

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ НА ТРАНСПОРТЕ

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-849-865

RESEARCH METHODS OF PLANNING PROCESSES IN ADAPTIVE AUTOMATIZED MANUFACTURING CONTROL SYSTEMS

V. D. Chertovskoy

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

In this article Research Problem of Planning Process in new class of Automatized Control System was considered. It was marked that traditional Automatized Manufacturing Control Systems was received wide Spread. It was showed that these Systems, working only with «direct count» tasks, satisfy modern requirements not full measure. It touches of Control Processes Optimization and Registration of high Market Dynamic. These Lacks haven't in new Systems Class – adaptive Systems. Basic Systems Features were determined, three-levels Structure “leader – dispatcher – shop superior” with horizontal and vertical Connections was exposed, Requirements to Methods of mathematical Description were formed. Methods Analyses was organized. Local and system Methods were assigned. Local Methods describe separate Structure Elements and don't satisfy to delivered Requirements. It was showed that many System Methods operation with two-level Structures and three-level Structures have only one Element on each Level with complicated Algorithms.. Suggested by Author integral and homogeneous Methods satisfy Requirements the full.

In integral Method Planning Process describes by linear programming Task and Control Process – by linear quadratic Optimization Task. Homogeneous Method is preferred and used for Planning and Control Processes dynamic linear programming Task that consists of static linear Task and differential Equations. Homogeneous Method was described in more detail. It allowed to create multiple approbated Computer Model working in optimal Regime, recording Transition Procedure to Output of new Product. Model can use in Control Process of real System. Homogeneous Method allowed to generate numerical data for Model Adjust.

Keywords: adaptive automatized systems manufacturing planning control global local methods.

For citation:

Chertovskoy, Vladimir D. “Research methods of planning processes in adaptive automatized manufacturing control systems.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.4 (2017): 849–865. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-849-865.

УДК 681.322

МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ПРОЦЕССОВ ПЛАНИРОВАНИЯ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВОМ

В. Д. Чертовской

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

В работе рассмотрена проблема исследования процессов планирования в новом классе автоматизированных систем управления. Отмечается, что традиционные автоматизированные системы управления производством получили широкое распространение. Показано, что эти системы, работающие только с задачами «прямого счета», не в полной мере удовлетворяют современным требованиям, особенно в части оптимизации процессов планирования и учета высокой динамичности рынка. Указанные недостатки отсутствуют в новом специфическом классе систем — адаптивных системах, для которых необходимо сформировать новые адекватные методы математического описания.

Определены основные особенности систем, для которых выявлена трехуровневая структура: «руководитель — диспетчер — начальники цехов» с горизонтальными и вертикальными связями, и сформулированы требования к методам описания для их сравнительного анализа. Методы разделены на локальные и системные. Локальные методы описывают порознь отдельные структурные элементы и не удовлетворяют поставленным требованиям. Показано, что большинство системных методов оперирует с двухуровневыми структурами, а в трехуровневых структурах на каждом уровне имеется по одному структурному элементу. Динамика процесса, как правило, не учитывается.

Среди системных методов наиболее полно удовлетворяют требованиям предложенные автором интегральный и однородный методы. В интегральном методе процесс планирования описывается задачей линейного программирования, а процесс управления — задачей линейно-квадратичной оптимизации. Более предпочтительным оказался однородный метод, в котором для процессов планирования и управления использована задача динамического линейного программирования как совокупность методов статического линейного программирования и разностных уравнений. Однородный метод позволил создать многократно апробированную компьютерную модель, работающую в оптимальном режиме, учитывающую процедуру оперативного перехода на выпуск новой продукции. Модель может быть использована в процессе управления реальной системой. Метод дал возможность генерировать числовые данные, необходимые для отладки модели.

Ключевые слова: адаптивные автоматизированные системы, производство, планирование, управление, глобальные локальные методы.

Для цитирования:

Чертовской В. Д. Методы изучения процессов планирования в интеллектуальных автоматизированных системах управления производством / В. Д. Чертовской // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 4. — С. 849–865. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-849-865.

Введение

Одним из эффективных направлений решения актуальной задачи создания в стране цифровой экономики в таких отраслях, как судостроение, судоремонт, машиностроение, является формирование интеллектуальных автоматизированных систем управления производством. Успех работы интеллектуальных систем в значительной мере определяется использованием эффективных методов математического описания системных процессов. Для выявления таких методов необходимо провести их сравнительный анализ.

Традиционные автоматизированные системы появились в 60-е годы XX в. вследствие растущего количества предприятий и усложняющихся информационных и информационно-экономических связей [1]. Подсистемное представление структуры автоматизированных систем показано на рис. 1.

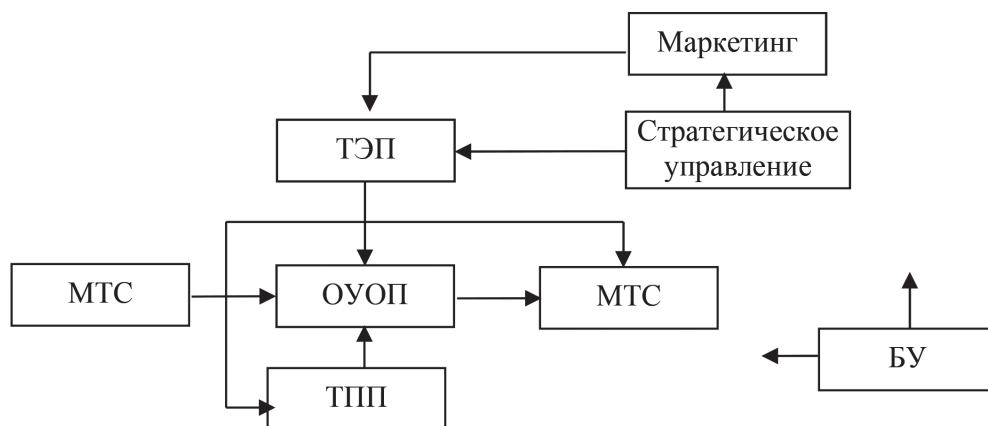


Рис. 1. Укрупненная схема связей функциональных подсистем при рыночных отношениях:

ТЭП — технико-экономическое планирование;

ОУОП — оперативное управление основным производством;

МТС — материально-техническое снабжение и сбыт;

ТПП — техническая подготовка производства; БУ — бухгалтерский учет

Первоначально системы работали в рамках плановой экономики со слабой динамичностью внешней среды. Основными алгоритмами являлись алгоритмы «прямого счета», не выходящие за четыре действия арифметики, для процедур планирования, учета и контроля. В то же время анализ процесса управления позволил сформировать схему цикла управления (рис. 2), впервые предложенную автором в 1980 г. [2] и закрепленную в 90-х годах XX в. в международном стандарте ИСО 9000.

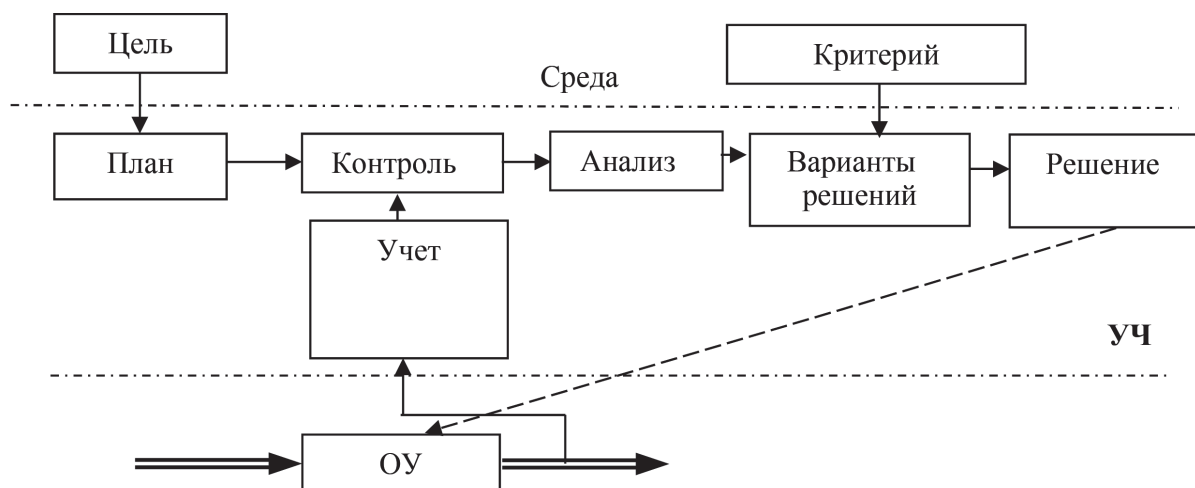


Рис. 2. Схема цикла управления:
ОУ — объект управления; УЧ — управляющая часть

Схема цикла управления позволила показать, что в системах решались статические, как правило, неоптимальные задачи на этапах планирования, учета и контроля в информационно-поисковом режиме. Остальные этапы цикла оставались прерогативой человека. Однако уже к 80-м годам XX в. возникла необходимость в учете динамики среды и самой системы [3], в оптимизации процессов управления и построении высокоавтоматизированных систем, что возможно при компьютеризации процедур выработки решений-советов и их реализации.

Широко известные автоматизированные системы управления производством уже не в полной мере удовлетворяли условиям высокودинамичного рынка и растущей конкуренции. Все чаще приходилось обращаться к интеллектуальным системам [4] – [7], в которых состав вектора цели (спроса) изменялся в процедуре функционирования. Сложившиеся обстоятельства потребовали формирования адекватных методов математического описания и реализации интеллектуальных систем, о которых пойдет речь в данной работе.

Методы и материалы

Следует отметить, что для современных систем управления производством в приборо-, машино- и кораблестроении в легкой промышленности характерны изменения целей функционирования. Автоматизированные системы управления производством являются частью АСУ предприятия и охватывают подсистемы технико-экономического планирования и оперативного управления основным производством (*подсистемное представление*) или бизнес-процесс «Производство» (*процедурное представление*).

Системный анализ таких систем позволил выявить трехуровневую структуру (рис. 3), учитывающую всевозможные изменения масштабов по координатам и времени при переходе с уровня на уровень. Наличие большего числа уровней затрудняет расчеты из-за большой разницы во времени процессов самого верхнего и самого нижнего уровней. При наличии большего числа уровней целесообразнее использовать «скольжение» по ним трехуровневой структуры.

Уровни:

$h = 3$ — руководитель

$h = 2$ — диспетчер

$h = 1$ — цехи

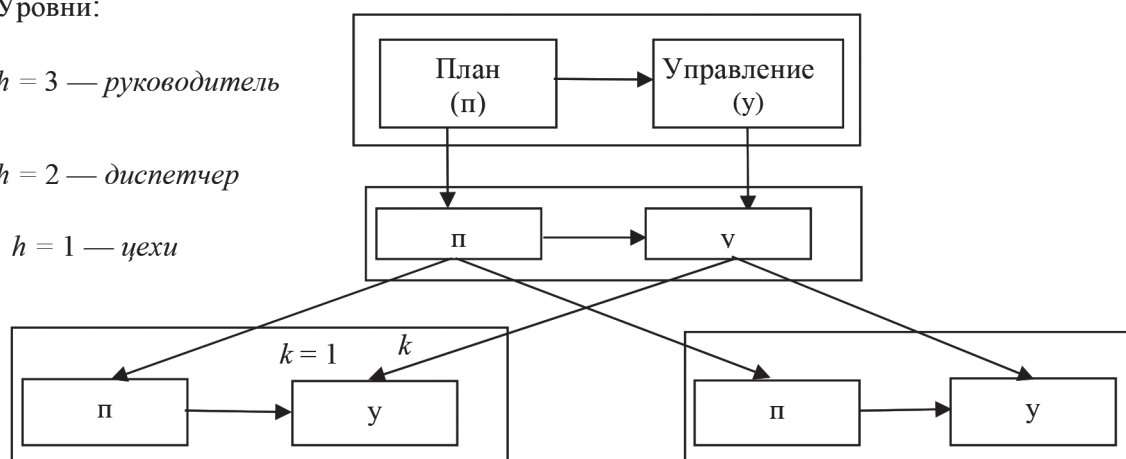


Рис. 3. Структура трехуровневой системы

Функциональное наполнение структуры системы при математическом исследовании процессов определяется спецификой системы. Укажем основные особенности, которые следует учитывать при формировании математического аппарата.

О1. Трехуровневая структура с вертикальными и горизонтальными связями, при этом на нижних уровнях имеется более одного структурного элемента.

О2. Изменение масштабов по координатам и времени при переходе с уровня на уровень.

О3. Связанные процессы планирования и управления во всех структурных элементах.

О4. Оптимальные методы процессов планирования и управления для наилучшего использования возможностей компьютеров.

О5. Оперативный переход на выпуск новой продукции.

О6. Однородность (однотипность) системного описания оптимальных процессов динамического планирования и нелинейного управления.

О7. Интеграция экономических и динамических свойств системы.

О8. Согласование экономических и координация динамических характеристик.

Указанным требованиям традиционные АСУ производства уже не удовлетворяли. Применяемые в них неоптимальные методы математического описания и алгоритмы можно разделить на две группы (табл. 1).

Таблица 1

Математические методы изначальных АСУ

Методы	Достоинства	Недостатки
Задачи «прямого счета», системы «Галактика», BAAN	Трехуровневая структура вида О1. Изменение масштабов (О2)	Только процесс планирования (О3). Неоптимальные алгоритмы «прямого счета». Невозможность оперативного перехода на выпуск новой продукции (О5)
Алгоритмы-ограничения	Трехуровневая структура вида О1. Изменение масштабов (О2)	Только процесс планирования (О3). Неоптимальные алгоритмы-ограничения. Невозможность оперативного перехода на выпуск новой продукции (О5)

Алгоритм «прямого счета» может быть представлен в виде решения следующей задачи.

Задача «прямого счета» (расчет плана по прибыли и рентабельности). Введем следующие обозначения: $j = 1; J$ — вид выпускаемой продукции; C_{npj}, C_{np} — прибыль от выпуска j -й продукции и всей продукции; P_j — количество j -й продукции, выпускаемой за год; S_j, S — соответственно цена единицы j -й продукции и стоимость всей продукции:

$$C_{np} = \sum_{j=1}^J C_{npj} P_j; S = \sum_{j=1}^J S_j P_j;$$

$$C_{np} = \sum_{j=1}^J C_{npj} P_j; S = \sum_{j=1}^J S_j P_j.$$

Схема связей подобных задач функциональных подсистем [1] приведена на рис. 4.

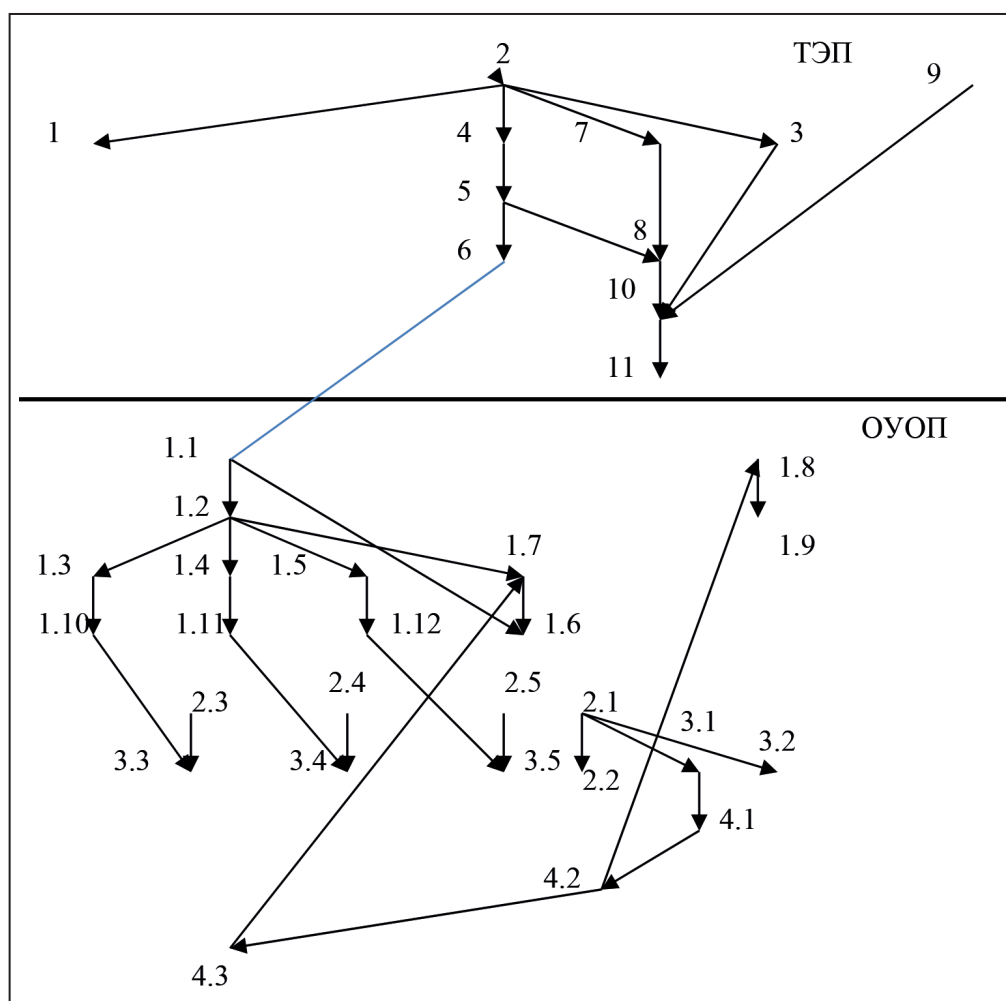


Рис. 4. Граф задач подсистем технико-экономического планирования и оперативного управления основным производством

Еще одной группой методов, распространенных в автоматизированном управлении, являются методы, сопровождающие Enterprise Resource Planning (ERP-системы) [8] и базирующиеся на ограничениях. ERP-системы хронологически прошли путь MRP- MRPII- ERP-CSRP. Material Requirement Planning (MRP) предполагал компьютерное определение потребностей в материалах в виде следующих ограничений: если a_{ij} — норма расхода материала на единицу продукции j , P_j — величина заказа клиента, b_i — наличное количество материала, то должно соблюдаться неравенство

$$\sum_{j=1}^J a_{ij} P_j \leq b_i.$$

Manufacturing Resource Planning (MRPII) добавил расчет потребных мощностей (время работы оборудования). При этом решение задач-ограничений идет итеративно: вначале решают задачу для материальных ресурсов, затем — для мощностей.

В методе Advanced Planning and Scheduling (APS), получившем в отечественной литературе название «синхронное планирование и оптимизация — СПО», задачи-ограничения решаются совместно (синхронно). Это не устраняет, однако, итеративности расчета, но и оптимизация в методе отсутствует. В методе Customer Synchronized Resource Planning (CSRП) планирование ресурсов синхронизировано с действиями покупателей (клиентов). Соотношение перечисленных методов математического описания элементов системы показано на рис. 5. В его правой ветви отражены методы BPI — Business Process Improving; CPI — Continuous Process Improving — повышение качества продукции по критериям качества потребителей, но не рост прибыли любой ценой; BPR — Business Process Reengineering.

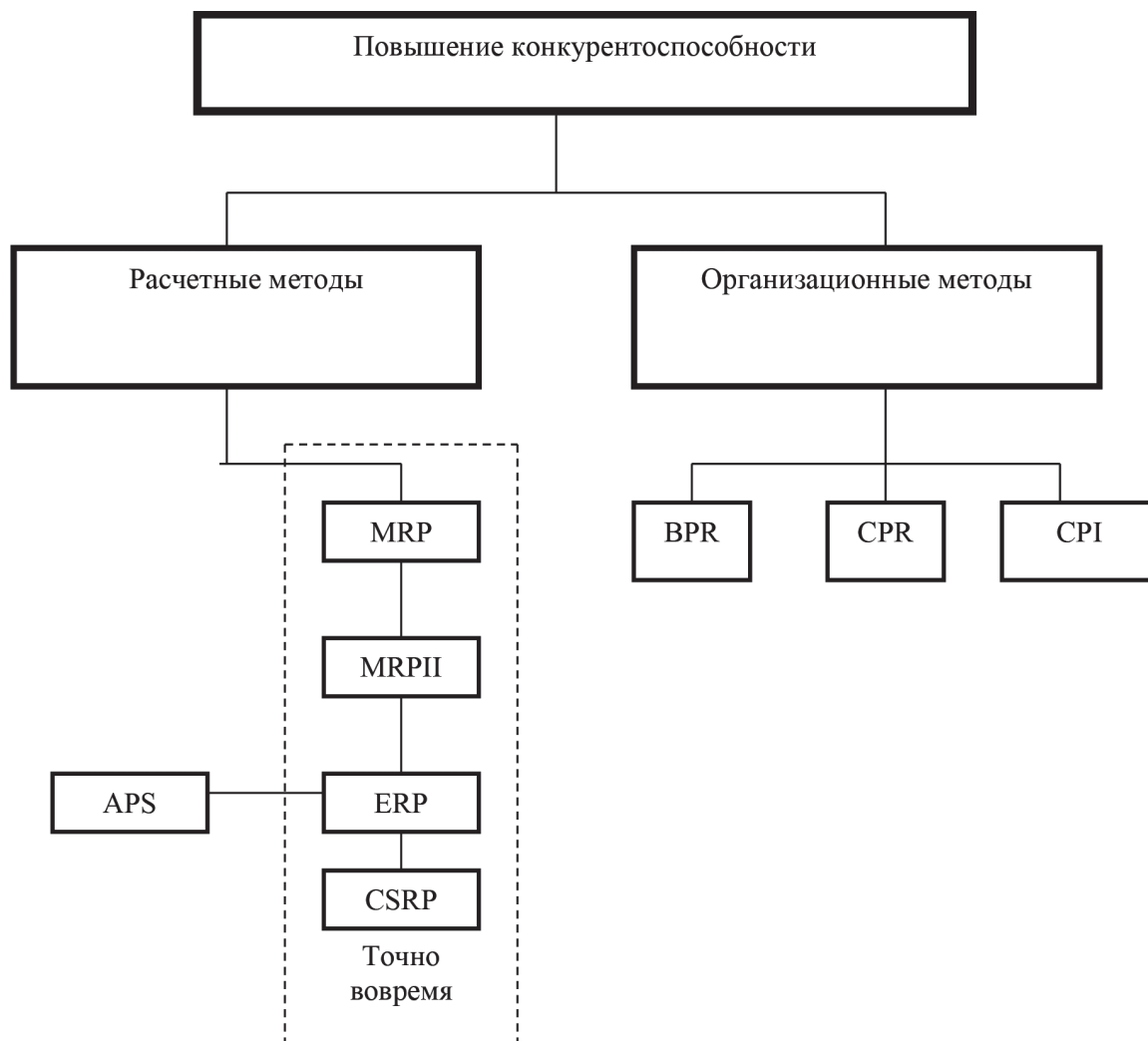


Рис. 5. Соотношение методов процедурного подхода

Первоначально рассматривались системы с двухуровневой структурой, а затем — с «веерной» [9]. Частотные методы оперируют, как правило, со скалярными величинами, тогда как современные системы характеризуются векторными величинами. Попытка [10] учета векторного характера не дала очевидных преимуществ по сравнению с методом пространства состояний,

с использованием которого позднее появилось множество работ. Автоматизированные двухуровневые системы впервые были рассмотрены в работе [11], в которой использовался теоретико-множественный аппарат описания, что не позволяло получать прикладные результаты.

Развитием предложенного направления явились двухуровневые системы оптимального планирования [12], для описания которых использовался аппарат статического линейного программирования. Фактически процедуру решения одноуровневой задачи трансформируют в двухуровневую процедуру. Целевые функции уровней согласованы постановкой задачи, что встречается не всегда. Заметим, что интервалы времени на разных уровнях одинаковы. Общая структура таких систем представлена на рис. 6, а. Ее частным случаем является структура с последовательным соединением подсистем (рис. 6, б).

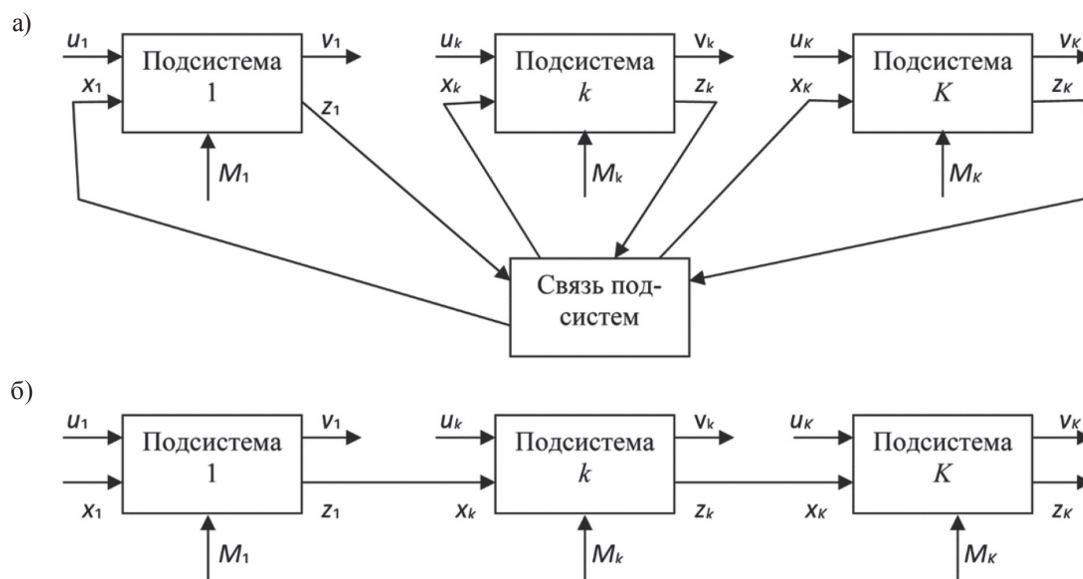


Рис. 6. Структуры системы вычислений: общая (а) и с последовательным соединением элементов (б)

Более интересным является применение СЛП в случае, когда необходимо согласование целевых функций [13]. Метод послужил, фактически, родоначальником целой группы методов, поэтому рассмотрим его более подробно. Схема такой задачи имеет следующий вид (рис. 7). Имеется один элемент (Центр) на верхнем уровне и K ($k = 1, K$) элементов (автономных производств без горизонтальных связей между ними) на нижнем уровне. Центр располагает ресурсом в количестве X_0 , который необходимо распределить между производствами в количестве x_k в соответствии с их запросами s_k .

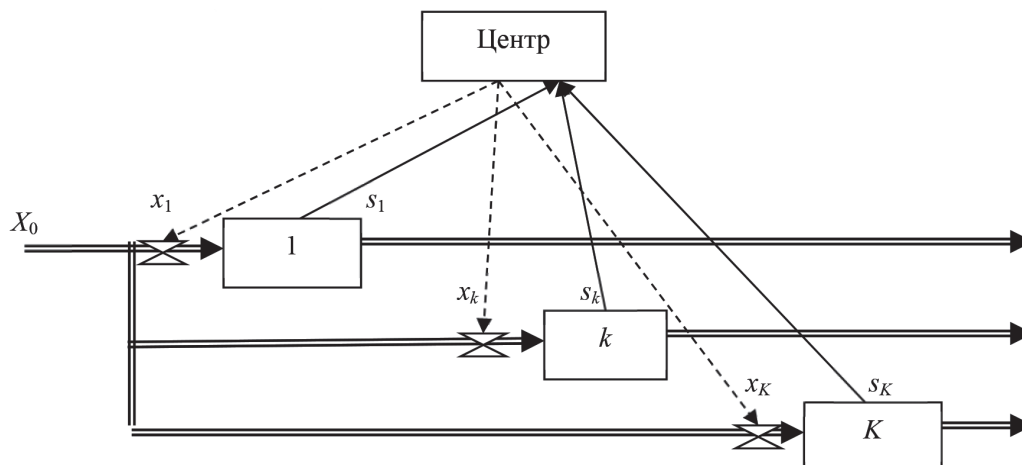


Рис. 7. Система распределения ресурса

Элементы используют ресурсы с эффективностью $r_k f(x_k)$, где r_k — числовой коэффициент эффективности; $f(x_k)$ — функция использования ресурсов. Работа системы идет в условиях неопределенности. *Центр* не знает точной величины r_k ($r_k \neq s_k$) и судит о ней по диапазону изменения r_k и сообщениям s_k элементов. В свою очередь, элементы не знают точной величины X_0 (дефицит или избыток). Необходимо выработать закон взаимодействия *Центра* и элементов, чтобы соблюдалось условие $r_k = s_k$.

Центр руководствуется следующей целевой функцией:

$$\Phi = \sum_{k=1}^K f(x_k) / s_k \rightarrow \min$$

при ограничении

$$\sum_{k=1}^K x_k \leq X_0,$$

k -й элемент использует целевую функцию

$$\varphi_k = f(x_k) / (r_k - \lambda x_k) \rightarrow \max,$$

где λ — цена единицы ресурса.

На этапе подготовки данных элементы сообщают *Центру* свои оценки s_k коэффициента эффективности r_k . Условие $s_k \neq r_k$ служит проявлением активности элементов.

На этапе процесса планирования *Центр* решает свою задачу оптимизации, при этом применяя $f(x_k) = (1/2)(x_k)^2$ — разновидность производственной функции. На этапе реализации плана *Центр* оценивает успешность работы элементов.

Возможны различные разновидности принципов работы системы, подробно описанные в [13], из которых рассмотрим два.

1. При использовании принципа жесткой централизации цена λ постоянна ($\lambda = \text{const}$) в течение всей игры. Тогда

$$x_k = s_k R / \sum_{j=1}^K s_j.$$

Показано, что в выигрыше оказываются элементы, сообщающие неверные сведения об r_k .

2. При применении принципа согласованного управления *Центр* на этапе планирования решает ранее описанную задачу совместно с условием

$$f(x_k) - \lambda x_k = \max_{0 \leq v_k \leq \infty} \left(\frac{f(v_k)}{s_k} - \lambda v_k \right),$$

цена λ — переменна и определяется из решения системы выражений:

$$df(x_k) / d\lambda = l / s_k;$$

$$\sum_{k=1}^K x_k \leq X_0.$$

В этом случае x_k определяется так же, как и при жесткой централизации, а $\lambda = R / \sum_{j=1}^K s_j$. В рассматриваемом случае элементам выгоднее сообщать правильную информацию. Заметим, что здесь речь идет о согласовании задач уровней только с вертикальными связями (верная структура). Позднее для указанных целей было предложено использовать игровые алгоритмы в двухуровне-

вой структуре с двумя игроками [13], [14] и двухуровневое булево программирование с приближенным сложным методом решения [15], [16].

Своеобразная двухуровневая система расчета представлена в работе [17]. Сначала с помощью задач статического линейного программирования осуществляется выбор состава оборудования и вырабатывается вариант расписания. Далее расписание уточняется с помощью имитационного моделирования. Сравнительные характеристики методов для двухуровневой структуры приведены в табл. 2. Математическое описание двухуровневой системы послужили базой для целого ряда новых методов.

Таблица 2

Методы исследования двухуровневых иерархических АСУ

Метод	Достоинства	Недостатки
Д1. Частотный [10]	Иерархическая динамическая система	Одинаковые масштабы на уровнях. Только процесс неоптимального управления. Неучет экономических свойств. По одному элементу на уровне
Д2. Частотный [11]	Иерархическая динамическая система. Учет горизонтальных связей	Одинаковые масштабы на уровнях. Только процесс неоптимального управления. Неучет экономических свойств. «Веерная» структура
Д3. Пространство состояний [11]	Иерархическая динамическая система. Учет горизонтальных связей	Одинаковые масштабы на уровнях. Только процесс неоптимального управления. Неучет экономических свойств. «Веерная» структура
Д4. Теоретико-множественная модель [12]	Учет горизонтальных связей	Невозможность получения прикладных результатов
Д5. Процесс планирования [12]	Учет горизонтальных связей. Оптимальность алгоритмов. Учет экономических свойств	Неучет динамических свойств. Одинаковый масштаб на уровнях
Д5. Процесс планирования [13]	Учет горизонтальных связей. Оптимальность алгоритмов. Учет экономических свойств	Неучет динамических свойств. Одинаковый масштаб на уровнях. «Веерная» структура системы
Д6. Процесс планирования [13] – [16]	Оптимальность алгоритмов. Учет экономических свойств	Неучет динамических свойств. Одинаковый масштаб на уровнях. По одному элементу на уровнях
Д7. Хоботов [17]	Использование нелинейного и стохастического программирования	Процесс планирования

В 90-е годы XX в. появилась необходимость описания трехуровневых структур автоматизированных систем. Сравнительные характеристики методов для трехуровневой структуры показаны в табл. 3.

Таблица 3

Методы исследования трехуровневых иерархических АСУ

Метод	Достоинства	Недостатки
T1. Интегральный метод [22], [23]	Учтены особенности O1 – O5	Неоднородное описание процессов планирования и управления. Затруднения в экономической трактовке квадратичного критерия для динамики. Неучет нелинейностей в описании процесса управления
T2. Однородный метод [22], [23]	Учтены все особенности O1 – O7	Применение только для неколебательных переходных процессов в системе
T3. Процесс планирования [18]	Три уровня	Неучет процесса управления. Отсутствие изменения масштабов. Отсутствие горизонтальных связей. По одному элементу на уровне
T4. Голенко [19]	Предприятие – цех – участок	Процесс планирования
T5. Динамические игры и оптимальное управление [20], [21]	Оптимальные алгоритмы	По одному элементу на каждом уровне. Неизменный масштаб. Отсутствие оценки экономических свойств. Неучет процесса планирования
T6. Активные методы [6]	Формализация плановых решений, связанных с «человеческим фактором»	Преимущественно двухуровневые объекты с «веерной» структурой. Слабый учет горизонтальных связей. Неучет процесса планирования

Различные варианты описания трехуровневых систем представлены в работах [18] – [21]. В работе [18] рассматривается процесс планирования в системе с трехуровневой «веерной» структурой. Математический расчет проводится с помощью задачи нелинейного и выпуклого программирования. В публикации [19] рассмотрена трехуровневая структура: *предприятие – цех – участок* для процесса планирования с использованием задач нелинейного и стохастического программирования. Сложные алгоритмы решения стохастических задач сводятся к более простым детерминированным, а нелинейные и выпуклые задачи решаются с помощью эвристических алгоритмов.

Трехуровневая система с «веерной» структурой описана и в работах [6], [20], [21]. В работе [6] освещены специфические методы, названные *механизмами* (рис. 8). В публикации [21] рассмотрена трехуровневая схема: *принципал – супервайзер – исполнитель*. Расчеты выполняются методами оптимального управления и динамических игр. В работе [21] выделено три уровня: *федеральный центр – органы управления – промышленные предприятия*. Рассмотрена управляемая динамическая система с «веерной» структурой. Управляющие воздействия вырабатываются методами принуждения и побуждения. Более детальная характеристика активных методов по предмету управления представлена в табл. 4, а по мотивации управления — в табл. 5.

Особый интерес вызывает совокупность (см. рис. 8) активных методов [6] для двух- и трехуровневой структуры с использованием игровых методов и задачи статического линейного программирования. Для методов введены новые понятия. Под *стимулированием* понимается побуждение центра к совершению определенных действий агентом путем воздействия на его целевую функцию. *Мотивация* — это приведение доводов в пользу чего-либо. Активные методы более подходят для процесса планирования и отличаются итеративным характером решения задачи для одного интервала времени. Для процесса управления их применение проблематично.

Одними из первых работ, учитывающих динамические процессы в системе, являются работы [22], [23], в которых были предложены два метода: интегральный и однородный. Процессы планирования и управления с применением этих методов проиллюстрированы на примере описания диспетчерского уровня ($h = 2$).

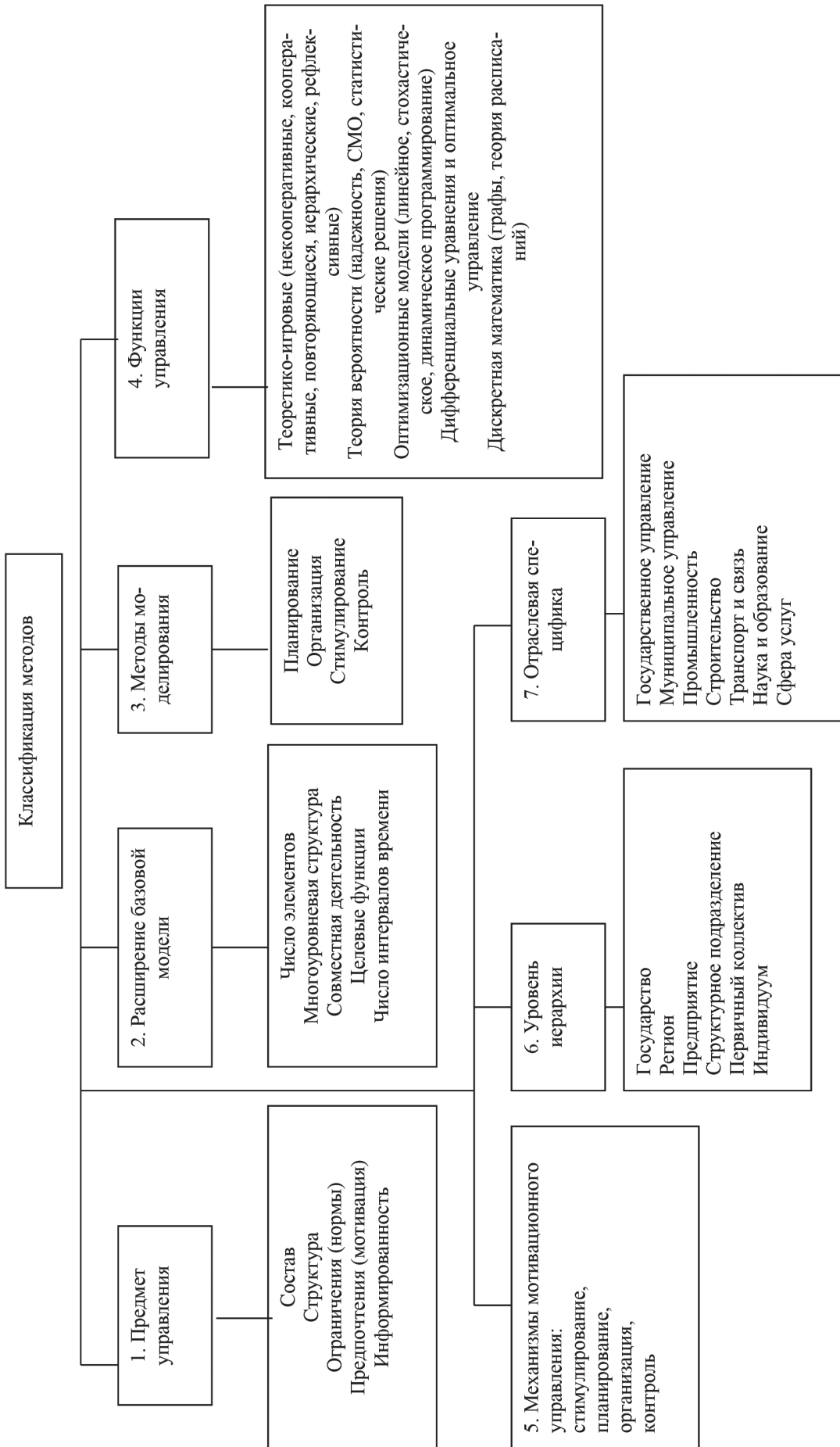


Рис. 8. Классификация механизмов управления

Таблица 4

Классификация по предмету управления

Метод (механизм) управления	Предмет управления
Составом	Расчет
Структурой	Иерархия над технологическим графом (при наличии ограничений). Иерархия над технологической цепью (при наличии ограничений, два уровня). Выбор типа структуры (матричная или функциональная). Сетевые структуры (всемерная двухуровневая структура)
Институциональное	Управление ограничениями (дополнительные ограничения) Институциональное и мотивационное управление (один агент, остальные позиции — несколько агентов). Институциональное управление в многомерных системах. Управление нормами деятельности. Аккордная оплата труда. Дуопология Курно
Информированное	Производитель и посредник. Коррупция. Формирование команды. Предвыборная борьба. Реклама товара
Мотивационное (см. табл. 5)	Стимулирование. Планирование. Организация. Контроль

Таблица 5

Функции и механизмы мотивационного управления

Функция управления	Метод (механизм)
Стимулирование	Непрерывная модель (игра <i>Центр – Агент</i>). Дискретная модель (игра двух лиц: <i>Центр – Агент</i>). Базовый (один элемент). Контракты (Ц — природа, вероятности). Индивидуальный результат (одно и многоэлементная игра с индивидуальной информацией). Результаты коллективные (многоэлементная игра с агрегированной информацией). Унифицированный (унифицированные агенты). Бригадная оплата труда (КТУ, КТВ). В матричных структурах управления два уровня управляющей части Ранговый (ранги агентов). Экономическая мотивация (нормативы: ставки агентов и т. д.)
Планирование	Распределение ресурса (информацию сообщает агент). Активная экспертиза (искажение информации). Внутренние цены (известны типы агентов). Конкурс (известны типы агентов). Обмен (известны типы агентов)

Таблица 5
(Окончание)

Организация	Смешанное финансирование (из многих источников). Противозатратный (антимонопольный) механизм Затраты — эффект (способы накопления, динамическое. программирование). Самоокупаемость (технологическая цепочка). Страхование (страхование риска). Оптимизация производственного цикла (технологическая цепочка). Назначение агентов на разные операции
Контроль	Комплексное оценивание (иерархия оценок). Согласие (распределение). Многоканальный. Дополнительные соглашения

Результаты

Интегральный метод. Процесс планирования описывается с помощью задачи статического или динамического линейного программирования, а процесс управления — с помощью задачи линейно-квадратичной оптимизации. Используем для планирования задачу динамического линейного программирования. Процесс планирования для отдельного структурного элемента описывается следующим образом:

$$\mathbf{z}_k(t_i) = \mathbf{A}_k \mathbf{z}_k(t_{i-1}) + \mathbf{B}_k \mathbf{p}_{1k}(t_{i-1}), \mathbf{z}_k(0) = \mathbf{z}_{k0};$$

$$\mathbf{p}_k(t_i) = \mathbf{F}_k \mathbf{z}_k(t_{i-1});$$

$$\sum_{i=0}^{N-1} \mathbf{D}_1^m \mathbf{p}_{1k}(t_i) \leq \mathbf{b}^m(0);$$

$$\sum_{i=0}^{N-1} \mathbf{p}_K(t_i) \leq \mathbf{P}(T);$$

$$\mathbf{D}_k^\Psi \mathbf{p}_k(t_{i+1}) \leq \mathbf{b}_k^\Psi(t_i);$$

$$\mathbf{D}_k^m \mathbf{p}_{1k}(t_{i+1}) \leq \mathbf{p}_{k-1}(t_i);$$

$$\mathbf{b}_k^\Psi(t_i) = \mathbf{b}_k^\Psi(t_{i-1}) + \Delta \mathbf{b}_k^\Psi(t_{i-1});$$

$$G_k = -\mathbf{F}_k \mathbf{P}_k(T) \rightarrow \min;$$

$$i = 0, N-1, t_i = iv, t_0 = 0, T = Nv,$$

где $\mathbf{z}$, $\mathbf{p}$ — вектор-столбцы (планового) незавершенного производства и ежедневного плана; $\mathbf{p}_1$ — вектор-столбец запуска комплектов ресурсов в производство; $\mathbf{D}$ — матрица норм расходов ресурсов; $\mathbf{b}$ — вектор-столбец наличного количества ресурсов; $\mathbf{b}^m$ — вектор количества материальных ресурсов; $\mathbf{b}^\Psi$ — вектор количества других ресурсов; $\Delta \mathbf{b}$ — поступление ресурсов; $\mathbf{P}$ — вектор-столбец плана уровня руководителя; $\mathbf{F}$ — вектор-строка прибыли от выпуска единицы продукции; $\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$, $\mathbf{C}$ — единичные матрицы соответствующих размерностей; v , T — минимальный интервал времени и время моделирования; m ($m = 1, M$) — виды материальных ресурсов; ψ ($\psi = 1, \Psi$) — виды прочих ресурсов; i ($i = 1, I$) — моменты времени; k ($k = 1, K$) — номер подразделения.

Для процесса управления справедливы следующие выражения:

$$\mathbf{z}_k(t_i) = \mathbf{A}_k \mathbf{z}_k(t_{i-1}) + \mathbf{B}_k \mathbf{u}_k(t_{i-1}), \mathbf{z}_k(0) = \mathbf{z}_{k0};$$

$$\mathbf{y}_k(t_i) = \mathbf{C}_k \mathbf{z}_k(t_i);$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}_k(t_i) = \mathbf{p}_k(t_i) - \mathbf{y}_k(t_i);$$

$$J_k = \boldsymbol{\varepsilon}_k T(N) \mathbf{C}_{1k} \boldsymbol{\varepsilon}_k(N) + \sum_{i=0}^{N-1} \{ \boldsymbol{\varepsilon}_k T(t_i) \mathbf{C}_{1k} \boldsymbol{\varepsilon}_k(t_i) + \mathbf{u}_k T(t_i) \mathbf{C}_{2k} \mathbf{u}_k(t_i) \} \rightarrow \min;$$

$$i = 0, N-1, t_i = iv, t_0 = 0, T = Nv,$$

где $\mathbf{z}$, $\mathbf{y}$ — векторы-столбцы состояния и выхода, $\mathbf{u}$ — вектор-столбец управления; $\mathbf{p}$ — вектор-столбец плана; $\boldsymbol{\varepsilon}$ — вектор столбец отклонений; $\mathbf{D}$ — матрица норм расходов; $\mathbf{b}$ — вектор-столбец наличного количества ресурсов; $\mathbf{b}^m(0)$ — вектор количества материальных ресурсов, которыми располагает руководитель; $\Delta \mathbf{b}$ — поступление ресурсов; $\mathbf{Y}$ — вектор-столбец управления уровня $h = 3$; $\mathbf{C}_1$, $\mathbf{C}_2$ — матрицы потерь от отклонений и затрат на дополнительные ресурсы для управления; $\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$, $\mathbf{C}$ — матрицы, отражающие динамику процесса управления v , T — минимальный интервал времени и время моделирования; m — виды материальных ресурсов; ψ — виды прочих ресурсов; i — моменты времени k — номер подразделения.

При этом предполагается априори, что соблюдаются условия:

$$\sum_{i=0}^{N-1} \mathbf{D}_1^m \mathbf{u}_{1k}(t_i) \leq \mathbf{b}^m(0);$$

$$\mathbf{y}_K(T) \leq \mathbf{Y}(T);$$

$$\mathbf{D}_k^\psi \mathbf{u}_k(t_i) \leq \mathbf{b}_k^\psi(t_{i-1}), \mathbf{D}_k^m \mathbf{u}_k(t_{i+1}) \leq \mathbf{y}_{k-1}(t_i);$$

$$\mathbf{b}_k^\psi(t_i) = \mathbf{b}_k^\psi(t_{i-1}) + \Delta \mathbf{b}_k^\psi(t_{i-1}).$$

Для интегрального метода характерны следующие недостатки.

1. Требуется знание двух видов описания.
2. Не учитывается нелинейный вариант описания процесса управления.
3. Имеются трудности трактовки квадратичного критерия процесса планирования с экономических позиций.

Этих недостатков лишен однородный метод.

Однородный метод. Процесс планирования описывается так же, как и в интегральном методе, иначе представлен процесс управления:

$$\mathbf{z}_k(t_i) = \mathbf{A}_k \mathbf{z}_k(t_{i-1}) + \mathbf{B}_k \mathbf{u}_k(t_{i-1}), \mathbf{z}_k(0) = \mathbf{z}_{k0};$$

$$\mathbf{y}_k(t_i) = \mathbf{C}_k \mathbf{z}_k(t_i);$$

$$\sum_{i=0}^{N-1} \mathbf{D}_1^m \mathbf{u}_{1k}(t_i) \leq \mathbf{b}^m(0);$$

$$\mathbf{y}_K(T) \leq \mathbf{Y}(T);$$

$$\mathbf{D}_k^m \mathbf{u}_k(t_{i+1}) \leq \mathbf{y}_{k-1}(t_i);$$

$$\mathbf{D}_k^m \mathbf{u}_k(t_i) \leq \mathbf{b}_k^m(t_{i-1});$$

$$\mathbf{b}_k^\psi(t_i) = \mathbf{b}_k^\psi(t_{i-1}) + \Delta \mathbf{b}_k^\psi(t_{i-1});$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}_k(t_i) = \mathbf{p}_k(t_i) - \mathbf{y}_k(t_i);$$

$$J_k = \sum_{i=0}^N \{ \mathbf{C}_{1k} \boldsymbol{\varepsilon}_k(t_i) + \mathbf{C}_{2k} \mathbf{u}_k(t_i) \} \rightarrow \min;$$

$$i = 0, N - 1, t_i = i\tau, t_0 = 0, T = N\tau,$$

где $\mathbf{z}$, $\mathbf{y}$ — векторы-столбцы состояния и выхода, $\mathbf{u}$ — вектор-столбец управления; $\mathbf{p}$ — вектор-столбец плана; $\boldsymbol{\varepsilon}$ — вектор столбец отклонений; $\mathbf{D}$ — матрица норм расходов; $\mathbf{b}$ — вектор-столбец наличного количества ресурсов; $\mathbf{b}^m(0)$ — вектор количества материальных ресурсов, которыми располагает уровень $h = 3$; $\Delta\mathbf{b}$ — поступление ресурсов; $\mathbf{Y}$ — вектор-столбец управления уровня $h = 3$; $\mathbf{C}_1$, $\mathbf{C}_2$ — векторы-строки потерь от отклонений и затрат на дополнительные ресурсы для управления; $\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$, $\mathbf{C}$ — матрицы, отражающие динамику процесса управления v ; T — минимальный интервал времени и время моделирования; m — виды материальных ресурсов; ψ — виды прочих ресурсов; i — моменты времени; k — номер подразделения.

Однородный метод имеет и некоторые ограничения. Он напрямую применим только для неколебательных переходных процессов. Если процесс колебательный, то следует в линейном критерии использовать модуль, при этом надо либо усложнять алгоритм решения, либо применять схемное решение на модели системы. Из ранее изложенного видно, что наиболее предпочтительным остается однородный метод.

Обсуждение результатов

Однородный метод в настоящее время имеет определенное предпочтение по сравнению с другими. Он достаточно прост в понимании и компьютерной реализации, является системным прикладным методом описания оптимальных динамических процессов в трехуровневой системе, учитывает возможность оперативного перехода на выпуск новой продукции, позволяет вырабатывать решения и оценивать последствия их реализации,

Заключение

Проведенный анализ показывает, что по мере роста требований к АСУ производством усложнялся математический аппарат их описания:

- от «задач прямого счета», через описание с помощью ограничений, к оптимальным алгоритмам;
- от отдельного решения задач планирования и задач управления к совместным задачам планирования и управления;
- от разнородного описания процессов планирования и управления к их однородному связанному представлению с возможностью описания процедур оперативного перехода на выпуск новой продукции.

Новым требованиям удовлетворяет предложенный автором однородный метод. Его дальнейшее развитие связано в построением компьютерной модели для использования в управлении реальной системой. Он позволяет получать согласованные и скоординированные решения и служить основой для генерации числовых данных, необходимых для процедуры отладки работоспособной модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Основы построения АСУ / под ред. В. И. Костюка. — М.: Сов. радио, 1977. — 304 с.
2. Чертовской В. Д. Автоматизация оперативного управления основным производством / В. Д. Чертовской. — Минск: Белорус. политех. ин-т, 1982. — 32 с.
3. Бобко И. М. Адаптивная АСУ производством / И. М. Бобко, Г. И. Марчук, А. Г. Аганбегян; под ред. Г. И. Марчука. — М.: Статистика, 1981. — 384 с.
4. Васильев С. Н. Интеллектуальное управление динамическими системами / С. Н. Васильев. — М.: Физматлит, 2000. — 352 с.
5. Мизон В. А. Интеллектуальные методы управления предприятием / В. А. Мизон. — СПб.: Академия управления и экономики, 2008. — 302 с.
6. Новиков Д. А. Теория управления организационными системами / Д. А. Новиков. — М.: Физматгиз, 2012. — 344 с.

7. Артамошин А. Н. Интеллектуальные организационно технические системы / А. Н. Артамошин, О. И. Близнава [и др.]. — М.: Академия, 2016. — 256 с.
8. Питеркин С. В. Точно вовремя для России. Практика применения ERP / С. В. Питеркин, Н. А. Осадов, Д. В. Исаев. — М.: Альпина Паблишер, 2002. — 368 с.
9. Александров А. Г. Частотное адаптивное управление по заданной точности / А. Г. Александров, Д. В. Шатов // Проблемы управления. — 2014. — № 5. — С. 7–13.
10. Гайдук А. Р. Синтез нелинейных селективно инвариантных систем на основе управляемой формы Жордана / А. Р. Гайдук // Автоматика и телемеханика. — 2013. — № 7. — С. 3–16.
11. Месарович М. Теория иерархических систем / М. Месарович, Д. Мако, Я. Такахара; пер. с англ. — М.: Мир, 1973. — 344 с.
12. Системы: декомпозиция, оптимизация и управление / сост. М. Сингх, А. Титли; пер. с англ. — М.: Машиностроение, 1986. — 496 с.
13. Бурков В. Н. Основы математической теории активных систем / В. Н. Бурков. — М.: Наука, 1977. — 256 с.
14. Горелов М. А. Иерархическая игра с умышленно искажаемой информацией / М. А. Горелов // Автоматика и телемеханика. — 2016. — № 4. — С. 99–113.
15. Лавлинский С. М. Двухуровневая модель государственно-частного партнерства / С. М. Лавлинский, А. А. Панин, А. В. Плясунов // Автоматика и телемеханика. — 2015. — № 11. — С. 89–103.
16. Береснев В. Л. О задаче конкурентного размещения предприятий со свободным выбором поставщиков / В. Л. Береснев // Автоматика и телемеханика. — 2014. — № 4. — С. 94–105.
17. Павлов К. С. Модели выбора и замены оборудования в производственных системах машиностроительных предприятий / К. С. Павлов, Е. Н. Хоботов // Автоматика и телемеханика. — 2015. — № 2. — С. 125–140.
18. Сагынгаалиев К. С. Согласование планирования в трехуровневой активной системе / К. С. Сагынгаалиев // Автоматика и телемеханика. — 1988. — № 3. — С. 80–91.
19. Голенко-Гинзбург Д. Управление трехуровневой производственной системой типа «человек-машина» / Д. Голенко-Гинзбург, В. Кац, С. Ситняковский, Э. Л. Ицкович // Автоматика и телемеханика. — 2000. — № 5. — С. 166–184.
20. Угольницкий Г. А. Алгоритмы решения дифференциальных моделей иерархических систем управления / Г. А. Угольницкий, А. Б. Усов // Автоматика и телемеханика. — 2016. — № 5. — С. 148–158.
21. Угольницкий Г. А. Трехуровневые системы управления эколого-экономическими объектами веерной структуры / Г. А. Угольницкий, А. Б. Усов // Проблемы управления. — 2010. — № 1. — С. 26–32.
22. Чертовской В. Д. Интеллектуализация автоматизированного управления производством / В. Д. Чертовской. — СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2007. — 164 с.
23. Чертовской В. Д. Моделирование процессов планирования в интеллектуальной системе управления производством / В. Д. Чертовской // Информационные технологии в управлении (ИТУ-2016): Материалы 9-й конференции по проблемам управления. — СПб.: Изд-во «Концерн» ЦНИИ «Электроприбор», 2016. — С. 536–544.

REFERENCES

1. Kostyuk, V. I., ed. *Osnovy postroeniya ASU*. M.: Sov. Radio, 1977.
2. Chertovskoi, V. D. *Avtomatizatsiya operativnogo upravleniya osnovnym proizvodstvom*. Minsk: Belorus. politekh. in-t, 1982.
3. Bobko, I. M., G. I. Marchuk, and A. G. Aganbegyan. *Adaptivnaya ASU proizvodstvom*. Edited by G. I. Marchuk. M.: Statistika, 1981.
4. Vasil'ev, S. N. *Intellektual'noe upravlenie dinamicheskimi sistemami*. M.: Fizmatlit, 2000.
5. Mizon, V. A. *Intellektual'nye metody upravleniya predpriyatiem*. SPb.: akademiya upravleniya i ekonomiki, 2008.
6. Novikov, D. A. *Teoriya upravleniya organizatsionnymi sistemami*. M.: Izd-vo Fizmatgiz, 2012.
7. Artamoshin, A. N., O. I. Bliznova, et al. *Intellektual'nye organizatsionno tekhnicheskie sistemy*. M.: Akademiya, 2016.
8. Piterkin, S. V., N. A. Osadov, and D. V. Isaev. *Tochno vovremya dlya Rossii. Praktika primeneniya ERP*. M.: Al'pina Publisher, 2002.

9. Aleksandrov, A. G., and D. V. Shatov. "Chastotnoe adaptivnoe upravlenie po zadannoi tochnosti." *Control sciences* 5 (2014): 7–13.
10. Gaiduk, A. R. "Design of nonlinear selectively invariant systems based on the controllable Jordan form." *Automation and Remote Control* 74.7 (2013): 1061–1071. DOI: 10.1134/S0005117913070011
11. Mesarovich, M., D. Mako, and Ya. Takahara. *Teoriya ierarkhicheskikh sistem*. M.: Mir, 1973.
12. Singkh, M., and A. Titli. *Sistemy: dekompozitsiya, optimizatsiya i upravlenie*. M.: Mashinostroyeniye, 1986.
13. Burkov, V. N. *Osnovy matematicheskoi teorii aktivnykh sistem*. M.: Nauka, 1977.
14. Gorelov, M. A. "Hierarchical games with deliberately distorted information." *Automation and Remote Control* 77.4 (2016): 629–639. DOI: 10.1134/S0005117916040081.
15. Lavlinskii, S. M., A. A. Panin, and A. V. Plyasunov. "A bilevel planning model for public—private partnership." *Automation and Remote Control* 76.11 (2015): 1976–1987. DOI: 10.1134/S0005117915110077
16. Bersenev, V. L. "The Competitive Facility Location Problem with Free Vendor Selection." *Automation and Remote Control* 4 (2014): 94–105.
17. Pavlov, K. S., and E. N. Khobotov. "Models for equipment selection and upgrade in manufacturing systems of machine building enterprises." *Automation and Remote Control* 76.2 (2015): 292–303. DOI: 10.1134/S0005117915020083.
18. Sagyngaliev, K. S. "Soglasovanie planirovaniya v trekhurovnevoi aktivnoi sisteme." *Automation and Remote Control* 3 (1988): 80–91.
19. Golenko-Ginsburg, D., E. L. Itskovich, V. Kats, and S. Sitnyakovskii. "Control of a Three-Level Industrial System of the "Man-Machine" Type." *Automation and Remote Control* 5 (2000): 166–184.
20. Ougolnitsky, G. A., and A. B. Usov. "Solution algorithms for differential models of hierarchical control systems." *Automation and Remote Control* 77.5 (2016): 872–880. DOI: 10.1134/S0005117916050106.
21. Ougolnitsky, G. A., and A. B. Usov. "Three-level control systems of the ecology-economic objects of the fan structure." *Control sciences* 1 (2010): 26–32.
22. Chertovskoy, V. D. *Intellektualizatsiya avtomatizirovannogo upravleniya proizvodstvom*. SPb.: Izd-vo S.-Peterb. un-ta, 2007.
23. Chertovskoi, V. D. "Modelirovanie protsessov planirovaniya v intellektual'noi sisteme upravleniya proizvodstvom." *Informatsionnye tekhnologii v upravlenii (ITU-2016): Materialy 9-i konferentsii po problemam upravleniya*. SPb.: Izdatel'stvo: Kontsern "Tsentral'nyi nauchno-issledovatel'skii institut "Elektroprigor", 2016: 536–544.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Чертовской Владимир Дмитриевич —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: vdchertows@mail.ru, kaf_vsi@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Chertovskoy, Vladimir D. —
Dr. of Technical Sciences, professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: vdchertows@mail.ru, kaf_vsi@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 30 апреля 2017 г.
Received: April 30, 2017.