

УДК 681.5

## ПРОБЛЕМЫ АДАПТИВНОГО АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫМ ПРЕДПРИЯТИЕМ

**Б. Я. Советов,**

доктор техн. наук, профессор

**В. В. Цехановский,**

канд. техн. наук, доцент

**В. Д. Чертовской,**

доктор техн. наук, профессор

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Рассматривается потребность, суть и место адаптации в современном автоматизированном управлении промышленным предприятием. Показана связь адаптивного и интеллектуального автоматизированного управления. Предложен составной метод адаптивного управления на основе методологии структурно-алгоритмического моделирования.

**Ключевые слова** — адаптивное управление, бизнес-процесс, подсистемное представление, процедурное представление, структурно-алгоритмическое моделирование, функциональное описание.

### Введение

Перед современными предприятиями появились новые цели, связанные с бизнесом: короткий производственный цикл, сжатые сроки поставок, нижний уровень запасов.

Критерием улучшения деятельности производства в процессах оперативного планирования и управления служит прибыль, что согласуется с современным понятием «бизнес» — деятельность, направленная на получение прибыли путем создания и реализации определенной продукции и услуг.

С переходом к рынку для предприятия стала более динамичной внешняя среда, вызывающая целый ряд возмущений.

К возмущениям относятся: неточность в прогнозах спроса; внеплановые выгодные заказы; прием заказов со слишком коротким сроком выполнения; изменения дат отгрузки продукции (срывы выполнения заказов); отмена и изменение заказов; срывы поставок материалов; потеря клиента или рынка; поиск новых потребителей продукции; потеря прибыли.

Как нетрудно заметить, возмущения связаны с изменениями составляющих векторов: динамическими количественными (например, спроса  $R(t)$ , определяющего цель функционирования предприятия), параметрическими (цены  $C(t)$ , ре-

сурсного обеспечения  $x(t)$  или  $b(t)$ ), состава (изменениями структуры).

Компенсировать быстрое изменение параметров возможно двумя способами.

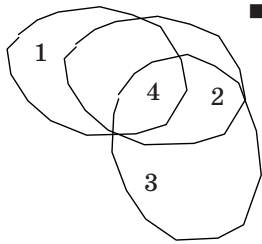
1. Снижением инерционности производства, увеличением оперативности реакции на различные возмущения, прогнозом последствий принимаемых решений (стационарный режим).

2. Оперативным переходом на выпуск новой продукции, что связано с учетом не только динамических свойств, но и структурных изменений предприятия (нестационарный режим).

Таким образом, возникает потребность в построении динамической автоматизированной системы управления (АСУ) предприятием, о чем говорилось еще в работах [1–5].

Параметрические и структурные изменения заставляют производителей приспосабливаться к изменениям среды подстройкой параметров и структуры управляющей части в процессе эксплуатации АСУ. Такие системы получили название [6] адаптивных систем управления. Соотношение некоторых классов автоматизированных систем показано на рис. 1.

Более того, появление спроса на новую продукцию означает практически изменение цели функционирования в процессе эксплуатации без процедуры целеполагания (интеллектуальные системы [6]).



■ **Рис. 1.** Соотношение классов систем управления: 1 — традиционные автоматизированные; 2 — динамические автоматизированные; 3 — адаптивные автоматические; 4 — адаптивные автоматизированные

Автоматизированная система современного предприятия представляет собой в терминах [6] человеко-машинную систему интеллектуального управления (ЧСИУ), поскольку в ней с участием человека периодически осуществляется и процесс целеполагания. Исследование ЧСИУ в общем является достаточно сложной задачей, и потому в данной работе ограничимся рассмотрением адаптивного автоматизированного управления [7], для которого представим формализованное описание процессов управления.

Отметим, что изменения структуры подразумевают в общем случае изменения элементов и их связей. Изменения элементов в экономических системах связаны с большими затратами, вызванными чаще всего реконструкцией. В силу этого в подобных системах используется изменение лишь структурных связей (изменение маршрутов движения продукции, замена ресурсов), которое определяется понятием «гибкость». Гибкость, таким образом, является частным случаем адаптации.

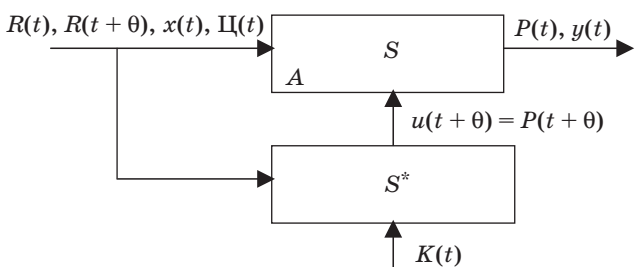
**Содержательное описание процесса управления**

В общем виде схема взаимодействия предприятия и внешней среды показана на рис. 2.

Производство  $S$  имеет следующее теоретико-множественное описание:

$$P(t + \theta) = S(R(t), R(t + \theta), x(t), b(t), \Pi(t), A, y(t)), \quad (1)$$

где  $P$  — план выпуска продукции;  $t$  — время;  $\theta$  — сдвиг по времени;  $R$  — спрос;  $x$  — поставки ре-



■ **Рис. 2.** Связь среды и системы управления

сурсов;  $b$  — наличное количество ресурсов;  $\Pi$  — цена продукции;  $A$  — нормы расхода ресурсов;  $y$  — выпуск продукции. Переменные  $R, x, \Pi$  характеризуют внешнюю среду, остальные — производство.

Модель управляющей части может иметь вид

$$S^* = S^*(P(t), y(t), x(t), b(t), \Pi(t), A, R(t), R(t + \theta), u(t + \theta) = P(t + \theta), K(t)), \quad (2)$$

где  $u$  — управление;  $K$  — критерий.

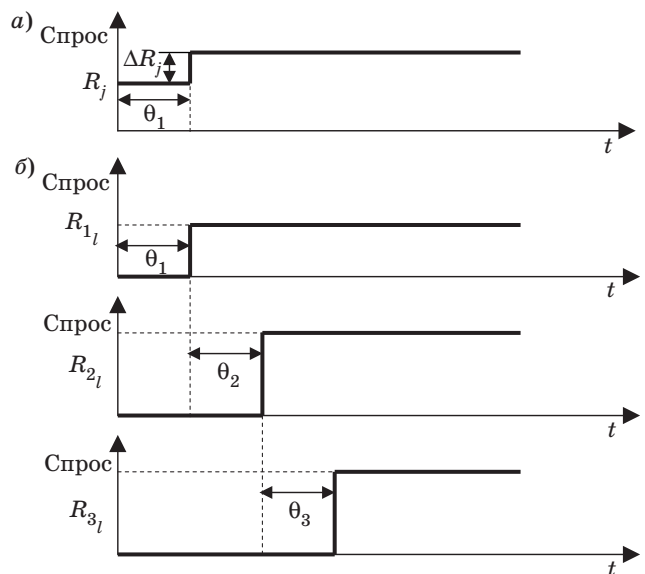
Отметим, что управление в автоматизированных системах возможно или введением воздействия без изменения ранее рассчитанного плана, или пересчетом плана, что отображено выражением (2).

Определим границы адаптивного автоматизированного управления.

1. В общем случае изменение спроса и других параметров может происходить по произвольному закону.

Динамика изменения параметров может быть учтена либо статистическим [2], либо детерминированным математическим описанием. Применение статистического описания ограничено незначительными изменениями и затруднительно при появлении спроса на новые виды продукции. В связи с этим предпочтительнее использовать детерминированное описание в виде скачков параметров. Этот вид наиболее тяжел для системы управления. Заметим, что фактически к такому же виду сводится статистическое описание спроса в работе [8].

Тогда описание спроса может иметь вид (рис. 3, а, б)



■ **Рис. 3.** Изменение спроса на старую (а) и новую (б) продукцию

$$R_j(t) = R_j^c(t) + \Delta R_j^* 1(t - \theta); \quad (3)$$

$$R_l(t) = R_l^* 1(t - \theta), \quad (4)$$

где  $j$  — вид старой продукции;  $R_j^c(t)$  — прежний спрос;  $\Delta R_j^*$  — количественное изменение спроса;  $1(\theta)$  — единичная функция;  $R_l(t)$  — величина спроса на новую продукцию вида  $l$ .

2. Для обеспечения адаптации и гибкости лучшим образом подходит серийный тип производства (рис. 4).

Как известно, тип производства характеризуется коэффициентом серийности

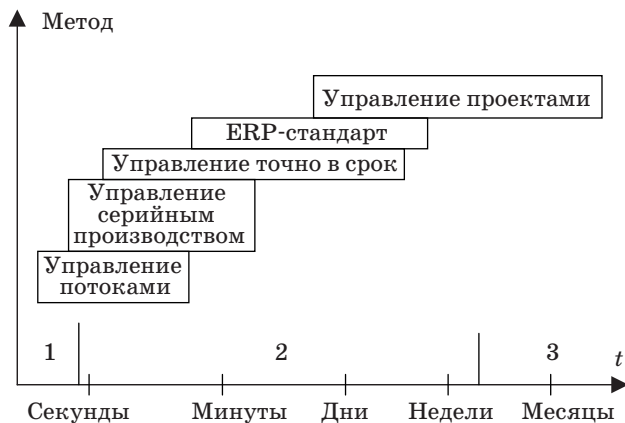
$$K_s = [t_j] / [t_{rj}],$$

где  $[t_j]$  — время изготовления единицы продукции на предприятии;  $[t_{rj}]$  — время обработки единицы продукции на рабочем месте  $r$ .

Для массового производства характерно  $K_s = 1$ ; для серийного производства  $K_s = 2 - 50$ , для единичного  $K_s > 50$ . При этом для крупносерийного типа  $K_s = 2 - 10$ , для среднесерийного  $K_s = 11 - 30$ , для мелкосерийного  $K_s = 31 - 50$ .

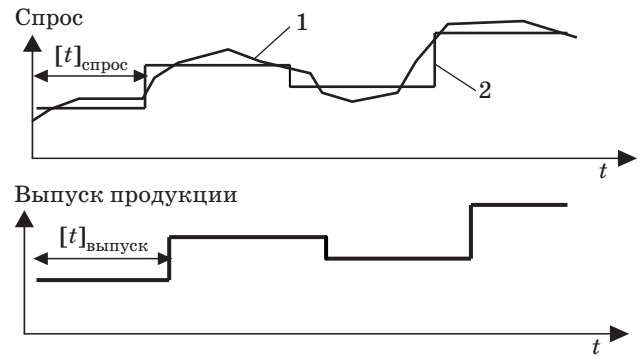
Тогда

$$K_s = [t_j] K_s / [t_{rj}] K_s = \theta / [t_j].$$



Нефть	Пищевые продукты, лекарства	Бытовая техника, легкая промышленность, машино- и приборостроение, электронная промышленность, полиграфия	Строительная техника	Авиастроение	Строительство зданий, кораблестроение
-------	-----------------------------	---	----------------------	--------------	---------------------------------------

■ Рис. 4. Классификация систем производственного управления: 1 — массовый тип производства; 2 — серийный тип производства; 3 — единичный тип производства



■ Рис. 5. Соотношение времени изменения спроса интервала производства заданной величины серии: 1 — реальный спрос; 2 — описание спроса

При оперативной реакции на спрос вида (4) в соответствии с теорией управления возникает динамическое ограничение  $K_s \geq 5 - 10$ . При  $K_s > 30$  перерасчет плана может проводиться в моменты его регулярного составления на более длительные промежутки времени (месяц, квартал).

3. Наибольший интерес представляет случай (рис. 5), когда время устойчивого спроса соизмеримо со временем выпуска серии продукции.

### Анализ методов математического описания

Известно, что к методам описания традиционных АСУ предъявлялись требования учета:

- 1) целенаправленности функционирования высокоразмерной системы;
- 2) многоуровневого характера систем с изменением масштабов описания процессов по координатам и времени на границах уровней;
- 3) неопределенности в получении данных (об управляющей части) для моделирования;
- 4) значительной доли неформальных процедур.

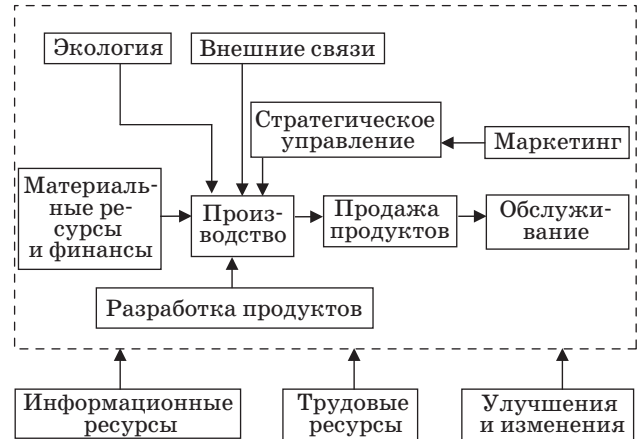
Перечисленные ранее факторы современного динамичного рынка определяют новые условия и дополнительные требования учета при описании функционирования предприятий:

- 1) динамичности свойств системы управления, подверженной целевым воздействиям и структурным изменениям ее элементов;
- 2) интеграции процессов функционирования и адаптации (развития);
- 3) потребности во введении и согласовании (векторных) экономических интересов целенаправленных элементов;
- 4) совместной оценки экономических интересов и динамических свойств.

Учет перечисленных дополнительных требований связан с необходимостью рассмотрения ме-

■ *Соотношение методов описания автоматизированных систем*

Представление	Уровень автоматизации	
	Информационно-поисковые системы	Информационно-советующие системы
Подсистемное — графы связей задач функциональных подсистем	Задачи «прямого» счета	Программирование (линейное, стохастическое)
Процедурное — CASE (ERD, DFD, STD), IDEF, ARIS	Системы управления документацией	ERP, APS



■ *Рис. 7. Процедурное представление АСУ*

тодов описания структуры и ее функционального наполнения.

В описании структуры следует выделить описание структуры класса систем (представление) и описание структуры конкретной системы. Выделяют подсистемное и процедурное представления (таблица).

Подсистемное представление (рис. 6) хорошо проработано методически, однако его основными недостатками являются слабый уровень унификации и отсутствие строгой документации и технологии использования реализованных задач.

В связи с этим в новых разработках используют процедурное представление, элементами системы в котором являются бизнес-процессы, составленные из бизнес-функций (рис. 7).

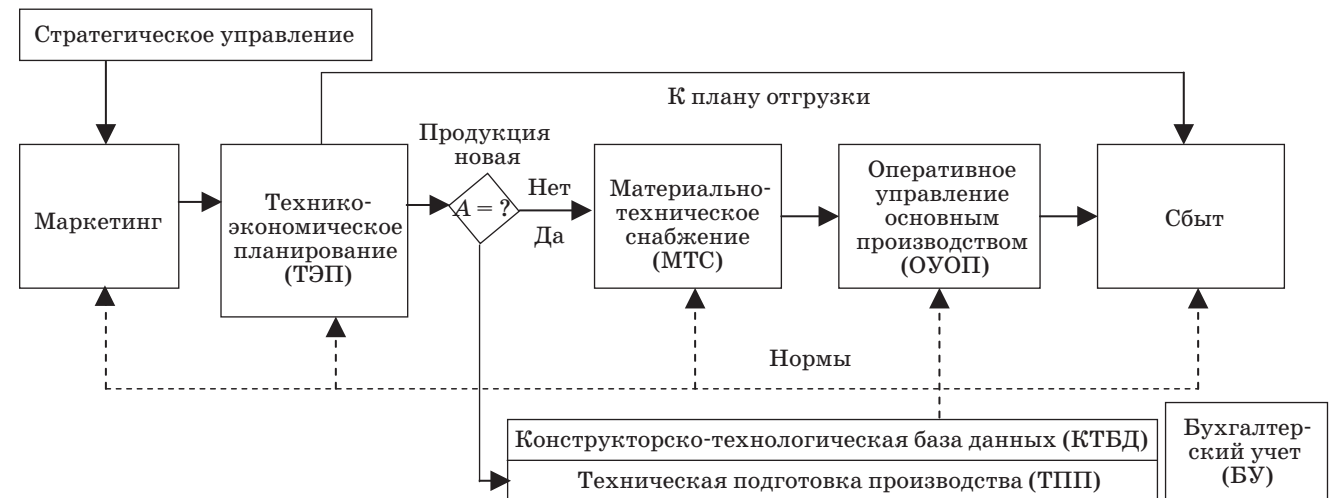
Вместе с тем процедурное представление методически проработано далеко недостаточно. В частности, не существует устоявшихся методов выделения системы бизнес-процессов. В связи

с этим бизнес-процессы выделяют «по аналогии» с ERP-системами, в том числе с системой «Галактика»; по приращению стоимости; по минимуму связей между бизнес-процессами. Авторские исследования показали, что последний способ приводит по структуре к подсистемному представлению.

В связи с этим далее исследуем подсистемы ТЭП и ОУОП. Им соответствует бизнес-процесс «Производить и обеспечивать производство» Американского центра производительности и качества (American Productivity & Quality Center).

Отображение структуры принято проводить методами IDEF ARIS [9–12] с использованием программных продуктов BP-Win и ARIS.

Речь идет о дискретных многономенклатурных производствах с мелко- и среднесерийным типом. Такой вывод подтверждается работой [13]: «... массовое производство и сервисная поставка стандартных продуктов и услуг должна быть за-



■ *Рис. 6. Технология функционирования АСУ (рыночные отношения) при подсистемном представлении: связи по задачам — сплошные линии; связи по данным — пунктирные линии*

менена гибкой, чувствительной высококачественной поставкой новых продуктов и услуг, которые могут быть индивидуализированы, чтобы удовлетворять сегменты заказчиков».

Перейдем к функциональному описанию.

Первоначально, на наш взгляд, следует разделить все методы функционального наполнения по области их применения. Такое деление проведено в соответствии с работой [14].

Организационными методами являются Business Process Improving (BPI); Continuous Process Improving (CPI) — **повышение качества продукции** по критериям качества потребителей, но не увеличение прибыли любой ценой; Business Process Reengineering (BPR). **Эти методы характеризуются** значительной долей неформальных процедур, не являются системными и потому далее не рассматриваются.

Методы «точно вовремя» (расчетные) хронологически прошли варианты Material Resource Planning (MRP), Material Requirement Planning (MRP II), Enterprise Requirement Planning (ERP). Наибольшее распространение получил ERP-метод, в котором планирование осуществляется с учетом только ограничений по материальным и трудовым ресурсам и оборудованию. Оптимизация процесса планирования не предусматриваются.

ERP-метод приобрел силу стандарта. В то же время он имеет ограниченную сферу применения:

1) не предназначен для случая динамических изменений спроса и ресурсного обеспечения в силу итеративности расчетов;

2) не в полной степени соответствует понятию «бизнес», поскольку рассчитывает фактические финансовые потоки на основе ограничений, а не оптимизирует их.

Первый недостаток попытались преодолеть методом Advanced Planning and Scheduling (APS), получившим в отечественной литературе название «синхронизированное планирование и оптимизация» (СПО) [15]. За счет синхронного планирования материалов и мощностей с использованием приемов направленного перебора удается резко сократить время вычислений. Однако поставленная задача не была решена.

Учет динамики внешней среды методами статистического описания [16] в условиях значительных изменений параметров среды и изменения целей работы системы также не дает должного эффекта.

### Математическая модель

Требованиям, предъявляемым к методам описания, удовлетворяет составной метод, построенный [7] на основе методологии структурно-алгоритмического моделирования (САМ).

### Создание системы.

1. Первичность цели проектирования и структуры модели объекта управления по отношению к структуре модели управляющей части системы.

2. Комплексное проектирование моделей функционирования и адаптации.

3. Интеграция исследований динамических процессов и процессов изменения структурных связей.

### Эксплуатация системы.

4. Построение единого метода математического описания разнородных по сути процессов планирования и управления с использованием составного критерия, учитывающего экономические и управленческие свойства системы.

5. Последовательный переход от имитационного к оптимизационному описанию системы.

6. Оптимизация (с помощью модели) структурных и динамических характеристик системы.

7. Горизонтальное и вертикальное согласование экономических интересов.

### Реализация системы.

8. Современный подход к построению системы управления.

9. Ориентация на использование динамических распределенных баз данных.

Рассматривается достаточно общая трехуровневая структура (рис. 8), на границах уровней  $h = 1$  и  $h = 2$  происходит изменение вектора координат, а на границах  $h = 2$  и  $h = 3$  — агрегация по времени и координатам.

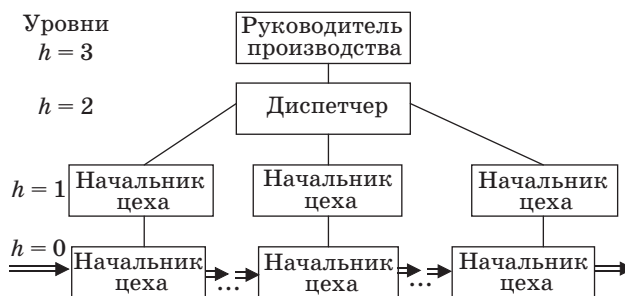
На базе САМ составлена обобщенная модель (ОМ) адаптивной автоматизированной системы управления (рис. 9).

В основу ОМ положен универсальный цикл управления (рис. 10), являющийся эпицентром стандарта ИСО 9000 [17] (рис. 11).

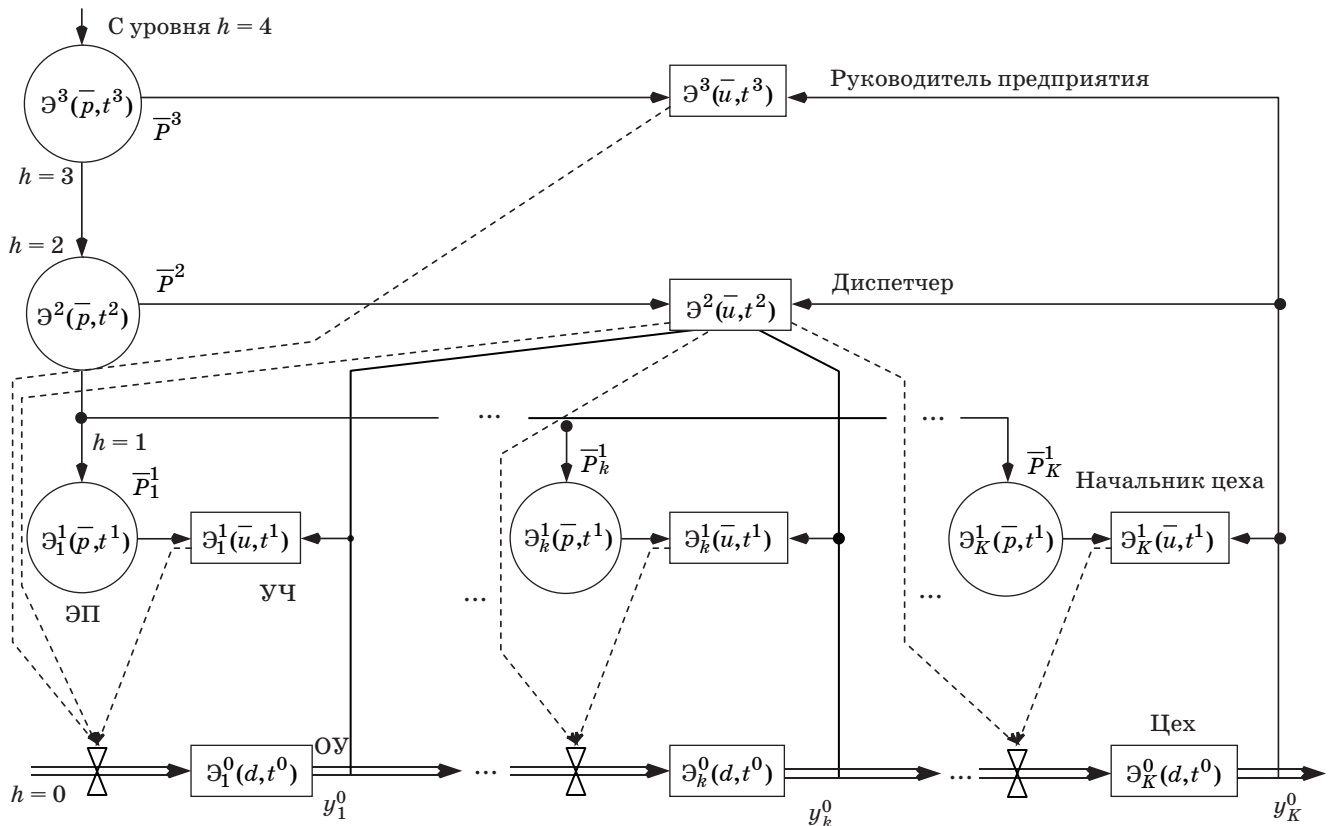
Простейшее теоретико-графовое описание ОМ имеет вид

$$M_l^{uhl}(1) = \{\exists_m^{h+2}(\mathbf{u}, t^{h+2}) * \exists_k^{h+1}(\mathbf{u}, t^{h+1}) * \exists_l^h(\mathbf{u}, t^h) * \exists_l^h(\mathbf{y}, t^h) * \exists_j^h(\mathbf{y}, t^h)\},$$

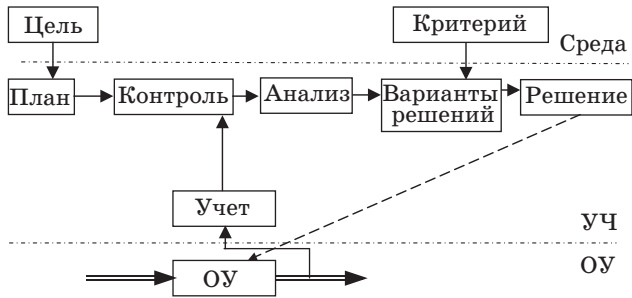
$$l = 1, \dots, K_h;$$



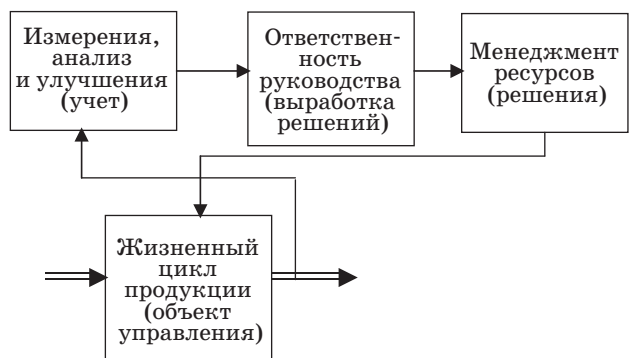
■ Рис. 8. Многоуровневая структура



■ Рис. 9. Обобщенная модель: ЭП — элемент планирования; УЧ, ОУ — элементы управляющей части и объекта управления



■ Рис. 10. Цикл управления



■ Рис. 11. Цикл управления в соответствии с ИСО 9000

$$h = 0, \dots, \theta;$$

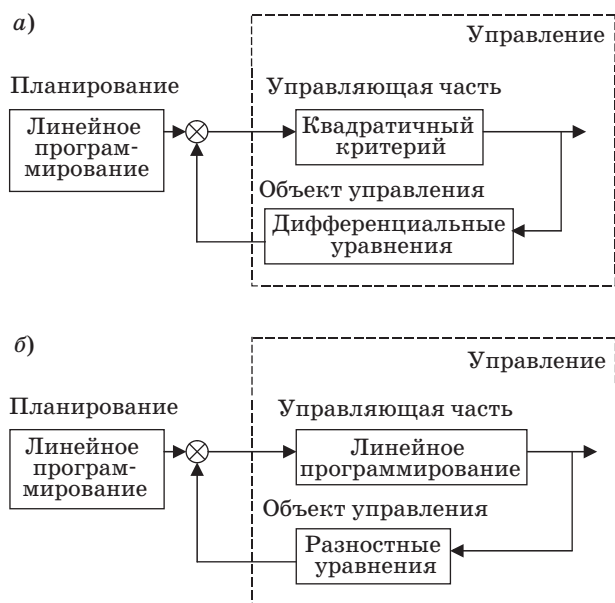
$$\Phi(S) \rightarrow \max,$$

где  $\Theta_k^{h+1}(\mathbf{u}, t^{h+1})$ ,  $\Theta_l^h(\mathbf{u}, t^h)$ ,  $\Theta_l^h(\mathbf{y}, t^h)$  —  $k$ -е и  $l$ -е элементы соответствующих уровней УЧ и ОУ;  $\mathbf{u}$ ,  $\mathbf{y}$  — векторы управления и выхода;  $t^h$  — отсчет времени на уровне  $h$ ; \* — оператор замыкания, учитывающий обратные связи;  $K_h$  — количество элементов на уровне  $h$ ;  $\Phi$  — целевая функция;  $S$  — связи между элементами  $\Theta$ ;  $l \in C(k)$ ,  $C(k) = \{l: \Gamma \Theta_k^{h+1} = \Theta_l^h\}$ ,  $|C(k)| = N_l$ ,  $k = 1, \dots, K_{h+1}$ ,  $l = 1, \dots, K_h$ ;  $j \in C(l)$ ,  $C(l) = \{j: \Gamma \Theta_j^h = \Theta_k^{h+1}\}$ ,  $|C(l)| = N_j$ ,  $j = 1, \dots, N_j$ ;  $C(r) = \{r: \Theta_r^h = \Gamma^{-1} \Theta_k^{h+1}\}$ ,  $|C(r)| = N_r$ ;  $\Gamma$  — прямая связь двух смежных элементов.

Обобщенная модель позволила построить обобщенную технологию, которая предписывает сначала рассматривать отдельные уровни (см. рис. 8), а затем учитывать взаимодействие уровней. На каждом уровне рассматриваются взаимодействующие процессы планирования и управления.

Возможные сочетания методов составной модели представлены на рис. 12. В настоящее время апробирован вариант, показанный на рис. 12, а, и проходит апробацию вариант рис. 12, б.

Накопленный опыт выявил и недостатки названных вариантов, в частности необходимость



■ Рис. 12. Разновидности математических моделей адаптивного управления: а — линейно-квадратичная; б — линейная

описания разнотипных процессов планирования и управления однотипным математическим аппаратом [18].

### Заключение

1. Современная внешняя среда характеризуется динамичностью.
2. Имеется потребность в формировании системы адаптивных методов и алгоритмов, которые бы дали возможность перейти к адаптивному автоматизированному управлению и позволили производствам работать в условиях изменчивости внешней среды.
3. Существующие методы описания процесса автоматизированного управления, в том числе методы **ERP-систем**, не дают возможности совместно исследовать динамические и экономические свойства.
4. Предложены варианты описания процесса адаптивного автоматизированного управления и апробирован один из них.
5. Первые результаты дают обнадеживающие перспективы использования предложений.
6. Дальнейшее развитие автоматизированного управления видится на пути создания однотипного математического аппарата описания разнотипных процессов планирования и управления, рассмотрения подобных АСУ как интеллектуальных и даже интеллектуальных систем.

### Литература

1. Форрестер Д. Индустриальная динамика. — М.: Прогресс, 1970. — 520 с.
2. Евдокимов В. В., Рейнер В. А. Машинный синтез АСУП. — М.: Статистика, 1980. — 222 с.
3. Вавилов А. А. и др. Имитационное моделирование производственных систем / Под общей ред. А. А. Вавилова. — М.: Машиностроение; Берлин: Техника, 1983. — 416 с.
4. Одинцов А. В., Норенков Ю. И., Горин О. А. Динамическое моделирование предприятия // Информационные технологии. 1997. № 2. С. 20–24.
5. Ширяев В. И., Ширяев Е. В., Головин И. Л., Смолен В. В. Теория и алгоритмы для идентификации, адаптации и управления фирмой в условиях изменения ситуации на рынке // Информационные технологии. 2002. № 4. Приложение. 25 с.
6. Васильев С. Н. Интеллектуальное управление динамическими системами. — М.: Физматлит, 2000. — 352 с.
7. Советов Б. Я., Чертовской В. Д. Автоматизированное адаптивное управление производством. — СПб.: Лань, 2003. — 176 с.
8. Курицкий Б. Я. Поиск оптимальных решений средствами Excel 7.0. — СПб.: БХВ, 1997. — 384 с.
9. Шеер А.-В. Моделирование бизнес-процессов. — М.: Серебряные нити, 2000. — 205 с.
10. Шеер А.-В. Бизнес-процесс. Основные понятия, теория, методы. — М.: Просветитель, 1999. — 152 с.
11. Каменнова М. С. и др. Моделирование бизнеса: методология ARIS. — М.: Серебряные нити, 2001. — 167 с.
12. Черемных С. В., Семенов И. О., Ручкин В. С. Структурный анализ систем: IDEF-технологии. — М.: Финансы и статистика, 2003. — 208 с.
13. Li Yihua. Analysis of stability of automatized control systems // J. Chanhsha Univ. Tlec. Powers. 1997. Vol. 12. N 4. P. 408–411.
14. Питеркин С. В., Осадов Н. А., Исаев Д. В. Точно вовремя для России. Практика применения ERP. — М.: Альпина Паблишер, 2002. — 368 с.
15. Turbide D. A. APS and ERP. A White Paper about Advanced Planning and Scheduling's Integration with Enterprise Resource Planning. — N. Y.: Product Solution Inc., 1998. — 192 p.
16. Заикин О. А., Рахимов Т. Н., Советов Б. Я. Основы построения АСУ. — Ташкент: Уткивучи, 1984.
17. ИСО 9000-2000. Система менеджмента качества. Основные положения и словарь.
18. Габасов Р. и др. Конструктивные методы оптимизации. — Минск: Университетское, 1984. — Ч. 1. 214 с.; Ч. 2. 198 с.