

УДК 66-933.6

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА АДАПТИВНОГО АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ

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»

Раскрыта специфика адаптивных автоматизированных систем управления производством. Предложена процедура исследования подобных систем в целях построения их формального описания. Показано, что используемый подход позволяет упростить интеграцию процессов как внутри одного структурного элемента, так и в рамках взаимодействия элементов в многоуровневой системе управления.

Ключевые слова — автоматизированное управление, адаптация, структура, неформальное представление, специфика систем.

Введение

Автоматизированные системы управления производством прошли полувековой путь от традиционных до адаптивных систем [1–5]. Потребность в адаптивных системах появилась на рубеже веков при переходе России к рыночным отношениям. Повышение конкурентоспособности связано с оперативным переходом на выпуск новой продукции, что в свою очередь определило необходимость применения адаптивного режима. Специфика таких систем не позволила напрямую использовать для их формального описания и компьютерной реализации математический аппарат известных классов систем. Потребовалось исследование этого нового класса систем в целях построения их математического описания.

Следовательно, задача данной работы ставится так. Необходимо выявить особенности нового класса адаптивных систем, сформировать их структуру и формализованное представление. В данной работе обсуждаются две первые позиции.

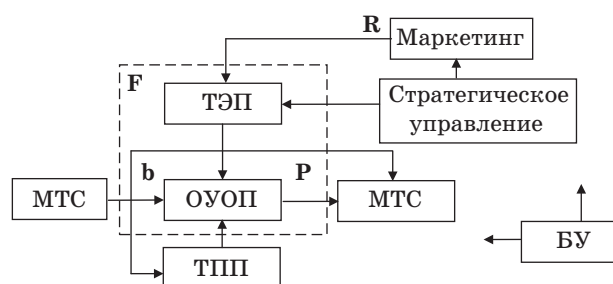
Решение задачи

При построении нового теоретического аппарата используются неформальные приемы системного анализа, которые включают определение цели функционирования, структуры и фор-

мального описания рассматриваемого класса систем. Вид (класс) организационно-экономической системы управления сильно зависит от отношения внешняя среда — система.

Адаптивные автоматизированные системы управления являются развитием традиционных, близких к статическим, систем, структуру которых можно использовать для иллюстрации связей среда — система.

Известны два представления автоматизированных систем: подсистемное (рис. 1) и процедурное.



■ **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

Входными величинами являются векторы \mathbf{R} , \mathbf{b} , \mathbf{F} — спроса, ресурсов, цены, а выходами — векторы выпуска продукции плана \mathbf{P} .

В общем случае среда описывается уравнением (см. рис. 1)

$$\mathbf{V} = \mathbf{V}(\mathbf{R}, \mathbf{F}, \mathbf{b}), \quad (1)$$

где параметры среды \mathbf{R} — спрос на продукцию; \mathbf{F} — цены продукции и ресурсов; \mathbf{b} — ресурсы.

В свою очередь:

$$\mathbf{b}(t) = \{\mathbf{b}_m(t), \mathbf{b}_\psi(t)\}, \quad (2)$$

где $\mathbf{b}_m(t)$ — материальные ресурсы; $\mathbf{b}_\psi(t)$ — остальные виды ресурсов.

Вид системы управления в значительной мере определяется характером спроса, являющимся в общем случае статистическим (рис. 2, кривая 1). Для последующих расчетов кривую 1 удобно заменить ступенчатой кривой 2, а затем рассматривать процессы лишь для одной «ступеньки». Такой подход оправдан тем, что ступенчатое воздействие является наиболее тяжелым для отработки системой управления.

Тогда в традиционных системах управления спрос может быть представлен в виде

$$\mathbf{R}_3(t) = \mathbf{R}_{30} - \Delta\mathbf{R}_3 \cdot 1(t - \theta), \quad (3)$$

где \mathbf{R}_{30} — прежний спрос; $\Delta\mathbf{R}_3$ — количественное изменение спроса; θ — момент изменения спроса; t — время; $1(t)$ — единичная функция.

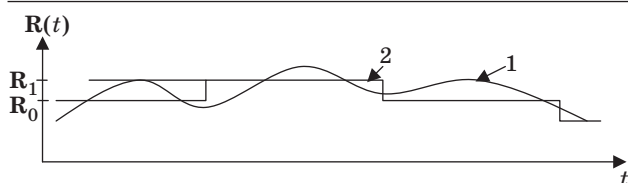
В этом случае состав вектора $\mathbf{R}_3 = (R_{3v} = 1, V)$ не меняется, а изменяются количественно лишь величины составляющих вектора. Заметим, что уравнение вида (3) характерно для обычных систем управления с обратной связью.

С переходом нашей страны к рыночным отношениям динамичность среды резко увеличилась. Изменения спроса стали носить качественный характер. Возникла потребность — для повышения конкурентоспособности — в оперативном переходе на дополнительный выпуск новых, ранее не выпускавшихся видов продукции:

$$\mathbf{R}_4(t) = \mathbf{R}_{40} \cdot 1(t - \theta), \quad (4)$$

где $\mathbf{R}_4(t)$ — величина спроса на новую продукцию вида; θ — момент возникновения спроса.

При этом часть старой продукции может быть снята с производства: спрос на нее количественно



■ Рис. 2. Характер спроса на продукцию

изменится в соответствии с уравнением (3) при $0 \leq \Delta\mathbf{R}_{3v} \leq \mathbf{R}_{30v}$.

Компенсация таких изменений невозможна без использования адаптивных систем управления.

При рассмотрении отдельного элемента системы можно варьировать величины $\Delta\mathbf{R}_3$, $\Delta\mathbf{R}_4$, $\Delta\mathbf{b}$, $\Delta\mathbf{c}$. Всего имеется 16 вариантов задач (табл. 1).

Строка 4 является сочетанием строк 2, 3, в которых изменения $\Delta\mathbf{R}_3$ и $\Delta\mathbf{R}_4$ рассмотрены порознь. В связи с этим строку 4 рассматривать отдельно нецелесообразно. По этим же причинам нет резона рассматривать варианты столбца IV, который является сочетанием столбцов II и III. Строка 1 соответствует традиционному управлению.

Вариант I.1 соответствует процессу планирования, вариант I.2 характеризует компенсацию сигнальных возмущений в традиционной автономной системе управления. Вариант I.3 соответствует адаптивной автономной системе управления с изменением параметров.

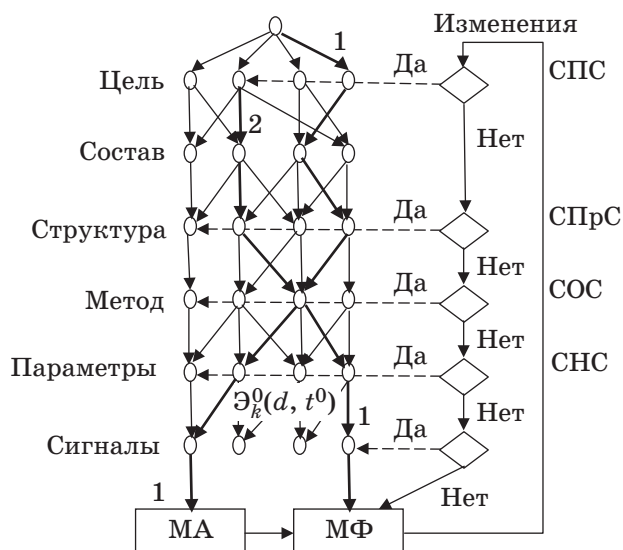
Варианты II.1 и III.1 говорят о «чистой» оценке возмущений в системе управления. На действия возмущений в вариантах II.2 и III.2 накладывается входной сигнал, усложняя «видение» общей картины процессов. В связи с этим имеет смысл варианты II.2 и III.2 не рассматривать, а исследовать только вариант I.2. Особый интерес представляет, прежде всего, вариант I.3 в «чистом виде», а потому изучение вариантов II.3 и III.3 остается под вопросом.

В варианте I.3 осуществляется, таким образом, ориентация производств на потребителя, поскольку производитель вынужден приспосабливаться к изменениям спроса (4). Иными словами, система управления должна стать адаптивной.

Под *адаптацией* понимается процесс изменения цели функционирования, структуры, параметров и алгоритмов системы на основе дополнительной информации, получаемой при управлении, в целях достижения оптимального состояния или поведения системы при начальной неопределенности и изменяющихся условиях работы, определяемых во взаимодействии с внешней средой.

■ Таблица 1. Варианты задачи

№ строки	Спрос	Вариант			
		I	II	III	IV
1	$\Delta\mathbf{R}_3 = 0$ $\Delta\mathbf{R}_4 = 0$	$\Delta\mathbf{b} = 0$ $\Delta\mathbf{c} = 0$	$\Delta\mathbf{b} \neq 0$ $\Delta\mathbf{c} = 0$	$\Delta\mathbf{b} = 0$ $\Delta\mathbf{c} \neq 0$	$\Delta\mathbf{b} \neq 0$ $\Delta\mathbf{c} \neq 0$
2	$\Delta\mathbf{R}_3 \neq 0$ $\Delta\mathbf{R}_4 = 0$	$\Delta\mathbf{b} = 0$ $\Delta\mathbf{c} = 0$	$\Delta\mathbf{b} \neq 0$ $\Delta\mathbf{c} = 0$	$\Delta\mathbf{b} = 0$ $\Delta\mathbf{c} \neq 0$	$\Delta\mathbf{b} \neq 0$ $\Delta\mathbf{c} \neq 0$
3	$\Delta\mathbf{R}_3 = 0$ $\Delta\mathbf{R}_4 \neq 0$	$\Delta\mathbf{b} = 0$ $\Delta\mathbf{c} = 0$	$\Delta\mathbf{b} \neq 0$ $\Delta\mathbf{c} = 0$	$\Delta\mathbf{b} = 0$ $\Delta\mathbf{c} \neq 0$	$\Delta\mathbf{b} \neq 0$ $\Delta\mathbf{c} \neq 0$
4	$\Delta\mathbf{R}_3 \neq 0$ $\Delta\mathbf{R}_4 \neq 0$	$\Delta\mathbf{b} = 0$ $\Delta\mathbf{c} = 0$	$\Delta\mathbf{b} \neq 0$ $\Delta\mathbf{c} = 0$	$\Delta\mathbf{b} = 0$ $\Delta\mathbf{c} \neq 0$	$\Delta\mathbf{b} \neq 0$ $\Delta\mathbf{c} \neq 0$



■ Рис. 3. Формирование адаптивных систем: СПС — самоприспосабливающиеся системы (интеллектуальные, интеллектуальные); СПрС — системы с переменной структурой; СОС — самоорганизующиеся системы; СНС — самонастраивающиеся системы; МА — модель адаптации; МФ — модель функционирования; 1, 2 — пути обычного и адаптивного проектирования

Разновидности адаптивных систем представлены на рис. 3. Характеристика систем управления с позиций адаптации представлена в табл. 2.

Технические адаптивные системы получают дополнительную информацию об изменении параметров объекта управления, которое в свою очередь компенсировалось изменением параметров управляющей части.

В процессе эксплуатации системы ее цели либо не менялись, либо менялись только значе-

■ Таблица 2. Классификация систем управления

Вид систем	Характеристики систем	
	Название	Область изменения
Традиционные	Системы автоматического управления	Количественное изменение входного сигнала и (или) возмущения
Адаптивные	Самонастраивающиеся	Параметры
	С переменной структурой	Структура
	Самоорганизующиеся	Алгоритм работы
Интеллектуальные, самоприспосабливающиеся	Интеллектуальные	Цель меняется качественно внешне
	Интеллектуальные	Цель меняется качественно внутри системы

ния составляющих вектора цели (количественные изменения цели).

Вместе с тем функциональное наполнение структуры адаптивных систем до настоящего времени связывают с техническими системами.

В то же время в процессе управления организационно-экономическими системами изменяется структура спроса, которая определяет изменения цели работы системы.

Компенсировать такие изменения в общем случае можно, изменяя структуру системы. Под *структурой* понимается совокупность элементов и их связей. Для рассматриваемых организационно-экономических систем управление введение (удаление) новых структурных элементов (реконструкция) связано с серьезными затратами. Поэтому компенсация изменения состава вектора цели осуществляется изменением состава векторов плана и управляющих воздействий, т. е. посредством изменения структурных связей системы (маршрутов — в терминах предметной области) и, возможно, весов отдельных составляющих целевых функций. В связи с этим в данной работе под изменением структуры подразумевается изменение связей при фиксированных структурных элементах.

Иными словами, фактически используется понятие гибкость — способность системы изменять цели функционирования за счет изменения структурных связей без существенных затрат (перевооружения производства). Гибкость представляет собой, таким образом, частный случай процедуры адаптации. Во вновь введенной классификации адаптивных систем гибкие системы отнесены к интеллектуальным системам с наличием человеческого фактора.

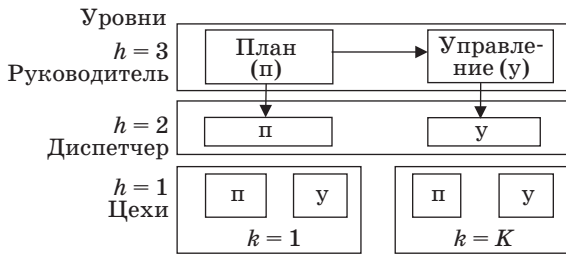
Рассмотрим особенности таких систем. Формирование описания рассматриваемого класса осуществим с помощью системного анализа с применением схемы, представленной на рис. 3.

Целью формирования является построение интеллектуальных систем, которые могли бы компенсировать в процедуре эксплуатации изменения цели функционирования вида, отмеченного в выражении (4).

Рассмотрим специфику исследуемой системы.

1. Автоматизированная система управления в общем случае обладает многоуровневой структурой [5–8]. Проводить анализ всех уровней сразу не представляется возможным. Целесообразно выбрать некоторую базовую часть структуры. В качестве такой структуры удобно принять трехуровневую структуру, представленную на рис. 4, поскольку в ней учтены все возможные изменения по координатам и времени при переходе с уровня на уровень.

На уровнях $h = 1$ и $h = 2$ масштабы по времени одинаковы, а по координатам — отличаются. На



■ Рис. 4. Трехуровневая система управления

уровне $h = 3$ осуществляется агрегация как по времени, так и по координатам.

Указанную базовую структуру можно использовать как «скользящую» при анализе структуры с числом уровней более трех. Из рис. 4 видно, что рассматриваемые системы отличаются многоэлементным составом. В данной работе — взаимодействием подсистем «ТЭП — ОУОП» при подсистемном представлении (см. рис. 1). Влияние других подсистем — маркетинга, МТС, ТПП — учтем в виде скачкообразных изменений их выходных координат.

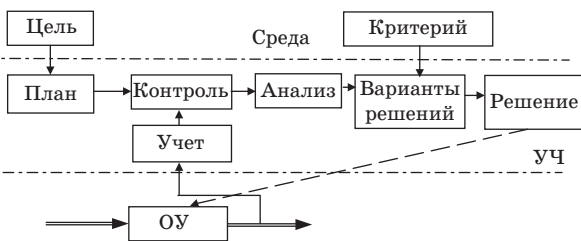
2. Каждый структурный элемент (см. рис. 4) характеризуется [4] циклом управления (рис. 5), в котором связаны процессы планирования и управления.

В организационно-экономических системах процесс планирования становится относительно самостоятельным. В то же время процессы планирования и управления отличаются по своей сути и по структуре.

3. В традиционных системах управления процесс планирования статический. План составляется заранее, например, в этом месяце, тогда как выполнение его осуществляется в следующем месяце. Инерционностью планирования здесь можно пренебречь.

В адаптивных системах при оперативном переходе на выпуск новой продукции процесс планирования становится динамическим, ибо интервал времени между процедурами составления и выполнения плана невелик.

4. Возможны различные сочетания процедур постановки на выпуск новой продукции и снятия части старой продукции.



■ Рис. 5. Цикл управления: ОУ — объект управления; УЧ — управляющая часть

5. Элементы управляющей части характеризуются в процедуре эксплуатации наличием в динамическом процессе целенаправленности, экономического интереса, который в математической форме может быть представлен целевой функцией. Работа целенаправленной системы проходит более успешно в случае согласования экономических интересов и динамических свойств элементов.

Цель синтеза целенаправленной системы заключается, следовательно, в выборе рационального пути $\mu^* \in M$ (см. рис. 3).

В общем случае такая задача нелинейная, требует учета функционально-целевых отношений, а процесс ее решения носит комбинаторный, эвристический характер.

Вместе с тем для синтеза должен быть определен эффект, который целесообразно оптимизировать:

$$\Phi(\mu^*) \rightarrow \max. \quad (5)$$

Эффект проектирования (5) определяется:

1) выбранными дугами маршрута μ , определяющими «затратную» часть эффекта при проектировании;

2) принятыми узлами маршрута μ , т. е. выбранными при проектировании моделями, используемыми при эксплуатации и характеризующими «доходную» часть эффекта.

Эффект полезно представить в виде

$$\Phi = \Phi_\phi + \Phi_a \rightarrow \max, \quad (6)$$

где Φ_ϕ и Φ_a — эффекты от эксплуатации моделей процедур функционирования и адаптации. В соответствии с поставленными задачами

$$\Phi_s = \Phi_s(\Phi_{s1}, \Phi_{s2}, \Phi_{s3}) \rightarrow \max, \quad (7)$$

где $s = \phi$ или $s = a$; Φ_1, Φ_2, Φ_3 — составляющие эффекта, связанные с выбором структурных связей, синтезом процессов планирования и управления.

В свою очередь:

$$\Phi_{s1} = \Phi_{s1}(S) \rightarrow \max; \quad (8)$$

$$\Phi_{s2} = \Phi_{s2}(P) \rightarrow \max; \quad (9)$$

$$\Phi_{s3} = \Phi_{s3}(\epsilon, u) \rightarrow \min, \quad (10)$$

где S — связи между элементами (общая структура) системы; ϵ — вектор отклонения вектор-выхода от вектор-плана P ; u — вектор управления.

В соответствии с рис. 3 $S = S_\pi * S_y$, S_π и S_y — структуры планирования и управления; * — оператор связи структур.

Решить математически задачу (7) в общем случае затруднительно, поэтому ограничимся неформальным решением, поскольку часто структура определяется в процедуре идентификации, и остановимся на трехуровневой структуре (см. рис. 4).

В системе можно выделить процедуры функционирования и адаптации. Большую часть времени система работает в режиме функционирования, с которого и начнем более подробное описание структур в выражениях (9), (10).

Процедура функционирования. Ф2 — планирование. В общем случае структура планирования имеет вид

$$S_{\Pi} = \mathcal{E}^{h+2}(\mathbf{P}, t^{h+2}) \oplus \mathcal{E}_k^{h+1}(\mathbf{P}, t^{h+1}) \oplus \oplus \{ \mathcal{E}_l^h(\mathbf{P}, t^h) \oplus \mathcal{E}_j^h(\mathbf{P}, t^h) \}, \quad (11)$$

где $\mathcal{E}^{h+2}(\mathbf{P}, t^{h+2})$, $\mathcal{E}_k^{h+1}(\mathbf{P}, t^{h+1})$, $\mathcal{E}_l^h(\mathbf{P}, t^h)$, $\mathcal{E}_j^h(\mathbf{P}, t^h)$ — k -, l - и j -е элементы соответствующих уровней УЧ и ОУ; \mathbf{P} — вектор плана; t^h — отсчет по времени на уровне h ; $h = 1, \theta$; θ — количество уровней системы; $l \in C(k)$, $C(k) = \{l: \Gamma \mathcal{E}_k^{h+1} = \mathcal{E}_l^h, |C(k)| = N_l, k = 1, K_{h+1}, l = 1, K_h, K_h$ — количество элементов на уровне h ; $j \in C(l)$, $C(l) = \{j: \Gamma \mathcal{E}_j^h = \mathcal{E}_l^h, |C(l)| = N_j, j = 1, N_j$; Γ — прямая связь двух смежных элементов; \oplus — оператор прямой связи.

Тогда процесс планирования можно понимать так: определить оптимальные планы $\mathbf{P}^h(t^h)$, $h = 1, \theta$, исходя из выбранного функционального описания элементов Э (ограничений) и целевой функции

$$\Phi_2^{\Phi} \{ \mathbf{P}^h(t^h) \} \rightarrow \max, \quad (12)$$

где $\mathbf{P}^h(t^h)$ — вектор плана.

Ф3 — процесс управления. Структура процесса управления имеет вид

$$S_y = \{ \mathcal{E}_m^{h+2}(\mathbf{u}, t^{h+2}) * \mathcal{E}_k^{h+1}(\mathbf{u}, t^{h+1}) * \mathcal{E}_l^h(\mathbf{u}, t^h) * * \mathcal{E}_l^h(\mathbf{y}, t^h) * \mathcal{E}_j^h(\mathbf{y}, t^h) \}, l = 1, K; h = 0, \theta, \quad (13)$$

где $\mathcal{E}_k^{h+1}(\mathbf{u}, t^{h+1})$, $\mathcal{E}_l^h(\mathbf{u}, t^h)$, $\mathcal{E}_l^h(\mathbf{y}, t^h)$, $\mathcal{E}_j^h(\mathbf{y}, t^h)$ — k -, l -, j -е элементы соответствующих уровней УЧ и ОУ; \mathbf{u}, \mathbf{y} — векторы управления и выхода; $*$ — оператор замыкания, учитывающий обратные связи; $C(r) = \{r: \mathcal{E}_r^h = \Gamma^1 \mathcal{E}_k^{h+1}, |C(r)| = N_r$.

Соответственно процесс управления можно записать так: определить оптимальные планы $\mathbf{u}^h(t^h)$, $h = 1, \theta$, исходя из выбранного функционального описания элементов Э и целевой функции

$$\Phi_{\Phi 3} \{ \boldsymbol{\varepsilon}^h(t^h), \mathbf{u}^h(t^h) \} \rightarrow \min, \quad (14)$$

где $\boldsymbol{\varepsilon}^h(t^h)$, $\mathbf{u}^h(t^h)$ — векторы отклонений и управлений; $\boldsymbol{\varepsilon}^h(t^h) = \{ \mathbf{P}^h(t^h) - \mathbf{y}^h(t^h) \}$.

Процедура адаптации. При переходе на выпуск новой продукции все перечисленные координаты $s^h(t^h)$ меняются на $s^{h'}(t^h)$, при этом

$$|s^{h'}(t^h)| = |s^h(t^h)| + |s_{\Pi}^h(t^h)| - |s_c^h(t^h)|,$$

где $|s_{\Pi}^h(t^h)|$ и $|s_c^h(t^h)|$ характеризуют новую и снимаемую (полностью) продукцию; $|\cdot|$ — размерность вектора. Изменяются, таким образом, структурные связи системы в выражениях (11), (13).

Приведенное описание структуры позволяет в дальнейшем указать место и выбрать функцио-

нальные зависимости в математическом описании системы.

Заключение

На начальном этапе развития автоматизированные системы управления производством являлись практически статическими системами. С переходом к рынку динамичность внешней среды резко увеличилась. Возникла необходимость в оперативном переходе производств на выпуск новой продукции.

Появился фактически новый класс адаптивных систем с качественно изменяющейся целью в процедуре функционирования. Потребовалось сформировать их математическое системное описание, учитывающее специфику систем и ранее практически отсутствовавшее.

Для формирования такого описания авторами предложена схема, базирующаяся на методах системного анализа.

В данной работе рассмотрены вопросы описания целей и структуры функционирования указанных систем. Они создают перспективу последующего формирования математического описания многоуровневых адаптивных автоматизированных систем управления производством.

Литература

1. **Основы** построения АСУ / под ред. В. И. Костюка. — М.: Сов. радио, 1977. — 304 с.
2. **Бобко И. М.** и др. Адаптивная АСУ производством. — М.: Статистика, 1981. — 384 с.
3. **Соломенцев Ю. М.** и др. Системное проектирование интегрированных АСУ ГПС машиностроения. — М.: Машиностроение, 1988. — 488 с.
4. **Соломенцев Ю. М.** и др. Введение в теорию интегрированных САПР гибких технологий и производств. — М.: Машиностроение, 1991. — 592 с.
5. **Советов Б. Я., Чертовской В. Д.** Автоматизированное адаптивное управление производством. — СПб.: Лань, 2002. — 200 с.
6. **Чертовской В. Д.** Интеллектуализация автоматизированного управления производством. — СПб.: Изд-во СПбГУ, 2007. — 164 с.
7. **Советов Б. Я., Цехановский В. В., Чертовской В. Д.** Теория адаптивного автоматизированного управления. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ, 2009. — 256 с.
8. **Советов Б. Я., Цехановский В. В., Чертовской В. Д.** Проблемы адаптивного автоматизированного управления промышленным предприятием // Информационно-управляющие системы. 2009. № 6(43). С. 18–24.