}$. Условные произ-

водные могут быть получены в результате вычисления детерминанта матрицы Якоби Якобиана:

$$W = \begin{vmatrix} \frac{\partial \varphi_1(x)}{\partial s_1} & \frac{\partial \varphi_1(x)}{\partial s_2} & \dots & \frac{\partial \varphi_1(x)}{\partial s_M} \\ \frac{\partial \varphi_2(x)}{\partial s_1} & \frac{\partial \varphi_2(x)}{\partial s_2} & \dots & \frac{\partial \varphi_2(x)}{\partial s_M} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial \varphi_M(x)}{\partial s_1} & \frac{\partial \varphi_M(x)}{\partial s_2} & \dots & \frac{\partial \varphi_M(x)}{\partial s_M} \end{vmatrix}.$$

где $\varphi_m(x)$ — m -е уравнение ограничений задачи, и P Якобианов матриц вида:

$$V_P = \begin{vmatrix} \frac{\partial Q(x)}{\partial d_p} & \frac{\partial Q(x)}{\partial s_1} & \dots & \frac{\partial Q(x)}{\partial s_M} \\ \frac{\partial \varphi_1(x)}{\partial d_p} & \frac{\partial \varphi_1(x)}{\partial s_1} & \dots & \frac{\partial \varphi_1(x)}{\partial s_M} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial \varphi_M(x)}{\partial d_p} & \frac{\partial \varphi_M(x)}{\partial s_1} & \dots & \frac{\partial \varphi_M(x)}{\partial s_M} \end{vmatrix}. \quad (4)$$

Тогда

$$A_P(x) = \frac{\partial Q(x)}{\partial d_p} = \frac{|V_P|}{|W|}. \quad (5)$$

Введем также понятие матрицы управления:

$$C = \begin{vmatrix} \frac{\partial \varphi_1(x)}{\partial d_1} & \frac{\partial \varphi_1(x)}{\partial d_2} & \dots & \frac{\partial \varphi_1(x)}{\partial d_p} \\ \frac{\partial \varphi_2(x)}{\partial d_1} & \frac{\partial \varphi_2(x)}{\partial d_2} & \dots & \frac{\partial \varphi_2(x)}{\partial d_p} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial \varphi_M(x)}{\partial d_1} & \frac{\partial \varphi_M(x)}{\partial d_2} & \dots & \frac{\partial \varphi_M(x)}{\partial d_p} \end{vmatrix}. \quad (6)$$

Необходимым условием существования оптимума (минимума) функции (2) является равенство нулю ее условного градиента по переменным решения (считаем, что достаточное условие было проверено при нахождении точки оптимума). Следовательно, потребуем

$$A_P(d, s) = \frac{\partial Q(d, s)}{\partial d_p} = 0. \quad (7)$$

При определении оптимума глобального критерия предполагалось, что коэффициенты λ_j являются постоянными величинами и равны своим математическим ожиданиям. Теперь, с учетом того, что λ_j также являются переменными в малой окрестности $M[\lambda_j]$, число переменных в задаче увеличилось на K . Однако

переменные состояния s_m учтены ранее в (7) и они не могут свободно изменяться. Это равносильно тому, что имеется $(P + K)$ переменных и P уравнений связи (7). В этом случае в роли переменных состояния выступают все P переменные d_p , а переменными решения являются λ_j .

Для определения коэффициентов чувствительности $\frac{\partial d_p}{\partial \lambda_j}$ составим матрицу Якоби:

$$W_A = \begin{vmatrix} \frac{\partial A_1(d, s)}{\partial d_1} & \frac{\partial A_1(d, s)}{\partial d_2} & \dots & \frac{\partial A_1(d, s)}{\partial d_p} \\ \frac{\partial A_2(d, s)}{\partial d_1} & \frac{\partial A_2(d, s)}{\partial d_2} & \dots & \frac{\partial A_2(d, s)}{\partial d_p} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial A_p(d, s)}{\partial d_1} & \frac{\partial A_p(d, s)}{\partial d_2} & \dots & \frac{\partial A_p(d, s)}{\partial d_p} \end{vmatrix} \quad (8)$$

и K матриц вида

$$V_{pj} = \begin{vmatrix} \frac{\partial d_p}{\partial \lambda_j} & \frac{\partial d_p}{\partial d_1} & \dots & \frac{\partial d_p}{\partial d_p} \\ \frac{\partial A_1(d, s)}{\partial \lambda_j} & \frac{\partial A_1(d, s)}{\partial d_1} & \dots & \frac{\partial A_1(d, s)}{\partial d_p} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial A_p(d, s)}{\partial \lambda_j} & \frac{\partial A_p(d, s)}{\partial d_1} & \dots & \frac{\partial A_p(d, s)}{\partial d_p} \end{vmatrix}. \quad (9)$$

Условные производные, вычисленные в точке компромиссного решения (x^*)

$$R_{pj}^* = \left(\frac{\partial d_p}{\partial \lambda_j} \right)^* = \frac{|V_{pj}|^*}{|W_A|^*}, \quad (10)$$

характеризуют чувствительность функции глобального критерия в малой окрестности (x^*) к вариациям коэффициентов λ_j по переменным решения. Значение R_{pj}^* стремится к нулю в случае слабого влияния весового коэффициента λ_j на значение p -й координаты оптимума и к бесконечности в противоположном случае.

Вычислив коэффициенты чувствительности оптимума для всех λ_j , получим матрицу чувствительности по переменным решения в точке (x^*)

$$\left(\frac{\partial d}{\partial \lambda} \right)^* = R_{pj}^* = \begin{vmatrix} R_{11}^* & R_{12}^* & \dots & R_{1K}^* \\ R_{21}^* & R_{22}^* & \dots & R_{2K}^* \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{P1}^* & R_{P2}^* & \dots & R_{PK}^* \end{vmatrix}, \quad (11)$$

Переменные решения и состояния в этой задаче назначались произвольно, поэтому необходимо получить матрицу чувствитель-

ности и по переменным состояниям (s_m). Так как переменные состояния и решения связаны зависимостью

$$\frac{\partial s}{\partial d} = -W^{-1}C, \quad (12)$$

получим ($K \times M$) — матрицу, характеризующую чувствительность по переменным состояниям:

$$R_{mj}^* = \frac{\partial s}{\partial d} \left(\frac{\partial d}{\partial \lambda_j} \right)^* = -W^{-1}CR_{mj}^*. \quad (13)$$

Сложив матрицы (11) и (13), получим матрицу чувствительности оптимума функции (2) в окрестности ее решения (x^*) при вариациях весовых коэффициентов

$$R_{ij}^* = \begin{vmatrix} R_{i1}^* & R_{i2}^* & \dots & R_{iK}^* \\ R_{21}^* & R_{22}^* & \dots & R_{2K}^* \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{N1}^* & R_{N2}^* & \dots & R_{NK}^* \end{vmatrix}. \quad (14)$$

Проведенный анализ позволяет оценить обобщенные коэффициенты чувствительности решения по параметрам λ_j в малой окрестности точки (x^*)

$$R_j^* = \sqrt{\sum_{i=1}^N (R_{ij}^*)^2}. \quad (15)$$

Анализ чувствительности решения нелинейной задачи с ограничениями-неравенствами

Для рассмотрения задач с ограничениями-неравенствами необходимо ввести некоторые дополнительные понятия [2]. Если необходимо минимизировать дифференцируемую функцию цели $Q(x)$, а (x^*) лежит внутри или на границе области Ω , определяемой условиями неотрицательности

$$\begin{aligned} x_i &> 0 \\ (i = 1, 2, \dots, N) \end{aligned} \quad (16)$$

и ограничениями

$$\begin{aligned} \varphi_l(x) &> 0, \\ (l = 1, 2 \dots L) \end{aligned} \quad (17)$$

то эквивалентный путь описания области заключается во введении дополнительных переменных g_l , которым соответствуют разности между значением функции $\varphi_l(x)$ и нулем, т. е. в этом случае L неравенств можно представить в виде L уравнений

$$\varphi_l(x) - g_l = 0 \quad (18)$$

и L условий неотрицательности

$$g_i > 0. \quad (19)$$

Очевидно, что такая задача имеет N степеней свободы (количество уравнений (18) равно количеству дополнительных переменных), поэтому N переменных решения должны быть выбраны среди N переменных x_i и L переменных g_i . Для любой точки $x \in \Omega$ в число переменных решения включим $M g_i$, равных нулю в этой точке, и $N - M$ переменных x_i . Остальные L переменных отнесем к категории переменных состояния, поскольку малые изменения переменных состояния не могут вывести ни одну из них за пределы Ω (переменные состояния не находятся на ее границе). Следовательно, точка, в которой находится минимум функции (2), всегда будет определена N переменными решения (часть их может быть равна нулю) и L переменными состояния.

Необходимые условия (Куна — Таккера) существования минимума функции $Q(x)$ в точке (x^*) включают условия неотрицательности производных решения

$$\frac{\partial Q(x^*)}{\partial d_p} > 0, \quad \frac{\partial Q(x^*)}{\partial g_i} > 0 \quad (20)$$

и условия ортогональности

$$\frac{\partial Q(x^*)}{\partial d_p} d_p^* = 0, \quad \frac{\partial Q(x^*)}{\partial g_i} g_i^* = 0. \quad (21)$$

Эти же условия являются и достаточными, если (20) — условия строгого неравенства. Если по некоторым переменным условия (20) являются строгими равенствами, то точка (x^*) должна быть проверена на оптимальность с помощью дополнительного анализа [2]. В дальнейшем будем считать, что такой анализ проведен для точки (x^*) в процессе определения оптимума, и поэтому выполнение необходимых условий в малой ее окрестности в результате вариаций λ_i определяется именно дрейфом оптимума.

Из (20), (21) видно, что в оптимальной точке может быть три типа переменных решения:

- 1) переменные, значение которых не равно нулю (свободные переменные), но равна нулю условная производная по ним;
- 2) переменные, значение которых равно нулю, а производная по ним положительна (жесткие переменные);
- 3) переменные, значение которых равно нулю и производная по ним так же равна нулю.

Случай 1 соответствует внутреннему оптимуму по данной переменной, случай 2 — оптимуму на границе области по ней, а 3 характеризует ситуацию, когда граница области находится в точке внутреннего оптимума по переменной.

Для исследования чувствительности найденного решения (x^*) переформулируем несколько задачу, используя знание координат

решения. Все ограничения, для которых $g_i > 0$, исключим из системы ограничений, поскольку они не влияют на оптимум в малой окрестности точки (x^*) , т. е. при малых изменениях δg_i они не могут стать равными нулю в силу знака строгого неравенства. Из всех ограничений (16) с переменными решения $g_i = 0$ исключим g_i из уравнений, оставив знак равенства, поскольку при малых изменениях $\delta \lambda_i$ производная $\frac{\partial Q(x^*)}{\partial g_i}$ не может стать отрицательной в силу строгого неравенства (кроме случая 3). Таким образом, теперь задача включает только ограничения-равенства и ту же целевую функцию (2).

Анализ чувствительности проведем исходя из первых условий Куна — Таккера (20), (21). Если по p -й переменной решения оптимум достигается при $d_p > 0$ (случай 1), условие (20) вырождается в условие

$$\frac{\partial Q(x^*)}{\partial d_p} = 0, \quad (22)$$

имеющее тот же вид, что и условие (7) в задаче с ограничениями-равенствами. Поэтому дальнейший анализ переменных такого рода проводится в полном соответствии с (10), учитывая при этом, что в число ограничивающих функций входят только те, для которых $g_i = 0$. Если же по p -й переменной решения оптимум достигается при $d_p = 0$ (случай 2), то из (20) запишем

$$\lambda_i > - \frac{\sum_{l=1}^m \lambda_l \frac{\partial \Phi_l(x^*)}{\partial d_p}}{\frac{\partial \Phi_i(x^*)}{\partial d_p}} \quad (23)$$

при

$$\frac{\partial \Phi_i(x^*)}{\partial d_p} > 0,$$

и

$$\lambda_i < - \frac{\sum_{l=1}^m \lambda_l \frac{\partial \Phi_l(x^*)}{\partial d_p}}{\frac{\partial \Phi_i(x^*)}{\partial d_p}} \quad (24)$$

при

$$\frac{\partial \Phi_i(x^*)}{\partial d_p} < 0.$$

Знак строгого неравенства в (23), (24) говорит о том, что малые изменения $\delta \lambda_i$ в отрицательную и положительную сторону не изменяют этих соотношений и, следовательно, при них

выполняется условие оптимума в точке $d_p = 0$. Это значит, что чувствительность в этой точке

$$R_{d^*}^* = \left(\frac{\partial d_p}{\partial \lambda_i} \right)^* = 0. \quad (25)$$

Если функция $Q(x)$ является выпуклой на выпуклой области Ω и остается такой при изменении λ_i , т. е. есть уверенность, что существует только один минимум функции (это условие выполняется в задачах линейного программирования), то можно показать не только чувствительность оптимума в малой окрестности точки $d_p = 0$, но и указать диапазон изменения λ_i , в котором оптимум не смещается из этой точки.

В итоге, как и в задаче с ограничениями-равенствами, может быть составлена матрица чувствительности по всем независимым переменным (14) и на ее основе рассчитаны обобщенные коэффициенты чувствительности решения по параметрам λ_i (15).

Случай 3 является вырожденным и не рассматривается, так как он представляет собой суперпозицию 1 и 2 по некоторой переменной. Укажем лишь, что чувствительность в этом случае характеризуется не одной, а двумя матрицами. Одна матрица показывает чувствительность при одних знаках $\partial \lambda_i$, а вторая — при противоположных.

В заключение отметим, что изложенный метод полностью характеризует поведение локального оптимума в малой окрестности компромиссного решения (x^*), но не гарантирует получения нового локального оптимума, если он появляется в многоэкстремальной задаче при вариациях λ_i .

ЛИТЕРАТУРА

1. И. В. Кузьмин, Б. Е. Кухарев. Один метод решения многокритериальных задач. Материалы конференции «Проблемы создания АСУП», Донецк, 1970.

2. D. Wilde, C. Beightler. Foundations of Optimization. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1967.

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ ОПТИМАЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВОМ И ЗАПАСАМИ

А. Я. Олешко, Л. Н. Серета

Харьков

В терминах теории управления запасами могут быть сформулированы самые разнообразные производственные задачи, решение которых обеспечивает совершенствование техники плани-

рования, повышение качества управления и более рациональное использование производственных мощностей.

Один из важнейших этапов планирования работы любой производственной единицы — цеха, предприятия или объединения предприятий — состоит в определении рационального уровня запасов того или иного вида сырья, инструмента, изделий. Чрезмерно большой запас приводит к избытку материальных ценностей и требует больших затрат на хранение. Недостаточный запас может привести к перебоям в работе предприятия, т. е. к потерям. Колебания спроса оказывают влияние как на уровень производства, так и на уровень запасов, что особенно важно для торговых предприятий и предприятий, выпускающих предметы народного потребления.

Наличие альтернативных линий поведения означает, что администрация предприятия обязана принимать решения, которые должны быть оптимальны в каждом конкретном случае, т. е. отвечать заранее поставленной цели. Следовательно, при управлении запасами применение теории оптимальных процессов не только полезно, но и необходимо.

Рассмотрим оптимальное управление запасами, обеспечивающее минимум издержек на хранение запасов в переходном режиме (при резком изменении случайного спроса) и в установившемся режиме (когда спрос выражается стационарной случайной функцией времени). Управления, оптимальные в указанном смысле, отыскиваются путем совместного решения прямой и обратной задач аналитического конструирования регуляторов [2, 6]. Поддержание издержек производства на требуемом уровне обеспечивается вводимым ограничивающим условием.

Постановка задачи

Запас можно определить как всякое неиспользуемое средство, имеющее экономическую ценность [3]. Это значит, что спрос на это средство существует и удовлетворяется выдачами из запаса (выходом), который затем пополняется за счет поступлений. Будем полагать, что поступление определяется интенсивностью работы предприятия в единицу времени $a(t)$, а выход — интенсивностью спроса в единицу времени $b(t)$. Если средний уровень запасов в нулевой момент равен I_0 , то уровень запаса в момент t определяется основным уравнением запасов [1, 3]:

$$I(t) = I_0 + \int_0^t [a(t) - b(t)] dt \quad (1.1)$$

или

$$\begin{aligned} \dot{I}(t) &= a(t) - b(t); \\ I(p) &= \frac{1}{p} [a(p) - b(p)]. \end{aligned} \quad (1.2)$$

Запись уравнений (1.2) соответствует соотношениям в отклонениях от установившегося режима, отвечающего среднему уровню запасов. С учетом временной задержки, всегда существующей между моментом требуемого уровня запасов и моментом удовлетворения его производством, уравнения (1.2) должны быть несколько видоизменены. Если задержка определяется оператором $\frac{1}{T_3 p + 1}$ (T_3 — постоянная времени задержки), то вместо (1.2) получаем:

$$I(p) = \frac{1}{p(T_3 p + 1)} a(p) - \frac{1}{p(T_3 p + 1)} b(p).$$

Введем новые обозначения интенсивностей:

$$\begin{aligned} \frac{1}{p} a(p) &= u(p); \\ -\frac{1}{p} b(p) &= \varepsilon_1(p). \end{aligned}$$

Тогда уравнение запасов при переходе к оригиналам приводится к виду

$$I(t) + a_{11} I(t) = u_1(t) + \varepsilon(t), \quad (1.3)$$

где

$$a_{11} = \frac{1}{T_3}; \quad u_1(t) = \frac{u(t)}{T_3}; \quad \varepsilon(t) = \frac{\varepsilon_1(t)}{T_3}.$$

$u_1(t)$ и $\varepsilon(t)$ — преобразованные выражения интенсивностей производства и спроса.

Для торговых предприятий и предприятий, выпускающих предметы народного потребления, интенсивность спроса $\varepsilon(t)$ представляет собой случайную функцию времени с известной корреляционной функцией вида [1, 5]

$$R_{\varepsilon\varepsilon}(\tau) = R_{\varepsilon\varepsilon}(0) e^{-\alpha|\tau|}, \quad \alpha > 0. \quad (1.4)$$

В этом случае оптимальная стратегия управления производством и запасами должна выбираться путем прогнозирования спроса, возникающего к будущему моменту времени $t + \tau$. Вместе с тем, уравнение (1.3) представляет собой классическую модель объекта управления, в которой $I(t)$ — управляемая координата, $u_1(t)$ — управление, $\varepsilon(t)$ — возмущающее воздействие. Данная модель может быть приведена к канонической форме, обеспечивающей марковский характер управляемого процесса и, следовательно, возможность построения управления u_1 в виде функции фазовых координат в данный момент времени. Основным требованием, предъявляемым к канонической форме, является приведение функции возмущения $\varepsilon(t)$ к дельта-коррелированной случайной функции ε^* (белому шуму). Это можно осуществить с помощью стационарного формирующего фильтра.

Для случайного возмущения с корреляционной функцией (1.4) в качестве стационарного формирующего фильтра может быть взято [5] инерционное звено с передаточной функцией

$$W_{\Phi}(p) = \frac{K_{\Phi}}{T_{\Phi}p + 1}. \quad (1.5)$$

Теперь интенсивность спроса $\varepsilon(t)$ запишется в следующем виде

$$\varepsilon = \frac{K_{\Phi}}{T_{\Phi}p + 1} \cdot \varepsilon^*. \quad (1.6)$$

На основании (1.6) получаем уравнение стационарного формирующего фильтра

$$\dot{\varepsilon} + \frac{1}{T_{\Phi}} \cdot \varepsilon = \frac{K_{\Phi}}{T_{\Phi}} \cdot \varepsilon^*. \quad (1.7)$$

С учетом (1.7) модель (1.3) принимает вид

$$\begin{aligned} \dot{I} + a_{11} \cdot I &= u_1 + \varepsilon; \\ \dot{\varepsilon} + \frac{1}{T_{\Phi}} \varepsilon &= \frac{K_{\Phi}}{T_{\Phi}} \varepsilon^*. \end{aligned} \quad (1.8)$$

Для удобства дальнейших выкладок сделаем замену переменных:

$$\begin{aligned} I(t) &= x_1(t); \\ \varepsilon(t) &= x_2(t); \\ \dot{\varepsilon}(t) &= \dot{x}_2(t). \end{aligned} \quad (1.9)$$

После замены переменных вместо (1.8) получаем

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 + a_{11}x_1 - x_2 &= u_1; \\ \dot{x}_2 + a_{22}x_2 &= c\varepsilon^*. \end{aligned} \quad (2.0)$$

Здесь

$$a_{22} = \frac{1}{T_{\Phi}}; \quad c = \frac{K_{\Phi}}{T_{\Phi}}.$$

Требуется определить оптимальное в смысле минимума квадратичного функционала [2]

$$z = M \int_0^T (\beta_{11} \cdot x_1^2 + \beta_{22} x_2^2) dt \quad (2.1)$$

управление u_1 при ограничивающем условии

$$\int_0^T \frac{u_1^2}{k_1} dt + \int_0^T k_2 \left(\sum_{m=1}^2 \gamma_{1m} x_m \right)^2 dt = \text{const}, \quad (2.2)$$

которое можно интерпретировать как ограничение суммарных издержек управления производством и запасами (первое слагаемое

— издержки на управление производством, второе — издержки на хранение запасов и удовлетворение спроса).

В (2.1) и (2.2) M — знак математического ожидания; t_1 и t_2 — начало и конец переходного процесса; k_1 — коэффициент, принятый равным единице.

Минимизируемый функционал (2.1) выбирается из условия минимума издержек управления запасами при резких колебаниях спроса.

Оптимальное управление u_1 отыскивается в следующей форме [2, 4].

$$u_1 = -(\gamma_{11}x_1 + \gamma_{12}x_2). \quad (2.3)$$

Коэффициенты γ_{1m} в ограничивающем условии (2.2), а конкретно γ_{11} , γ_{12} в (2.3), однозначно определяются через коэффициенты объекта и коэффициенты минимизируемого функционала.

Найденное u_1 совместно с моделью (2.0) определит оптимальную, в смысле качества переходного процесса, структуру системы управления запасами.

В установившемся режиме критерием качества этой системы можно считать средний квадрат ошибки [7]

$$\alpha_2 = \{M[x_1(t)]\}^2 + D[x_1(t)], \quad t > t_2,$$

где $M[x_1(t)]$ — математическое ожидание ошибки;

$D[x_1(t)]$ — дисперсия ошибки.

В соответствии с записью в отклонениях системы (2.0) в данном случае $M[x_1(t)] = 0$. Тогда

$$\alpha_2 = D[x_1(t)]. \quad (2.4)$$

Критерий (2.4) характеризует издержки управления запасами в период, когда спрос представляет собой стационарную случайную функцию времени. Тогда задача синтеза оптимальной системы управления запасами формулируется следующим образом.

В положительном квадранте плоскости коэффициентов β_{11} и β_{22} , матрица которых

$$B = \begin{vmatrix} \beta_{11} & 0 \\ 0 & \beta_{22} \end{vmatrix} \quad (2.5)$$

удовлетворяет критерию Сильвестра [2], т. е. $\beta_{11} > 0$, и $\beta_{11}\beta_{22} > 0$, найти такую точку β_{jj} ($j = 1, 2$), для которой в оптимальной системе управления запасами достигался бы минимум величины α_2 (2.4)

$$\alpha_2 = \alpha_{2\min}. \quad (2.6)$$

Решение задачи

При решении задачи воспользуемся современными приемами теории оптимальных процессов, позволяющими свести задачу аналитического конструирования системы управления к решению линейных алгебраических уравнений [2].

Коэффициенты оптимального управления u_1 (2.3) определяем из матричного уравнения

$$GA + A^*G = B, \quad (2.7)$$

где A — матрица коэффициентов объекта (2.0);

A^* — соответствующая ей транспонированная матрица;

B — матрица коэффициентов минимизируемого функционала (2.1);

G — матрица коэффициентов оптимальных управлений.

Расписываем уравнение (2.7) для системы (2.0):

$$\begin{vmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} a_{11} - 1 & \\ 0 & a_{22} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} a_{11} & 0 \\ -1 & a_{22} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \beta_{11} & 0 \\ 0 & \beta_{22} \end{vmatrix},$$

откуда получаем выражения для коэффициентов γ_{11} , γ_{22}

$$\begin{aligned} \gamma_{11} &= \frac{1}{2a_{11}} \beta_{11}; \\ \gamma_{22} &= \frac{1}{2a_{11}(a_{11} + a_{22})} \beta_{22}. \end{aligned} \quad (2.8)$$

Подставив (2.8) в (2.3) получим

$$u_1 = - \left[\frac{\beta_{11}}{2a_{11}} x_1 + \frac{\beta_{22}}{2a_{11}(a_{11} + a_{22})} x_2 \right], \quad (2.9)$$

Структурная схема полученной оптимальной системы управления запасами с учетом (1.9) приведена на рисунке. Согласно рисунку записываем выражения для интенсивности производства u и запасов I :

$$u = \frac{\beta_{11}}{2a_{11}} \cdot I + \frac{\beta_{22}}{2a_{11}(a_{11} + a_{22})} s; \quad (3.0)$$

$$I = \frac{1}{\tau_{sp} + 1} (u + s). \quad (3.1)$$

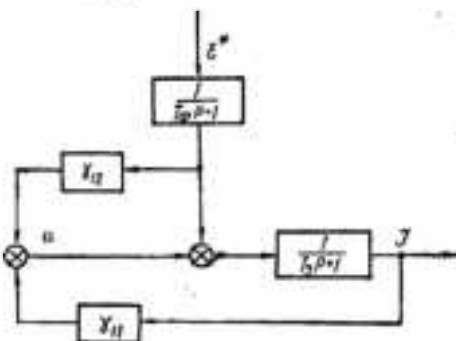


Рис. 1.

Введем в (3.0) новые обозначения, опустив у β_{11} индекс «11»

$$\frac{\beta_{11}}{2\alpha_{11}} = \beta\rho_1 = L_1; \quad (3.2)$$

$$\frac{\beta_{11}}{2\alpha_{11}(\alpha_{11} + \alpha_{21})} = \beta\rho_2 = L_2.$$

Тогда соотношение (3.0) примет вид:

$$u = L_1 \cdot I + L_2 \cdot \varepsilon. \quad (3.3)$$

Так как в дальнейшем необходимо только соотношение для I , то подставив (3.3) в (3.1), получаем

$$T_2 I + (1 - L_2) I = (1 + L_2) \cdot \varepsilon. \quad (3.4)$$

Как указывалось ранее, в установившемся режиме критерием качества системы является средний квадрат ошибки σ_e (2.4). Дисперсия ошибки определяется, согласно [7], из соотношения

$$D_I = \int_{-\infty}^{\infty} |\Phi_{I\varepsilon}(j\omega)|^2 S_\varepsilon(\omega) d\omega, \quad (3.5)$$

где $\Phi_{I\varepsilon}(j\omega)$ — частотная характеристика системы по отношению к $\varepsilon(f)$;

$S_\varepsilon(\omega)$ — спектральная плотность интенсивности случайного сигнала, определяющаяся соотношением [5]

$$S_\varepsilon(\omega) = \frac{K_\Phi S_{\varepsilon^*}}{1 + \omega^2 T_\Phi^2}, \quad (3.6)$$

где S_{ε^*} — спектральная плотность белого шума (const).

Частотная характеристика $\Phi_{I\varepsilon}(j\omega)$ находится из (3.4)

$$\Phi_{I\varepsilon}(j\omega) = \frac{1 + L_2}{T_2 j\omega + (1 - L_2)}. \quad (3.7)$$

Тогда выражение для дисперсии ошибки принимает вид

$$D_I = \int_{-\infty}^{\infty} \left| \frac{1 + L_2}{T_2 j\omega + (1 - L_2)} \right|^2 \frac{K_\Phi^2 S_{\varepsilon^*}}{1 + \omega^2 T_\Phi^2} d\omega. \quad (3.8)$$

Существует более простое выражение для D_I [5, 7]:

$$D_I = 2\pi Q_\sigma, \quad (3.9)$$

где

$$Q_\sigma = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{g_\sigma(j\omega)}{h(j\omega)h(-j\omega)} d\omega \quad (4.0)$$

и табулировано. Преобразуем (3.8) в форму, пригодную для вычисления табличного интеграла (4.0):

$$D_I = K_{\Phi}^2 S_* \int_{-\infty}^{\infty} \left| \frac{1 + L_2}{[T_2 j\omega + (1 - L_1)](1 + T_{\Phi} j\omega)} \right|^2 d\omega. \quad (4.1)$$

Здесь постоянные величины вынесены за знак интеграла, выражение $(1 + \omega^2 T_{\Phi}^2)$ разложено на множители и внесено под знак модуля. Теперь интеграл Q_2 (4.0) определится соотношением

$$Q_2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left| \frac{1 + L_2}{T_2 T_{\Phi} (j\omega)^2 + [T_2 + T_{\Phi} (1 - L_1)] j\omega + (1 - L_1)} \right|^2 d\omega. \quad (4.2)$$

Здесь n взято равным 2, так как высшая степень $j\omega$ в (4.1) равна двум. Для Q_2 имеем

$$q_2(j\omega) = (1 + L_2)^2; \quad (4.3)$$

$$h_2(j\omega) = T_2 T_{\Phi} (j\omega)^2 + [T_2 + T_{\Phi} (1 - L_1)] j\omega + (1 - L_1).$$

Согласно приложению 5 в [7] с учетом (4.3) определяем окончательно Q_2 :

$$Q_2 = \frac{(1 + L_2)^2}{2 [T_2 + T_{\Phi} (1 - L_1)] (1 - L_1)}. \quad (4.4)$$

Подставив (4.4) в (3.9) находим дисперсию D_I , равную среднему квадрату ошибки α_2 :

$$\alpha_2 = k \frac{(1 + L_2)^2}{[T_2 + T_{\Phi} (1 - L_1)] (1 - L_1)}. \quad (4.5)$$

Здесь $k = \pi K_{\Phi}^2 S_*$.

Для определения β , минимизирующего среднеквадратичную ошибку системы, запишем (4.5) с учетом принятых ранее обозначений (3.2)

$$\alpha_2 = k \frac{(1 + \rho_2 \beta)^2}{[T_2 + T_{\Phi} (1 - \rho_1 \beta)] (1 - \rho_1 \beta)},$$

вычислим $\frac{\partial \alpha_2}{\partial \beta}$ и приравняем ее нулю.

Вычисление $\frac{\partial \alpha_2}{\partial \beta}$ громоздко, поэтому записываем лишь окончательный результат

$$\frac{\partial \alpha_2}{\partial \beta} = k \frac{m_0 \beta^2 + m_1 \beta + m_2}{(n_0 \beta^2 + n_1 \beta + n_2)^2} = 0, \quad (4.6)$$

где

$$m_0 = -\rho_1 \rho_2 [2\rho_1 T_{\Phi} + \rho_2 (2T_{\Phi} + T_2)];$$

$$m_1 = 2[\rho_2^2 (T_{\Phi} + T_2) - \rho_1^2 T_{\Phi}];$$

$$m_2 = 2\rho_2(T_\phi + T_2) + \rho_1(2T_\phi + T_2);$$

$$n_0 = \rho_1^2 T_\phi;$$

$$n_1 = -\rho_1(2T_\phi + T_2);$$

$$n_2 = T_\phi + T_2.$$

Итак, оптимальная стратегия управления производством и запасами сводится к определению зависимости интенсивности производства (2.9) от уровня запасов и интенсивности спроса при β , удовлетворяющем уравнению (4.6). Решение задачи легко алгоритмизируется и реализуется на современных ЭЦВМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дж. Букан, Э. Кенигсберг. Научное управление запасами. Изд-во «Наука», 1967.
2. А. А. Красовский. Аналитическое конструирование контуров управления летательными аппаратами. Изд-во «Машиностроение», 1969.
3. Ф. Хэнссмэн. Применение математических методов в управлении производством и запасами. Изд-во «Прогресс», 1966.
4. А. А. Красовский. Статистическая теория переходных процессов в системах управления. Изд-во «Наука», 1968.
5. Н. А. Лившиц, В. Н. Пугачев. Вероятностный анализ систем автоматического управления. Изд-во «Советское радио», 1963.
6. А. Я. Олешко. К вопросу совместного решения прямой и обратной задач аналитического конструирования регуляторов, «Кибернетика и автоматическое управление» (Харьковское отделение), № 11. Изд-во «Наукова думка», Киев, 1970.
7. И. Е. Казанков. Статистические методы проектирования систем управления. Изд-во «Машиностроение», 1969.

АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ОДНОЙ ЗАДАЧИ КУСОЧНО-ЛИНЕЙНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

М. И. Варсак, Н. Т. Куценко

Харьков

В работе рассматривается следующая задача выпуклого кусочно-линейного программирования:
найти

$$\min \sum_{i=1}^n c_i x_i, \quad (1)$$

где

$$c_i = \begin{cases} c_i^+, & \text{если } x_i > 0; \\ c_i^-, & \text{если } x_i < 0, \end{cases}$$

при ограничениях

$$a_{j1}x_1 + a_{j2}x_2 + \dots + a_{jn}x_n = b_j \quad (j = 1, 2, \dots, m, m < n). \quad (2)$$

Ее можно классифицировать как обобщение классической задачи линейного программирования.

Общее описание метода

Разрешим систему (2) относительно произвольных m переменных. Пусть это будут переменные x_1, x_2, \dots, x_m . Представим их в виде линейных функций $n-m$ оставшихся переменных:

$$x_j = a_{j1}x_{m+1} + \dots + a_{jk}x_{m+k} + \dots + a_{jn-m}x_n + a_{jn-m+1} \quad (3) \\ (j = 1, 2, \dots, m).$$

Оптимальное решение задачи (1)–(2) следует искать среди базисных решений вида

$$x_j = a_{jn-m+1} \quad (j = 1, 2, \dots, m), \\ x_{m+1} = x_{m+2} = \dots = x_{m+k} = \dots = x_n = 0. \quad (4)$$

Решению (4) соответствует значение целевой функции

$$C(x) = \sum_{j=1}^m c_j a_{jn-m+1},$$

где

$$c_j = \begin{cases} c_j^+, & \text{если } a_{jn-m+1} > 0, \\ c_j^-, & \text{если } a_{jn-m+1} < 0. \end{cases} \quad (5)$$

При изменении свободной переменной x_{m+k} целевая функция (5) получит приращение

$$\left(\sum_{j=1}^m c_j a_{jk} + c_{m+k}^+ \right) x_{m+k}, \text{ если } x_{m+k} > 0, \quad (6)$$

или

$$\left(\sum_{j=1}^m c_j a_{jk} + c_{m+k}^- \right) x_{m+k}, \text{ если } x_{m+k} < 0. \quad (7)$$

Обозначим выражение $\left(\sum_{j=1}^m c_j a_{jk} + c_{m+k}^+ \right)$ через Δ_k^+ , а выражение $\left(- \sum_{j=1}^m c_j a_{jk} - c_{m+k}^- \right)$ — через Δ_k^- . Очевидно, что целевую функцию можно уменьшить, если существует такая свободная переменная x_{m+k} , что $\Delta_k^+ < 0$ или $\Delta_k^- < 0$. Ее следует ввести в базис. Отметим, что в силу условий выпуклости $c_j^- \leq c_j^+ \Delta_k^+$ и Δ_k^- не могут одновременно быть отрицательными.

Пусть $\Delta_k^+ < 0$. Увеличивая x_{m+k} , мы изменяем значения базисных переменных. Некоторые из них могут менять знаки. В момент изменения знака базисной переменной x_j значение Δ_k^+ увеличивается на $\alpha_{jk}(c_j^+ - c_j^-) > 0$. Переменную x_{m+k} выгодно увеличивать до тех пор, пока Δ_k^+ остается отрицательным. Та из переменных x_j , которая при увеличении x_{m+k} меняет знак и вызывает перемену знака Δ_k^+ , исключается из базиса.

Аналогичным будет процесс улучшения опорного решения при $\Delta_k^- < 0$. Если после некоторой итерации окажется, что $\Delta_k^+ > 0$ и $\Delta_k^- > 0$ для всех свободных переменных, значит получено оптимальное решение.

Алгоритм решения задачи

Перейдем теперь к непосредственному изложению алгоритма, основанного на приведенных рассуждениях.

1. Методом Жордана — Гаусса разрешить систему ограничений (2) относительно m переменных и представить ее в виде (3).

2. $k := 1$, $\delta_j := 0$ для $j = 1, 2, \dots, m$.

$$3. \Delta_k^+ := \sum_{j=1}^m c_j \alpha_{jk} + c_{m+k}^+.$$

4. Если $\Delta_k^+ < 0$, то перейти к 9.

$$5. \Delta_k^- := - \sum_{j=1}^m c_j \alpha_{jk} - c_{m+k}^-.$$

6. Если $\Delta_k^- < 0$, то перейти к 13.

7. Если $k < n - m$, то $k := k + 1$, перейти к 3;

8. Конец (получено оптимальное решение, в котором базисные переменные равны соответственно $a_{j, n-m+1}$, а небазисные равны нулю).

9. Если не существует отрицательных отношений $\frac{a_{j, n-m+1}}{a_{jk}}$ ($j = 1, 2, \dots, m$, $k = 1, 2, \dots, n - m$), то конец (задача имеет неограниченное решение: переменную x_{m+k} можно неограниченно увеличивать, уменьшая значение целевой функции).

10. Среди строк, которым соответствует $\delta_j = 0$, найти номера r_1, r_2, \dots, r_k тех строк, у которых отношения $\frac{a_{j, n-m+1}}{a_{jk}}$ отрицательны и имеют максимальное значение.

11. $\delta_{r_1} := 1$, $\delta_{r_2} := 1$, $\delta_{r_1} := -1$,

$$\Delta_k^+ := \Delta_k^+ + \sum_{s=1}^k \alpha_{r_s k} (c_{r_s}^+ - c_{r_s}^-)$$

12. Если $\Delta_k^+ < 0$, то перейти к 9, иначе, перейти к 16.

13. Если не существует положительных отношений $\frac{a_{j/n-m+1}}{a_{jk}}$, то конец (получено неограниченное решение: переменную x_{m+k} можно неограниченно уменьшать, уменьшая значение целевой функции).

14. Среди строк, которым соответствует $b_j = 0$, найти номера r_1, r_2, \dots, r_l тех строк, у которых отношения положительны и имеют минимальное значение.

15. $b_{r_1} := 1, b_{r_2} := 1, \dots, b_{r_l} := 1,$

$$\Delta_k^- := \Delta_k^- + \sum_{i=1}^l a_{r_i} (c_{r_i}^+ - c_{r_i}^-).$$

16. Если $\Delta_k^- < 0$, то перейти к 14.

17. Ввести в базис свободную переменную x_{m+k} вместо переменной x_{r_i} , преобразовать матрицу $\|a_{ij}\|$ по следующим правилам:

а) $\gamma := a_{rk};$
 $\rho_i := a_{ri}$ для $i = 1, 2, \dots, n-m;$
 $\nu_j := a_{jk}$ для $j = 1, 2, \dots, m;$

б) $a_{ji} := a_{ji} - \frac{\nu_j \rho_i}{\gamma}$ для $j = 1, 2, \dots, m;$

в) $a_{ri} := -\frac{\rho_i}{\gamma}$ для $i = 1, 2, \dots, n-m+1;$

$$a_{jk} := \frac{\nu_j}{\gamma} \quad \text{для } j = 1, 2, \dots, m.$$

$$a_{rk} := \frac{1}{\gamma}.$$

18. Перейти к 2.

Двойственная задача

На практике часто встречается задача максимизации линейной функции

$$\sum_{j=1}^m b_j u_j$$

при двусторонних ограничениях [1, 2)

$$c_i^- < \sum_{j=1}^m a_{ij} u_j < c_i^+ \quad (i = 1, 2, \dots, n).$$

Легко показать, что она является двойственной к рассмотренной задаче и, следовательно, может быть решена с помощью описанного алгоритма.

Задача линейного программирования

Предлагаемый алгоритм можно применять для решения общей задачи линейного программирования [2, 3]

$$\min \sum_{i=1}^n p_i x_i$$

при ограничениях

$$a_{j1}x_1 + a_{j2}x_2 + \dots + a_{jn}x_n = b_j, \quad (j = 1, 2, \dots, m);$$
$$x_i \geq 0 \quad (i = 1, 2, \dots, n).$$

Для этого достаточно положить $c_i^+ = p_i$ и $c_i^- = -M$, где M — достаточно большое положительное число.

Особенно удобен этот алгоритм для решения вырожденных задач линейного программирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. Зойтендейк. Методы возможных направлений. ИЛ, 1963.
2. С. И. Зуховицкий, Л. И. Андеева. Линейное и выпуклое программирование. Изд-во «Наука», 1967.
3. Д. Б. Юдин, Е. Г. Гольштейн. Линейное программирование. Изд-во «Наука», 1968.

ЛИНЕЙНАЯ ЗАДАЧА СИНТЕЗА ОПТИМАЛЬНОЙ ПО ЭНЕРГОЗАТРАТАМ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРУЮЩИХ ОРГАНОВ В ШАХТНОЙ ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ СЕТИ

А. Г. Ефодкимов, Б. Г. Шеховцов

Харьков

Задача синтеза системы регулирующих органов при заданных расходах в μ хордах сети является задачей линейного программирования [1]. Ее решению посвящено довольно большое количество работ. В одних задачах решается методом перебора маршрутов [2, 3], в других — с помощью симплекс-метода решения задачи линейного программирования [4, 5].

В настоящей работе предлагается общий алгоритм решения, основанный на целенаправленном переборе деревьев, который учитывает специфику задачи, обусловленную ее сетевой структурой, и позволяет повысить сходимость ее решения с одновременным уменьшением занимаемого объема памяти цифровой вычислительной машины.

Математическая формулировка задачи

В соответствии с [4] линейная задача синтеза оптимальной системы регулирующих органов в шахтной вентиляционной сети формулируется следующим образом.

Определить значения аэродинамических сопротивлений дросселирующих устройств (пассивных регулирующих органов) r_{pj} и депрессии вентиляторов $h_r^{(a)}$, обращающих в минимум линейную форму

$$y = \sum_{j \in Q_1 \cup B_2} c_j r_{pj} = \sum_{j \in B_2^{(a)}} h_j^{(a)} q_j \quad (1)$$

и удовлетворяющих ограничениям

$$f_r = a_r r_{pr} + \sum_{j \in Q_1} b_{1,rj} a_j r_{pj} + H_r^{(e)} = 0 \quad (r \in B_2 / B_2^{(a)}); \quad (2)$$

$$f_r = a_r r_{pr} - h_r^{(a)} + \sum_{j \in Q_1} b_{1,rj} a_j r_{pj} + H_r^{(e)} = 0 \quad (r \in B_2^{(a)}); \quad (3)$$

$$r_{pj} > 0, \quad j \in Q_1 \cup B_2. \quad (4)$$

Здесь

$$c_j = |q_j|^{r+1} \quad j \in (Q_1 \cup B_2); \quad (5)$$

$$a_j = \text{sign } q_j |q_j|^r \quad j \in (Q_1 \cup B_2); \quad (6)$$

$$H_r^{(e)} = \text{sign } q_r r_r |q_r|^r + \sum_{j \in Q_1} b_{1,rj} \text{sign } q_j r_j |q_j|^r \quad r \in B_2, \quad (7)$$

где Q_1 — множество индексов ветвей дерева;

B_2 — множество индексов хорд;

$B_2^{(a)}$ — множество индексов ветвей дерева с активными источниками;

r_j и r_{pj} — соответственно аэродинамическое сопротивление j -й ветви и дросселирующего устройства этой ветви;

x_j и q_j — коэффициент турбулентности и расход воздуха j -й ветви;

$b_{1,rj}$ — элемент матрицы B_{21} для ветвей дерева;

$\text{sign } q_j$ — знак q_j ($\text{sign } q_j = 1$, если $q_j > 0$, $\text{sign } q_j = -1$, если $q_j < 0$).

Необходимые и достаточные условия для точки минимума

Приведенная математическая формулировка линейной задачи оптимального синтеза системы регулирующих органов в совокупности с понятиями переменных состояния и решения (зависимых и независимых переменных в соответствии с [6]), а также условий производных по переменным решения [1,6] позволяют

получить необходимые и достаточные условия для точки минимума задачи исследования:

$$\frac{\partial y}{\partial r_{pl}} > 0 \quad l \in Q_1 \cup B_2^{(a)}; \quad (8)$$

$$\frac{\partial y}{\partial r_{pl}} \cdot r_{pl} = 0 \quad l \in Q_2 \cup B_2^{(a)}, \quad (9)$$

где

$$\frac{\partial y}{\partial r_{pl}} = -\text{sign } q_l |q_l|^{s_l} \sum_{r \in B_2^{(a)}} b_{lr} q_r \quad l \in Q_1. \quad (10)$$

Здесь к переменным состояния отнесены r_{pr} ($r \in B_1 \setminus B_2^{(a)}$) и $r_{pr}^{(a)}$ ($r \in B_2^{(a)}$). При этом

$$\frac{\partial y}{\partial r_{pr}} = |q_r|^{s_r+1} > 0 \quad (r \in B_2^{(a)}) \quad (11)$$

в любой допустимой точке области задания Ω и, следовательно, в точке минимума

$$r_{pr} = 0 \quad (r \in B_2^{(a)}). \quad (12)$$

Дифференциальный алгоритм решения линейной задачи

Симплекс-метод решения задачи линейного программирования является дифференциальным алгоритмом, условные производные решения которого постоянны, т. е. не зависят от переменных решения. Последнее является следствием линейности функции цели и ограничений в виде равенств и приводит к тому, что оптимальное решение всегда находится в крайней точке множества допустимых решений, т. е. соответствует одному из опорных допустимых решений.

Опорное решение (допустимое или нет) представляет собой решение системы линейных уравнений относительно переменных состояния в предположении, что переменные решения равны нулю. Опорное решение называется допустимым, если все полученные переменные состояния неотрицательны, и недопустимым — в случае отрицательности хотя бы одного из них.

Алгоритм решения по симплекс-методу начинается с произвольного допустимого опорного решения и состоит из последовательности шагов, каждый из которых заканчивается переходом к новому опорному допустимому решению, где значение функции цели меньше (или, по крайней мере, равно), чем на предыдущем шаге. Итерационная процедура заканчивается по достижению опорного плана, в котором соблюдаются необходимые и достаточные условия для точки минимума.

На каждом шаге алгоритма анализируются значения производных решения (для симплекс-алгоритма взятых с обратным

знаком) и определяется переменная решения с максимальной по модулю отрицательной условной производной и переменная состояния, которая первой обратится в нуль в результате увеличения переменной решения. Затем осуществляется так называемая симплекс-процедура. В результате ее изменяемая на данном шаге переменная решения становится переменной состояния, а переменная состояния, принявшая нулевое значение — новой переменной решения.

Очевидно, что линейная задача синтеза системы регулируемых органов может быть решена на основе общих методов решения задачи линейного программирования, что, однако, не является эффективным, ибо в данном случае не будет учтена присущая этой задаче специфика, отражающая сетевую структуру задачи.

Выясним эту специфику на основе анализа системы линейных уравнений (2) и (3). Переменными решения нашей задачи являются дросселирующие устройства в ветвях дерева r_{pi} ($i \in Q_1$), а переменными состояния — дросселирующие устройства r_{pr} в хордах ($r \in B_2 \setminus B_2^{(a)}$) и активные источники $h_r^{(a)}$ ($r \in B_2^{(a)}$) (дросселирующие устройства r_{pr} ($r \in B_2^{(a)}$) в соответствии с выражением (12) из числа переменных можно исключить). Число линейных уравнений определяется количеством циклов μ (μ — цикломатическое число графа), а свободный член для каждого из уравнений ($-H_r^{(c)}$) есть ничто иное, как падение напора на аэродинамических сопротивлениях ветвей сети, входящих в цикл, соответствующий данному уравнению. Следовательно, опорное решение задачи исследования однозначно связано с деревом графа сети и опирающейся на него системой фундаментальных циклов.

Опорное решение будет допустимым, если ему соответствует система фундаментальных циклов, на которых (кроме циклов с вентиляторами) суммарное падение напора $H_r^{(c)}$ будет отрицательным. Физически это значит, что в хордах, образующих эти циклы, поставлены дросселирующие устройства

$$r_{pr} = - \frac{H_r^{(c)}}{\text{sign } q_r |q_r|^{r_r}} \quad (r \in B_2). \quad (13)$$

Цикл, образованный хордой r ($r \in B_2$), обозначим B_{or} . Если по какому-либо циклу B_{or} соответствующее $H_r^{(c)} > 0$, то это приводит к отрицательности r_{pr} , т. е. к нарушению ограничения (4). В таком случае опорное решение не является допустимым. Допустимое опорное решение будет оптимальным, если в нем выполняются условия (8) — (10).

Следовательно, дифференциальный алгоритм решения рассматриваемой линейной задачи должен состоять из двух этапов: поиска допустимого решения и поиска оптимального решения.

Каждое опорное решение (допустимое или нет) однозначно связано с деревом графа, а переход от одного опорного решения к другому при использовании симплекс-метода эквивалентен в нашей задаче переходу к новому дереву, отличающемуся от предыдущего лишь заменой хорды ветвью дерева, которые определяются в результате анализа соответствующих критериев. Эти критерии для итерации поиска допустимого решения несколько отличны от итерации поиска оптимального решения.

Переход от одного опорного решения к другому (эквивалентный переходу от одной симплекс-таблицы к другой при использовании симплекс-метода) одинаков на любом этапе решения и заключается в применении симплекс-процедуры к цикломатической матрице при использовании матричного способа представления графа сети или к множеству фундаментальных циклов B_0 при теоретико-множественном представлении [7]. В соответствии с этим представлением систему главных сечений и фундаментальных циклов для дерева графа можно представить в виде множества главных сечений Q_0 и множества фундаментальных циклов B_0 .

Множество главных сечений Q_0 состоит из $(v-1)$ -го подмножества Q_{0j} , элементами каждого из которых являются номера дуг графа, принадлежащие j -му главному сечению, (т. е. сечению, содержащему j -ю ветвь дерева), взятые со знаком «+», если направление дуги в сечении совпадает с направлением j -й ветви дерева, и со знаком «-» в противном случае. Элемент j -ведущий элемент подмножества Q_{0j} , принадлежит только этому подмножеству и однозначно его определяет.

Множество фундаментальных циклов B_0 состоит из μ подмножеств B_{0r} . Элементами каждого из них являются номера дуг графа, принадлежащие r циклу (т. е. циклу, содержащему r -ю хорду), взятые со знаком «+», если направление дуги в цикле совпадает с направлением r -й хорды, и со знаком «-» в противном случае. Элемент r -ведущий элемент B_{0r} , принадлежащий только этому подмножеству и однозначно его определяющий.

Для дерева {2, 3, 5, 6, 7} графа, приведенного на рис. 1, матрица главных сечений Q_0 и фундаментальных циклов B_0 и соответственно эквивалентные им множества Q_0 и B_0 выглядят следующим образом:

$$Q_0 = \begin{array}{c} \begin{array}{cccccccccc} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \\ \begin{array}{l} 1 \\ 0 \\ 1 \\ -1 \\ 0 \end{array} & \begin{array}{l} \boxed{1} \\ 0 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{array} & \begin{array}{l} 0 \\ \boxed{1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{array} & \begin{array}{l} 0 \\ 1 \\ -1 \\ 1 \\ 0 \end{array} & \begin{array}{l} 0 \\ 0 \\ \boxed{1} \\ 0 \\ 0 \end{array} & \begin{array}{l} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \boxed{1} \\ 0 \end{array} & \begin{array}{l} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \boxed{1} \end{array} & \begin{array}{l} 0 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{array} & \begin{array}{l} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \end{array} & \begin{array}{l} -1 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \\ -1 \end{array} \end{array} & Q_0 = \left\{ \begin{array}{l} \boxed{2} \ 1, \ -9, \\ \boxed{3} \ 4, \ -8, \\ \boxed{5} \ 1, \ -4, \ 8, \ -9, \\ \boxed{6} \ -1, \ 4, \\ \boxed{7} \ 8, \ -9 \end{array} \right\} \end{array}$$

$$B_* = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{matrix} & \begin{bmatrix} \boxed{1} & -1 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & \boxed{1} & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & -1 & \boxed{1} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & \boxed{1} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad B_0 = \left[\begin{matrix} \boxed{1} & -2 & -5 & 6 \\ \boxed{4} & -3 & 5 & -6 \\ \boxed{8} & 3 & -5 & -7 \\ \boxed{9} & 2 & 5 & 7 \end{matrix} \right].$$

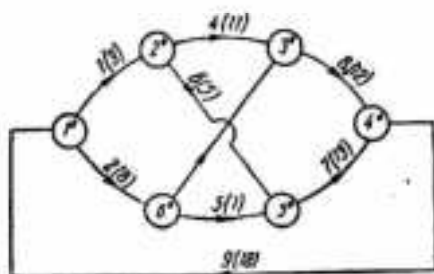


Рис. 1. Ориентированный граф сети.

Продемонстрируем процедуру симплекс—преобразования на примере графа рис. 1 при матричном и теоретико-множественном представлении элементов графа. Пусть первоначальное опорное решение соответствует дереву с ветвями {1, 2, 5, 7, 8} и связанной с этим деревом системой фундаментальных циклов, представленных в виде цикломатической матрицы

$$B_*^{(0)} = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 3 \\ 4 \\ 6 \\ 9 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 1 & -1 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

или множества фундаментальных циклов

$$B_0^{(0)} = \left[\begin{matrix} \boxed{3}, & -5, & -7, & 8 \\ \boxed{4}, & 1, & -2, & -5, & -7, & 8 \\ \boxed{5}, & 1, & -2, & -5 \\ \boxed{9}, & 2, & 5, & 7 \end{matrix} \right].$$

Проведенный анализ показал, что необходимо перейти к новому опорному решению в результате замены хорды 4 ветвью дерева 2, т. е. к дереву {1, 4, 5, 7, 8}. Симплекс—процедура для матрицы $B_*^{(0)}$ заключается в элементарных преобразованиях (например, Жордано—Гауссовы исключения) [8].

В результате такой процедуры матрица $B_2^{(0)}$ будет преобразована к $B_2^{(1)}$

$$B_2^{(1)} = \begin{array}{c|cccccccc} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \\ \hline 3 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 2 & -1 & 1 & 0 & -1 & 1 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 6 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 1 & -1 & 0 \\ 9 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{array}$$

Эквивалентный алгоритм симплекс—преобразования при теоретико-множественном представлении графа заключается в следующем.

В подмножестве B_{0r} , образованном исключаемой хордой r (4 в примере), ведущим элементом становится исключаемая ветвь дерева i (2 в примере), а все подмножество предварительно подвергается операции «реверс», если эта ветвь дерева имела отрицательный знак в этом подмножестве. Все остальные подмножества B_0 , содержащие элемент, соответствующий исключаемой ветви дерева, преобразуются путем операции «ориентированная симметрическая разность» с подмножеством B_{0r} , предварительно подвергнутому операции «реверс», если знак этого элемента в преобразуемом подмножестве положителен. Применяя данный алгоритм к множеству $B_0^{(0)}$, получим

$$B_0^{(1)} = \left[\left[\underline{3} \right], -5, -7, 8 \right] \\ \left[\underline{2} \right], -1, -4, 5, 7, -8 \right] \\ \left[\underline{6} \right], -4, 7, -8 \right] \\ \left[\underline{9} \right], 1, 4, 8 \right]$$

В дальнейшем при рассмотрении алгоритмов поиска допустимого и оптимального решения будем использовать теоретико-множественное представление элементов графа как более эффективное по объему вычислений и занимаемой памяти.

Поиск допустимого решения

Анализ поиска допустимого решения рассматриваемой задачи при использовании симплекс—метода с искусственным базисом позволяет получить простые критерии для определения ветви дерева и хорды, которые меняются ролями при переходе к новому дереву.

Такой ветвью будет ветвь дерева k , принадлежащая хотя бы одному циклу B_{0r}^+ , которой соответствует максимальное положительное число

$$\delta_k = \text{sign } q_k |q_k|^n \sum_{i \in Q_k^+} \text{sign } j \quad (i \in Q_k^+), \quad (14)$$

$$\max_{k \in Q_1^+} \delta_k. \quad (15)$$

Здесь B_0^+ — цикл, не содержащий активного источника, для которого $H_i^{(n)} > 0$, совокупность таких циклов образует множество $B_0^+ = B_1^+ \cup B_2^+$; Q_1^+ — множество ветвей дерева, принадлежащих B_0^+ ; Q_{2i}^+ — подмножество элементов множества Q_{2i} ($i \in Q_1^+$), содержащее хорды, принадлежащие Q_{2i} и B_2^+ одновременно; $\text{sign } j$ — знак j -й хорды ($\text{sign } j = 1$, если $j \in Q_{2i}^{++}$, т. е. j -я хорда входит в подмножество Q_{2i}^+ со знаком «+»); $\text{sign } j = -1$, если $j \in Q_{2i}^{+-}$, т. е. j -я хорда входит в подмножество Q_{2i}^+ со знаком «-»).

Множество циклов, для которых $H_i^{(n)} < 0$, обозначим $B_0^- = B_1^- \cup B_2^-$. Объединение множеств B_0^+ и B_0^- обозначим B_0 , т. е. $B_0 = B_1 \cup B_2 = B_0^+ \cup B_0^-$, где $B_1 = B_1^+ \cup B_1^-$ и $B_2 = B_2^+ \cup B_2^-$.

Что же касается преобразуемой хорды, то в соответствии с симплекс-методом решения задачи с искусственным базисом ей будет соответствовать хорда $l \in Q_{2k}^{++} \cup Q_{2k}^{+-}$, удовлетворяющая условию

$$\min_{Q_{2k}^{++} \cup Q_{2k}^{+-}} |H_l^{(n)}|, \quad (16)$$

где Q_{2i}^- — подмножество, содержащее хорды, которые принадлежат B_2^- и Q_{2i} одновременно; $Q_{2i}^{--} \subset Q_{2i}^-$ — подмножество отрицательных элементов Q_{2i}^- ; Q_{2k}^{++} — подмножество положительных элементов Q_{2k}^+ .

Учитывая сетевую специфику задачи, процесс сходимости поиска допустимого решения можно существенно ускорить, несколько модифицировав критерии определения направляющей ветви дерева и хорды.

Алгоритм определения направляющей ветви дерева

Формируется подмножество ветвей дерева $Q_1^{++} \subset Q_1^+$, элементам i которого соответствует положительное δ_i (14). Если $Q_1^{++} = \emptyset$, то допустимого решения не существует. При $Q_1^{++} \neq \emptyset$ в качестве направляющей ветви дерева выберем ветвь $k \in Q_1^{++}$. Для нее

$$\max_{k \in Q_1^{++}} \text{card } Q_{2k}^{++}. \quad (17)$$

В случае, если несколько ветвей дерева удовлетворяют условию (17), необходимо выбирать ту из них, которой соответствует максимум δ , т. е. для которой справедливо соотношение

$$\max_{m \in M} \delta_m, \quad (18)$$

где $M \subset Q_1^{++}$ — это подмножество ветвей дерева, у которых одинаковое $\text{card } Q_{2k}^{++}$; элемент $m \in M$ соответствует номеру ветви дерева, удовлетворяющему условию (17).

Алгоритм выбора направляющей хорды

Среди хорд, принадлежащих подмножеству Q_{2k}^- выбирается такая хорда t , для цикла которой $H_t^{(k)}$ минимально, т. е. имеет место соотношение

$$\min_{t \in Q_{2k}^-} |H_t^{(k)}|. \quad (19)$$

Если $Q_{2k}^- = \emptyset$, то в качестве направляющей выбирается хорда $t \in Q_{2k}^{++}$, для которой $H_t^{(k)}$ максимально, т. е. имеет место соотношение

$$\max_{t \in Q_{2k}^{++}} H_t^{(k)}. \quad (20)$$

Итерационный процесс поиска допустимого опорного решения заканчивается с выбором такого дерева, для которого множество $B_0^+ = \emptyset$. В этом случае необходимо переходить к поиску оптимального решения.

Алгоритм поиска оптимального решения

Выбор направляющей ветви при поиске оптимального решения, эквивалентный выбору направляющего столбца при симплекс-алгоритме, осуществляется из условия

$$\max_{i \in Q} \left(-\frac{b_{ij}}{a_{ij}} \right), \quad (21)$$

или с учетом (9) это выражение примет вид

$$\max_{i \in Q} \text{sign } q_i |q_i|^{1/2} \sum_{j \in Q_2^{(k)}} \text{sign } j \cdot q_{ij}. \quad (22)$$

где $Q_2^{(k)}$ — подмножество $Q_2^{(k)}$, содержащее только хорды с активными источниками.

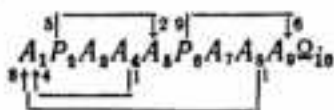
Хорда, эквивалентная определению направляющей строки, выбирается из условия

$$\min_{r \in Q_{2k}} |H_r^{(t)}| \quad (23)$$

Рассмотренные алгоритмы совместно с критериями (8) и (9) позволяют получить компактную вычислительную процедуру решения линейной задачи синтеза системы регулирующих органов в шахтной вентиляционной сети.

Операторная схема вычислительной процедуры

Исходная информация для вычислений задается в виде произвольного дерева, ветви которого не содержат активных источников, и соответствующих этому дереву множеств B_0 и $B_0^{(0)}$. Операторная схема вычислительной процедуры имеет вид



Здесь A_i — формирование подмножеств B_i^+ , B_i^- и $B_i^{(0)}$ и вычисление $H_r^{(t)}$ (по всем $r \in B_i$) по формуле

$$H_r^{(t)} = \sum_{i \in B_i} \text{sign } j \cdot \text{sign } q_{ij} r_{ij} |q_{ij}|^{i|j|}, \quad (24)$$

эквивалентной (7). P_2 — анализ на допустимость опорного решения. Если $B_i^+ = \emptyset$, то переход к оператору A_5 . Если $B_i^+ \neq \emptyset$, то переход к следующему оператору. A_3 — формирование множеств Q_1 и Q_2 и определение направляющей ветви дерева k на текущей итерации поиска допустимого решения в соответствии с рассмотренным выше алгоритмом, т. е. формирование подмножества Q_i^+ и вычисление по формуле (14) соответствующих ему чисел $\delta_i \times \times (i \in Q_i^+)$; выделение из Q_i^+ подмножества Q_i^{++} , формирование подмножеств $Q_{2i}^{++} (i \in Q_i^{++})$ и определение их кардинальных чисел; формирование подмножества $M \subset Q_i^{++}$ и анализ $\text{card } M$; если $\text{card } M = 1$, то $k = m$; если $\text{card } M > 1$, то $k = m \in M$, для которого выполняется условие (18). A_4 — определение направляющей хорды l на текущей итерации поиска допустимого решения в соответствии с рассмотренным выше алгоритмом и переход к оператору A_1 для вычислений следующей итерации. A_8 — формирование под-

множество $Q_2^{(a)*}$ и вычисление $\frac{\partial y}{\partial r_{pi}}$ ($i \in Q_1$) в соответствии с выражением

$$\frac{\partial y}{\partial r_{pi}} = -\text{sign } q_i |q_i|^{n_i} \sum_{h \in Q_2^{(a)*}} \text{sign } l \cdot |q_{lh}| \quad (i \in Q_1), \quad (24')$$

эквивалентным (10). P_6 — анализ на оптимальность решения; если $-\frac{\partial y}{\partial r_{pi}} > 0$ (для всех $i \in Q_1$), то текущее опорное допустимое решение оптимально, переход к оператору A_6 ; если $-\frac{\partial y}{\partial r_{pi}} < 0$ хотя бы для одного $i \in Q_1$, переход к следующему оператору. A_7 — определение направляющей ветви дерева на текущей итерации поиска оптимального решения в соответствии с критерием (22). A_8 — формирование подмножества Q_{2k} , определение направляющей хорды l в соответствии с критерием (23) и переход к A_1 на повторный цикл вычислений. A_9 — вычисление r_{pr} ($r \in B_2^-$) и $h_r^{(a)} \times \times$ ($r \in B_2^{(a)}$) по формулам

$$r_{pr} = -\frac{H_r^{(a)}}{\text{sign } q_r |q_r|^{n_r}} \quad (r \in B_2^-), \quad (25)$$

$$h_r^{(a)} = H_r^{(a)}; \quad (26)$$

Ω_{10} — выдача результата и останов.

Пример. Продемонстрируем решение линейной задачи синтеза

системы регулирующих органов для вентиляционной сети, граф которой и требуемое воздухо-распределение приведено на рис. 2; аэродинамическое сопротивление всех ветвей $r_{lh} = 1$, $\kappa_{lh} = 2$. В сети имеется два взаимосвязанных регулируемых источника, а ее граф характеризуется следующими числами: $e = 13$; $v = 8$; $\mu = 6$. В качестве произвольного начального дерева, соответствующего произвольному опорному решению выбираем дерево {3, 4, 6, 8, 10, 12, 13}. Здесь e и v соответ-

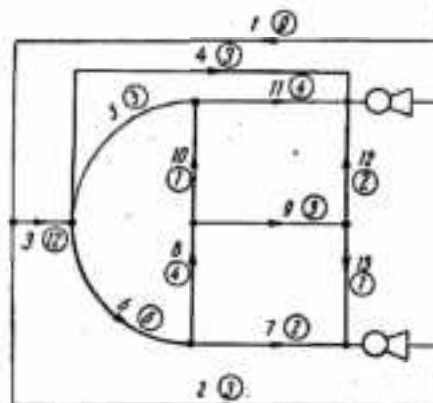


Рис. 2. Пример шахтной вентиляционной сети.

венно число дуг и вершин графа. Процесс нахождения оптимального решения осуществляется

в соответствии с рассмотренной выше вычислительной процедурой. Сформируем множество фундаментальных циклов B_0 . Для дан-

ного примера множество B_0 , разбитое на соответствующие подмножества $B_1, B_2, B_1^+, B_1^-, B_2^+, B_2^-, B_1^{(a)}, B_2^{(a)}$, приведено в табл. 1.

Из выражения (24) находим $H_r^{(r)}$ (табл. 1) и определяем, что по трем циклам B_{0r} ($r = 7, 8, 9$) оно положительно, т. е. по этим циклам нарушена допустимость решения ($B_{0r}^+ \neq \emptyset$).

Для поиска допустимого решения из множества фундаментальных циклов формируем множество главных сечений Q , разбитое на соответствующие подмножества $Q_1, Q_2, Q_1^+, Q_1^{++}, Q_1^{+-}, Q_2^+, Q_2^{++}, Q_2^{+-}, Q_2^-, Q_2^{(r)}, Q_2^{(a)+}, Q_2^{(a)-}$ (табл. 2). Вычисляя в соответствии с (14) значения δ_i ($i \in Q_1^+$), находим, что в качестве направляющей выбираем ветвь 4, так как множество $Q_1^{++} = \{4\}$ и состоит из одного элемента.

Поскольку $Q_{2,4}^- = \emptyset$, то в качестве направляющей хорды выбираем хорду $11 \in Q_{2,4}^{+-} = \{7, 9, 11\}$, для которой согласно (20) максимальное $H_{11}^{(r)} = 60$.

Таким образом, поменяв ветвь 4 и хорду 11 местами, получим новое дерево $\{3, 6, 8, 10, 11, 12, 13\}$, которое соответствует новому опорному решению. Сформировав новое множество фундаментальных циклов B_0 и определив $H_r^{(r)}$ (табл. 3), видим, что $B_2^+ = \emptyset$, т. е. дерево $\{3, 6, 8, 10, 11, 12, 13\}$ соответствует опорному допустимому решению, для которого $y = 376$.

Для поиска оптимального решения из множества фундаментальных циклов B_0 , соответствующих опорному допустимому решению, формируем множество главных сечений Q (табл. 4). Из выражения (24) вычисляем $-\frac{\partial y}{\partial r_{pi}}$ ($i \in Q_1 = \{3, 6, 8, 10, 11, 12, 13\}$) и проверяем на оптимальность решения согласно условию (8), которое нарушено по r_{p12} . В качестве направляющей ветви выбираем ветвь 12, а в качестве направляющей — хорду 9, для которой соблюдается условие (23). В результате получим новое дерево $\{3, 6, 8, 9, 10, 11, 13\}$, соответствующее новому опорному решению. Согласно табл. 5 оно является допустимым. Из анализа табл. 6 делаем заключение, что это опорное допустимое решение является оптимальным.

Процесс решения заканчивается определением по выражениям (25) и (26) соответствующих дросселирующих сопротивлений и депрессии активных источников: $r_{p4} = 6,67$; $r_{p5} = 4,89$; $r_{p7} = 5,5$; $r_{p12} = 1$; $h_1^{(a)} = 294$; $h_2^{(a)} = 215$. При этом $y = 368$.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Г. Евдокимов, Б. Г. Шеховцов. Об одной задаче математического программирования. «Приборы и системы автоматизации», вып. 18, Харьков. Изд-во ХГУ, 1971.

Таблица 1

B_2	B_1		$H_i^{(e)}$
	B_1^+	B_1^-	
B_2^+	B_1^{++}	B_1^{+-}	
7	6, 12	-4, -13	+34
9	6, 8, 12	-4	+56
11	6, 8, 10	-4	+60
B_2^-	B_1^-		
5	B_1^+	B_1^-	
		-6, -8, -10	-44
$B_2^{(e)}$	$B_1^{(e)}$		
1	B_1^{++}	B_1^{+-}	+234
2	3, 4	-12	+159
	3, 4, 13		

Таблица 2

Q_1	Q_2					δ_i
	Q_2^+		Q_2^-		$Q_2^{(e)}$	
Q_1^+	Q_2^{++}	Q_2^{+-}	Q_2^{--}	Q_2^{+}	Q_2^{-}	$Q_2^{(e)}$
4	7, 9, 11					-1, -2 +0
Q_1^-						
3						-1, -2 -288
6				5	-7, -9, -11	-72
8				5	-9, -11	-16
12					-7, -9	-4
10				5	-11	0
13		7				0
Q_1/Q_1^+	$Q_2/Q_2^+ \cup Q_2^- \cup Q_2^{(e)}$					

Таблица 3

B_2	B_1		$M_1^{(e)}$
	B_1^+	B_1^-	
4		-6, -8, -10, -11	-60
5		-6, -8, -10	-44
7	12	-8, -10, -11, -13	-20
9	12	-10, -11	-4
$B_2^{(e)}$	$B_1^{(e)}$		
	$B_1^{(e)+}$	$B_1^{(e)-}$	
1	3, 6, 8, 10, 11		+294
2	3, 6, 8, 10, 11, 13	-12	+219

Таблица 4

Q_1	Q_2				$Q_3^{(e)}$	$-\frac{By}{kr^2}$
	Q_2^-		Q_2^+			
	Q_2^+	Q_2^-	$Q_2^{(e)+}$	$Q_2^{(e)-}$		
3					-1, -2	-1726
6	4, 5				-1, -2	-432
8	4, 5, 7				-1, -2	-192
10	4, 5, 7, 9				-1, -2	-12
11	4, 7, 9				-1, -2	-192
12			-7, -9	-2		+12
13	7				-2	-3
$Q_1 \setminus Q_1^{(e)}$	$Q_2 \setminus Q_2^{(e)} \cup Q_2^-$					

Таблица 5

B_2	B_1		$H_1^{(a)}$
	B_1^+	B_1^-	
4		-6, -8, -10, -11	-60
5		-6, -8, -10	-44
7		-8, -9, -13	-22
12	9	-10, -11	-4
$B_2^{(a)}$	$B_1^{(a)}$		
	$B_1^{(a)+}$	$B_1^{(a)-}$	
1	3, 6, 8, 10, 11		+294
2	3, 6, 8, 9, 13		+215

Таблица 6

Q_1	Q_2				$-\frac{\partial y}{\partial r_{pi}}$
	Q_2^-		Q_2^+		
	Q_2^+	Q_2^-	$Q_2^{(a)+}$	$Q_2^{(a)-}$	
3				-1, -2	-1728
6	4, 5			-1, -2	-432
8	4, 5, 7			-1, -2	-192
9	7	-12		-2	-27
10	4, 5, 12			-1	-9
11	4, 12			-1	-144
13	7			-2	-3
$Q_1 \setminus Q_1^{(a)}$	$Q_2 \setminus Q_2^{(a)} \cup Q_2^-$				

2. Ф. А. Абрамов, Б. М. Торговников, В. И. Вихров, В. М. Каганер, А. В. Курман. Расчет принудительного распределения воздуха в вентиляционной сети шахты с помощью ЭВМ. «Уголь», № 12, Изд-во «Недра», 1964.

3. А. Д. Багриновский. Равномерное распределение воздуха в диагональных соединениях горных выработок. «Горный журнал», № 5, 1961.

4. А. Г. Евдокимов, В. Д. Яловкин. Применение линейного программирования для решения некоторых задач по оптимальному управлению проветриванием шахт. «Проектирование и строительство угольных предприятий», № 3, 1966.

5. С. Цой, С. И. Петрович, С. М. Цхай. Применение линейного программирования для определения оптимального распределения воздуха. Вестник АН Кав. ССР, № 8, 1964.

6. D. I. Wilde, C. S. Beightler. Foundations of Optimization, Prentice-Hall, IWC, 1967.

7. A. G. Ievdokimov. A theory of the solution of steady state network problems with apesial reference to mine ventilation networks. International Journal of numerical methods in engineering, vol. 1, 279—299, 1969.

8. С. И. Зуховицкий, Л. И. Авдеева. Линейное и выпуклое программирование. Изд-во «Наука», 1964.

О СИСТЕМЕ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ВОДОРАСПРЕДЕЛЕНИЕМ

А. А. Волков, Э. Н. Рыбников
Харьков

Интенсивное развитие и благоустройство современных городов приводят к усложнению водопроводных систем и режимов их работы. Для повышения экономичности и надежности при эксплуатации таких систем и для наилучшего удовлетворения непрерывно растущих потребностей в водоснабжении требуется разработка и исследование методов и систем оптимального управления потокораспределением при использовании ЦВМ.

Систему управления водораспределением можно представить в виде блок-схемы, показанной на рисунке, где A — управляющая система, которая может представлять собой, например, управляющую цифровую вычислительную машину; B — управляемая система (комплекс водопроводных сооружений).

Состояние управляемой системы — водопроводной сети в общем случае определяется:

1) состоянием потокораспределения в сети, т. е. вектором \bar{q} расходов в сети;

2) состоянием параметров (гидравлических сопротивлений S_i^l , S_j^r и коэффициентов нелинейности n_i^l , n_j^r) участков водопроводной сети;

3) состоянием регулирующих органов в сети, т. е. вектором \bar{F} .

Под воздействием возмущений \bar{Z} , которые носят случайный характер (выпадение солей жесткости из воды, коррозионное действие воды на стенки труб, заносы, засорение и т. д.), параметры участков сети могут с течением времени изменяться.

Вследствие этого параметры участков водопроводной сети необходимо периодически уточнять. При известном состоянии координат регулирующих органов состояние потокораспределения и состояния участков водопроводной сети полностью определяется вектором $\bar{W} = (\bar{q}, \bar{h})$. Поскольку потери напора на участках

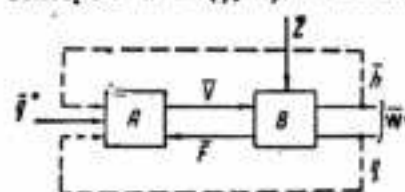


Рис. 1.

сети h_A^i , h_B^j и установившиеся значения расходов в них q_j^i функционально связаны между собой и эта функциональная связь включает в себя значения гидравлических сопротивлений S_j^i , S_j^j и коэффициенты нелинейности n_j^i , n_j^j , представляется возможным при известных значениях

вектора \bar{F} координат регулирующих органов и вектора $\bar{W} = (\bar{q}, \bar{h})$ определить неизвестные значения S_j^i , S_j^j или n_j^i , n_j^j , т. е. уточнить состояние параметров участков водопроводной сети при различных режимах водопотребления. При уточнении упомянутых параметров может быть применен алгоритм, аналогичный приведенному в [1].

Область изменения вектора \bar{q} в процессе управления строго ограничена как режимами водопотребления, так и технической реализуемостью управления. Отдельные составляющие вектора \bar{q} ограничиваются неравенствами

$$q_{i_{\min}} < q_i < q_{i_{\max}} \quad (1)$$

Таким образом, изменение вектора \bar{q} ограничивается допустимой областью

$$\bar{q} \in \lambda(\bar{q}) \quad (2)$$

Вероятностное изменение вектора \bar{q}^* требуемых расходов в сети образует некоторую область управления — $\Omega(\bar{q}^*)$. Поэтому для любого \bar{q}^* справедливо соотношение

$$\bar{q}^* \in \Omega(\bar{q}^*) \quad (3)$$

и всегда соблюдается условие

$$\Omega(\bar{q}^*) \subseteq \lambda(\bar{q}) \quad (4)$$

Существует область управляемости $\Omega(\bar{q})$, характеризующая техническую возможность управления вектором \bar{q} при соблюдении ограничивающих условий.

$$\bar{q} \in \Omega(\bar{q}). \quad (5)$$

Очевидно, что

$$\Omega(\bar{q}^*) \subseteq \Omega(\bar{q}) \quad (6)$$

или

$$\Omega(\bar{q}^*) \subseteq \lambda(\bar{q}) \cap \Omega(\bar{q}). \quad (7)$$

Условие (7) определяет реализуемость закона управления $\bar{q}^* \in \Omega(\bar{q}^*)$.

Область управляемости $\Omega(\bar{q})$ может в определенных пределах целенаправленно изменяться, что необходимо учитывать при создании системы оптимального управления водораспределением. Она существенно зависит от допустимой области $\Omega(\bar{F})$ изменения вектора \bar{F} координат регулирующих органов и их расположения в сети.

Существует условие

$$\bar{F} \in \Omega(\bar{F}). \quad (8)$$

Отдельные составляющие вектора \bar{F} ограничены неравенствами

$$\omega_{i\min} < \omega_i < \omega_{i\max} \quad (9)$$

(ω_i — число оборотов активного регулирующего органа). Область управляемости при заданных условиях (8), (9) может быть найдена путем решения определенным образом сформулированной задачи дискретного моделирования установившихся процессов потокораспределения в водопроводной сети [2].

Вектор управления состоянием регулирующих органов в сети вырабатывается управляющей системой A (рис. 1). Он является допустимым управлением, если соответствующий ему вектор \bar{F} координат регулирующих органов обеспечивает требуемое значение вектора

$$\bar{q} = \bar{q}^* \quad (10)$$

управляемых переменных при соблюдении ограничивающих условий (2), (3) и удовлетворении уравнениям системы

$$f(\bar{q}, \bar{h}, \bar{F}) = 0; \quad (11)$$

$$f(\bar{q}, \bar{h}, \bar{F}) > \bar{c}. \quad (11')$$

Допустимое управление \bar{V} называется оптимальным, если оно обеспечивает минимизацию критерия оптимальности системы.

В качестве критерия оптимальности могут быть приняты суммарные по системе эксплуатационные расходы, которые зависят от стоимости воды и стоимости электроэнергии. Критерий оптимальности в этом случае можно представить в виде функционала

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_s(\bar{h}^{(a)}, \bar{q}) + \mathcal{E}_B(\bar{q}) = \mathcal{E}_s(\bar{h}, \bar{h}^c, \bar{q}) + \mathcal{E}_B(\bar{q}), \quad (12)$$

где $\bar{h}^{(a)}$ — вектор напоров источников питания;

\bar{h} — вектор падений напоров на участках сети;

\bar{h}^c — вектор свободных напоров в узлах сети.

При оптимальном управлении выполняется условие (10) и критерий оптимальности (12) приобретает минимальное значение:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{\min} &= \min_{\bar{F} \in \mathcal{F}} [\mathcal{E}_s(\bar{h}^{(a)}, \bar{q}^*) + \mathcal{E}_B(\bar{q}^*)] = \\ &= \min_{\bar{F} \in \mathcal{F}} [\mathcal{E}_s(\bar{h}, \bar{h}^c, \bar{q}^*) + \mathcal{E}_B(\bar{q}^*)]. \end{aligned} \quad (13)$$

Считаем, что вектор \bar{F}^* оптимального состояния регулируемых органов всегда однозначно соответствует вектору \bar{V}^* оптимального управления водораспределением в сети.

Путем минимизации функционала (13) при соблюдении ограничивающих условий (3), (7) и (11) находятся значения этих векторов. Данная задача представляет собой в общем случае задачу математического программирования.

При оптимальном управлении водораспределением иногда требуется управлять конечными значениями расходов не во всех независимых по расходу базисных ветвях (связях графа), а лишь в части из них. В остальных базисных ветвях сети потоки могут либо ограничиваться допустимыми пределами их изменения, либо вообще не ограничиваться. В этом случае отсутствует полная информация о потокораспределении в сети. Вследствие этого задача синтеза оптимального управления потокораспределением в общем виде формулируется как задача нелинейного программирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. И., Лариков, Э. Н. Рыбников. Уточнение параметров шахтных вентиляционных сетей при диспетчерском управлении с применением ЦВМ. ЦНИИТЭИ Угля, серия II, карточка № 72, 1967.

2. Э. Н. Рыбников. Дискретное моделирование на ЦВМ процессов потокораспределения в водопроводных сетях. Научно-техническая информация. «Межотраслевые вопросы строительства (отечественный опыт)», № 6, ЦИНИС, М., 1968.

ОБ ОДНОМ ЭВРИСТИЧЕСКОМ ПОДХОДЕ К ЗАДАЧЕ ВЫРАВНИВАНИЯ РЕСУРСОВ

В. А. Забродский, Б. Л. Замков, В. И. Уберман

Харьков

Введение платы за фонды оказывает положительное влияние на их использование. В этой связи становится актуальной проблема устранения диспропорции в использовании различных групп основных производственных фондов. Решить ее можно в результате выравнивания ресурсов, например, посредством итерационной процедуры по компонентам вектора, образованного всеми различными видами ресурсов (элементами множества ресурсов R) при рассмотрении их в произвольно фиксированном порядке — вектора ресурсов \vec{R} . Указанный итеративный процесс является целенаправленным и аппроксимирует такое значение \vec{R}^* вектора \vec{R} , при котором можно получить наибольший доход I^* . Выравнивание ресурсов производится только в том случае, когда существует непустая допустимая область Ω_R изменения \vec{R} . Изменить компоненты $r \in R$ можно путем разработки и внедрения целого ряда мероприятий, таких, как приращение (положительное или отрицательное) парка оборудования, модернизация, рациональная планировка оборудования и т. д.

Введем в рассмотрение множества A всех различных видов мероприятий, которые могут быть использованы при выравнивании ресурсов. Тогда i -я итерация ($i = 1, 2, \dots$) процесса выравнивания возможна в результате реализации некоторого подмножества $A_i \subseteq A$. Последовательность $\langle A_i \rangle = \vec{A}$ определяется (вообще говоря, не взаимно однозначно) путем выравнивания ресурсов, т. е. $\vec{R}_0, \vec{R}_1, \dots, \vec{R}_i, \dots, \vec{R}_n$. Каждый путь характеризуется следующим показателем:

$$\frac{1}{n} \left\| \vec{R}^* - \vec{R}_n \right\|.$$

Эффективным путем выравнивания ресурсов будем считать такой, на котором достигается

$$\min \left[\frac{1}{n} \left\| \vec{R}^* - \vec{R}_n \right\| \right].$$

В [1] была описана постановка задачи выравнивания ресурсов, которую можно представить в следующем виде:

$$\max_i I_i, \quad (1)$$

$$I_i = \left[\sum_{k=1}^g c_k^i x_k^i - P_i + \psi \left(E - \sum_{j=1}^{m-1} E^j \right) \right];$$

$$E_i^j = \sum_{a \in A_i} y_i^a < E - \sum_{j=1}^{i-1} E^j; \quad (j = 1, 2, \dots, m) \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^g b_{jk} x_k^i < r_{j-1}^i + \mu_j^i r_{j-1}^i;$$

$$\beta^{k-} < x_k^i < \beta^{k+} \quad (k = 1, 2, \dots, g);$$

$$\mu_j^- < \mu_j^i < \mu_j^+ \quad (j = 1, 2, \dots, m);$$

$$\mu_j^i \begin{cases} = 0, & \text{если } u_j \neq \max_i u_j, \\ & | \\ > 0, & \text{если } u_j = \max_i u_j, \end{cases} \quad (3)$$

- где I_i — условный доход на i -й итерации выравнивания;
 c_k^i — доход от реализации единицы изделия k -го типа с учетом изменения себестоимости в процессе выравнивания ресурсов, т. е. $c_k^i = f(y_i^a)$;
 x_k^i — количество изделий k -го типа, которое окажется возможным выпустить после реализации i -й итерации процесса выравнивания;
 P_i — плата за пользование фондами ($P_i = \varphi(y_i^a)$);
 E_i^j — затраты на i -й итерации выравнивания ресурсов;
 Y_i^a — объем затрат, связанных с внедрением элемента $a \in A_i$;
 E — допустимый объем затрат на весь процесс выравнивания ресурсов;
 b_{jk} — расход ресурсов j -го вида (j -й компоненты) на изготовление изделия k -го типа;
 r_{j-1}^i — j -я компонента вектора \bar{R}_{i-1} ;
 μ_j^i — коэффициент, учитывающий прирост r_j^i на i -й итерации;
 μ_j^-, μ_j^+ — нижнее и верхнее ограничения по дополнительному приросту ресурсов;
 β^{k-}, β^{k+} — ограничения на выпуск изделия k -го типа;
 u_j — двойственная оценка, соответствующая r_j^i .

Условие (2) является ограничением, накладываемым на длину пути выравнивания, т. е. на максимальное значение n . Условия (3) определяют допустимые области изменения x_k^i, μ_j^i, r_j^i . Функции f, φ, ψ сложны и пока не могут быть записаны в явном виде.

Предполагается далее, что при нахождении максимума целевой функции (1) берется также и $\max_{A_i < A}$ этой же функции. Но

так как зависимость I_i от $a \in A$ пока не установлена, то в записи (1) эта зависимость не фигурирует. В более общем виде целевая функция (1) может быть записана как

$$\max_{i, A_i \in A} I_i \quad (4)$$

при указанных ограничениях (2)—(3).

Таким образом, задача сводится к отысканию такого вектора \bar{A} , который удовлетворяет (1) при условиях (2)—(3). Но реализация каждой компоненты $a \in A$ связана с затратами y_i^a , влияние которых на (1) по указанным причинам учесть невозможно. Поэтому решить задачу (1)—(3) обычными методами математического программирования трудно.

Рассмотрим один эвристический подход к определению компонент $a \in A$ вектора \bar{A} , заключающийся в использовании экспертных оценок аналогично [2], но в более узком плане. Его особенностью является моделирование задачи (1)—(3) экспертами на основе «пред-программирования», причем решение будет получено в первичных переменных (т. е. в виде вектора $\bar{A} = \langle A_i \rangle$), которые в запись задачи (1)—(3) непосредственно не входят.

Предполагается, что процесс решения осуществляется последовательно «машинной» и экспертами, причем для получения решения между ними необходим обмен информацией. «Машина» определяет сам факт наличия «узкого места» в векторе ресурсов \bar{R} , т. е. указывает одну из его компонент $r \in R$, которая должна участвовать на i -й итерации процесса выравнивания. Это происходит путем решения упрощенной задачи

$$\max I_i \\ I_i = \sum_{j=1}^q c_{i-1}^j x_i^j - P_{i-1}$$

при ограничении (3), в результате которого получим r_i^j и приращение $\Delta r_{i-1}^j = \mu_j^i r_{i-1}^j$. По этим данным эксперты проводят «моделирование» задачи (1) при ограничении (2) и определяют квазиградиент дохода по $a \in A$. При этом можно использовать следующую методичку.

Составляется матрица экспертных оценок (таблица), элементами α_{ae} которой являются показатели предпочтительности проведения мероприятий $a \in A^0$ по заранее фиксированной системе оценок $e \in E$ (например, десятибалльной). Строки последней соответствуют компонентам $a \in A_i^0$, а столбцы — одной из оценок $e \in E$, где A^0 — нулевое приближение подмножества A_i . Элементами матрицы являются экспертные веса оценок α_{ae} , т. е. коли-

чество α экспертов, указавших данную оценку e мероприятию a . Предполагается, что ни один эксперт не может воздержаться от участия в процессе оценивания, т. е.

$$\sum_{e \in E} \alpha_{ae} = \gamma,$$

где γ — число привлекаемых экспертов.

Шкала оценок Вид мероприятия	l_{e_1}	l_{e_2}	l_{e_n}	Коллективная оценка
a_{r_1}	$\alpha_{a_{r_1} l_{e_1}}$	$\alpha_{a_{r_1} l_{e_2}}$	$\alpha_{a_{r_1} l_{e_n}}$	$\alpha_{a_{r_1}}$
a_{r_2}	$\alpha_{a_{r_2} l_{e_1}}$	$\alpha_{a_{r_2} l_{e_2}}$	$\alpha_{a_{r_2} l_{e_n}}$	$\alpha_{a_{r_2}}$
a_{r_m}	$\alpha_{a_{r_m} l_{e_1}}$	$\alpha_{a_{r_m} l_{e_2}}$	$\alpha_{a_{r_m} l_{e_n}}$	$\alpha_{a_{r_m}}$

При анализе матрицы экспертных оценок заполняется таблица «коллективных» оценок. Каждая «коллективная» оценка α_a определяется выражением

$$\alpha_a = \sum_{e \in E} \alpha_{ae} e$$

и представляет собой одну из компонент указанного выше квази-градиента целевой функции (1) на i -й итерации процесса выравнивания. Дальнейший анализ матрицы экспертных оценок должен выявить «существенные» мероприятия $a \in A_r^0$, которые образуют следующее приближение искомого подмножества $A_i^1 \subseteq A_i^0$. Для этого можно использовать относительные значения коллективных оценок α_a , вводя для них некоторый «порог». Далее решается задача (4)—(2) с использованием одного из известных методов поиска экстремума (метода Гаусса — Зейделя, градиентного метода, метода наискорейшего спуска и т. д.).

Величину $\max l_i$ можно определить методом перебора, проходя по всей допустимой длине пути выравнивания ресурсов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Э. А. Дедиков, В. А. Забродский, Ю. В. Шагаев. Задачи «выравнивания ресурсов». Сб. «Приборы и системы автоматика», вып. 11. Харьков. Изд-во ХГУ, 1970.
2. В. М. Глушков. О прогнозировании на основе экспертных оценок. «Кибернетика», 1969, № 2.

К ВОПРОСУ ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В ПЛАСТИНКАХ С ВНУТРЕННИМИ ИСТОЧНИКАМИ ТЕПЛА

Н. В. Гончарюк

Харьков

В различных радиотехнических устройствах, электронных приборах и аппаратах, содержащих внутренние источники тепла, возникают температурные поля, которые влияют на их работу. Учет распределения температуры в этих технических объектах позволяет либо более рационально конструировать их, либо найти более эффективные режимы их работы.

В статье предлагается метод определения стационарного температурного поля, возникающего в пластине заданной формы с внутренними источниками тепла. Решение основано на применении R -функции [1, 2], что позволяет рассматривать пластины сложной геометрической формы.

Рассмотрим пластину (рис. 1), в которой находится источник тепловой энергии, распределенный по области P_2 и имеющий мощность N . Предположим, что тепловая энергия рассеивается в окружающую среду не только кондукцией через границу области P_2 , но и путем конвекции излучения с ее поверхности.

Пусть λ — коэффициент теплопроводности материала пластины, δ — ее толщина, α_1 и α_2 — коэффициенты теплоотдачи ее поверхностей, а U_0 — температура окружающей среды.

Если функция $U = U_1 + U_2$ описывает стационарное поле пластины, то функция $U_1(x, y)$ должна внутри области P_1 удовлетворять дифференциальному уравнению

$$-\Delta U_1 + CU_1 = 0, \quad (1)$$

а внутри области P_2 — дифференциальному уравнению

$$-\Delta U_1 + CU_1 = \frac{N}{S\delta\lambda} \quad (2)$$

при граничном условии

$$\left. \frac{\partial U_1}{\partial n} \right|_{\Gamma_1} = 0, \quad (3)$$

где $C = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{\delta}$; S — площадь области P_2 , n — нормаль к контуру Γ_1 , направленная в сторону области P_1 .

Решение будем искать в виде

$$U_1 = \Phi_0 + \alpha_1 \Phi_1, \quad (4)$$

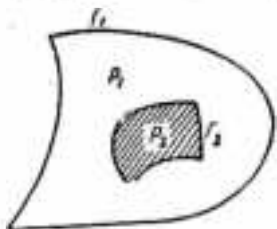


Рис. 1.

где Φ_0 и Φ_1 пока произвольные функции, принадлежащие к классу C^2 , а функция $\omega_1(x, y)$ также принадлежит к классу C^2 и обладает следующими свойствами: $\omega_1 > 0$ в области $P = P_1 \cup P_2$,

$$\omega_1|_{\Gamma_1} = 0, \quad \frac{\partial \omega_1}{\partial n}|_{\Gamma_1} = 1. \quad (5)$$

Вспользуемся введенным в работе [2] дифференциальным оператором $D_1^{(1)}$, который имеет следующее свойство. Если в области P , ограниченной кусочно-гладким контуром Γ_1 , функция $w(x, y)$ строго положительна, $w|_{\Gamma_1} = 0$ и $\frac{\partial w}{\partial n}|_{\Gamma_1} = 1$, где n — нормаль к контуру Γ_1 , направленная в сторону области P , а $f(x, y)$ дифференцируемая в этой области функция, то оператор $D_1^{(1)}$ определяется формулой

$$D_1^{(1)}f = \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial y} \frac{\partial f}{\partial y}. \quad (6)$$

Так как на контуре Γ_1 $\frac{\partial w}{\partial x} = \cos(\angle nx)$, $\frac{\partial w}{\partial y} = \cos(\angle ny)$, то из (6)

$$D_1^{(1)}f|_{\Gamma_1} = \frac{\partial f}{\partial n}. \quad (7)$$

Другими словами, оператор $D_1^{(1)}$ отличается от обычного дифференциального оператора тем, что имеет смысл всюду в области P , а на ее границе переходит в нормальную производную функции $f(x, y)$.

Применим оператор $D_1^{(1)}$ к решению (4) и удовлетворим граничному условию (3)

$$D_1^{(1)}(\Phi_0 + \omega_1 \Phi_1) = 0. \quad (8)$$

Отсюда

$$\Phi_1 = -D_1^{(1)}\Phi_0. \quad (9)$$

Подставляя найденное для Φ_1 выражение в (4), получим

$$U_1 = \Phi_0 - \omega_1 D_1^{(1)}\Phi_0. \quad (10)$$

Решение (10) удовлетворяет граничному условию (3) при любой функции $\Phi_0 \in C^2$

Выберем функцию Φ_0 в виде

$$\Phi_0 = \sum_{k=0}^m c_k \varphi_k, \quad (11)$$

где $\{\varphi_k\}_0^m$ некоторая полная в области P система функций, а c_k ($k = 0, 1, \dots, m$) — неопределенные коэффициенты.

С учетом (11) решение (10) можно переписать так:

$$U_i = \sum_{k=0}^m c_k \psi_k, \quad (12)$$

причем последовательность

$$\psi_k = \varphi_k - \alpha_1 D_1^{(1)} \varphi_k \quad (k = 0, 1, \dots, m) \quad (13)$$

представляет собой относительно полную в области P систему координатных функций. Выберем теперь коэффициенты c_k ($k = 0, 1, \dots, m$) так, чтобы в некотором смысле наилучшим образом удовлетворить дифференциальным уравнениям (1) и (2). Для их отыскания применим вариационный метод Рунта. Функционал вариационной задачи, соответствующий рассмотренной краевой задаче, имеет вид

$$I(U_i) = \iint_{(P)} [(grad U_i)^2 + CU_i - 2\rho U_i] dP, \quad (14)$$

где

$$\rho = \begin{cases} \frac{N}{3\lambda} & \text{если } (x, y) \in P_2, \\ 0 & \text{если } (x, y) \in P_1. \end{cases} \quad (15)$$

Константы c_k ($k = 0, 1, \dots, m$) находятся из системы линейных алгебраических уравнений

$$\sum_{k=0}^m c_k \alpha_{ks} + \beta_s = 0 \quad (s = 0, 1, \dots, m). \quad (16)$$

Здесь

$$\alpha_{ks} = \iint_{(P)} \left(\frac{\partial \psi_k}{\partial x} \frac{\partial \psi_s}{\partial x} + \frac{\partial \psi_k}{\partial y} \frac{\partial \psi_s}{\partial y} + C \psi_k \psi_s \right) dx dy, \quad (17)$$

$$\beta_s = 2\rho \iint_{(P)} \psi_k dx dy \quad (k, s = 0, 1, \dots, m). \quad (18)$$

В качестве примера, иллюстрирующего данный алгоритм, была решена задача для пластины прямоугольной формы с внутренним источником тепла прямоугольной формы (рис. 2) при следующих значениях параметров:

$$\begin{aligned} a_1 &= 12,5 \text{ см}, \quad b_1 = 12,5 \text{ см}, \quad a_2 = 4 \text{ см}, \quad b_2 = 5 \text{ см}, \\ N &= 50 \text{ вт}, \quad \alpha_1 = 0,99 \cdot 10^{-3} \text{ вт/см}^2 \text{град}, \\ \alpha_2 &= 0,785 \cdot 10^{-3} \text{ вт/см}^2 \text{град}, \quad \lambda = 1,7 \text{ вт/см град}, \\ U_c &= 20 \text{ град}. \end{aligned}$$

В качестве полной системы функций была взята следующая система:

$$\{\varphi_k\}_0^m = \{x^k y^s\}_{k,s=0}^m \quad (k, s = 0, 1, \dots).$$

Приближенное решение задачи с учетом симметрии области P имеет вид

$$U(x, y) = 41,160 - 0,277 \left(x - 2\omega_1 \frac{\partial \omega_1}{\partial x} \right) - 0,250 \left(y - 2\omega_1 \frac{\partial \omega_1}{\partial y} \right) + 0,84310 \cdot 10^{-3} x^3 \left(x - 4\omega_1 \frac{\partial \omega_1}{\partial x} \right) + 0,88110 \cdot 10^{-3} xy \left[xy - 2\omega_1 \left(y \frac{\partial \omega_1}{\partial x} + x \frac{\partial \omega_1}{\partial y} \right) \right] + 0,71710 \cdot 10^{-3} y^3 \left(y - 4\omega_1 \frac{\partial \omega_1}{\partial y} \right), \quad (19)$$

где

$$\omega_1 = f_1 + f_2 - \sqrt{f_1^2 + f_2^2}, \quad (20)$$

причем

$$f_1 = \frac{1}{2a_1} (a_1^2 - x^2),$$

$$f_2 = \frac{1}{2b_1} (b_1^2 - y^2). \quad (21)$$

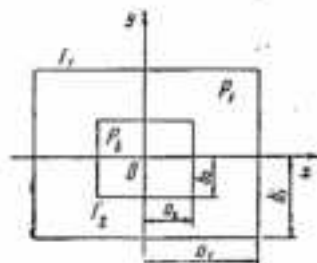


Рис. 2.

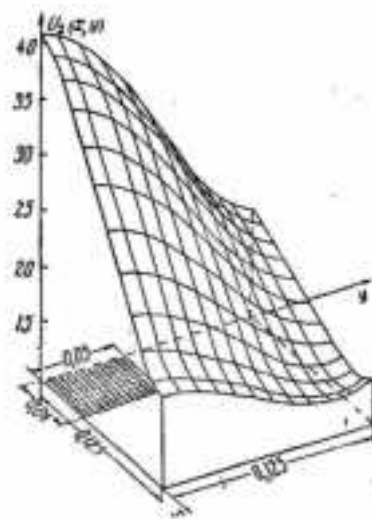


Рис. 3.

На рис. 3 показана поверхность распределения температуры по одной четвертой части пластины, отражающая физический смысл решенной задачи.

Применение R -функций позволяет применять указанный алгоритм для решения данного класса задач с помощью ЭЦВМ в случае, если области P_1 и P_2 имеют сложную геометрическую форму.

Время решения приведенного примера на ЭЦВМ «Урал-2» составило 6 минут.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Л. Рвачев. Геометрические приложения алгебры логики. Изд-во «Техника», Киев, 1967.
2. В. Л. Рвачев. К вопросу о построении координатных последовательностей. «Дифференциальные уравнения», № 6, Минск, 1970.

РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНОГО РАЗМЕРА ПАРТИИ НОРМАЛИЗОВАННЫХ ДЕТАЛЕЙ И ЗАГОТОВОК В УСЛОВИЯХ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА НА БАЗЕ ЭВМ

А. Г. Светличная, Ю. В. Шагаев

Харьков

Улучшение организации и планирования инструментального производства ведет к повышению эффективности работы промышленного предприятия. Технический уровень основного производства требует внедрения прогрессивной технологии со сложной высокопроизводительной оснасткой. В правильной организации и планировании изготовления технологической оснастки скрыты огромные резервы экономии трудовых и материальных ресурсов, ускорения темпов развития производства, повышения отдачи капиталовложений, улучшения использования основных фондов.

В настоящее время одним из прогрессивных направлений развития инструментального производства является расширение унификации и нормализации технологической оснастки как средства стабильности производственного процесса, создания условий для применения серийных методов производства. Это играет важную роль в совершенствовании системы планирования работ по инструментальной подготовке, сокращает сроки освоения новых изделий.

Планирование производства унифицированных и нормализованных деталей в инструментальных цехах требует выполнения целого ряда календарно-плановых расчетов: средняя потребность цеха в таких деталях в течение принятой календарной единицы времени, оптимальный размер партии всех наименований унифицированных и нормализованных деталей и заготовок, нормативная трудоемкость их изготовления. На основе этих данных можно рассчитать длительность производственного цикла изготовления партий деталей и заготовок, определить необходимый уровень страхового запаса.

Правильно и оперативно выполненные календарные расчеты (с помощью ЭВМ) позволяют успешнее применить автоматизированную систему оперативно-производственного планирования в инструментальном цехе.

Средняя потребность инструментального цеха в унифицированных и нормализованных деталях и заготовках определяется обычно из условно-годовой программы, которая рассчитывается на основе среднемесячной потребности по каждой детали согласно отчетным данным о фактическом расходе за истекший год с учетом коэффициента роста объема производства против базисного периода.

Определение нормативного размера партий унифицированных и нормализованных деталей является одним из важнейших календарно-плановых расчетов. Размер партии влияет на уровень производительности труда, на использование оборудования и производственных площадей, на длительность производственного цикла изготовления оснастки, а следовательно, на срок освоения нового изделия, на оборачиваемость средств и, в конечном счете, на себестоимость выпускаемой технологической оснастки и в целом изделия. Нормативный размер партии деталей должен обеспечить наиболее эффективное использование оборудования, труда рабочих и оборотных средств, вложенных в незавершенное производство. С одной стороны, увеличение

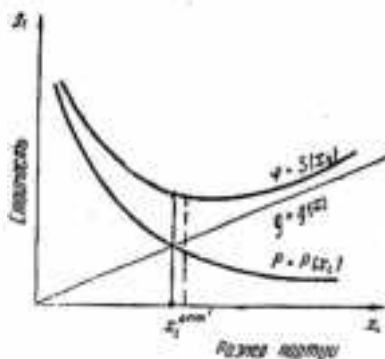


Рис. 1.

размера партии нормализованных деталей и заготовок за счет удельного сокращения подготовительно-заключительного времени создает условия для лучшего использования оборудования, повышения производительности труда и снижения себестоимости детали. Понятно, что при этом увеличивается размер незавершенного производства в инструментальных цехах и удлиняется производственный цикл. Но, с другой стороны, уменьшение размера партий приводит к недоиспользованию оборудования за счет частных переналадок, снижает производительность труда. Необходимо установить оптимальный размер партии запуска нормализованных деталей и заготовок в условиях инструментального производства. При этом следует учитывать производственные условия, которые требуют соответствия определенного размера партии заданной номенклатуры технологической оснастки имеющимся производственным мощностям цеха.

Если при установлении размера партии нормализованных деталей и заготовок учитываются только интенсивность потребления деталей, которая определяется средней потребностью в них в течение планируемого периода; условия снабжения материалами; наличие вспомогательных площадей в кладовых для их хранения, то оптимальный размер партии может быть установлен классическим методом [2]. При этом учитываются, с одной стороны, стоимость переналадок станка для изготовления каждой партии (на рис. 1 кривая типа гиперболы), а с другой стороны, — ущерб от связывания оборотных средств (на рис. 1 это прямая, показывающая линейную зависимость величины неза-

вершеного производства и величины партии). Оптимальный размер партии нормализованных деталей и заготовок определяется на графике минимальным суммарным значением затрат.

Особенности инструментального производства требуют при проведении календарно-плановых расчетов в каждый данный момент учитывать производственную ситуацию. При этом при расчете партии нормализованных деталей и заготовок могут вводиться дополнительные ограничения: по фонду времени определенного вида оборудования; по размеру незавершенного производства на данный планируемый период и т. д. Например, при технической подготовке нового изделия объем производства в инструментальных цехах резко возрастает, производственные мощности остаются неизменными. В этих условиях токарное, фрезерное, координатно-расчетное оборудование зачастую является «дефицитным», причем «дефицитность» сохраняется на более длительный период по сравнению с периодичностью запуска в производство нормализованных деталей оптимальными партиями. Для расшивки «узкого» места, очевидно, целесообразно увеличить размер ранее рассчитанной партии.

При расчете оптимального размера партии стоимость выполнения детали-операции на дефицитном оборудовании целесообразно увеличивать на величину ценности 1 часа работы данного дефицитного ресурса. Ценность данного ресурса будет характеризоваться прибылью, получаемой за счет дополнительного выпуска нормализованных деталей, которые позволили увеличить выпуск технологической оснастки за счет расшивки узкого места. При этом график функции $P_0 = P_0(x_i)$ с учетом ценности оборудования будет более резко расти при уменьшении размера партии (рис. 2). Оптимальным размером партии будет являться величина X_i^{opt} .

Рассмотрим задачу, когда при наличии «узкого места» в инструментальном цехе для изготовления нормализованных деталей и заготовок по дефицитному оборудованию выделен определенный фонд времени. Он недостаточен для изготовления нормализованных деталей и заготовок ранее рассчитанными оптимальными партиями, но обеспечивает изготовление более крупной партии за счет уменьшения расходов на подготовительно-заключительное время.

Введем обозначения:

I_i — интенсивность потребления i -й детали;

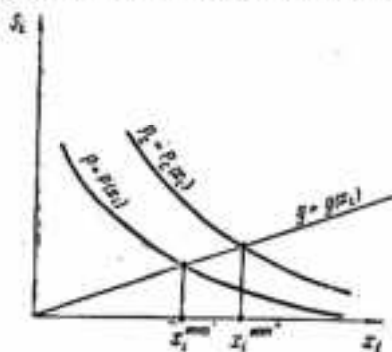


Рис. 2.

b — имеющийся фонд времени по дефицитному ресурсу;
 y_i — фонд времени, выделенный для обеспечения производства i -й деталью;
 n — количество позиций нормализованных деталей и заготовок;

$S_i = S_i(y_i)$ — функция стоимости i -й детали в зависимости от величины выделенного фонда;

y_i^0 — фонд времени, при котором можно изготавливать детали оптимальными партиями в условиях, когда нет дополнительных ограничений (соответствует $x_i^{\text{опт}}$ на рис. 1).

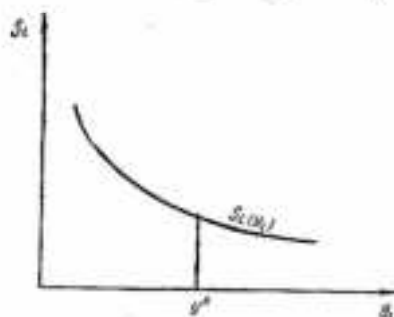


Рис. 3.

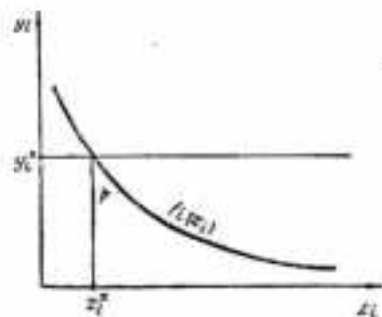


Рис. 4.

Задача заключается в минимизации функционала $\sum_{i=1}^n f_i(y_i) I_i$

при ограничениях $\sum_{i=1}^n y_i = b, y_i \geq 0$.

Эффективно она решается методом динамического программирования [1]. В результате решения получаем оптимальное распределение фонда времени между отдельными нормализованными деталями и заготовками ($y_1^*, y_2^*, y_3^* \dots y_n^*$).

Если известна функция $y_i = f_i(x_i)$, которая определяет величину фонда необходимого для изготовления i -й детали в зависимости от величины партии x_i , то зная y_i^* — величину рассчитанного фонда, легко найти величину партии (рисунок 4).

Как указывалось, в конкретных производственных условиях могут существовать ограничения на величину незавершенного производства. При этом вся номенклатура унифицированных и нормализованных деталей и заготовок должна рассматриваться совместно с допустимой величиной незавершенного производства, равной A . При ранее рассчитанных оптимальных партиях величина незавершенного производства может оказаться

больше допустимой. Тогда возникает необходимость в оптимальном уменьшении размера партии деталей.

Введем обозначения:

$S_i(x_i)$ — функция технологической себестоимости i -й детали, учитывающая стоимость хранения, в зависимости от величины партии;

x_i^0 — минимальные значения партий;

C_i — плановая стоимость i -й детали;

Z_i — величина страхового запаса i -й детали.

Величину среднего запаса i -й детали принимаем равной

$$\left(Z_i + \frac{x_i}{2} \right).$$

Задача заключается в нахождении минимума функционала

$$\sum_{i=1}^n I_i \cdot S_i(x_i) \quad (1)$$

при ограничениях

$$\sum_{i=1}^n \left(Z_i + \frac{x_i}{2} \right) C_i = A, \quad x_i > x_i^0. \quad (2)$$

Введем новые переменные

$$U_i = (x_i - x_i^0) C_i. \quad (3)$$

Минимизируемый функционал (1) примет вид

$$\sum_{i=1}^n I_i S_i \left(\frac{U_i}{C_i} + x_i^0 \right), \quad (4)$$

а ограничения (2) —

$$\sum_{i=1}^n U_i = 2A - 2 \sum_{i=1}^n Z_i C_i - \sum_{i=1}^n x_i^0 C_i; \quad (5)$$

$$U_i > 0 \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n).$$

Обозначим $I_i S_i \left(\frac{U_i}{C_i} + x_i^0 \right)$ через $F_i(U_i)$, а правую часть выражения (5) через B . Тогда задача запишется

$$\min \sum_{i=1}^n F_i(U_i)$$

при ограничениях

$$\sum_{i=1}^n U_i = B,$$

$$U_i > 0 \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n).$$

Следовательно, и в этом случае приходим к задаче динамического программирования. В результате ее решения получаем значение U_i , с помощью которого оптимальный размер партии при заданных ограничениях на объем незавершенного производства определяется по формулам

$$x_i = \frac{U_i}{C_i} + x_i^0 \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n).$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Р. Беллман. Динамическое программирование. ИЛ, 1960.
2. С. А. Думлер. Управление производством и кибернетика. Изд-во «Машиностроение», 1969.

ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ РЕШЕНИЯ ТРАНСПОРТНОЙ ЗАДАЧИ

В. П. Авраменко, Н. Т. Куценко

Харьков

В данной работе предлагается удобный для реализации на ЦВМ метод решения транспортной задачи. В m пунктах производства $A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$ имеется некоторый однородный продукт, причем объем продукта в пункте A_i составляет a_i единиц. Этот продукт доставляется в n пунктов потребления $B = \{B_1, B_2, \dots, B_n\}$. Объем потребления пункта B_j равен b_j единиц. Предполагается, что спрос не превышает предложение:

$$\sum_{i=1}^m a_i > \sum_{j=1}^n b_j.$$

Это условие не нарушает общности задачи, так как в противном случае потребителей и поставщиков следовало бы поменять местами.

Допустим, что из каждого пункта производства A_i можно перевозить продукт в любой пункт потребления B_j , причем транспортные расходы заранее известны и составляют c_{ij} единиц. Если из-за отсутствия транспортных коммуникаций перевозки из пункта A_i в пункт B_j невозможны, то стоимость перевозок c_{ij} принимается равной бесконечности.

В результате решения транспортной задачи требуется составить такой план перевозок, при котором все запросы потребителей удовлетворяются при минимальных общих транспортных расходах.

Практическая важность рассматриваемой задачи состоит в том, что к ней сводятся многие задачи по организации и планированию: составление оптимального плана перевозок, рациональное использование оборудования, задача о назначениях и другие.

Предлагаемый метод решения транспортной задачи по своей идее близок к методу потенциалов, но является более общим и универсальным. Особенно удобен этот метод при решении вырожденных транспортных задач.

Процесс решения задачи состоит из ряда последовательных шагов. На каждом шаге увеличивается общий поток груза, полученный на предыдущем шаге. Увеличенный поток должен иметь минимальную стоимость среди всех потоков равной ему величины.

Пусть на некотором шаге решения задачи поток грузов характеризуется матрицей перевозок

$$X = \|x_{ij}\| \quad (i = 1, 2, \dots, m; \quad j = 1, 2, \dots, n),$$

где x_{ij} — количество груза, перевезенное из пункта A_i в пункт B_j . Тогда запасы грузов у поставщиков равны

$$\tilde{a}_i = a_i - \sum_{j=1}^n x_{ij} \quad (i = 1, 2, \dots, m),$$

а запросы потребителей

$$\tilde{b}_j = b_j - \sum_{i=1}^m x_{ij} \quad (j = 1, 2, \dots, n).$$

Разобьем множество поставщиков A на два подмножества: A_1 — поставщики, имеющие груз, и A_{11} — поставщики, не имеющие груза, а множество потребителей B — на подмножества: B_1 — потребители, имеющие спрос, и B_{11} — не имеющие спроса. Каждому потребителю B_j ставится в соответствие потенциал q_j , представляющий собой минимальную стоимость доставки единицы груза в этот пункт при условии, что общий поток в сети не уменьшается; аналогично каждому поставщику ставится в соответствие потенциал p_i .

Потенциалы потребителей и поставщиков, а также номера пунктов, которыми они обусловлены, определяются функциональными уравнениями

$$p_i = \min_{j \in T_i} (q_j - c_{ij}) \quad (i \in A),$$

$$q_j = \min_{i \in A} (p_i + c_{ij}) \quad (j \in B),$$

где $p_i = 0$ ($i \in A_1$),

T_i — подмножество потребителей из множества B_{11} , у которых $x_{ij} \neq 0$.

Эти уравнения могут быть решены итерационным методом по следующей вычислительной схеме.

1. Предварительно принимаем

$$p_i^{(1)} = 0 \quad (i \in A_1), \quad p_i^{(1)} = \infty \quad (i \in A_{11}).$$

Если $A_{11} = \emptyset$ или $B_{11} = \emptyset$, то переходим к пункту 3; в противном случае первое приближение потенциала q_j определяем по формуле

$$q_j^{(1)} = \min_{i \in A} (p_i^{(1)} + c_{ij}) \quad (j \in B_{11}).$$

2. Значения потенциалов p_i и q_j уточняются по формулам

$$p_i^{(k)} = \min_{T_i \neq \emptyset} (q_j^{(k)} - c_{ij}) \quad (i \in A_{11}),$$

$$p_i^{(k)} = p_i^{(k-1)} \quad (\text{если } T_i = \emptyset),$$

$$q_j^{(k)} = \min_{i \in A} (p_i^{(k)} + c_{ij}) \quad (j \in B_{11}).$$

Вычислительная процедура повторяется до тех пор, пока не будет установлен факт равенства потенциалов на предыдущей и последующей итерациях. Количество итераций не превосходит числа потребителей, не имеющих спроса, и числа поставщиков, не имеющих груза.

3. Потенциалы потребителей, имеющих спрос, определяются по формуле

$$q_j = \min_{i \in A} (p_i^{(k)} + c_{ij}) \quad (j \in B_{11}),$$

а потенциалы остальных пунктов принимаются равными

$$q_j = q_j^{(k)} \quad (j \in B_{11}), \quad p_i = p_i^{(k)} \quad (i \in A).$$

В процессе вычисления потенциалов запоминаются пункты, которыми они обусловлены.

Для увеличения общего потока с наименьшими удельными затратами необходимо направить груз в пункт потребления $B_{10} \in B_1$, имеющий спрос, у которого потенциал минимальный. Груз в этот пункт направляется из пункта A_{10} , которым обусловлен потенциал. Если найденный пункт $A_{10} \in A_1$, то x_{10j_0} увеличиваем на

$$\delta = \min(\bar{a}_{10}, \bar{b}_{j_0}).$$

Если $A_{10} \in A_{11}$, то определяется пункт B_{j_1} , которым обусловлен потенциал пункта A_{10} , и так далее пока не встретится поставщик $A_{1k} \in A_1$. Полученная последовательность пунктов $B_{j_0}, A_{10}, B_{j_1}, A_{11}, \dots, B_{j_k}, A_{1k}$ определяет маршрут, по которому следует перераспределить и увеличить общий поток. Маршрут в этом случае начинается у поставщика, имеющего груз, проходит через несколько промежуточных потребителей, не имеющих спроса, через несколько промежуточных поставщиков, не имеющих грузов, и оканчивается у потребителя, имеющего спрос. На участках маршрута, идущих от потребителей к поставщикам, поток грузов уменьшается, а на участках, идущих от поставщиков

к потребителям, увеличивается на величину δ , которая не должна превышать спроса в пункте B_{j_0} , предложения в A_{i_0} и величины перевозок на участках, где поток уменьшается.

Такой процесс увеличения общего потока грузов продолжается до тех пор, пока не будут удовлетворены запросы всех потребителей.

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КОМПЛЕКСОМ ОПЕРАЦИЙ С ИЕРАРХИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ

В. В. Свиридов, А. К. Колющенко

Харьков

При разработке и совершенствовании систем управления промышленным предприятием важно выбрать наиболее эффективные методы получения, обработки и использования информации, а также рациональные схемы движения потоков информации в зависимости от организационной структуры и применяемых методов управления.

Иерархическая структура системы управления предприятием в большинстве случаев строится по принципу нерархичности промышленного предприятия как сложной (большой) системы. Пока не существует формального и строгого определения большой системы, однако необходимо рассматривать иерархию в управлении ею как наиболее характерную черту больших систем [1, 2, 3].

Иерархичность производства проявляется в виде различия целей на различных уровнях управления. Автоматизированная система управления производством должна иметь нерархическую структуру, так как цель нижестоящего уровня определяется вышестоящим [5]. Объектом управления в таких системах является коллектив людей, цель которого — достижение определенного результата за некоторый (вполне определенный) промежуток времени. Управляющий орган — руководитель производством или руководящая группа — на основе поступающих по каналам обратной связи сведений о выполнении намеченных работ и воздействий со стороны более высокого уровня управления вырабатывает управляющие воздействия, т. е. принимает ряд организационно-технических мер, чтобы скомпенсировать рассогласование между реальным ходом работ и планом, например, путем перераспределения ресурсов.

Рассмотрим систему управления (рис. 1) с нерархической структурой, в которой регулятор высшего уровня P_0 изменяет характеристики регуляторов низшего уровня $p_{i_1}^{(01)}$, ..., $p_{i_R}^{(01)}$, с целью оптимизации всего процесса в целом,

Если $\{p_{ih}\} p \in P$ — множество, представляющее организацию как упорядоченный набор элементов (каждый элемент будем называть оператором), то можно определить положение элемента p_{ih} относительно высоты уровня управления и других элементов R , где $h = 1, 2, \dots, H$ — число уровней управления; $r = 1, 2, \dots, R$ — число элементов на уровне.

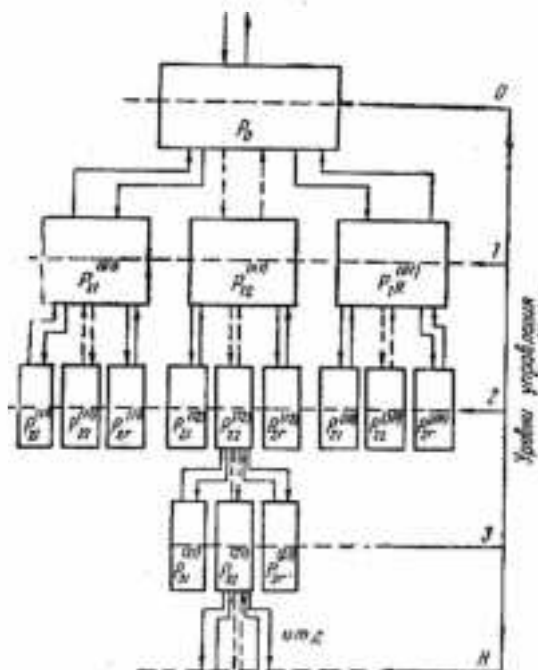


Рис. 1.

Если каждый оператор $p \in P$ способен выполнить одну или несколько операций $q \in Q$, т. е. если задано множество операций Q , так, что $X(q) = p$, $X \in QP$, где X множество операций $x = (q, p)$, $x \in X$, то можно считать, что структура задана.

Руководство высшего уровня, используя иерархическую структуру, определяет состав операций, подлежащих контролю на этом уровне. Затем строится модель комплекса операций всей разработки. Ответственность за определенные операции высшего уровня переносится на более низкий уровень руководства, где в свою очередь определяется состав работ. Затем ответственность за отдельные операции этого уровня переносится на следующий уровень и т. д., в соответствии с организационной структурой исполнительной системы, до тех пор, пока передача ответственности не достигнет уровня исполнителей.

В соответствии с иерархической структурой руководство операциями, входящими в общий комплекс, различает следующие уровни:

а) нулевой уровень — сетевой график, охватывающий весь комплекс операций по созданию нового объекта и составленный на основе частных и первичных сетевых графиков (сводная сеть);

б) частные уровни, каждый из которых охватывает комплекс работ, выполняемых отдельной организацией или подразделением предприятия (частные сети);

в) первичные уровни, охватывающие комплекс работ, выполняемых отдельными ответственными исполнителями (первичная сеть).

Иерархическая структура промышленного предприятия характеризуется размахом контроля (количеством подчиненных у одного руководителя); количеством уровней иерархии; количеством элементов на уровне; характером взаимодействия элементов внутри системы; и что особенно важно, структура должна отражать целенаправленность, управляемость и состояние системы.

Выделение замкнутого контура управления (рис. 2) на каждом уровне иерархической структуры АСУ позволит рассмотреть все основные принципы оптимальной динамической системы управления [4]. Состояние объекта управления может быть описано с помощью некоторого n -мерного вектора.

$$X(t) = \{x_i(t)\}_{i=1}^n.$$

Изменение состояния объекта с течением времени t , есть траектория его движения. Эти изменения осуществляются при помощи управляющих взаимодействий $U(t) = \{U_i(t)\}_{i=1}^m$, а также внешних и внутренних случайных возмущений $E_1(t)$ и $E_2(t)$.

Задача управления заключается в следующем: в начальный момент t_0 объект находится в состоянии $x(t_0)$; требуется выбрать управляющее воздействие $U(t_0)$, которое за время τ переведет объект в заданное конечное состояние $x(t_0 + \tau) = X_1$. При этом требуется, чтобы траектория движения объекта была оптимальной относительно выбранного критерия. Наличие внешних и внутренних случайных возмущений вызывает необходимость в оперативном учете и контроле отклонений, их анализе и формировании управляющих воздействий, обеспечивающих достижение цели.

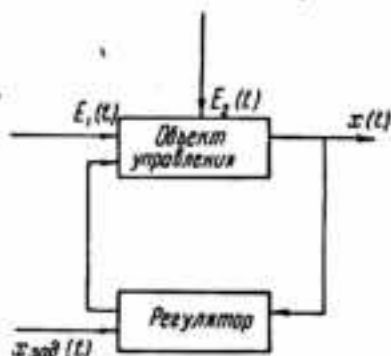


Рис. 2.

Состояние операций есть функция времени. Обычно операция может выполняться с помощью различных ресурсов, поэтому x_{ij} является функциями вектора по времени. На основании предположений о неразрывности и однородности ресурсов принимаемые при управлении предприятием решения $U_{ij}(t)$ для каждой операции $(i, j) \in X$ также являются функциями вектора по времени, чьи компоненты соответствуют различным типам ресурсов. Существует зависимость между распределениями ресурсов U_{ij} и количеством работы на каждой операции. Компоненты $x_{ij}(t)$ становятся убывающими функциями времени при соотношении U_{ij} с соответствующей операцией (i, j) [6].

Для большей убедительности предположим, что выбор решений может меняться за конечное число L . Это соответствует дискретной модели комплекса операций. Состояние каждой операции определится тогда с помощью семейства преобразований следующим образом:

$$x_{ij}(l+1) = T_{ij}[x_{ij}(l), U_{ij}(l)], \quad (1)$$

$$l = 0, \dots, L-1, \quad (i, j) \in X,$$

где начальное состояние проекта является известным множеством $x_{ij}(0) = x_{ij}$ для каждой операции $(i, j) \in X$. Конечное состояние также задано.

С каждой операцией $(i, j) \in X$ связана скалярная функция цели

$$Z_{ij} = \sum_{l=0}^{l=L} g_{ij}[x_{ij}(l), U_{ij}(l)], \quad (2)$$

$$g_{ij} = 0 \text{ для } U_{ij}(l) = 0,$$

где Z_{ij} — может выражать время выполнения работы, стоимость и т. д.

Предположим, что граф комплекса операций построен и что события сети занумерованы так, что если $(i, j) \in X$, $(j, k) \in X$, то $i < j < k$. Порядок выполнения операций комплекса сохраняется, если для любого момента времени $U_{jk} \equiv 0$ для $x_{ij} \neq 0$, $U_{jk} \equiv 0$ для $x_{ik} = 0$ для каждого i, j, k , таких, что

$$(i, j) \in X, \quad (j, k) \in X. \quad (3)$$

Ограничения на ресурсы задаются в виде

$$\sum_{(i, j) \in X} U_{ij}(l) \in U, \quad (4)$$

$$(l = 0, \dots, L-1),$$

где U — допустимое множество.

Тот факт, что пределы ресурсов могут изменяться во времени, претерпевают увеличение или перемещение в течение проектирования, подтверждается тем, что допустимое множество и является заданной функцией времени или состояния системы.

Цель принятия решений при управлении формулируется следующим образом: выбрать переменные $U_{ij}(l)$, $(ij) \in X$, $l=0, \dots, L-1$, удовлетворяющие условию (2) и ограничениям (3) и (4), переводящие проект из начального состояния в конечное, так, чтобы свести до минимума общий критерий (2).

Математическая формулировка порождает типичную проблему управления и позволяет использовать весь аппарат современной теории управления для решения задачи оптимального использования распределения ресурсов.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Трапезников. Автоматическое управление в экономике. «Автоматика и телемеханика», № 1. Изд-во «Наука», 1966.
2. Н. П. Вусленко. К теории сложных систем. Изв. АН СССР. «Техническая кибернетика», № 5, 1963.
3. Е. Б. Забежинская. К вопросу об исследовании организационных структур. Труды Ленэлектронмаш, т. V, VI, 1969.
4. А. И. Чуханов. Некоторые вопросы оптимизации системы управления большим проектом с иерархической структурой. «Экономика и математические методы», т. IV, вып. 3, 1968.
5. В. И. Петров. Структура автоматизированных систем управления предприятием. «Автоматика и вычислительная техника», № 1. Изд-во «Зинатне», Рига, 1970.
6. Radivoj Petrovic. Optimization of Resource allocation in Project Planning. Operations Research, 1968, vol. 16, № 3.

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ИНФОРМАЦИОННЫХ ПОТОКОВ МЕЖДУ ПОДСИСТЕМАМИ АСУП

*И. В. Кузьмин, В. Ф. Канарский, В. Т. Мирошниченко,
В. И. Гальченко*

Харьков

Автоматизированные системы управления производством (АСУП) требуют системного подхода к оптимальному решению задач управления на всех уровнях иерархической структуры Предприятия как на этапе разработки, так и при реализации плановых заданий. Этот непрерывный логико-вычислительный процесс требует четкой взаимосвязи между подсистемами, основанной на единых первичных источниках информации. Выходные (входные) показатели подсистем можно условно разбить на две группы: стационарную и нестационарную. Под стационарной информацией будет пониматься полный объем плановых и планово-производных показателей, период повторения (декада, месяц, квартал и т. д.) которых определяется сетевым графиком планирования хода производства; под нестационарной — объем оперативной информации, возникающей в процессе

реального хода производства. Выбор технических средств, обеспечивающий в должной мере обмен информацией между подсистемами, в первую очередь зависит от соотношения этих двух видов информации, циркулирующих между отдельными подсистемами и верхними уровнями иерархической структуры предприятия [1]. При этом исходные показатели, определяющие объемы информации между подсистемами:

N — количество заказов на предприятии ($i = 1, 2, \dots, N$);

Q — полный объем финансирования,

$$Q = \sum_{i=1}^{i=N} Q_i \quad (1)$$

где Q_i — объем финансирования i -го заказа;

$T_{i \text{ ср}}$ — приведенная длительность условного среднего заказа

$$T_{i \text{ ср}} = \frac{\sum_{i=1}^{i=N} T_i}{N}, \quad (2)$$

где T_i — плановая длительность выполнения i -го заказа.

Опираясь на понятия временной коэффициент удельных плановых затрат

$$K_{\text{уд}} = \frac{Q}{N} T_{i \text{ ср}},$$

который с учетом (2) запишется

$$K_{\text{уд}} = \frac{Q}{N^2} \sum_{i=1}^{i=N} T_i,$$

и временной коэффициент максимальных плановых затрат на наиболее сложный заказ, имеющий минимальный коэффициент ответственности

$$K_{\text{уд. max}} = \max [Q_i T_i], \quad (3)$$

получим выражение для приведенного коэффициента плановых затрат

$$K_{\text{уд. ср}} = \frac{K_{\text{уд}}}{K_{\text{уд. max}}}.$$

Структура технических средств, обеспечивающая передачу потоков стационарной информации, является производной от финансовых затрат, отражающих сложность каждого заказа, и характеризуется $K_{\text{ст. в}}$ — коэффициентом стабильности, который с достаточной степенью точности для мелкосерийного производства можно считать [2] равным

$$K_{\text{ст. в}} = k(1 - e^{-K_{\text{уд. ср}}}),$$

где k — статистический коэффициент стабильности плана, определяющий постоянство заказов, получаемых предприятием, на планируемый период (для приборостроительных заводов $0,2 < k < 0,8$).

Условный объем стационарной информации между отдельными подсистемами

$$I_{ij} = (1 + K_{ст. q}) \sum_{l=1}^{j-1} \sum_{m=1}^{j-l} I_{0ij} R_{ij}, \quad (j \neq l), \quad (4)$$

где q — количество подсистем ($j = 1, 2, \dots, q$; $l = 1, 2, \dots, q$);
 I_{0ij} — статистический стационарный объем информации между подсистемами;

R_{ij} — корреляционная функция, учитывающая кратность использования потоков стационарной информации и возможности упорядочения структуры АСУП.

Технико-экономические и эксплуатационные показатели проектируемых технических средств [2] возможно определить как

$$I_{0ij} = \xi \eta b \lambda T_{0i}, \quad (5)$$

где $\xi = \frac{C_{ст}}{C_{ст} + C_s}$ — коэффициент, учитывающий стоимость и технические возможности канала связи;

$C_{ст}$ — стоимость оборудования;
 $C_s = \alpha T$ — стоимость эксплуатации;
 $\alpha = \frac{C_{обсл} + C_{зип}}{t_{рес}}$ — коэффициент;

$C_{обсл}$ — стоимость содержания обслуживающего персонала;

$C_{зип}$ — стоимость ЗИП;

$t_{рес}$ — полный ресурс работы канала связи;

T — полное время передачи стационарной и нестационарной информации по одному условному каналу за время $t_{рес}$;

η — количество задач, приходящихся на каждый условный канал связи;

b — среднее число передаваемых символов, необходимое для решения одной условной экономико-математической задачи (определяется на основе статистического обследования);

$T_s = a_s T_{0i} (1 - \rho_{0i})^n$ — время передачи необходимого объема информации для решения одной условной экономико-математической задачи;

a_s — соотношение условных объемов стационарной и нестационарной информации для данной подсистемы;

T_{0i} — время передачи стационарной и нестационарной информации по одному условному каналу с вероятностью безотказной работы ρ_{0i} ;

- μ_1 — коэффициент, характеризующий удельный показатель пропускной способности S_{yx} (под относительным удельным показателем пропускной способности понимается полный объем сведений, который может быть передан при максимальной достоверности за минимальный промежуток времени для данного вида связи);
- λ — число условных идентичных каналов связи между подсистемами, где под условным каналом связи для АСУП, исходя из ее организационно-технических и структурных характеристик, понимается совокупность средств, определяемых едиными технико-эксплуатационными характеристиками.

Режим работы каналов связи в значительной мере будет обусловлен характером, объемом и периодичностью нестационарной информации, поступление которой нужно рассматривать с позиций статистической динамики. С другой стороны, технико-экономические показатели деятельности предприятия являются теми синтезирующими компонентами, в свете которых наиболее целесообразно оценивать как возможные объемы нестационарной информации, так и параметры проектируемых технических средств связи с учетом их эксплуатационно-стоимостных характеристик [3]. Особенно важно это для мелкосерийного и индивидуального производств, где важнейший показатель эффективности — сокращение сроков перестройки технологического процесса как на стадии подготовки производства, так и при реализации продукции. В подобной ситуации основные потоки нестационарной информации целесообразно формализовать по следующим составляющим:

а) констатация факта невозможности принятия того или иного технического решения каким-либо звеном иерархии;

б) уточнение этого факта, принятие решения по коренному преобразованию изделия или принятие другого конструктивного решения на основе ранее принятой стратегии;

в) доведение решения до всех исполнительных звеньев иерархии и выработка поправок (коррекций) к дальнейшему планированию хода производства.

Исходя из изложенного, приведенный показатель объема нестационарной информации можно выразить в виде

$$Z = \frac{k_u k_c N b^3}{\lambda} k_\Phi^h \left(1 + \frac{\sum m^d m}{\sum r d_r} \right) \quad (6)$$

где k_Φ — функционально-структурный показатель проектируемой АСУП ($k_\Phi < 1$);

k_0 — обобщенный семантический показатель сложности системы кодов;

θ — объем нестационарной информации по отдельному заказу;

k_u — коэффициент, учитывающий ценность информации для принятия решения ($k_u < 0,5$);

h — число выпускающих цехов;

x_m — номенклатура цехов вспомогательного производства;

x_r — номенклатура цехов основного производства;

$d_{m,r} = k_r k_{ct} k_t$ — показатели преемственности соответственно для цехов вспомогательного и основного производства;

k_y — коэффициент унификации;

k_{ct} — коэффициент стандартизации;

k_t — коэффициент технологичности.

Объем нестационарной информации по отдельному заказу с учетом указанного можно определить как

$$\theta = \beta [k_0 g + \sigma \gamma n' (\Sigma r_i + \Sigma v_i)], \quad (7)$$

где β — относительный показатель сложности преобразования информации между подсистемами;

g — среднее число плановых показателей по цехам;

α — весовой показатель сложности заказа;

γ — статистический коэффициент технологической сложности заказа;

n' — среднее число заказов на цех;

Σr_i — средний объем сводной спецификации по цехам;

Σv_i — средний объем организационно-технических показателей работы по цехам.

Следовательно, приведенный объем оперативной информации

$$I_{ij} = \sum_{i=1}^{i=N} \sum_{j=1}^{j=g} ZK_{ик} K_p \lambda T_0 \gamma R_{ij} \quad (i \neq j), \quad (8)$$

где $K_{ик} = \frac{S p_i}{S_{\max} \rho T_{\max}} \frac{t_0}{T_{ик}}$ — коэффициент использования канала, под

которым будем понимать отношение количества фактических сообщений к предельно допустимому числу сообщений ($K_{ик} < 1$);

S — реальная пропускная способность канала с вероятностью p_i , характеризующей квалификацию оператора;

$t_0 = \Sigma \Delta t_i$ — наиболее вероятное суммарное время передачи сообщений;

S_{\max} — предельная пропускная способность канала связи;

$P_{T_{\max}}$ — вероятность ошибки при данных технических средствах и способах преобразования информации;

η — коэффициент, учитывающий старение информации;

$T_{\text{па}}$ — планируемый промежуток времени, характеризующий своевременность поступления информации;

$K_p = \frac{c \eta k_0 T_0}{\lambda T_{\text{па}}}$ — коэффициент, характеризующий регламент работы канала связи, под которым понимается последовательность передачи сообщений с учетом своевременности информации;

c — априорный коэффициент приоритетности;

k_0 — коэффициент периодичности обмена информацией;

R_{ij} — корреляционная функция, учитывающая кратность использования потоков нестационарной информации и возможности упорядочения структуры АСУП.

Окончательно условный объем информации между подсистемами из выражений (4) и (8):

$$\begin{aligned}
 I = k_s (I_{\text{н}} + I_{\text{д}}) = k_s \left[(1 + K_{\text{ст. в}}) \sum_{\substack{j=1; j=1; \\ i+j}}^{i=N; i=N} \eta n b \lambda T_0 R_{ij} + \right. \\
 \left. + \sum_{\substack{j=1; j=1; \\ i+j}}^{i=N; i=N} Z K_{\text{ст. в}} K_p \lambda T_0 \eta R_{ij} \right] = k_s \lambda T_0 \left[(1 + K_{\text{ст. в}}) \sum_{\substack{j=1; j=1; \\ i+j}}^{i=N; i=N} \eta n b R_{ij} + \right. \\
 \left. + \sum_{\substack{j=1; j=1; \\ i+j}}^{i=N; i=N} Z K_{\text{ст. в}} K_p \eta R_{ij} \right], \quad (9)
 \end{aligned}$$

где $k_s = 1,2 + 1,9$ — коэффициент, характеризующий отношение фактического объема информации к расчетному.

Приведенное выражение (9) оценки информационных потоков между подсистемами АСУП с точностью, достаточной для ориентировочного выбора технических средств, определяет объемы потоков информации. Отклонение рассчитанного объема информации из выражения (9) от фактического на величину k_s обусловлено следующими причинами [1]:

1) документооборот в условиях машинной обработки данных существенно отличается от анализируемого документооборота и,

следовательно, изменяются количественные характеристики потоков информации;

2) в условиях машинной обработки данных вводится дополнительная избыточность для повышения достоверности передаваемых данных и выполняемых вычислений (избыточное кодирование, методы программного контроля и т. д.);

3) основные коэффициенты, используемые для определения объемов потоков информации, являются статистическими и могут быть уточнены либо моделированием информационных потоков, либо статистической обработкой данных существующих АСУП.

Таким образом, приближенный метод определения объемов информации между подсистемами является основной базой как при выборе технических средств, обеспечивающих надежное функционирование каналов связи и устройств сбора, хранения, преобразования, передачи и приема информации, так и при разрешении конфликтных ситуаций, возникающих между стоимостными характеристиками и возможностями системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Организация информационно-вычислительного центра предприятия (методические указания). МИЭИ им. С. Орджоникидзе, М., 1970.
 2. А. С. Касаткин, И. В. Кузьмин. Оценка эффективности автоматизированных систем контроля. Изд-во «Энергия», 1967.
 3. В. И. Ланцберг. Об одном методе исследования потоков информации руководителя на промышленном предприятии. «Электронная техника», серия 10, вып. 5 (37), МЭП СССР, М., 1970.
-

РЕФЕРАТЫ

УДК 62—504

Вопросы социологии АСУП. Шехшуев А. Я. Сб. «Приборы и системы автоматки», вып. 21, 1972, стр. 3—9.

Обобщается первый опыт поисковых исследований и на этой основе ставится общая задача и намечаются основные направления экономико-социологических исследований при проектировании и внедрении АСУП. Анализируется структура предложений коллектива трудящихся, направленных на совершенствование организации производства как одного из главных условий автоматизации управления.

Таблиц 1.

УДК 62—501

К вопросу об оценке сложности структур. Волков А. А., Коломиец Б. К., Забродский В. А. Сб. «Приборы и системы автоматки», вып. 21, 1972, стр. 9—16.

Изучаются вопросы, связанные с построением критериев оценки сложности произвольных, в том числе и иерархических структур, выдвигается ряд требований к ним и рассматривается критерий, удовлетворяющий этим требованиям. Получен обобщенный критерий оценки сложности структур, позволяющий учесть вероятностный характер связей и неравномерность свойств структуры.

Библиографических ссылок 3.

УДК 658.411:51

Об одном способе распределения плана производства по плановым периодам. Дедиков Э. А., Ершов С. Г., Чернина Л. П. Сб. «Приборы и системы автоматки», вып. 21, 1972, стр. 16—27.

Обосновывается распределение годового плана производства по кварталам, рассматривается задача обеспечения квартальных планов директивных изделий и оптимального использования образующихся резервов производственной мощности. Приводятся математическая модель и алгоритмы решения поставленной задачи. Разработана блок-схема решения задачи на ЭЦВМ.

Рисунков 1. Библиографических ссылок 3.

УДК 62—507:658.5

Алгоритм расчета нормативов прямых затрат на изделие. Дедиков Э. А., Панишев А. В., Скибницкая В. И., Тихенко А. Ю. Сб. «Приборы и системы автоматки», вып. 21, 1972, стр. 27—31.

Производится алгоритмизация процедуры расчета нормативов прямых затрат на изделие. Рассматривается изделие произвольной сложности, состоящее из большого количества деталей и узлов, предлагается математическое описание его структуры. Предложенный алгоритм позволяет оценить все элементы структуры изделия по статьям: материалы, полуфабрикаты, заработная

плата и трудоемкость. Массивы исходной информации представляются в виде матриц. Алгоритм реализуется рядом простейших операций над ними. Предлагается алгоритм коррекции нормативов, прямых затрат. Полученные результаты имеют прикладное значение при создании математического обеспечения АСУП.

Рисунков 5.

У Д К 621.394.147—621.394.18

Организационные и математические основы АСУ технологической подготовки производства. Заруцкая Л. И., Коноваленко К. Д., Склепус В. А. Сб. «Приборы и системы автоматизации», вып. 21, 1972, стр. 31—40.

Отмечается, что главный фактор любого управления, его цель и смысл заключены в решениях и тех процессах, которые приводят к принятию решений. Возможности принимать и реализовать решения заключены в обмене информацией между органом и объектом управления. Рассматривается вопрос машинной обработки информации о сетевой модели, функционирование АСУ ТПП на стадии оперативного управления.

Рисунков 3.

У Д К 658.51

Автоматизированная система оперативно-производственного планирования в условиях инструментального цеха. Светличная А. Г. Сб. «Приборы и системы автоматизации», вып. 21, 1972, стр. 41—48.

Рассматриваются вопросы, связанные с созданием системы оперативно-производственного планирования на базе ЭВМ в условиях инструментального производства. Приводится математическое описание задачи по составлению календарного плана — графика выпуска технологической оснастки — и алгоритм ее решения.

У Д К 621.394.147—621.394.18

Задачи и функции служб технологической подготовки производства в условиях АСУП. Коноваленко К. Д. Сб. «Приборы и системы автоматизации», вып. 21, 1972, стр. 48—63.

Рассматриваются задачи служб технологической подготовки производства в обычных условиях и в условиях функционирования АСУ на предприятии. Необходимость создания определенной нормативной базы на ИВЦ и возможность использования ЭВМ для выполнения некоторых работ по подготовке производства вызывают определенные изменения в функционировании подготовки производства. Дается схема функционирования службы технологической подготовки производства в условиях АСУП.

Рисунков 1. Библиографических ссылок 2.

У Д К 621.394

Методология автоматизированного проектирования процессов холодной штамповки. Макурин Н. С. Сб. «Приборы и системы автоматизации», вып. 21, 1972, стр. 53—61.

Рассматривается методика автоматизированного проектирования технологических процессов холодной штамповки с помощью ЭВМ. Дается характеристика этапов автоматизации технологического проектирования (АТП), их содержание и сущность.

Рисунков 1. Библиографических ссылок 3.

У Д К 621.394

Система автоматизации технологического проектирования (АТП) и ее функционирование. Макурин Н. С. Сб. «Приборы и системы автоматизации», вып. 21, 1972, стр. 61—65.

Рассматривается структурная схема системы АТП, дается анализ ее функциональных звеньев, рассматривается работа системы и обуславливается взаимосвязь между звеньями при их функционировании.

Рисунков 2. Библиографических ссылок 3.

У Д К 62—503:519.2:666.9.02

Исследование статистических характеристик входного сигнала и синтез систем управления химическим составом сырьевой смеси на цементном заводе. В. Б. Шифрин, Н. Г. Бизюк. Сб. «Приборы и системы автоматизации», вып. 21, 1972, стр. 66—73.

Рассматривается входной сигнал системы, представляющий собой последовательность импульсов одинаковой длительности, нормально распределенных по амплитуде, статистически связанных и случайно следующих друг за другом. Анализируются две системы управления приготовлением смеси: разомкнутая и замкнутая. Расчет оптимальной разомкнутой системы управления сводится к решению интегрального уравнения Винера — Хопфа. С помощью метода неопределенных коэффициентов находится оптимальная импульсная переходная функция. Анализ ошибок системы управления показал, что в реальных условиях подстройка параметров оптимального фильтра может не производиться. Была определена оптимальная импульсная характеристика корректирующего звена в цепи обратной связи для замкнутой системы.

Рисунков 2. Библиографических ссылок 7.

У Д К 621.394.147—621.394.18

Особенности передачи информации в АСУ. Панов А. Ф. Сб. «Приборы и системы автоматизации», вып. 21, 1972, стр. 73—83.

Рассматриваются основные особенности передачи информации в АСУ. Предлагается для передачи информации в АСУ использовать метод структурной избыточности в линии связи. Выводится математическое выражение выигрыша в помехоустойчивости предлагаемого метода в сравнении с обычным методом двухпроводной линии связи. Приводится функциональная схема метода структурной избыточности в линии связи.

Таблиц 1. Рисунков 1. Библиографических ссылок 8.

У Д К 681.325

Об одном способе преобразования изображения с микрофильма в код для последующего ввода в ЭВМ. Романов В. П., Чистюхин А. А., Кузьмичев М. А., Огороднейчук И. Ф., Шатохин А. В., Денисенко Э. А., Сычев В. В. Сб. «Приборы и системы автоматизации», вып. 21, 1972, стр. 83—90.

Приводятся требования к системам ввода информации с микрофильма в ЭВМ. Для кодирования изображений с микрофильма в двоичный код предлагается использовать способ сканирования снимка растром электронно-лучевой трубки (ЭЛТ) с программным управлением развертывающего пятна. Описывается функциональная схема устройства фотоэлектрического преобразования изображения в код на ЭЛТ и фотоэлектронном умножителе (ФЭУ). Приводятся основные технические данные устройства, а также описание схем коррекции геометрических искажений раstra и динамической подфокусировки электронного луча ЭЛТ, которые необходимы для увеличения разрешающей способности сканирующей системы.

Рисунков 3. Библиографических ссылок 7.

У Д К 621.394.147—621.394.18

Об одном способе увеличения достоверности передачи информации в АСУП. Свиридов В. В., Панов А. Ф. Сб. «Приборы и системы автоматизации», вып. 21, 1972, стр. 90—94.

Предлагается метод повышения достоверности передачи информации позиционным кодом путем организации обратной связи таким образом, чтобы решающая обратная связь дублировалась посимвольным сравнением. Показано, что достоверность передачи в этом случае существенно возрастает при сохранении основного преимущества простого позиционного кода — простоты технической реализации. Приводится функциональная схема системы связи, реализующая описываемую обратную связь с использованием простого позиционного кода.

Рисунков 1. Библиографических ссылок 6.

У Д К 519.82

О сокращении времени и повышении точности проведения депрессионных съемок. Евдокимов А. Г., Деордица Ю. С. Сб. «Приборы и системы автоматизации», вып. 21, 1972, стр. 95—103.

Излагается методика проведения депрессионной и анемометрической съемки, позволяющая значительно повысить точность получаемых параметров горных выработок и вентиляционных сооружений и существенно сократить время, необходимое для производства съемок. Приводятся алгоритмы по выбору месторасположения точек замера и обработки результатов депрессионной съемки, реализация которых на цифровых вычислительных машинах позволяет наиболее эффективно использовать последние с точки зрения требуемого объема памяти, затрат машинного времени и объема исходной информации, необходимой для решения задачи.

Рисунков 1. Библиографических ссылок 3.

У Д К 681.325.53

Выбор синхронного двигателя для преобразователя угла — временной интервал — код. Михайлов В. А., Тырса В. Е. Сб. «Приборы и системы автоматизации», вып. 21, 1972, стр. 103—109.

Рассматриваются вопросы, связанные с выбором синхронного двигателя как чувствительного элемента преобразователя угла — временной интервал — код. Сравниваются различные типы синхронных двигателей, решается дифференциальное уравнение движения выходного вала двигателя типа колеса Ла-Кура с маховиком. Исследуются погрешности, вносимые в процесс преобразования угла из-за неравномерности хода маховика. Приводится количественная оценка этих погрешностей и указаны пути их снижения.

Рисунков 1. Библиографических ссылок 6.

У Д К 681.2.088 : 519.2

Опыт применения преобразования Лапласа для построения функции распределения суммы независимых случайных величин. Михайлов В. А., Тырса В. Е., Романова А. Г. Сб. «Приборы и системы автоматизации», вып. 21, 1972, стр. 109—119.

Рассматриваются вопросы нахождения композиции распределений независимых случайных величин (н. с. в.). Дифференциальные законы распределения н. с. в., полученные из опыта или сложных аналитических выражений, аппроксимируются прямыми линиями, а затем вводятся простые аналитические выражения для их описания. Поскольку при аппроксимации получаются однотипные простые выражения для описания законов распределения н. с. в., это дает возможность получить композицию без перехода от оригиналов компонующих величин к изображениям и обратно. Приводится пример нахождения композиции двух н. с. в.

Таблиц 2. Рисунков 3. Библиографических ссылок 7.

К вопросу об исследовании чувствительности решения многокритериальных задач некоторого класса при вариациях весовых коэффициентов локальных критериев. Кухарев Б. Е. Сб. «Приборы и системы автоматизации», вып. 21, 1972, стр. 119—126.

Сформулирована задача исследования чувствительности решения многокритериальной задачи математического программирования с глобальным критерием «минимум суммарных потерь оптимальности относительно локальных критериев с учетом весовых коэффициентов». Изучалось поведение оптимальной точки компромиссного решения при вариациях весовых коэффициентов для двух случаев задания области ограничений. Получены условия, характеризующие поведение этой точки в малой окрестности исходного решения в соответствии с глобальным критерием.

Библиографических ссылок 2.

Применение теории оптимальных процессов в задачах управления производством и запасами. Олешко А. Я., Середа Л. Н. Сб. «Приборы и системы автоматизации», вып. 21, 1972, стр. 126—134.

Рассматривается оптимальное управление производством и запасами в переходном и установившемся режимах. Предлагается отыскивать оптимальные управления путем совместного решения прямой и обратной задач аналитического конструирования регуляторов.

Рисунков 1. Библиографических ссылок 7.

Алгоритм решения одной задачи кусочно-линейного программирования. Варсак М. И., Куценко Н. Т. Сб. «Приборы и системы автоматизации», вып. 21, 1972, стр. 134—138.

Предлагается компактный алгоритм решения задачи выпуклого кусочно-линейного программирования. С его помощью могут быть решены многие задачи прикладного характера. Простота вычислительной схемы делает алгоритм удобным для реализации на ЭЦВМ. Предлагаемый алгоритм можно успешно использовать и для решения задач линейного программирования.

Библиографических ссылок 3.

Линейная задача синтеза оптимальной по энергозатратам системы регулирующих органов в шахтной вентиляционной сети. Евдокимов А. Г., Шеховцов Б. Г. Сб. «Приборы и системы автоматизации», вып. 21, 1972, стр. 138—153.

Рассмотрен общий алгоритм решения линейной задачи, основанный на целенаправленном переборе деревьев графа сети. Предложена компактная вычислительная процедура, требующая меньшего объема вычислений.

Таблиц 6. Рисунков 2. Библиографических ссылок 8.

О системе оптимального управления водораспределением. Волков А. А., Рыбинков Э. Н. Сб. «Приборы и системы автоматизации», вып. 21, 1972, стр. 153—156.

Излагается краткая общая характеристика системы оптимального управления водоснабжением. В качестве критерия оптимальности принят функционал, выражающий суммарные по системе эксплуатационные расходы, которые зависят от стоимости воды и стоимости электроэнергии. Путем минимизации функционала при соблюдении ограничивающих условий отыскиваются значения вектора оптимального состояния регулирующих органов и, следо-

ательно, вектора оптимального управления водораспределением в сети. В общем случае данная задача является задачей математического программирования.

Рисунков 1. Библиографических ссылок 2.

У Д К 658.51

Об одном эвристическом подходе к задаче выравнивания ресурсов. Забродский В. А., Замков Б. Д., Уберман В. И. Сб. «Приборы и системы автоматик», вып. 21, 1972, стр. 157—160.

Рассматриваются вопросы, связанные с выбором предпочтительных мероприятий по выравниванию ресурсов, влияние которых на целевую функцию определяется с помощью экспертных оценок. Находится квазиградиент целевой функции и проводится процесс оптимизации. Предлагаемый метод может найти применение при устранении «узких» мест в производстве.

Таблиц 1. Библиографических ссылок 2.

У Д К 536.21

К вопросу об определении температурного поля в пластинках с внутренними источниками тепла. Гончарюк И. В. Сб. «Приборы и системы автоматик», вып. 21, 1972, стр. 161—164.

Приводится алгоритм расчета температурного поля пластинок с внутренними источниками тепла. В основе алгоритма лежит использование аппарата теории R-функций. Решение конструируется применительно к использованию вариационных методов. Алгоритм позволяет автоматизировать процесс получения решений данного класса задач с помощью ЭЦВМ.

Рисунков 3. Библиографических ссылок 2.

У Д К 658.51

Расчет оптимального размера партии нормализованных деталей и заготовок в условиях инструментального производства на базе ЭВМ. Светличная А. Г., Шагаев Ю. В. Сб. «Приборы и системы автоматик», вып. 21, 1972, стр. 165—170.

Рассматривается один из возможных подходов к определению оптимального размера партии деталей, запускаемых в производство. Приводится расчет норматива партии нормализованных деталей и заготовок в условиях инструментального производства на базе ЭВМ с применением метода динамического программирования.

Рисунков 4. Библиографических ссылок 2.

У Д К 658.564

Об одном методе решения транспортной задачи. Авраменко В. П., Куценко Н. Т. Сб. «Приборы и системы автоматик», вып. 21, 1972, стр. 170—173.

Предлагается удобный для реализации на ЦВМ метод решения транспортной задачи, по своей идее близкий к методу потенциалов, но более общий и универсальный. Особенно удобен метод при решении вырожденных транспортных задач, таких, как составление оптимального плана перевозок, рациональное использование оборудования, задача о назначениях и другие.

У Д К 62—50

Основные принципы построения оптимальной системы управления комплексом операций с иерархической структурой. Свиридов В. В., Колющенко А. К. Сб. «Приборы и системы автоматик», вып. 21, 1972, стр. 173—177.

Рассмотрены основные принципы построения иерархической структуры системы управления промышленным предприятием, дано определение иерархи-

ческой структуры и приведены ее характерные черты. Показаны различные уровни управления всем комплексом операций и принципы управления на каждом уровне иерархии. Сформулирована задача перераспределения ресурсов и принятия решений для достижения цели с использованием аппарата современной теории управления.

Рисунков 2. Библиографических ссылок 6.

УДК 62.505

Количественная оценка информационных потоков между подсистемами АСУП. Кузьмин И. В., Канарский В. Ф., Мирошниченко В. Т., Гальченко В. И. Сб. «Приборы и системы автоматизации», вып. 21, 1972, стр. 177—183.

Исследуются объемы потоков стационарной и нестационарной информации между подсистемами АСУП на основе статистических данных. Приводятся аналитические выражения, позволяющие выбирать технические средства связи. Предлагается метод приближенной оценки объемов информации между подсистемами.

Библиографических ссылок 3.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
А. Я. Шекшуев. Вопросы социологии АСУП	3
А. А. Волков, Б. К. Коломиец, В. А. Забродский. К вопросу об оценке сложности структур	9
Э. А. Дедиков, С. Г. Ершов, Л. П. Чернина. Об одном способе распределения плана производства по плановым периодам	16
Э. А. Дедиков, А. В. Панишев, В. И. Скибицкая, А. Ю. Тихенко. Алгоритм расчета нормативов прямых затрат на каденле	27
Л. И. Заруцкая, К. Д. Коноваленко, В. А. Склепус. Организационные и математические основы АСУ технологической подго- товки производства	31
А. Г. Светличная. Автоматизированная система оперативно- производственного планирования в условиях инструментального цеха	41
К. Д. Коноваленко. Задачи и функции служб технологи- ческой подготовки производства в условиях АСУП	48
Н. С. Макурин. Методология автоматизированного проектиро- вания процессов холодной штамповки	55
Н. С. Макурин. Система автоматизация технологического проек- тирования (АТП) и ее функционирование	61
В. Б. Шифрин, Н. Г. Бизюк. Исследование статистических ха- рактеристик входного сигнала и синтез систем управления химическим составом сырьевой смеси на цементном заводе	66
А. Ф. Панов. Особенности передачи информации в АСУ	73
В. П. Романов, А. А. Чистюхин, М. А. Кузьмичев, И. Ф. Огороднейчук, А. В. Шатохин, Э. А. Деянсенко, В. В. Смычев. Об одном способе преобразования изображения микро- фильма в код для последующего ввода в ЭВМ	83
В. В. Свиридов, А. Ф. Панов. Об одном способе увеличения достоверности передачи информации в АСУП	90
А. Г. Евдокимов, Ю. С. Деордица. О сокращении времени и повышении точности проведения депрессионных съемок	95
В. А. Михайлов, В. Е. Тырса. Выбор синхронного двигателя для преобразователя угол — временной интервал — код	103
В. А. Михайлов, В. Е. Тырса, А. Г. Романова. Опыт применения преобразования Лапласа для построения функции распре- деления суммы независимых случайных величин	109
Б. Е. Кухарев. К вопросу об исследовании чувствительности решения многокритериальных задач некоторого класса при вариациях весовых коэффициентов локальных критериев	119
А. Я. Олешко, Л. Н. Середы. Применение теории оптимальных процессов в задачах управления производством и запасами	126
М. И. Варсаж, Н. Т. Куценко. Алгоритм решения одной зада- чи кусочно-линейного программирования	134
А. Г. Евдокимов, Б. Г. Шеховцов. Линейная задача синтеза	

оптимальной по энергозатратам системы регулирующих органов в шахтной вентиляционной сети	138
А. А. Волков, Э. Н. Рыбников. О системе оптимального управления водораспределением	153
В. А. Забродский, Б. Д. Зайков, В. И. Уберман. Об одном эвристическом подходе к задаче выравнивания ресурсов	157
И. В. Гончарюк. К вопросу об определении температурного поля в пластинках с внутренними источниками тепла	161
А. Г. Светличная, Ю. В. Шагаев. Расчет оптимального размера партии нормализованных деталей и заготовок в условиях инструментального производства на базе ЭВМ	165
В. П. Авраменко, Н. Т. Куценко. Об одном методе решения транспортной задачи	170
В. В. Свиридов, А. К. Колющенко. Основные принципы построения оптимальной системы управления комплексом операций с иерархической структурой	
И. В. Кузьмин, В. Ф. Княрский, В. Т. Мирошниченко, В. И. Гальченко. Количественная оценка информационных потоков между подсистемами АСУП	173
Рефераты	177
	184

Редактор *Л. И. Решетникова*
 Техредактор *Т. П. Воробийенко*
 Корректоры *Т. А. Жигальцова, Л. П. Пипенко*

Сдано в набор 19/VIII 1971 г. Подписано к печати 17/II 1972 г. БЦ 50080. Формат 60×90^{1/16}. Объем: 12 фз. печ. л., 12 усл. печ. л., 13,3 уч.-изд. л. Зак. 1-1779. Тираж 1370. Цена 1 руб.33 коп. Св. ТП 1972 г. в. 282. «Будівельник»

Типоофсетная фабрика «Коммунист» Комитета по печати при Совете Министров Украинской ССР. Харьков, ул. Энгельса, 11.

1 руб. 33 коп.