

В. Д. Чертовской, д-р техн. наук, профессор, проф. каф., e-mail: vdchertows@mail.ru,
Санкт-Петербургский государственный университет морского и речного флота
имени адмирала С. О. Макарова

Методология математического описания и моделирования адаптивной автоматизированной системы управления производством

Исследованы иерархические адаптивные системы управления производством, в которых в оптимальном процессе функционирования меняется состав вектора цели. Проведен системный анализ процедур математического описания и компьютерной реализации. Предложены методы описания и получения числовой информации для моделей систем. Рассмотрены особенности и выбраны программная структура компьютерной реализации, методы согласования числовых данных.

Ключевые слова: системный анализ, адаптивная система управления, производство, планирование, описание, моделирование

Введение

Автоматизированные системы управления предприятием [1] с 60-х годов XX века прошли большой путь и получили широкое распространение. Сказанное в полной мере относится и к части таких систем — автоматизированным системам управления производством, охватывающим только бизнес-процесс "Производство" (рис. 1). В них уже не в полной мере удовлетворяются современные требования: в системах используется неоптимальный режим работы, а оперативной реакции на изменение состава вектора спроса не предусмотрено.

Указанные недостатки отсутствуют у адаптивных автоматизированных систем управления серийным производством (ААСУП), являющихся новым классом систем управления [2–7]. Новизна класса требует рассмотрения для него процедур математического описания и компьютерного моделирования.

Если вопросы описания нашли хорошее отражение в литературе [8, 9], то вопросы моделирования изучены явно недостаточно. Следует добавить, что между процедурами сильно взаимовли-

яние, что делает необходимым их исследование с позиций системного анализа.

Постановка задачи. Целью настоящей работы является системное изучение ААСУП с позиций оптимизации режима работы и обеспечения оперативной реакции на быстрое изменение состава вектора рыночного спроса на продукцию. Использование адаптивных систем предполагает рассмотрение методологий математического описания и моделирования с последующим переходом к прикладному аспекту. Акцент в данной работе сделан не столько на формировании методологий, сколько на их применение в прикладном аспекте.

Необходимо, следовательно, системно рассмотреть процедуры описания и моделирования.

Математическое описание ААСУП

Цель функционирования системы определена. Она предполагает достаточно сложную структуру бизнес-процесса "Производство" серийного типа (рис. 2).

Такую структуру трудно описывать и тем более исследовать из-за большой разницы масштабов по времени на верхнем уровне (годы) и на нижнем уровне (часы и даже минуты). Ее целесообразно представить в виде трех блоков (рис. 2). Процессы в блоке 3 характерны для единичного типа производств, а процессы в блоках 1 и 2, представляющие наибольший интерес, — для серийного типа. Поскольку условия работы в двух последних блоках похожи, ограничимся рассмотрением блока 1.

Построение прикладного описания проводится на основе методологии, поэтому приведем

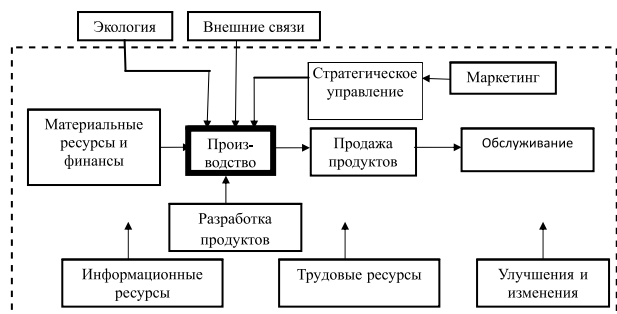


Рис. 1. Процедурное представление автоматизированной системы

ее краткое описание. Вопросам методологии посвящены работы [5–7]. В работе [5] рассматривается теоретико-множественное описание лишь двухуровневой системы. В работах [6, 7] четко не очерчен изучаемый тип производства, однако

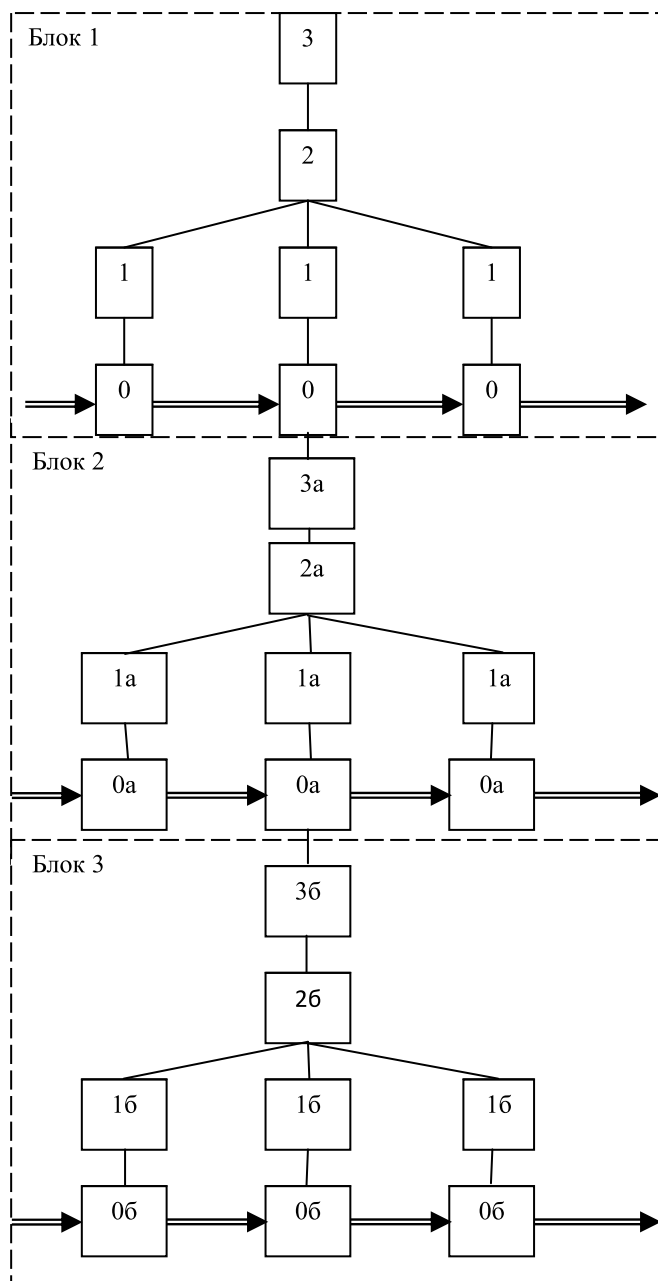


Рис. 2. Общая структура ААСУП:

0 — цехи; 1 — начальники цехов; 2 — диспетчер; 3 — руководство; 0а — участки; 1а — начальники участков; 2а — цепочки участков; 3а — начальник цеха; 0б — согласование работы элементов в пределах выпуска одного вида продукции или партии однотипной продукции (один цикл); 1б — согласование работы элементов в пределах выпуска партии однотипной продукции при наличии циклов для нескольких видов ресурсов; 2б — организация работы системы элементов в пределах выпуска одного вида продукции или партии разнотипной продукции с пересекающимися циклами для разных видов ресурсов; 3б — начальник участка

речь идет об управлении потоками (работами), т.е. о единичном типе производства. Описание процесса проводится фактически на теоретико-множественном уровне. Исследование взаимодействия элементов в двухуровневой системе с веерной структурой в одном масштабе времени на разных уровнях достаточно трудоемко. Управление осуществляется путем корректировки плана, при этом возмущения на рассчитываемом интервале времени определяются по результатам имитационного моделирования на основе данных за предыдущий период времени.

Методология описания представлена автором в работе [4], приведем ее основные положения. Концепция структурно-алгоритмического описания базируется на следующих основных принципах:

- первичность цели проектирования и структуры объекта управления по отношению к структуре управляющей части;
- рассмотрение цикла управления с выделением связанных процессов планирования и управления;
- описание процессов единым методом с использованием составного критерия, учитывающего экономические и динамические свойства;
- учет целенаправленности структурных элементов с согласованием их экономических интересов по вертикали и горизонтали;
- учет динамичности рынка.

Подходы к построению обобщенного описания определяются спецификой адаптивных систем. К специфическим особенностям относятся:

- трехуровневая структура системы;
- использование оптимального режима работы;
- применение адаптивного управления из-за динамичности рынка;
- интеграция описания проектирования и эксплуатации, функционирования и адаптации системы;
- специфика получения числовых данных.

Автором [4] сформировано трехуровневое обобщенное описание, в котором элементы представлены на теоретико-множественном уровне, а связи — с помощью графов. Там же приведена обобщенная технология работы с описанием, которую удобнее иллюстрировать в прикладной части.

При переходе к прикладному представлению и формированию математического описания была учтена наиболее важная особенность блока — изменение состава вектора цели (спроса), которое компенсируется изменением структурных связей.

С учетом особенностей были сформированы требования к методам описания иерархических систем [5]. Укажем основные требования:

- учет динамики процесса планирования;
- однотипное описание разных процессов планирования и управления;

- описание трехуровневой структуры;
- оптимизация процессов в системе.

Метод должен быть нагляден и обладать малым временем получения результата.

Анализ методов, существовавших на конец XX века, показал отсутствие таких методов для многоуровневых систем. Этот факт подтверждается и работами [10, 11]. Автору удалось построить два новых системных метода [4] (интегральный и однородный), удовлетворяющих поставленным требованиям. Однородный метод оказался более подходящим и получил большее распространение. Дополнительный анализ, проведенный в 2016 г. [12–14], подтвердил, что однородный метод жизнеспособен.

Однородный метод базируется на задаче динамического линейного программирования, состоящей из известной задачи статического линейного программирования (СЛП) и совокупности разностных уравнений.

Описание процесса управления этим методом для уровня цехов получает вид

$$\begin{aligned}
 \mathbf{z}_k(t_i) &= \mathbf{A}_k \mathbf{z}_k(t_{i-1}) + \mathbf{B}_k \mathbf{u}_k(t_{i-1}), \mathbf{z}_k(0) = \mathbf{z}_{k0}; \\
 \mathbf{y}_k(t_i) &= \mathbf{C}_k \mathbf{z}_k(t_i); \\
 \sum_{i=0}^{N-1} \mathbf{D}_1^m \mathbf{u}_{1k}(t_i) &\leq \mathbf{b}^m(0); \\
 \mathbf{y}_k(T) &\leq \mathbf{Y}(T); \\
 \mathbf{D}_k^m \mathbf{u}_k(t_i) &\leq \mathbf{b}_k^m(t_{i-1}); \\
 \mathbf{D}_k^\Psi \mathbf{u}_k(t_i) &\leq \mathbf{b}_k^\Psi(t_{i-1}); \\
 \mathbf{b}_k^\Psi(t_i) &\leq \mathbf{b}_k^\Psi(t_{i-1}) + \Delta \mathbf{b}_k^\Psi(t_{i-1}); \\
 \boldsymbol{\varepsilon}_k(t_i) &= \mathbf{p}_k(t_i) - \mathbf{y}_k(t_i), \\
 J_k &= \sum_{i=0}^N \{ \mathbf{C}_{1k} \boldsymbol{\varepsilon}_k(t_i) + \mathbf{C}_{2k} \mathbf{u}_k(t_i) \} \rightarrow \min; \\
 i &= 0, N-1, t_i = iv, t_0 = 0, T = Nv, \quad (1)
 \end{aligned}$$

где \mathbf{z} , \mathbf{y} — вектор-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 — вектор-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; $m = \overline{1, M}$ — виды материальных ресурсов; $\psi = \overline{1, \Psi}$ — виды прочих ресурсов; $i = \overline{1, I}$ — моменты времени; $k = \overline{1, K}$ — номер подразделения;

N — целое число; J_k — критерий оптимизации, представляющий собой сумму из потерь за счет отклонения выпуска продукции от плана и из затрат на управление для ликвидации отклонения.

Процедура целевой адаптации начинается с изменения размерности вектора $\mathbf{p}_k(t_i)$ с последующим изменением структурных связей между ресурсами и продуктами.

На уровне диспетчера устанавливаются горизонтальные связи.

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

$$J_k = \sum_{k=0}^K J_k \rightarrow \min.$$

Уровень руководителя описывается подобно уровню $h = 1$ с заменой интервала $[t]$ на $[T] = m[t]$, где m — целое число.

Выражения для процесса управления можно использовать и для описания процесса планирования с заменой, показанной в табл. 1, в которой выражения

$$\mathbf{D}_k \mathbf{p}_k \leq \mathbf{b}_k,$$

$$G_k = \mathbf{F}_k \mathbf{P}_k \rightarrow \max$$

системы (1) представляют собой прямую задачу СЛП, в которой \mathbf{p}_k , \mathbf{P}_k , G_k — ежедневный выпуск продукции, выпуск с накоплением, критерий оптимизации. Задача может быть записана иначе (табл. 2). Наряду с прямой задачей, потребуются обратная задача, запись которой представлена в табл. 2.

Таким образом, был построен достаточно удачный и относительно простой метод описания, который стал основой для изучения процедуры моделирования.

Таблица 1

Соотношение переменных

Управление	$\mathbf{y}(t_i)$	$\mathbf{u}(t_i)$	$\boldsymbol{\varepsilon}(t_i)$	J	C	$\boldsymbol{\varepsilon}_k(t_i) = \mathbf{p}_k(t_i) - \mathbf{y}_k(t_i)$
Планирование	$\mathbf{p}(t_i)$	$\mathbf{p}_k(t_i)$	0	G	F	$\mathbf{p}_k(t_i) = \mathbf{y}_k(t_i)$

Таблица 2

Виды задач СЛП

Задача	Даны	Найти
Прямая	Векторы \mathbf{R} , \mathbf{b} , \mathbf{F} , матрица \mathbf{D}	Вектор \mathbf{P}
Обратная	Векторы \mathbf{R} , \mathbf{P} , матрица \mathbf{D}	Вектор \mathbf{F} , \mathbf{b}

Моделирование ААСУП

Методология моделирования учитывает следующую систему концептуальных принципов.

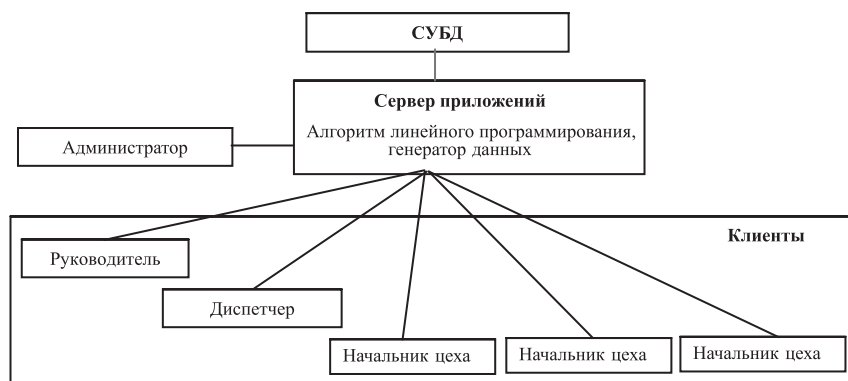


Рис. 3. Структура компьютерной реализации

1. Использование сетевой архитектуры "клиент — сервер" в силу иерархичности системы.
2. Применение "тонкого" клиента с выделением составляющих: сервер базы данных, сервер приложений, программные средства клиента.
3. Рассмотрение автоматизации управления, а не автоматизации документооборота.

Подход к решению задачи определяется спецификой составляющих.

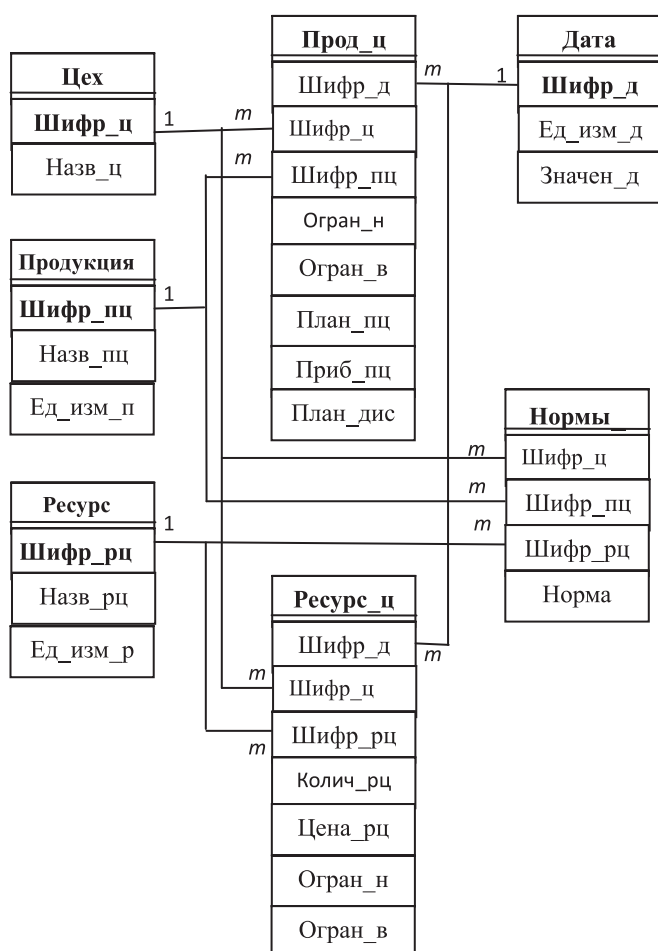


Рис. 4. Структура элементов базы данных уровней $h = 2$ и $h = 1$

Распределенная динамическая база данных должна обладать гибкостью доступа, простотой создания, широкой распространенностью, понятным интерфейсом.

Сервер приложений должен быть связан с СУБД, иметь открытый код, простую расширяемость, блочное построение, быть прост в настройке и широко распространен.

В программных средствах должны присутствовать алгоритмы и реализации разностных уравнений и оптимизации, модульность построения, оперативность апробации алгоритмов и способность стыковки с СУБД.

Обобщенная модель построена на основе обобщенного описания, а обобщенную технологию моделирования лучше иллюстрировать на прикладной модели.

В процедуре прикладного моделирования ААСУП [12] следует выделить построение и использование модели.

Построение модели. Здесь можно выделить построение структуры модели и программную работу с ней (табл. 3). Поскольку система является распределенной, целесообразно использовать архитектуру "клиент-сервер" с "тонким" клиентом (рис. 3).

Строится структура многоуровневой базы данных, которая для диспетчерского уровня может иметь вид, показанный на рис. 4.

Интерфейсы специфичны и требуют дополнительной проработки.

Локальные методы (табл. 3) включают в себя операции генерации/идентификации и обработку данных, связанные с их согласованием. Возможны различные сочетания алгоритмов операций, из которых представим один.

Обратимся к генерации данных. Первоначально генерируются согласованные данные (согласованный режим) для одного структурного

Таблица 3

Формирование структуры модели

Действие	Результат
Сетевое взаимодействие пользователей	Структура "клиент—сервер" и требования к программным средствам
Построение базы данных	Выбор СУБД
Формирование интерфейса	Интерфейсы администратора и клиентов
Локальные методы и коды используемых программ	Методы генерации/идентификации и согласования данных

элемента уровня $h = 1$ (цех), для чего используется алгоритм Р. Габасова для обратной задачи (см. табл. 2). Величины \mathbf{P} , \mathbf{R} , \mathbf{A} задаются в диалоге; оптимальная оценка \mathbf{DEL} и оптимальный потенциал \mathbf{Y} генерируются функцией Rand:

$$\mathbf{b}_k = \mathbf{D}_k \mathbf{P}_k,$$

$$\mathbf{F}_{k0} = \mathbf{DEL}_k,$$

$$\mathbf{F}_k = \mathbf{F}_{k0} + \mathbf{D}_k \mathbf{Y}_k.$$

На уровне диспетчера ($h = 2$) вводятся горизонтальные связи

$$N_{k-1} = M_k, \quad (2)$$

$$\mathbf{D}_k^m \mathbf{p}_{1k} = \mathbf{p}_{k-1}, \quad k = \overline{2, K}, \quad (3)$$

где $N_{k-1} = M_k$ — размерность матрицы \mathbf{D}_k .

Далее вычисляются данные для уровня руководителя ($h = 3$).

$$\mathbf{D} = \prod_{k=1}^K \mathbf{D}_k;$$

$$\mathbf{G} = \sum_{k=1}^K \mathbf{F}_k \prod_{j=k+1}^K \mathbf{D}_j \mathbf{P}_K,$$

где

$$r = \begin{cases} k+1 & \text{при } k < K, \\ 0 & \text{при } k = K, \end{cases}$$

$\mathbf{D}_0 = \mathbf{I}$, \mathbf{I} — единичная матрица.

Далее строится несогласованный режим. Для этого, в частности, достаточно нарушить выражения (2), (3).

Несогласованный режим получается, как правило, при специфической идентификации.

Согласование может осуществляться различными способами [13, 14], например, возвратом от несогласованных данных к согласованным с изменением коэффициентов целевых функций.

Следует особо отметить, что система методов генерации и согласования требует дополнительной детальной проработки.

Использование модели. Рассмотрим традиционный вариант работы. Первоначально администратором генерируются данные согласованного режима для уровня диспетчера. На их основе строятся данные для верхнего и нижнего уровней (см. рис. 2). Все данные, кроме оптимальных планов, передаются в базу данных. Клиенты запрашивают данные из базы данных (БД) для определения оптимальных планов, значения которых передаются в БД. Фактически осуществляется апробация модели.

Далее для тех же уровней формируются несогласованные данные и с ними проводятся те же операции.

Структурные элементы системы отличаются целенаправленностью в виде экономических интересов, которые проявляются в целевых функциях. В силу этого в процедуре функционирования требуется согласование интересов и данных. Согласование данных осуществляется сначала на уровне диспетчера, а потом — на других уровнях.

Данные, получаемые при идентификации, как правило, несогласованные, поэтому проводится и их согласование.

После завершения традиционного варианта те же операции осуществляют, переходя к адаптивному варианту. Однако следует предварительно удостовериться в целесообразности перехода на выпуск новой продукции.

Обсуждение результатов

Развитие традиционных автоматизированных систем управления производством привело к появлению и все большей потребности в новом классе — адаптивных систем, позволяющих оптимизировать процесс управления и автоматизировать процедуру оперативного перехода на выпуск новой продукции. Для прикладного применения таких систем необходимо системное изучение процедур их математического описания и моделирования.

Изучение процедуры описания позволило выявить на верхнем блоке трехуровневую структуру систем и (с учетом их особенностей) сформулировать требования к методам математического описания. Анализ, проведенный на основе требований, позволил построить новый метод описания — однородный метод, который лег в основу построения прикладной модели систем.

Для прикладной модели системы управления сформулированы требования к структуре программных средств (сервер базы данных, сервер приложений, программные файлы клиентов), позволившие выбрать архитектуру "клиент — сервер" с "тонким" клиентом. Специфичной оказалась процедура получения для модели числовых данных, которые, как показано, возможны в процедуре идентификации или генерации. При генерации числовых данных первоначально формируется согласованный режим, а затем — несогласованный. Идентификация числовых данных дает, как правило, несогласованные данные. Они согласуются с помощью предложенного локального метода.

Таким образом, автором проведено системное рассмотрение процедур от описания систем до их компьютерной реализации.

Полученный результат является фундаментом (каркасом) для развития системы локальных

методов функционирования адаптивных систем. Более того, он позволяет перейти к анализу процессов в нижнем блоке структуры системы.

Список литературы

1. Глушков В. М. Основы безбумажной информации. М.: Наука, 1982. 552 с.
2. Бобко И. М., Марчук Г. И., Аганбегян А. Г. Адаптивная АСУ производством // Под ред. Г. И. Марчука. М.: Статистика, 1981. 384 с.
3. Li Yihua. Анализ устойчивости АСУ // J. Chanhsha Univ. Elec. Powers, 1997, 12, N. 4. P. 408–411.
4. Советов Б. Я., Чертовской В. Д. Автоматизированное адаптивное управление производством. СПб.: Лань, 2002. 200 с.
5. Месарович М., Мако Д., Такахара Я. Теория иерархических систем / Пер. с англ. М.: Мир, 1973. 344 с.
6. Скурихин В. И., Забродский В. А., Копейченко Ю. В. Проектирование систем управления машиностроительным производством. Харьков: Вища школа, 1984. 206 с.
7. Скурихин В. И., Забродский В. А., Копейченко Ю. В. Адаптивные системы управления машиностроительным производством. М.: Машиностроение, 1989. 208 с.
8. Мизон В. А. Интеллектуальные методы управления предприятием. СПб.: Академия управления и экономики, 2008. 302 с.
9. Бурков В. Н. Основы математической теории активных систем. М.: Наука, 1977. 256 с.
10. Новиков Д. А. Теория управления организационными системами. М.: Физматгиз, 2012. 344 с.
11. Угольников Г. А., Усов А. Б. Трехуровневая система управления эколого-экономическими объектами // Проблемы управления. 2010. № 1. С. 26–32.
12. Чертовской В. Д. Моделирование процессов планирования в интеллектуальной системе управления производством // Материалы 9-й российской мультиконференции по проблемам управления "Информационные технологии в управлении (ИТУ-2016)" 4–6 октября. СПб.: Электроприбор, 2016. С. 536–544.
13. Чертовской В. Д. Анализ процесса согласованного автоматизированного планирования в иерархической системе управления производством // Информационные технологии. 2010. № 6 (166). С. 68–72.
14. Чертовской В. Д. Математическое описание и компьютерная реализация модели адаптивной автоматизированной системы управления производством // Информационно-управляющие системы. 2017. № 1 (86). С. 106–114.

V. D. Chertovskoy, Professor, e-mail: vdchertows@mail.ru,

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

Methology of Mathematical Description and Modeling of Adaptive Automatized Manufacturing Control Systems

Hierarchical adaptive manufacturing control systems was researched these work in optimal regime with change goal vector composition. System analyses of mathematical description and computer realization was made. Description method and method of obtain of numerical information for model of system were proposed. Singularities were considered and program structure of computer realization, methods of numeric data agreement were chosen.

Keywords: system analyses adaptive manufacturing control system planning description modeling

References

1. Glushkov V. M. *Osnovy bezbuzmazhnoy informacii* [Basis of Paperless Information]. Moscow: Nauka, 1982. 552 p. (in Russian).
2. Bobko I. M., Marchuk G. I., Aganbegjan A. G. *Adaptivnaja ASU proizvodstvom* [Adaptive Automatized Manufacturing Control System]. By edit G. I. Marchuk. Moscow: Statistika, 1981. 384 p. (in Russian).
3. Li Yihua. *Analiz ustoichivocti ASU* [Stability analysis of ACS] // J. Chanhsha Univ. Elec. Powers, 1997, vol. 12, no. 4, pp. 408–411.
4. Sovetov B. Y., Chertovskoy V. D. *Avtomatizirovannoe adaptivnoe upravlenie proizvodstvom* [Adaptive Automatized Manufacturing Control]. S.-Peterburg: Lan, 2002. 200 p. (in Russian).
5. Mesarovich M., Mako L., Takahara Y. *Teorija ierarhicheskikh sistem*. [Hierarchical Systems Theory]. Per. s English. Moscow: Mir, 1973. 344 p. (in Russian).
6. Skurihin V. I., Zabrodskiy V. A., Koheychenko J. V. *Projektirovaniye sistemy adaptivnogo upravleniya mashinostroitelnykh proizvodstvom*. [Design of adaptive control systems of machine-building production]. Harkov: Visha shkola, 1984. 206 p. (in Russian).
7. Skurihin V. I., Zabrodskiy V. A., Koheychenko J. V. *Adaptivnye sistemy upravleniya mashinostroitelnykh proizvodstvom*. [Adaptive control systems of machine-building production]. Moscow, Mashinostroenie, 1989. 208 p. (in Russian).
8. Mison V. A. *Intellectualnye metody upravleniya predpriyatiem* [Intellectual Methods of Manufacturing Control]. S.-Peterburg: Academy of Control and Economic, 2008. 302 p. (in Russian).
9. Burkov V. N. *Osnovy teorii aktivnykh sistem*. [Basis of Active Systems Theory]. Moscow: Nauka, 1977. 256 p. (in Russian)
10. Novikov D. A. *Teoriya upravleniya organizatsionnymi sistemami* [Control Theory of Organization Systems]. Moscow: Fizmatgiz, 2012. 344 p. (in Russian).
11. Ugolnitskiy G. A., Usov A. B. *Trehurovnevaya sistema ekologo-ekonomicheskimi objektami*. [Three-level Control System by Ecologically-economic Objects]. *Problemy upravleniya*, 2010, no 1. pp. 26–32 (in Russian).
12. Chertovskoy V. D. *Modelirovaniye protsessov planirovaniya v intellektualnoy sisteme upravleniya proizvodstvom* [Modelling of Planning Processes in Intellectual Manufacturing Control System]. *Materialy 9 multikonferencii po problemam upravleniya "Informacionnye tekhnologii v upravlenii (ITU-2016)" 4–6 oktjabrja*. Saint-Peterburg, Elektroprigor, 2016. pp. 536–544 (in Russian).
13. Chertovskoy V. D. *Analiz processa soglasovannogo planirovaniya v ierarhicheskoy sisteme upravleniya proizvodstvom* [Automatized cjoordinated planning process analyses in hierarchical control system of manufacturing], *Informacionnye tekhnologii*, 2010, no. 6 (166), pp. 68–72 (in Russian).
14. Chertovskoy V. D. *Matematicheskoe opisaniye i komputernaya realizatsiya mjdeli adaptivnoy avtomatizirovannoy sistemy upravleniya proizvodstvom* [Mathematical description and computer realization of model for adaptive automatized manufacturing control system], *Informacionno-upravljajucsie sistemy*, 2017, no. 1 (86), pp. 106–114 (in Russian).