

## МОДЕЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ КАК СТРАТЕГИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ

**Abstract:** In the article it is considered the Model Oriented Control problem when operation modern manufacturing systems which consists in using a wide spectrum of computer models at all levels of making decision. It is grounded the direction of building realization models, restoration and predictive models. Tasks which are subjected to the decision during application of Model Oriented Control strategy are formulated.

**Key words:** model oriented control, Intelligent manufacturing systems.

**Анотація:** У статті розглядається проблема модельно-орієнтованого управління при функціонуванні сучасних виробничих систем, яка полягає у використанні широкого спектра комп'ютерних моделей на всіх рівнях прийняття рішень. Обґрунтовуються напрямки побудови моделей реалізації, відновлення та прогнозування. Формулюються задачі, що підлягають вирішенню під час використання стратегії модельно-орієнтованого управління.

**Ключові слова:** модельно-орієнтоване управління, інтелектуальні виробничі системи.

**Аннотация:** В статье рассматривается проблема модельно-ориентированного управления при функционировании современных производственных систем, которая состоит в использовании широкого спектра компьютерных моделей на всех уровнях принятия решений. Обосновываются направления построения моделей реализации, восстановления и прогнозирования. Формулируются задачи, которые подлежат решению во время применения стратегии модельно-ориентированного управления.

**Ключевые слова:** модельно-ориентированное управление, интеллектуальные производственные системы.

### 1. Введение

Понятие интеллектуальной производственной системы (ИПС) сформировалось под влиянием растущих возможностей информационных технологий, проникающих во все сферы человеческой деятельности. Важным этапом развития на этом пути стало появление в 80-е годы прошлого века гибких производственных систем (ГПС). Дальнейшее развитие работ в данном направлении привело к становлению компьютеризированного интегрированного производства (КИП). На этой стадии развития возник и был частично апробирован целый ряд фундаментальных идей, принципов и технологий. В частности, были созданы автоматизированные системы проектирования (Computer Aided Design - CAD) и автоматизированные системы технологической подготовки производства (Computer Aided Manufacturing - CAM). Обмен геометрическими данными в электронном виде между CAD и CAM-системами явился одним из первых реальных примеров информационной интеграции процессов. Однако наибольшего развития идеи построения современного предприятия получили в ходе выполнения международной программы «Интеллектуальные производственные системы» (Intelligent Manufacturing Systems - IMS), развернутой передовыми промышленными державами мира на рубеже веков [1]. В рамках программы IMS получили развитие более 50 международных проектов, в результате выполнения которых уже разработаны или будут созданы новейшие производственные технологии, формирующие понятие современной производственной системы.

Анализ этапов развития производственных систем показывает, что основным элементом, формирующим их сущность, является компьютерная система управления (КСУ). ИПС не отменяют

и не заменяют принципы построения производственных систем, сформированные в процессе развития ГПС и КИП, а делают их более интеллектуальными, гибкими и прогрессивными за счет широкого использования передовых информационных технологий на всех уровнях управления. По сути, ИПС приносят качественные интеллектуальные определения в каждое из наследуемых от ГПС и КИП свойств, совершенствуя автоматизацию технологических процессов и повышая уровень информационной интеграции предприятий. С точки зрения автоматизации ИПС отличает развитие распределенных SCADA-систем (Supervisory Control And Data Acquisition - SCADA) до уровня реализации открытой модульной архитектуры управления (Open Modular Architecture Controls - OMAC). В вопросах информационной интеграции ИПС решают задачи не только обмена данными между различного рода компьютерными программами, но и задачу поддержки полного жизненного цикла продукции, совершенствуя CALS-технологии (Continuous Acquisition and Life cycle Support - CALS) в направлении создания виртуальных предприятий.

Но главной характерной чертой ИПС, определяющей фактически их название и делающей процесс управления интеллектуально насыщенным, является широкое использование компьютерного моделирования на всех этапах принятия управленческих решений. В ИПС компьютеры получили совершенно новое назначение. Помимо программного управления и интеграционных функций на них все чаще возлагаются задачи восприятия, распознавания и отображения информации, а также формирования управленческих решений по целесообразному поведению в различных ситуациях развития производственного процесса. Компьютерное зрение, компьютерная графика, имитация поведения, человеко-машинный интерфейс, синтетическое окружение и виртуальная организация в настоящее время становятся важнейшими составляющими процесса управления. Метод, положенный в основу функционирования данных составляющих, есть моделирование, потому что всегда предполагается использование модели - некоторого приближения к реальному объекту; моделирование в данном случае является компьютерным, поскольку требует значительных объемов вычислений.

Необходимо отметить, что в последнее время вопросу применения моделей в современной теории управления, которая создавалась в том числе и благодаря работам крупнейших отечественных ученых-кибернетиков В.М. Глушкова, А.Г. Ивахненко, Т.П. Марьяновича, А.А. Морозова, В.И. Скурихина и других, уделяется огромное внимание. Но, как показывает прекрасный обзор существующих методов и приложений в области управляемых процессов, приведенный в статье В.М. Кунцевича и А.А. Чикрия [2], сейчас усилия ученых в основном сосредоточены на решении проблем автоматического управления в физических системах, оставляя открытым вопрос использования современных методов моделирования при управлении производством.

Целью данной статьи является обоснование нового подхода в стратегии функционирования ИПС, учитывающего сложную многоуровневую структуру и динамику поведения системы и основанного на применении различных видов компьютерного моделирования непосредственно в процессе принятия решений на всех уровнях управления производственным процессом. В статье формулируется проблема модельно-ориентированного управления ИПС и определяются научные и практические задачи, направленные на ее решение.

## 2. Структура и процесс функционирования КСУ предприятием

Следуя существующим традициям, КСУ отдельным предприятием можно представить в виде иерархической структуры, включающей два основных уровня управления:

- уровень управления технологическими процессами;
- уровень управления производством.

На рис. 1 показана связь уровней управления ПС с ее основными подсистемами. На нижнем уровне создается автоматизированная система управления технологическими процессами (АСУ ТП), задачей которой является компьютерное управление процессами, непосредственно связанными с выпуском конечного продукта. Именно на данном уровне закладывается требуемая степень автоматизации производства, которая формирует в дальнейшем все последующие возможности управления ПС. Подсистема переработки является доминирующей и выполняет производственную функцию, связанную с преобразованием входных параметров в выходные результаты. Так, например, для машиностроительного предприятия основными результатами его деятельности являются готовые станки и установки, переданные заказчику в эксплуатацию. Материалы, которые используются при выпуске продукции, комплектующие детали и конструкции перерабатываются данной подсистемой в ходе выполнения технологического процесса.

Подсистема обеспечения хотя и не связана непосредственно с производством выходной продукции, но выполняет важные функции по обеспечению бесперебойного функционирования подсистемы переработки.

На верхнем уровне создается АСУ производством (АСУП), решающая задачи планирования и управления качеством. Подсистема планирования и контроля получает от

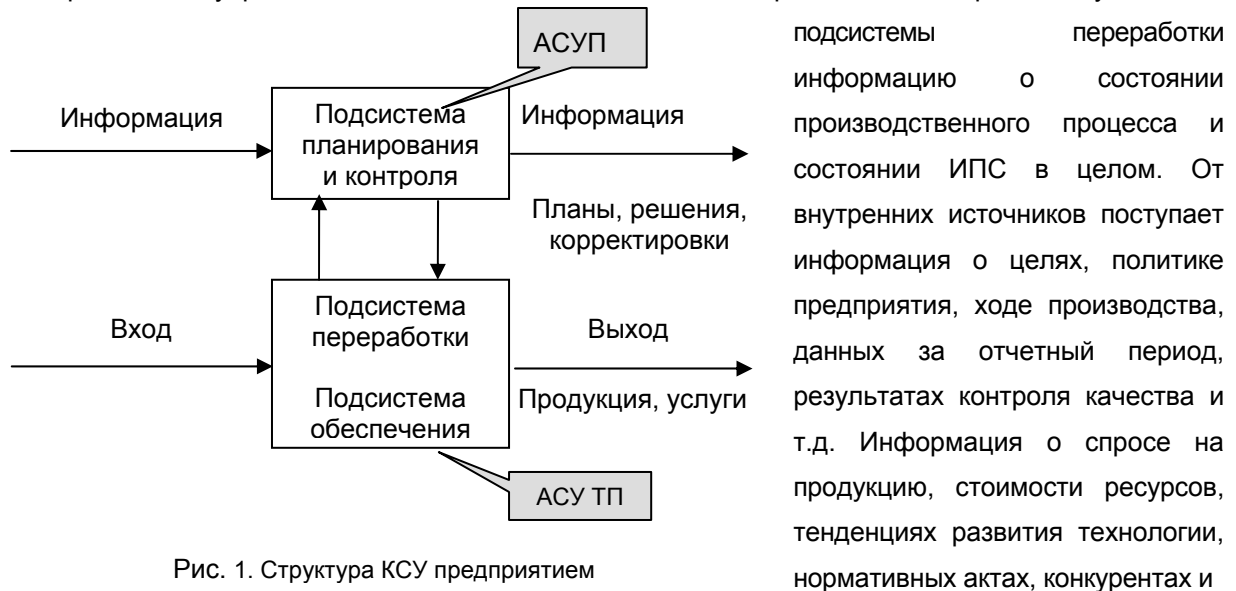


Рис. 1. Структура КСУ предприятием

других важных факторах поступает из внешней среды. Подсистема планирования и контроля должна обработать весь объем этой информации и выдать решения по организации и корректировке процесса переработки. Конфетные вопросы, подлежащие решению на данном уровне, как правило, включают планирование производственной мощности, планирование

производственного процесса, планирование ресурсов, контроль процессов производства, качества конечной продукции и ее реализации.

### 3. Внутренняя и внешняя модели ИПС

Моделирование составляет суть системного подхода к проблемам управления ИПС. Для того, чтобы разработать ПС и иметь возможность ею управлять, необходимо получить ее математическую модель.

При всем многообразии существующих свойств реальной системы модель не может быть точной копией моделируемой системы, но должна быть способна описывать действительность с максимально возможной точностью, выделяя для этого ограниченное число переменных. Даже простейшие ситуации управления производством оказываются слишком сложными при детальном рассмотрении. В конечном счете, задачей моделирования является установление взаимосвязей между входом и выходом системы, которые обеспечивают достижение поставленной цели с заданной точностью, и определение такой динамики системы, которая описывала бы реальный процесс в соответствии с заранее принятыми допущениями. Именно на основе созданной модели может быть выработана требуемая стратегия управления.

Сформулировать понятие модели можно многими способами. В нашем случае воспользуемся математической формулировкой, принятой в общей теории систем [3]. Если  $S \subset X \times Y$  и  $S' \subset X' \times Y'$  являются некоторыми общими системами, а  $h = (h_x, h_y)$  – гомоморфизм, определяющий множество отображений  $h_x : X \rightarrow X'$  и  $h_y : Y \rightarrow Y'$ , причем  $h_x$  – сюръективно, то система  $S'$  называется моделью системы  $S$  в том и только в том случае, когда выполняется условие

$$\forall (x, y)((x, y) \in S \Rightarrow h(x, y) \in S'). \quad (1)$$

Построим гомоморфную модель ПС, включающую внутреннее и внешнее описание стационарной системы с множеством состояний  $X$ , множеством управляющих входов  $U$  и множеством выходов  $Y$ . Для внутреннего описания будем использовать пару функций

$$s_1 : X \times U \rightarrow X, \quad s_2 : X \rightarrow Y, \quad (2)$$

а для внешнего описания функцию

$$s' : U' \rightarrow Y, \quad (3)$$

которая отображает множество входных последовательностей  $U' = (u(1), u(2), \dots, u(n))$  на множество выходных сигналов  $Y$ .

Данное описание будет подразумевать, что существуют изоморфизмы  $h : X \rightarrow U'$  и  $h_1 : X \times U' \rightarrow X$ , позволяющие осуществлять переход от внутреннего описания к внешнему и наоборот. Воспользовавшись свойством

$$s_1(x, u(1)u(2)) = s_1(s_1(x, u(1)), u(2)), \quad (4)$$

можно с помощью равенства

$$s'(u(1)u(2)..u(n)) = s_2(s_1(x, u(1)u(2)..u(n))) \quad (5)$$

сопоставить внешнему описанию вход-выход  $s'$  любое состояние  $x$ , которое можно определить, например, с помощью уравнения состояния.

Теперь рассмотрим обратную задачу. При заданной функции вход-выход необходимо найти реализацию  $s'$ , т.е. систему, обладающую таким состоянием  $x$ , для которого выполняется, например, выражение (3). Уравнение состояния здесь рассматривается не как заданное, а как неизвестное свойство, характеризующее динамику системы. Таким образом, задача реализации для зависимости вход-выход заключается в нахождении динамики системы, представление которой в пространстве состояний обеспечивало ту же самую зависимость вход-выход.

Рассмотренным моделям вход-выход соответствуют передаточные функции, заданные как отношение преобразования Лапласа выходного параметра к преобразованию Лапласа входного параметра при нулевых начальных условиях. Однако в силу известных причин [4] передаточные функции существуют только для линейных стационарных систем и не несут никакой информации о внутренних переменных и характере их изменения. Поэтому они не могут рассматриваться в качестве общей модели ПС и используются только при проектировании отдельных элементов АСУ ТП, в основном регуляторов, в том числе и цифровых.

Наиболее общую схему представления моделей класса «вход-выход» дает агрегативный подход, в основе которого лежит понятие агрегата [5]. Агрегат представляется как объект, заданный на множествах состояний  $Z$ , входных сигналов  $X$  и выходных сигналов  $Y$ . Эволюция агрегата определяется операторами переходов  $H$  и выходов  $G$ . Поступление входного сигнала в агрегат, являющееся внешним событием, может вызвать изменение состояний агрегата, что будет являться фактором совершения внутренних событий. Оператор  $H$ , в общем случае случайный, ставит в соответствие некоторому состоянию  $x(t) \in X$  множество значений  $X(t)$  с некоторым законом распределения, зависящим от вида оператора  $H$ . Состояние агрегата для произвольного момента времени  $t > t_0$  определяется как конкретная реализация в соответствии с этим законом распределения. Оператор  $G$  определяет правила выдачи выходных сигналов, которые, в свою очередь, могут поступать на выход других агрегатов. Выходные сигналы выдаются в результате изменения внутреннего состояния агрегата или поступления входного сигнала и являются их следствием. В том числе выходной сигнал может быть и пустым. Агрегаты могут вмещать в себя другие виды формализмов, позволяющие раскрыть динамику поведения систем любой сложности. Конкретизация агрегатов связана непосредственно с построением моделей реализации.

Среди многообразия агрегатов выделяется класс кусочно-линейных агрегатов (КЛА), являющихся частным случаем кусочно-непрерывных агрегатов. Функционирование КЛА представляет собой кусочно-линейный марковский процесс (КЛМП), задаваемый следующим выражением:

$$x(t) = (q, x_q), \quad (6)$$

где  $q \in Q$  - некоторая дискретная величина, называемая основным состоянием;

$x_q = (x_{q1}, x_{q2}, \dots, x_{q|q|})$  – вектор дополнительных координат размерности  $|q|$ , соответствующий основному состоянию;

$|q|$  – неотрицательная величина, называемая рангом основного состояния.

КЛА свойственно линейное равномерное изменение значений координат вектора  $z_q$  :

$$\frac{dx_q}{dt} = -\alpha, \quad (7)$$

где  $\alpha$  – положительная константа.

Поскольку КЛА позволяют моделировать широкий класс объектов, поведение которых описывается различными формальными методами, а также обеспечивают возможность построения многоуровневых агрегативных систем, их можно рассматривать в качестве основы создания моделей как уровня АСУ ТП, так и уровня АСУ П. Отличие этих моделей будет состоять в деталях наполнения внутреннего содержания агрегатов.

#### 4. Модели реализации

Отталкиваясь от первичного понятия модели и используя гомоморфные преобразования, можно перейти от модели вход-выход к ее различным динамическим реализациям.

Динамику самых простых линейных непрерывных систем можно представить дифференциальным уравнением первого порядка, которое в векторной форме имеет вид следующего выражения [6]:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), \quad (7)$$

где  $u \in U$  – вход системы,  $x \in X$  – состояние системы,  $A$  и  $B$  – матрицы соответственно размеров  $n \times n$  и  $n \times m$ .

Кроме уравнения состояния (7), для построения реализации можно воспользоваться разностным уравнением, связывающим реакцию системы с ее входом

$$y(t) = Cx(t), \quad (8)$$

где  $y \in Y$  – выход системы. При этом следует учитывать, что влияние входов на реакцию системы может быть учтено через вычисление состояния системы на текущем шаге  $k$ .

В общем случае цель состоит в нахождении такой модели  $(A, B, C)$ , которая имеет минимальную размерность. Хотя минимальная реализация системы не обязательно является единственной, все минимальные реализации реакций на входные воздействия единственны с точностью до изоморфизма [3]. Для линейных систем существуют алгоритмы нахождения минимальной реализации, описанные, в частности, в [6]. Однако, если система нелинейна, то построение минимальной реализации аналитическим путем становится проблематичным.

В теории управления производственными системами в последнее время получили распространение методы формализации, основанные на сетях Петри [7]. Но более предпочтительными в данном плане являются Е-сети [8]. Как наиболее мощный представитель

временных сетей Петри они позволяют производить не только качественный анализ процессов, но и учитывать количественные оценки в процессе реализации динамики поведения систем.

Важным свойством Е-сетей является то, что они могут быть использованы в качестве формальной основы реализации КПА. Пусть  $M$  является множеством всех допустимых маркировок некоторой Е-сети, т.е. множеством всех возможных состояний процесса, а  $M_i \in M$  является ее текущей маркировкой. Пусть также  $T_i \in T$  – некоторое подмножество множества всех переходов Е-сети, задержанных в  $M_i$ , которые связаны отображением

$$\Gamma : M \rightarrow T, \Gamma M_i \subseteq T, i \in \overline{1, N}, \quad (9)$$

где  $N$  – число допустимых маркировок сети. Тогда сигма-алгебра  $\Omega$  выделенных подмножеств из  $T$ , элементами которой определяются наблюдаемые совокупности состояний отдельных переходов, задает измеримое фазовое пространство состояний  $(T, \Omega)$ . Будем считать также, что  $\Omega$  содержит каждый элемент из  $T$ , т.е. отдельные состояния наблюдаемы.

Пусть теперь  $w_{ij}$  – случайная переменная, равная времени до окончания задержки перехода  $t_j \in T_i$  при маркировке  $M_i$ . Тогда процесс срабатывания переходов, т.е. наступления событий, приводящих к смене состояний исходного процесса, можно записать в виде

$$x(t) = (M_i, \overline{w_i(t)}), \quad (10)$$

где  $M_i$  – текущая маркировка сети;  $w_i(t)$  – вектор дополнительных координат  $w_i(t) = (w_{i1}(t), w_{i2}(t), \dots, w_{i|M_i|}(t))$ ,  $|M_i|$  – количество задержанных переходов Е-сети в состоянии, соответствующем маркировке  $M_i$ .

Если задать скорость изменения  $w_{ij}(t)$ , равной минус единице, т.е. считать, что  $\alpha = 1$ , то процесс функционирования Е-сети будет представлять собой КЛМП, определяемый выражением (6). Именно в значении дополнительной переменной  $w_{ij}(t)$  и заключена информация о предыстории процесса, позволяющая определить моменты смены его состояний по формуле

$$\tau_i = \min_j w_{ij}. \quad (11)$$

Однако следует учитывать, что при подобной формализации мы естественным образом переходим к дискретной форме представления динамики системы, которой соответствует разностное уравнение состояния

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k). \quad (12)$$

Подобное уравнение может быть построено для Е-сети, конкретизирующей внутреннее описание КПА. Более того, сама Е-сеть и каждый ее переход могут рассматриваться в качестве КПА [9] и, следовательно, обеспечивать вложение разнородных моделей. На нижнем уровне управления это могут быть имитационные модели технологических процессов, графические модели объектов и траекторий их перемещения, визуальные модели, используемые в человеко-машинном интерфейсе для отображения состояния объектов управления и формирования управляющих

технологическими процессами и процессами управления качеством. Последние, в свою очередь, будут представлены соответствующими моделями, реализующими те или иные процедуры, в основном связанные с необходимым документооборотом.

## 5. Модели систем с обратной связью

В контуре управления, включающем управляющий элемент и ОУ, обратная связь используется для установления зависимости входа от выхода системы. Как правило, в этом случае в качестве входа рассматривается желаемое значение выхода, которое является целью управления. Задача состоит в том, чтобы найти закон управления, который приближает систему к цели и удерживает ее вблизи цели. Делается это на основе известной динамики системы с учетом того, что выход  $Y$  должен служить входом управляющего элемента.

Если обозначить желаемый выход через  $z$ , реальный выход – через  $y$ , управляющий входной сигнал – через  $u$ , вектор состояния управляющего элемента – через  $x_c$ , а вектор состояний ОУ – через  $x$ , то модель СУ с обратной связью можно записать в виде двух пар уравнений:

– для управляющего элемента

$$x_c(k+1) = A_c x_c(k) + B_c \alpha(z(k), y(k)), \quad (13)$$

$$u(k) = C_c x_c(k); \quad (14)$$

– для ОУ

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k), \quad (15)$$

$$y(k) = Cx(k). \quad (16)$$

С помощью функции  $\alpha(z(k), y(k))$  в уравнении (13) устанавливается вид целевой зависимости между желаемым выходом системы и ее реальным выходом. В случае отрицательной обратной связи,

$$\alpha(z(k), y(k)) = z(k) - y(k). \quad (17)$$

Подставляя (14) в (15), получим

$$x(k+1) = Ax(k) + BC_c x_c(k) \quad (18)$$

и далее, используя (13),

$$x(k+1) = Ax(k) + BC_c (A_c x_c(k-1) + B_c \alpha(z(k-1), y(k-1))). \quad (19)$$

Как правило, при построении оптимального регулятора в качестве ошибки регулирования используется квадратичный критерий [9]:

$$J = \sum_{j=1}^{N-1} (p \varepsilon^2(k+j) + q u^2(k+j)) \xrightarrow{u} \min, \quad (20)$$



где  $\varepsilon(k+j) = \alpha(z(k+j), y(k+j)) = z(k+j) - y(k+j)$ , а управляющая последовательность  $\{u(k+j)\}_{j=0}^{N-1}$  находится методом динамического программирования с использованием соответствующего уравнения Риккати [10,11].

Применение замкнутых СУ сопряжено с преодолением ряда проблем и недостатков. В частности, уравнение (19) отображает тот факт, что для вычисления состояния ОУ на шаге  $(k+1)$  необходимо знать его состояние на шаге  $k$ , а также состояние управляющего элемента, желаемое и реальное значения выхода на шаге  $(k-1)$ . Это означает, что при определении требуемого управления управляющий элемент запаздывает относительно текущего состояния ОУ. Чем больше шаг времени дискретизации, тем большее запаздывание возникает. По этой причине для дискретных замкнутых систем не существует прямого перехода от  $u(k)$  к  $y(k)$  в выражении для выхода, так чтобы модель была строго корректна. Помимо отмеченного выше факта, к издержкам обратной связи следует отнести возрастание сложности реализации и уменьшение коэффициента усиления.

Но главный недостаток управления с обратной связью состоит в том, что текущие значения переменных состояния в моменты приложения к ним управляющего воздействия предполагаются известными. Более реальна ситуация, когда не все переменные состояния можно измерить. В этом случае используются так называемые модели восстановления, которые реализуются с помощью наблюдателей. В роли наблюдателя должна использоваться другая динамическая система, которая способна восстанавливать вектор состояния наблюдаемой системы по значениям ее входов и выходов. Фактически, наблюдатель имитирует управляемую систему.

Для линейных непрерывных и дискретных систем существуют аналитические методы решения задачи восстановления [11], предусматривающие достаточно жесткие ограничения, накладываемые на структуру наблюдателя. Однако в случае нелинейных систем данная задача становится крайне сложной, требующей применения нетрадиционных методов. Именно в процессе восстановления состояния системы методы компьютерного моделирования должны сыграть свою решающую роль. Благодаря использованию моделей компьютерной графики, имитационного моделирования и виртуальной реальности, построение моделей восстановления может быть сведено к построению соответствующих образов ОУ и его окружения. Кроме того, это позволит избежать запаздывания измерения реакции системы на применяемое управление, обеспечивая замыкание обратной связи через модели восстановления. Подобная форма использования моделей напрямую связана с прогнозированием поведения систем.

## 6. Модели прогнозирования

Рассмотренные выше модели реализации, включая модели с обратной связью, являются средством, используемым только при проектировании СУ, обладающих заданными свойствами. Причем для решения данной задачи необходимо располагать полным набором информации о свойствах ОУ и приложенных к СУ внешних воздействиях. При существовании ограничений на такую информацию в процессе управления использование традиционных методов становится

недостаточным и требуется применение стратегии управления с прогнозированием, основанной на использовании моделей, непосредственно встроенных в контур управления. В англоязычной терминологии управление, которое использует модели для прогнозирования поведения процесса в будущем, называется модельно-прогнозируемым управлением (Model Predictive Control - MPC) [12].

Предпосылкой становления данного направления можно считать адаптивное управление с моделями [9], при котором возможны два основных подхода к использованию моделей [10]:

- идентификационный, когда модель выполняет двойственное назначение: вначале подстраивается под характеристики реальной системы (решает задачу идентификации), а затем служит для стабилизации или оптимизации свойств реальной системы;
- безидентификационный, когда модель представляет собой заданный эталон, с которым сравнивается реальное функционирование системы; в последующем эта эталонная модель остается неизменной или также может подстраиваться под внешние воздействия.

Начиная с 1985 года, появилось множество вариантов MPC-технологии, которые развили направление адаптивного управления с моделями [13]:

- динамическое матричное управление (Dynamic Matrix Control - DMC);
- расширенное прогнозируемое адаптивное управление (Extended Prediction Self-Adaptive Control - EPSAC);
- обобщенное прогнозируемое управление (Generalized Predictive Control - GPC);
- модельно-алгоритмическое управление (Model Algorithmic Control - MAC);
- прогнозируемое функциональное управление (Predictive Functional Control - PFC);
- квадратичное динамическое матричное управление (Quadratic Dynamic Matrix Control - QDMC);

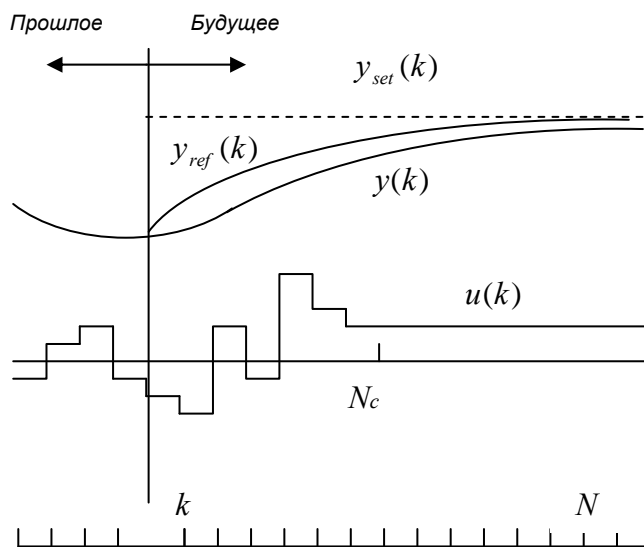


Рис. 2. Стратегия удаляющегося горизонта

преддемонстрирована с помощью рис. 2.

Принципиальные особенности стратегии удаляющегося горизонта состоят в следующем:

- последовательная разомкнутая оптимизация (Sequential Open Loop Optimization - SOLO) и др.

Представленные технологии отличаются, в основном, типом используемых моделей для представления процессов и методами решения задач оптимизации при принятии решений, которые могут включать те или иные виды ограничений. Но существует главное, что их объединяет, – это применяемая стратегия удаляющегося горизонта (Receding Horizon Strategy) [14]. Суть данной стратегии может быть наглядно

– в каждый текущий момент времени  $k$  выход процесса  $y(k+j)$  прогнозируется в пределах конечного временного горизонта  $j = \overline{1, N}$ . Реальный выходной сигнал в момент времени  $k$  определяется как  $y(k+j|k)$ , а величина  $N$  называется горизонтом прогнозирования. Прогнозирование выполняется посредством модели процесса, причем имеется в виду, что эта модель процесса доступна. Прогноз зависит от входов и выходов в прошлом, но также и от будущего сценария управления  $\{u(k+j|k), j = \overline{0, N_c - 1}\}$  (т.е. от управляющих действий, которые мы намереваемся применить, начиная с текущего момента времени  $k$  до некоторого момента  $k + N_c - 1$ ); базовая траектория  $\{y_{ref}(k+j|k), j = \overline{1, N}\}$  с начальным условием  $y_{ref}(k|k) = y(k)$  определяется на протяжении горизонта прогнозирования, обеспечивая вычисление ошибки траектории  $e(k+j|k) = y_{ref}(k+j|k) - y(k+j|k)$ ;

– измеренное значение выхода  $y(k)$  охвачено обратной связью;

– последовательность управлений  $\{u(k+j|k), j = \overline{0, N_c - 1}\}$  вычисляется на основе измерений таким образом, чтобы минимизировать специфицированную штрафную функцию, зависящую от ошибки прогнозирования  $e(k+j|k) = y_{ref}(k+j|k) - y(k+j|k)$ . Также в большинстве методов существует некоторая структуризация закона будущего управления  $\{u(k+j|k), j = \overline{0, N_c - 1}\}$  и ограничения на переменные процесса;

– первый элемент  $u(k|k)$  вычисленной оптимальной управляющей последовательности  $\{u(k+j|k), j = \overline{0, N_c - 1}\}$ , применяемой к реальному процессу, определяет управляющие действия только для шага  $k$ . Все остальные элементы вычисленного вектора управления могут быть забыты, потому что все последующие выборочные последовательности сдвигаются, новое значение выхода  $y(k+1)$  измеряется, и весь процесс повторяется. Это приводит к вычислению нового управляющего входа  $u(k+1|k+1)$ , который, в общем случае, может отличаться от предыдущего вычисленного значения  $u(k+1|k)$ .

## 7. Формулировка проблемы модельно-ориентированного управления

Перечисленные выше методы реализации стратегии удаляющегося горизонта в большинстве своем основываются на линейных динамических моделях. Это обусловлено следующими потенциальными свойствами реальных процессов:

– применение MPC до настоящего времени было связано, в основном, с управлением непрерывными процессами, что типично, скорее, для САР, где линейные модели являются наиболее подходящими;

– линейные эмпирические модели могут быть идентифицированы непосредственно на основе данных, полученных при наблюдении за процессом;

- тщательно идентифицированная линейная модель достаточно точна в окрестности отдельной точки для тех приложений, где доступны высококачественные измерения по линии обратной связи;

- наконец, используя линейную модель и квадратичную целевую функцию, MPC-алгоритм принимает форму высокоструктурированной выпуклой задачи квадратичного программирования, для которой существуют надежные методы решения и развитое программное обеспечение [15]. Последнее обстоятельство особо важно, т.к. алгоритм принятия решения должен сходиться за ограниченное время, чтобы быть полезным в ИПС.

Вместе с тем имеется множество приложений в ИПС, где указанные свойства не соблюдаются.

Во-первых, существуют процессы, для которых нелинейности являются настолько серьезными (даже вблизи устойчивого состояния) и столь критичными к замкнутому циклу стабилизации, что линейная модель является недостаточной.

Во-вторых, существуют процессы, которые испытывают продолжительные переходные режимы (запуски, остановки, и т.д.) и тратят большое количество времени на достижение устойчивого состояния или никогда не достигают его, как это бывает, например, в сталелитейной промышленности, где все производство выполняется в переходном режиме. Для таких процессов линейный закон управления будет не эффективен.

В-третьих, существуют процессы, которые можно описать только в виде некоторого алгоритма, описывающего логическую последовательность технологических операций, включая задание производственных циклов и использование обратных связей. Такой класс алгоритмических систем можно рассматривать как высшую форму нелинейности, для которой отсутствует возможность получения аналитических решений вообще.

И, наконец, следует отметить, что реальные процессы, встречающиеся в ПС, демонстрируют структурные и динамические феномены, которые выражаются, прежде всего, в чувствительности к изменению направления динамики (в терминах теории систем это означает плохие условия в пространстве), а также в координации временных масштабов для различных уровней управления (плохие условия во времени).

Во всех перечисленных выше случаях приходится говорить о необходимости применения нелинейных моделей, что сопряжено с целым рядом трудностей, вызванных ограничениями на модельные подходы. И хотя многие недавние исследования были направлены на преодоление данных трудностей [15, 16], использование нелинейных и алгоритмических моделей для прогнозирования с целью улучшения управления все еще остается открытой проблемой.

Несмотря на простое формальное определение нелинейной системы, которое можно представить в виде выражений [14]

$$Px = f(x, u); \quad (21)$$

$$y = g(x), \quad (22)$$

где  $P = \frac{d}{dt}$  для непрерывного времени и  $Px(k) = x(k+1)$  для дискретного времени, реальные

определения функций  $f$  и  $g$  являются крайне сложными. Более того, как уже отмечалось ранее, они могут быть заданы в алгоритмическом виде, что вообще исключает возможность применения аналитических методов как на этапах восстановления реакций системы и ее текущих состояний, так и при принятии решений. Следует отметить также, что использование нелинейных моделей приводит к потере выпуклости. Это означает, что становится гораздо труднее найти решение. Но даже если оно найдено, нельзя гарантировать его глобальную оптимальность.

Сложным остается также вопрос использования обратной связи для коррекции модельного прогнозирования на основе текущих измерений. Несмотря на то, что данный подход является значимым для линейного MPC, который базируется на принципе суперпозиции, он все еще остается сомнительным в качестве основного принципа выработки управляющих воздействий для нелинейных процессов.

Подводя итог вышесказанному, можно констатировать следующее:

- моделирование является важнейшим инструментом не только проектирования КСУ ИПС, но и является составной частью непосредственно процесса управления;

- используемые для управления модели в основном ограничены классом линейных систем, для которых существуют известные аналитические и численные решения; в то же время реальные процессы и системы отмечены сложной нелинейной динамикой и многоуровневой структурой, где эти решения уже не действуют;

- применение моделей для управления нелинейными многоуровневыми процессами, протекающими в ПС, сопряжено с целым рядом трудностей как чисто математического, так и вычислительного характера, которые на современном этапе развития ПС могут быть решены за счет широкого применения методов компьютерного моделирования.

Таким образом, на данный момент существует проблема модельно-ориентированного управления ИПС, которая состоит в разработке методов и технологии применения компьютерного моделирования при управлении системами со сложной структурой и динамикой поведения.

Сформулированная проблема подразумевает разрешение целого комплекса задач, которые могут быть сгруппированы по следующим направлениям:

**Направление 1.** Разработка метода спецификации алгоритмов управления, допускающего использование гибридных моделей реализации и учитывающего многоуровневость построения КСУ ИПС.

**Направление 2.** Разработка математического аппарата для оценки в реальном времени динамических свойств алгоритмов управления на основе моделей прогнозирования.

**Направление 3.** Разработка методов адаптивного и многоагентного управления на основе моделей восстановления, построенных с помощью компьютерной графики и виртуальной реальности.

**Направление 4.** Разработка технологии создания и встраивания моделей в контур управления на основе реализации открытой модульной архитектуры построения АСУ ТП.

**Направление 5.** Разработка методов и технологии модельно-ориентированного планирования и управления качеством производственного процесса на уровне АСУП.

## 8. Выводы

Сформулированная в данной статье стратегия модельно-ориентированного управления при функционировании ИПС базируется на прочном фундаменте известных методов управления. Она не отменяет и не заменяет эффективные методы ситуационного и адаптивного управления, з развивает их, используя современные средства информатики и компьютерного моделирования. Модельно-ориентированное управление как подход к построению КСУ ИПС позволяет решить весь комплекс задач, связанный с построением моделей реализации, восстановления и прогнозирования. Объединяя в себе универсальные математические методы и прогрессивные информационные технологии, данный подход может стать надежным и гибким инструментом решения сложных задач управления в современном производстве.

Эффективность применения модельно-ориентированного подхода была апробирована при создании роботизированных установок электронно-лучевой сварки, предназначенных для серийного производства сложных пространственных конструкций в аэрокосмической области [17].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gaines B.R., Norrie D.H. Knowledge Systematization in the International IMS Research Program // Proc. of IEEE Conference on Systems, Man and Cybernetics Intelligent Systems for 21st Century. -1995. - Vol.1. - P. 958 - 963.
2. Кунцевич В.М., Чикрий А.А. Управляемые процессы - методы исследования и приложения // Кибернетика и системный анализ. - 2003. - № 4. - С.11 - 23.
3. Месарович М., Такахара Я. Общая теория систем: математические основы. - М.: Мир, 1978. - 311 с.
4. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления. - М.: Лаборатория базовых знаний, 2002. - 832 с.
5. Бусленко Н.П., Калашников В.В., Коваленко И.Н. Лекции по теории сложных систем. - М.: Советское радио, 1973.-440 с.
6. Калман Р., Фалб П., Арбиб М. Очерки по математической теории систем. - М.: Мир, 1971. -400 с.
7. Лескин А.А., Мальцев П.А., Спиридонов А.М. Сети Петри в моделировании и управлении. - Л.: Наука, 1989. -133 с.
8. Nutt G. Evaluation Nets for Computer Systems Performance Analysis.- FJCC, AFIPS PRESS. -1972.- Vol. 41, Pt. 1rP. 279-286.
9. Казимир В.В. Моделирование синтетического окружения для реактивных систем // Математичне моделювання. Дніпродзержинський державний технічний університет. - 2003. - № 2(10). - С 24 - 32.
10. Чураков Е.П. Оптимальные и адаптивные системы. - М.: Энергоатомиздат, 1987. - 256 с.
11. Квакернак Х., Сиван Р. Линейные оптимальные системы управления. - М.: Мир, 1977. - 650 с.
12. Garcia C.E., Prett D.E. and Morari M. Model predictive control.Theory and practice -a survey //Automatica 25. - 1989.-P.335-348.
13. Qin S.J., Badgwell T.A. An overview of industrial model predictive control technology / In J.C. Kantor, C.E. Garcia, and B. Camahan AIChE Symposium Series: Fifth Int. Conf. on Chemical Process Control. -1997- Vol. 316. - P. 232 -256.
14. Rawlings J.B. Tutorial: Model predictive control technology // Proc. American Control Conference.- San Diego, California-1999- June. - P. 662 -676.
15. Wright S.J. Applying new optimization algorithms to model predictive control // J.C. Kantor, C.E. Garcia, and B. Camahan, editors, Chemical Process Control: Assessment and New Directions for Research, AIChE Symposium Series 316, AIChE and CACHE. -1997. - P. 147 -155.
16. Michalska H., Mayne D.Q. Robust receding horizon control of constrained nonlinear systems // IEEE Transactions on Automatic Control. -1993- November. - N 38(11):1623-1633.
17. Computer control of electron beam welding with multi-coordinate displacements of gun and workpiece / Paton B.E., Nazarenko O.K., Nesterenkov V.M., Morozov A.A., Litvinov V.V., Kazymyr V.V. // The Paton welding journal. - 2004.-N 5.-P. 2-5.