

# Системный анализ, управление и автоматизация

УДК 614.8.084

## МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦЕНКИ ДОСТОВЕРНОСТИ ПРОГНОЗА СТРАТЕГИИ РАЗВИТИЯ КРУПНОМАСШТАБНОЙ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ

*В.И. Батищев<sup>1</sup>, Н.Г. Яговкин*Самарский государственный технический университет  
443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244

*Разработана модель, позволяющая оценить эффективность использования систем поддержки принятия решений для формирования стратегии развития крупномасштабной производственной системы в зависимости от характеристик внешней среды.*

**Ключевые слова:** модель, прогнозирование, производственная система, принятие решений

Современные крупномасштабные производственные системы являются интегративными (включающими в себя разнородные производственные, экономические и социальные составные части) и разнообразными (каждый элемент системы отличается собственным поведением) и функционируют в условиях неопределенности, что приводит к ее возрастанию. Это связано с нечеткостью, так как частично или полностью отсутствует информация о возможных состояниях системы, и со случайностью, так как для управления системой требуется значительно больший объем информации о состоянии окружающей среды. Увеличение неопределенности снижает достоверность прогноза, что потребовало разработки модели для его оценки.

Для целей прогнозирования используются зависимости, которые являются комбинацией аналитического и имитационного моделирования [1-3]. В оценке поведения информационной среды участвует  $I$  факторов. Каждый из них может находиться в  $N$  состояниях. Общее количество возможных ситуаций будет равно  $N^M$ . После идентификации  $m$  факторов вероятность идентификации ситуации будет равна

$$P_0 = \frac{1}{N^{M-m}}. \quad (1)$$

Тогда  $m$  идентификаций содержит информацию о  $mN^{M-1}$  ситуациях. Учитывая хеммингово расстояние, определим вероятность идентификации ситуации в виде [1-3]

---

<sup>1</sup> Батищев Виталий Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой.  
Яговкин Николай Германович, кандидат технических наук, докторант.

$$P_I = \left( \frac{mN^{M-1} - N^{M-m}}{MN^{M-1} - 1} \right)^2. \quad (2)$$

Полная вероятность идентификации ситуации будет равна

$$P(m) = [1 - (1 - P_0)(1 - P_I)], \quad (3)$$

где  $P_0$  – оценивает возможность системы идентифицировать ситуацию по априорным данным;

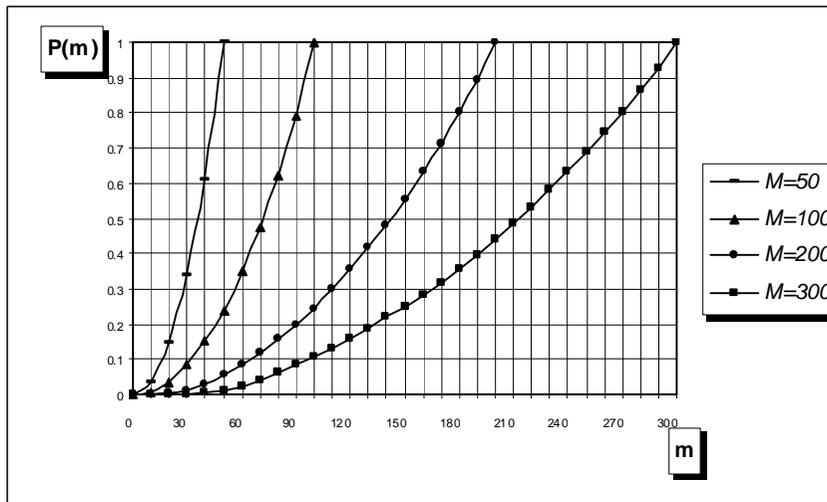
$D_I$  – оценивает способность системы идентифицировать ситуацию путем формирования описания ситуации по мере поступления информации.

После преобразований в окончательном виде вероятность идентификации ситуации вычисляется по формуле

$$P(m) = \frac{(MN^{(M-1)} - 1)^2 + (N^{(M-N)} - 1)(mN^{(M-1)} - N^{(M-m)})}{(MN^{(M-1)} - 1)^2 N^{(M-N)}}, \quad (4)$$

где  $M$  – общее количество факторов, подлежащих идентификации, или число (мощность множества) факторов, образующих множество вероятных ситуаций.

Результаты расчётов  $P(m)$  по формуле (4) приведены на рис. 1, с учетом того, что независимо от  $M$  и  $N$  для получения приемлемого уровня вероятности распознавания ( $P(m) = 0,85-0,9$ ) необходима информация о большинстве факторов (не меньше 0,9-0,95), образующих ситуацию.



Р и с. 1. Зависимость вероятности идентификации ситуации от мощности множества факторов

Достоверность принятого решения в функции количества и достоверности принятых решений по идентификации факторов определяются рекуррентной зависимостью [1-3]:

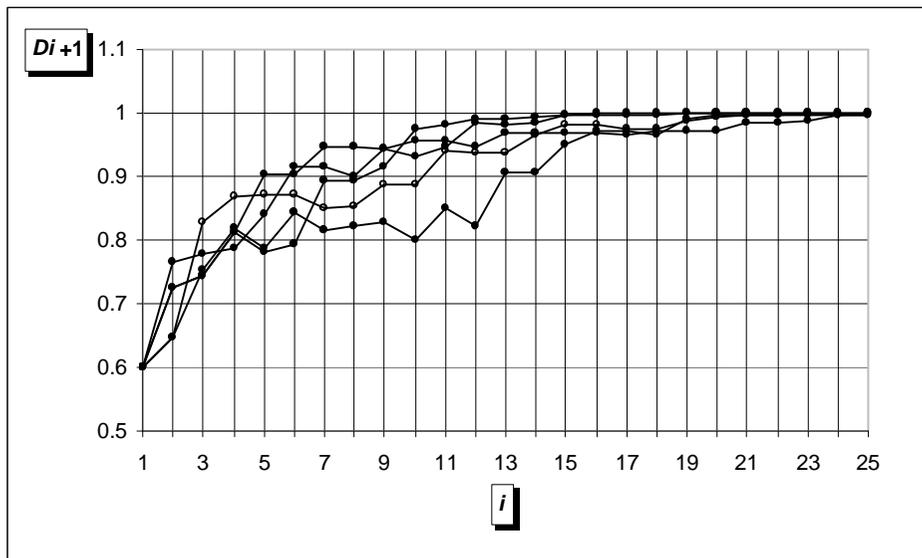
$$D_{I+1} = D_I + (1 - D_I)[d_{I+1}^2 + D_I(d_{I+1} - 1)], \quad (5)$$

где  $D_I$  – достоверность решения, принятого по  $I$  сообщениям (по информации об  $I$  факторах);

$D_{I+1}$  – достоверность решения, принятого по  $I+1$  сообщению (по информации об  $I+1$  факторах);

$d_{I+1}$  – достоверность  $(I+1)$  сообщения (входной информации об  $(I+1)$  факторе).

Результаты расчётов  $D_{I+1} = f(D_I, d_{I+1}, I)$  для различных  $d_{I+1}$  приведены на рис. 2.



Р и с. 2. Зависимость достоверности принятого решения от количества факторов

При использовании метода распознавания с учётом коэффициента корреляции состояний факторов вероятность распознавания ситуации определяется по формуле [1-3]

$$P(m) = \frac{\left[ (1+k)M \times m - k \times m^2 \right]}{M^2}, \quad (6)$$

где  $k$  – коэффициент корреляции состояний факторов.

Результаты расчётов по формуле (6) приведены на рис. 3. Использование информации о корреляционной зависимости состояний факторов позволяет на 5÷25% повысить вероятность распознавания по сравнению с графиками на рис. 2 при изменении  $k$  в интервале от 0,3 до 0,7.

При заданной требуемой вероятности распознавания ситуации  $P_3$  требуемое число вскрытых факторов (признаков ситуации) определяется формулой [1-3]

$$m_{mp} = \frac{(1+k) - \sqrt{(1+k)^2 - 4k \times P_3}}{2 \times k} \times M, \text{ при этом } 0 \leq k \leq 1, \quad (7)$$

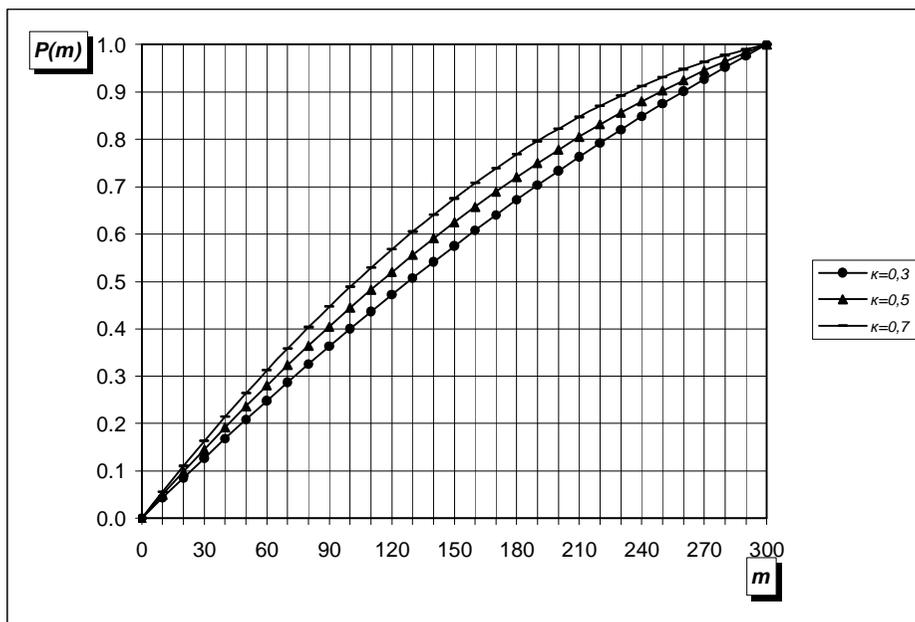
где  $P_3$  – заданная (требуемая) вероятность распознавания ситуации;

$m_{mp}$  – требуемое количество вскрытых признаков ситуации (факторов).

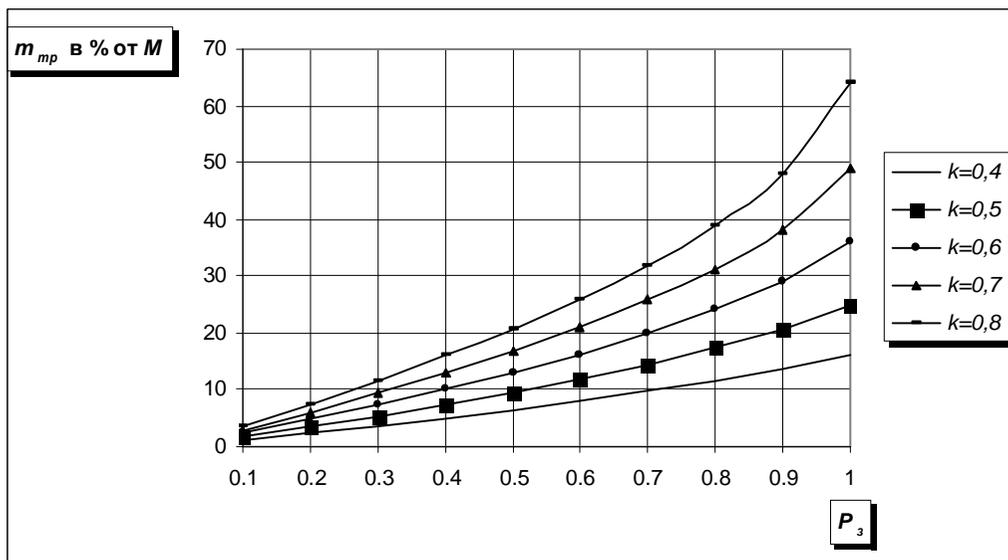
Результаты анализа зависимости  $m_{mp} = f(P_3)$  приведены на рис. 4.

Изменение ситуации во времени происходит вследствие изменения параметров (характеристик) факторов, ее образующих. Если они определены (спрогнозированы) не ниже заданного (требуемого) уровня достоверности (точности) в момент принятия

решения, то не оказывают влияния на рост погрешности прогноза во времени. В противном случае погрешность прогноза растёт соответственно количеству факторов, динамика изменения характеристик которых определена неверно.



Р и с. 3. Зависимость вероятности идентификации ситуации от коэффициента корреляции состояний факторов



Р и с. 4. Зависимость требуемого количества вскрытых признаков ситуации от заданной вероятности ее распознавания

Постоянное обновление информации о состоянии факторов ведёт к снижению погрешности прогноза во времени.

Изменение погрешности прогноза  $G^2$  во времени определяется формулой [1, 2]

$$G^2(k) = G^2(k-1) + R - R_b \times d \times p, \quad (8)$$

где  $k$  – номер интервала времени  $\Delta t$ ;

$R = \frac{m_u}{M}$  – относительное число факторов, изменивших значение за интервал времени  $\Delta t$ ;

$R_b = \frac{m_b}{M}$  – относительное число факторов, информация о которых поступила в систему обработки за интервал времени  $\Delta t$ ;

$M$  – число (мощность множества) факторов, образующих множество вероятных ситуаций;

$m_u$  – число факторов, изменивших значение за интервал времени  $\Delta t$ ;

$m_b$  – число факторов, информация о которых поступила в систему обработки за интервал времени  $\Delta t$ ;

$p$  – вероятность пересечения множеств  $\{m_u\}$  и  $\{m_b\}$ ;

$d$  – достоверность поступившей информации.

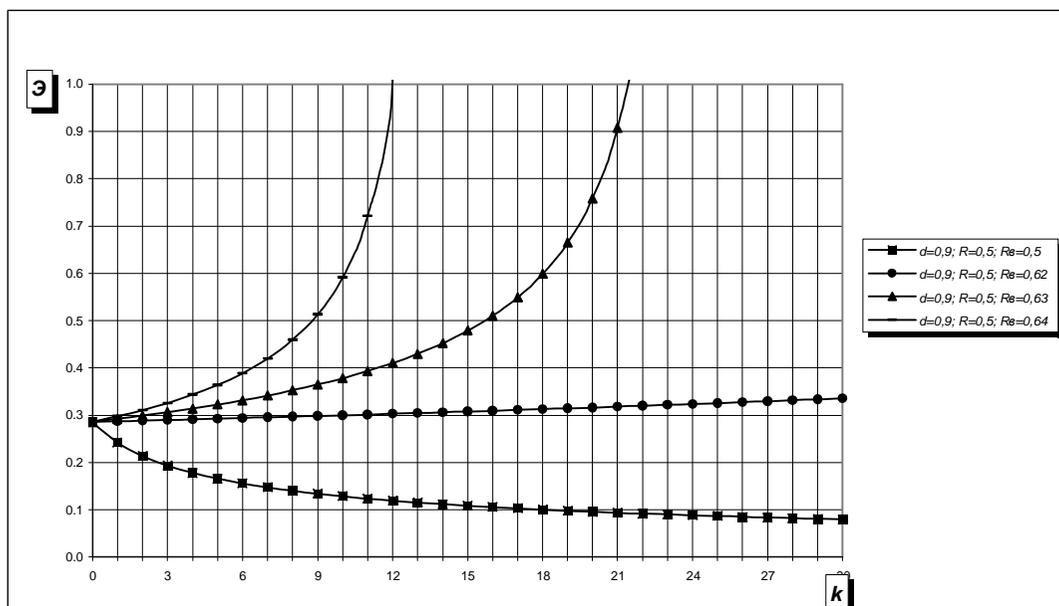
Величина погрешности прогноза на момент принятия решения ( $k=0$ ) [1, 2]

$$G^2(k=0) = 2(1-d_0) \times (1-R_0), \quad (9)$$

где  $R_0 = \frac{m_0}{M}$  – относительное число факторов, информация о которых использована

для принятия решения ( $k=0$ );

$d_0$  – достоверность принятого решения.



Р и с. 5. Зависимость эффективности от количества факторов

Эффективность функционирования системы поддержки принятия решения в течение времени оценивается выражением [1, 2]

$$\mathcal{E}(k) = \frac{G_n}{G_{(k)}}, \quad (10)$$

где  $G_n^2 = 2 \times (1 - d_{mp})(1 - R_{mp})$  – допустимая погрешность прогноза;

$d_{mp}$  – требуемая достоверность прогноза;

$R_{mp} = \frac{m_{mp}}{M}$  – относительное число вскрываемых факторов в соответствии с требованиями.

Результаты анализа зависимости  $\mathcal{E}(k) = f(k, R, R_b, d, p)$  по формуле (10) приведены на рис. 5. Анализ показал, что исходная погрешность прогноза ( $k=0$ ) убывает (эффективность увеличивается) только при  $(R_b dp)/R > 1$ .

Использование разработанной модели позволяет оценить эффективность применения систем поддержки принятия решений для стратегии развития предприятия в зависимости от качества и объема входной информации.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Костечко Н.Н., Костюков А.А., Куликов Л.С., Яговкин Н.Г. Методологические аспекты построения автоматизированных систем обработки информации. – Самара: Российская Академия наук, Самарский научный центр, 2004.
2. Захарченко А.Н. Обработка информации в комплексных системах мониторинга. – М., 2001.
3. Вентцель Е. Теория вероятности. – М.: ГИФМЛ. 1958.

*Статья поступила в редакцию 29 сентября 2008 г.*

UDC 614.8.084

## MODEL FOR THE ESTIMATION OF FORECAST RELIABILITY OF LARGE-SCALE INDUSTRIAL SYSTEM DEVELOPMENT STRATEGY

**V.I. Batishev<sup>1</sup>, N.G. Yagovkin**

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya str., Samara, 443100

*Developed model allows estimation efficiency of using support decision-making systems for formation of large-scale industrial system development strategy depending on environment characteristics*

**Key words:** *model, forecasting, industrial system, decision making*

---

<sup>1</sup> Vitaliy I. Batishev, Doctor of Technical Sciences, Professor.  
Nikolay G. Yagovkin, Candidate of Technical Sciences. Doctoral candidate.

## ПОРТАЛЬНЫЙ МАНИПУЛЯТОР С ПОДВЕСНОЙ ТРАВЕРСОЙ КАК ОБЪЕКТ УПРАВЛЕНИЯ

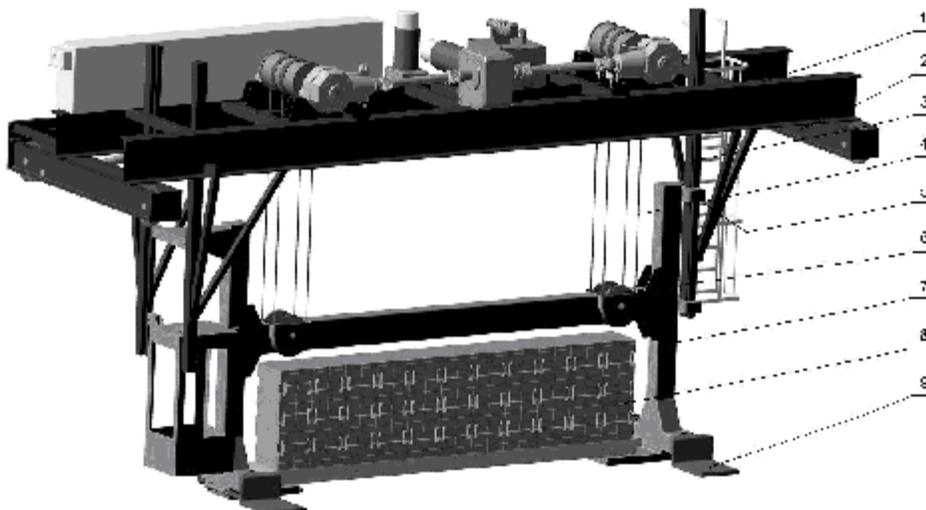
*О.И. Блинчиков<sup>1</sup>, С.Я. Галицков*

<sup>1</sup> Самарский государственный архитектурно-строительный университет  
443001, Самара, ул. Молодогвардейская, 194

*На основании принятых допущений разрабатывается расчетная схема манипулятора в виде двух связанных маятников с учетом ограничений на амплитуду колебаний траверсы, обусловленных конструкцией. В основе предлагаемой математической модели лежит использование уравнений Лагранжа в обобщенных координатах. В синтезированной структуре объекта в наглядной форме отражены взаимосвязи механической части, двигателя и передаточных механизмов, выделены выходные координаты, управляющее и возмущающие воздействия.*

**Ключевые слова:** *портальный манипулятор, объект управления, уравнения движения, уравнения Лагранжа, структурная схема*

**Введение.** На предприятиях строительной индустрии, в частности на технологических участках автоклавирования при производстве ячеистого бетона используются портальные манипуляторы большой грузоподъемности с подвесной траверсой. Управление их движением осложнено ярко выраженными колебаниями рабочего органа, обусловленными особенностями конструкции. В связи с этим при построении на его основе промышленного робота возникает необходимость математического описания манипулятора как объекта управления.



Р и с. 1. Конструкция манипулятора

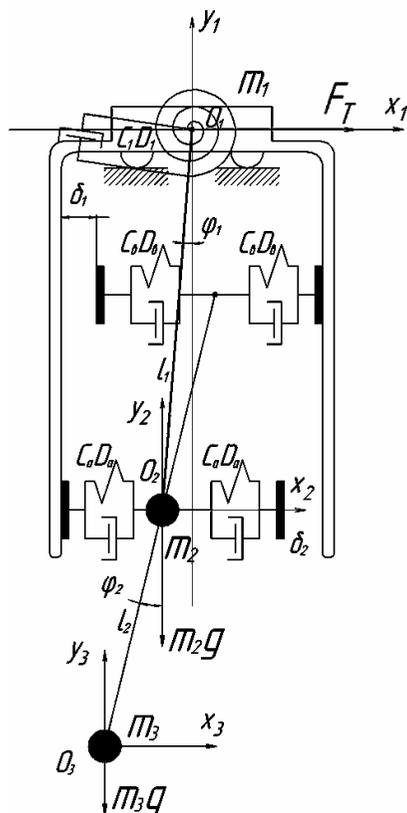
---

*Блинчиков Олег Игоревич, аспирант,  
e-mail: [o.i.blinchikov@mail.ru](mailto:o.i.blinchikov@mail.ru)*

*Галицков Станислав Яковлевич, доктор технических наук, профессор.*

**Конструкция манипулятора.** Портальный манипулятор состоит из двух тележек 2 (рис. 1), колеса которых движутся по рельсовому пути (на рисунке не показан), и двухбалочного моста 1, на котором симметрично смонтированы две лебедки; к барабанам лебедок тросами 4 подвешена Н-образная траверса 7 посредством блоков 6. Манипулятор имеет две электромеханические степени подвижности: подъем-опускание траверсы и перемещение моста. В нижних частях вертикальных стоек траверсы смонтированы гидравлические поворотные и выдвижные схваты 9, на которые опирается массивный груз 8. Для ограничения амплитуды колебания траверсы в конструкции предусмотрена система вертикальных направляющих 3 и ограничителей 5, жестко связанных с вертикальными стойками. Ограничители расположены вверху стойки (сечение а) и на уровне осевой линии (сечение б) поперечины.

**Определение объекта управления.** Под объектом управления будем понимать совокупность моста крана с траверсой и двигателя, который через редуктор, карданные валы и зубчатые колеса осуществляет линейное перемещение крана по зубчатым рейкам, смонтированным на несущих путях. С методической точки зрения в объекте целесообразно выделить две части: механическую (в нее входит исполнительный механизм манипулятора) и электромеханическую (она включает в себя двигатель и передаточные механизмы). Они образуют замкнутую динамическую систему с отрицательными обратными связями по противо-ЭДС и динамическому моменту двигателя.



Р и с. 2. Модель манипулятора в виде связанных маятников

За выходные координаты, определяющие состояние объекта, принимаем линейные положения моста и рабочего органа по оси движения крана. Управляющим воздействием при использовании двигателя постоянного тока является напряжение якоря  $U_{я}$ , а в случае асинхронного двигателя – частота  $\omega_1$  питающего напряжения. Основные возмущающие воздействия – сила  $F_T$  трения колес крана и переменное значение массы  $m_3$  груза.

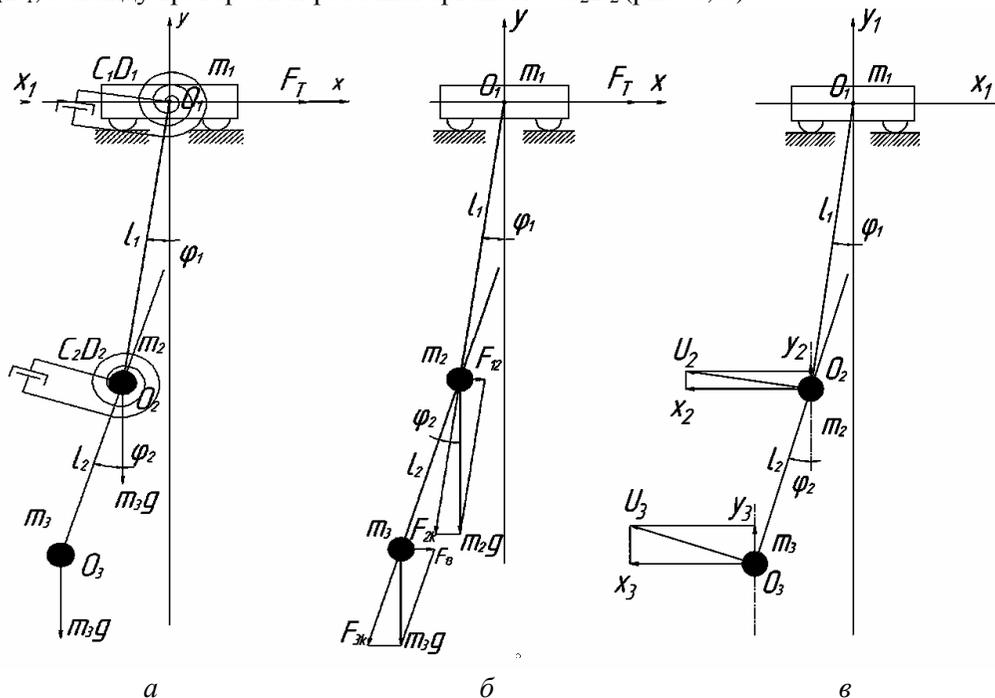
**Основные допущения. Расчетная схема.** Мост, траверса и крупногабаритный груз представляют собой конструкции с распределенными массами. Считаем, что движение систем робота выполняется раздельно, последовательно: при движении моста привод подъема траверсы не работает. Поэтому пренебрегаем динамикой деформации тросов, изгибными колебаниями моста и траверсы. Кроме того, учитывая достаточно высокие значения жесткостей конструктивных элементов

манипулятора, можно допустить, что в полосе пропускания системы управления мостом будет проявляться только первая составляющая спектра колебаний объекта с распределенными параметрами. Это позволяет перейти от распределенных к сосре-

доточенным массам  $m_1$ ,  $m_2$ , и  $m_3$  моста, траверсы и рабочего органа, расположенным в соответствующих центрах масс.

Для описания динамики робота введем в рассмотрение базовую систему координат  $O_1X_1Y_1Z_1$  и системы координат  $O_2X_2Y_2Z_2$ ,  $O_3X_3Y_3Z_3$  [1]. Конструкция блоков б и барабанных лебедок позволяет траверсе и рабочему органу совершать под действием силы  $F_T$  угловые колебания в плоскостях  $O_1X_1Y_1$  и  $O_2X_2Y_2$  вокруг осей  $O_1$  и  $O_2$ . При этом угловыми колебаниями в плоскостях  $O_1Y_1Z_1$  и  $O_2Y_2Z_2$ , можно пренебречь. Принимаем, что барабаны подъемных лебедок траверсы вращаются синхронно, а деформации тросов идентичны. Тогда и в статическом, и в динамическом режимах оси  $O_1X_1$ ,  $O_2X_2$  и  $O_3X_3$  остаются параллельными.

На основании принятых допущений представим траверсу и груз (рис. 2) в виде связанных маятников [2]. Первым маятником моделируем подвеску траверсы к мосту с помощью несущих тросов. Считая, что центр масс траверсы расположен на оси ее поперечины, можно принять, что  $l_1=O_1O_2$ . Вторым маятником моделируем крепление траверсы к блокам тросовой подвески,  $l_2=O_2O_3$ . Верхние и нижние упоры ограничителей крепятся к подъемной траверсе на расстоянии  $l_3=QO_2$ . Представим левые и правые упоры траверсы в виде упруго-диссипативных звеньев  $C_aD_a$  и  $C_bD_b$  с зазорами  $d_1$  и  $d_2$ , величины которых равны между собой и определяются конструкцией крана. Жесткости и демпфирующие факторы механической связи между тележкой и траверсой учтем в расчетной схеме (см. рис. 2) упруго-диссипативным звеном  $C_1D_1$ , а между траверсой и рабочим органом –  $C_2D_2$  (рис. 3, а).



Р и с. 3. Расчетные схемы манипулятора: а – обобщенные координаты, б – обобщенные силы, в – определение коэффициентов жесткости  $C_1$ ,  $C_2$

**Уравнения движения.** Наиболее общей формой описания динамики системы (см. рис. 2) являются уравнения Лагранжа в обобщенных координатах, которые для механической системы с  $r$  степенями свободы имеют вид [3]

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\delta T}{\delta q'_r} \right) - \frac{\delta T}{\delta q_r} = Q_r - \frac{\delta U}{\delta q_r} - \frac{\delta D}{\delta q'_r}, \quad (1)$$

здесь число уравнений (1) равно числу обобщенных координат, в рассматриваемой задаче это –  $x_1$ ,  $j_1$  и  $j_2$  (рис. 3, а);  $T$  – запас кинетической энергии системы;  $Q_r$  – обобщенная сила,  $U$  – запас потенциальной энергии системы;  $D$  – обобщенная диссипативная энергия сопротивления.

Кинетическая энергия масс  $m_1$ ,  $m_2$  и  $m_3$ :

$$T_1 = \frac{m_1 x_1'^2}{2}, \quad T_2 = \frac{m_2 (x_1' - j_1' l_1 \cos j_1)^2}{2} + \frac{m_2 (j_1' l_1 \sin j_1)^2}{2}, \quad (2)$$

$$T_3 = \frac{m_3 (x_1' - j_1' l_1 \cos j_1 - j_2' l_2 \cos j_2)^2}{2} + \frac{m_3 (j_1' l_1 \sin j_1 + j_2' l_2 \sin j_2)^2}{2}.$$

Сумма кинетической энергии с учетом выражений (2):

$$\begin{aligned} T = & \frac{m_1 x_1'^2}{2} + \frac{m_2 x_1'^2}{2} + \frac{m_3 x_1'^2}{2} + \frac{m_2 j_1'^2 l_1^2}{2} + \frac{m_3 j_1'^2 l_1^2}{2} + \frac{m_3 j_2'^2 l_2^2}{2} + \\ & + m_2 x_1' j_1' l_1 \cos j_1 - m_3 x_1' j_1' l_1 \cos j_1 - m_3 x_1' j_2' l_2 \cos j_2 + \\ & + m_2 j_1' j_2' l_1 l_2 \cos j_1 \cos j_2 + m_3 j_1' j_2' l_1 l_2 \sin j_1 \sin j_2. \end{aligned} \quad (3)$$

Частные производные от (3) по скоростям координат  $x_1', j_1', j_2'$ :

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dT}{dx_1'} &= m_1 x_1' + m_2 x_1' + m_3 x_1' + m_2 j_1' l_1 \cos j_1 - m_3 j_1' l_1 \cos j_1 - m_3 j_2' l_2 \cos j_2, \\ \frac{dT}{dj_1'} &= m_2 j_1' l_1^2 + m_3 j_1' l_1^2 + m_2 x_1' l_1 \cos j_1 - m_3 x_1' l_1 \cos j_1 + \\ &+ m_2 l_1 l_2 j_2' \cos j_1 \cos j_2 + m_3 l_1 l_2 j_2' \sin j_1 \sin j_2, \\ \frac{dT}{dj_2'} &= m_3 j_2' l_2^2 - m_3 x_1' l_2 \cos j_2 + m_3 l_1 l_2 j_1' \cos j_1 \cos j_2 + m_3 l_1 l_2 j_1' \sin j_1 \sin j_2; \end{aligned} \right. \quad (4)$$

полные производные по времени:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d}{dt} \left( \frac{dT}{dx_1'} \right) &= (m_1 + m_2 + m_3) x_1'' + m_2 j_1'' l_1 \cos j_1 - m_2 j_1'^2 l_1 \sin j_1 - m_2 j_1'' l_1 \cos j_1 + \\ &+ m_2 j_1'^2 l_1 \sin j_1 - m_2 j_2'' l_2 \cos j_2 + m_2 j_2'^2 l_2 \sin j_2, \\ \frac{d}{dt} \left( \frac{dT}{dj_1'} \right) &= (m_2 + m_3) j_1'' l_1^2 + m_2 x_1'' l_1 \cos j_1 - m_2 x_1' j_1'' l_1 \sin j_1 - m_3 x_1'' l_1 \cos j_1 + \\ &+ m_3 x_1' j_1'' l_1 \sin j_1 - m_2 j_1' j_2'' l_1 l_2 \sin j_1 \cos j_2 + m_2 j_1'' l_1 l_2 \cos j_1 \cos j_2 - m_2 j_1'' l_1 l_2 \cos j_1 \sin j_2 + \\ &+ m_2 j_1' j_2'' l_1 l_2 \cos j_1 \sin j_2 + m_2 j_2'' l_1 l_2 \sin j_1 \sin j_2 + m_2 j_2'' l_1 l_2 \sin j_1 \cos j_2, \\ \frac{d}{dt} \left( \frac{dT}{dj_2'} \right) &= m_3 j_2'' l_2^2 - m_3 x_1'' l_2 \cos j_2 + m_3 x_1' j_2'' l_2 \sin j_2 + m_3 j_1'' l_1 l_2 \cos j_1 \cos j_2 + \\ &- m_3 j_1'' l_1 l_2 \sin j_1 \cos j_2 - m_3 j_1' j_2'' l_1 l_2 \cos j_1 \sin j_2 + m_3 j_1'' l_1 l_2 \sin j_1 \sin j_2 + \\ &+ m_3 j_1'' l_1 l_2 \cos j_1 \sin j_2 + m_3 j_2'' l_1 l_2 \sin j_1 \cos j_2. \end{aligned} \right. \quad (5)$$

Частные производные (3) по обобщенным координатам  $x_1, j_1, j_2$ :

$$\begin{cases} \frac{dT}{dx_1} = 0, & \frac{dT}{dj_1} = -m_2 x_1' l_1 j_1' \sin j_1 + m_3 x_1' l_1 j_1' \sin j_1 - m_3 j_2' \sin j_1 \cos j_2 + \\ & + m_3 j_2' l_1 l_2 \cos j_1 \sin j_2, \\ \frac{dT}{dj_2} = m_3 x_1' l_2 j_2' \sin j_2 - m_3 j_2' l_1 l_2 \cos j_1 \sin j_2 + m_3 j_2' l_1 l_2 \sin j_1 \cos j_2. \end{cases} \quad (6)$$

Используя уравнения (5) и (6), образуем левые части уравнений (1):

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left( \frac{dT}{dx_1'} \right) - \frac{dT}{dx_1} = (m_1 + m_2 + m_3) x_1'' + (m_2 - m_3) j_1'' l_1 \cos j_1 + \\ + (m_3 - m_2) j_1'' l_1 \sin j_1 - m_3 j_2'' l_2 \cos j_2 + m_3 j_2'' l_2 \sin j_2, \\ \frac{d}{dt} \left( \frac{dT}{dj_1'} \right) - \frac{dT}{dj_1} = (m_2 + m_3) j_1'' l_1^2 + (m_2 - m_3) x_1'' l_1 \cos j_1 + \\ + m_3 j_2'' l_1 l_2 (\cos j_1 \cos j_2 - \cos j_1 \sin j_2 + \sin j_1 \sin j_2 + \sin j_1 \cos j_2), \\ \frac{d}{dt} \left( \frac{dT}{dj_2'} \right) - \frac{dT}{dj_2} = m_3 j_2'' l_2^2 - m_3 x_1'' l_2 \cos j_2 + \\ + m_3 j_1'' l_1 l_2 (\cos j_1 \cos j_2 - \sin j_1 \cos j_2 + \sin j_1 \sin j_2 + \cos j_1 \sin j_2). \end{cases} \quad (7)$$

Правыми частями (1) являются обобщенные силы (рис. 3, б). Для координаты  $X_1$  это – равнодействующая сила тяги  $F_T$  и возникающая при этом сила трения  $F_{тр}$ :

$$Q = F_T - |F_{TP}| \operatorname{sign} x_1', \quad (8)$$

на сосредоточенные массы  $m_2$  и  $m_3$  действуют силы тяжести и упруго-диссипативные силы, обусловленные элементами  $C_1 D_1$ ,  $C_2 D_2$ . Потенциальная энергия  $U$  двухмаятниковой системы состоит из энергии сил тяжести  $U_{m_2}$ ,  $U_{m_3}$  и энергии  $U_{c_1}$ ,  $U_{c_2}$  крутильных деформаций:

$$U = U_{m_2} + U_{m_3} + U_{c_1} + U_{c_2}. \quad (9)$$

В соответствии с рис. 3, б составляющие потенциальной энергии:

$$\begin{aligned} U_{m_2} &= m_2 g l_1 (1 - \cos j_1), & U_{m_3} &= m_3 g l_1 (1 - \cos j_1) + m_3 g l_2 (1 - \cos j_2), \\ U_{c_1} &= \frac{C_1 j_1^2}{2}, & U_{c_2} &= \frac{C_2 (j_2 - j_1)^2}{2}, \end{aligned} \quad (10)$$

Здесь для определения значений  $C_1, C_2$  использован подход [4]. В соответствии с ним

$$C_1 = (m_2 + m_3) g l_1, \quad C_2 = m_3 g l_2, \quad (11)$$

Подставим (10) в выражение (9), получим:

$$U = m_2 g l_1 (1 - \cos j_1) + m_3 g l_1 (1 - \cos j_1) + m_3 g l_2 (1 - \cos j_2) + \frac{C_1 j_1^2}{2} + \frac{C_2 (j_2 - j_1)^2}{2}. \quad (12)$$

Теперь обобщенные силы:

$$\begin{cases} \frac{dU}{dx_1} = 0, & \frac{dU}{dj_1} = m_2gl_1 \sin j_1 + m_3gl_1 \sin j_1 + C_1j_1 + C_2(j_2 - j_1), \\ \frac{dU}{dj_2} = m_3gl_2 \sin j_2 + C_2(j_2 - j_1). \end{cases} \quad (13)$$

Учтем влияние сил вязкого трения. Будем полагать, что они пропорциональны скорости колебаний [5]. Диссипативные функции Релея  $D_{d1}$  и  $D_{d2}$  для первого и второго маятников:

$$D_{d1} = \frac{D_1 j_1'^2}{2}, \quad D_{d2} = \frac{D_2 (j_2' - j_1')^2}{2}, \quad (14)$$

тогда

$$D = D_{d1} + D_{d2} = \frac{D_1 j_1'^2}{2} + \frac{D_2 (j_2' - j_1')^2}{2}, \quad (15)$$

где  $D_1$  и  $D_2$ , определяются выражениями [3]:

$$D_1 = \frac{\Psi}{2p} \sqrt{C_{эк1} J_2}, \quad D_2 = \frac{\Psi}{2p} \sqrt{C_{эк2} J_3}, \quad (16)$$

здесь  $\Psi$  – коэффициент относительного рассеяния энергии, для стального троса  $\Psi = 0.6 \dots 1.2$  [3];  $J_2, J_3$  – момент инерции груза, приведенные к осям действия  $D_1$  и  $D_2$ ,  $J_2 = m_2 l_1^2 + m_3 (l_1 + l_2)^2$ ,  $J_3 = m_3 l_3^2$ .

Составляющие обобщенных диссипативных сил:

$$\frac{dD}{dx_1'} = 0, \quad \frac{dD}{dj_1'} = D_1 j_1' + D_2 (j_2' - j_1'), \quad \frac{dD}{dj_2'} = D_2 (j_2' - j_1'). \quad (17)$$

Влияние упоров начинает проявляться при условиях

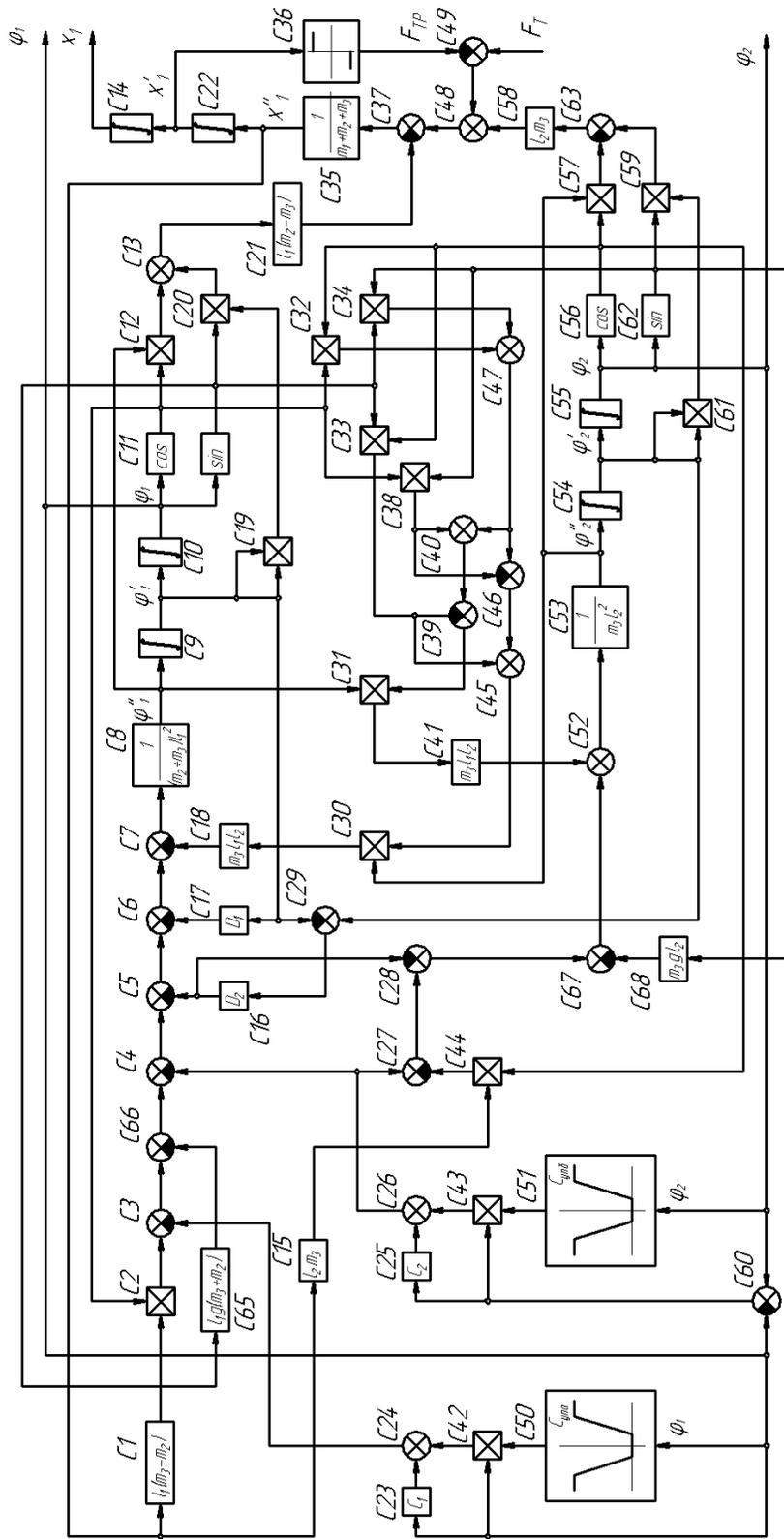
$$j_1 \geq \arcsin \frac{d_1}{l_1}, \quad j_2 \geq \arcsin \frac{d_2}{l_2}. \quad (18)$$

Это отразим в модели дополнительными составляющими  $C_{упа}$ ,  $C_{упб}$  (они учитывают упругие свойства упоров и ограничителей в сечениях «а» и «б») к  $C_1, C_2$ . Поэтому эквивалентная жесткость в сечениях «а» и «б»:

$$C_{эква} = \begin{cases} C_1, & \text{если } l_1 \sin j_1 < d_1 \\ C_1 + C_{упа}, & \text{если } l_1 \sin j_1 \geq d_1 \end{cases} \quad C_{экуб} = \begin{cases} C_2, & \text{если } l_3 \sin j_2 < d_2 \\ C_2 + C_{упб}, & \text{если } l_3 \sin j_2 \geq d_2 \end{cases} \quad (19)$$

Теперь уравнения Лагранжа (1), описывающие динамику механической конструкции манипулятора, можно представить в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} (m_1 + m_2 + m_3) x_1'' + (m_2 - m_3) j_1'' l_1 \cos j_1 + (m_3 - m_2) j_1'^2 l_1 \sin j_1 - m_3 j_2'' l_2 \cos j_2 + m_3 j_2'^2 l_2 \sin j_2 = \\ = F_T - |F_{TP}| \operatorname{sign} x_1', \\ (m_2 + m_3) j_1'' l_1^2 + (m_2 - m_3) x_1'' l_1 \cos j_1 + m_3 j_2'' l_1 l_2 (\cos j_1 \cos j_2 - \cos j_1 \sin j_2 + \sin j_1 \sin j_2 + \\ + \sin j_1 \cos j_2) = -(m_2 + m_3) gl_1 \sin j_1 - C_1 j_1 - C_2 (j_2 - j_1) - D_1 j_1' - D_2 (j_2' - j_1'), \\ m_3 j_2'' l_2^2 - m_3 x_1'' l_2 \cos j_2 + m_3 j_1'' l_1 l_2 (\cos j_1 \cos j_2 - \sin j_1 \cos j_2 + \sin j_1 \sin j_2 + \cos j_1 \sin j_2) = \\ = -m_3 gl_2 \sin j_2 + C_2 (j_2 - j_1) - D_2 (j_2' - j_1'), \\ C_{эква} = \begin{cases} C_1 & \text{если } l_1 \sin j_1 < d_1 \\ C_1 + C_{упа} & \text{если } l_1 \sin j_1 \geq d_1 \end{cases} \quad C_{экуб} = \begin{cases} C_2 & \text{если } l_3 \sin j_2 < d_2 \\ C_2 + C_{упб} & \text{если } l_3 \sin j_2 \geq d_2. \end{cases} \end{array} \right. \quad (20)$$



Р и с. 4. Структурная схема механической части объекта управления



## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бурдаков С.Ф. и др. Проектирование манипуляторов промышленных роботов и роботизированных комплексов. – М.: Высшая школа, 1986. – 234 с.
2. Яковенко Г.Н. Краткий курс аналитической динамики. – М.: Бином, 2004. – 238 с.
3. Бидерман В.А. Прикладная теория механических колебаний. – М.: Высшая школа, 1972. – 416 с.
4. Чиликин М.Г. Теория автоматизированного электропривода. – М.: Энергия, 1979. – 616 с.
5. Зерцалов А.И. Краны с жестким подвесом груза. – М.: Машиностроение, 1979. – 192 с.
6. Галицков С.Я., Галицков К.С., Масляницын А.П. Математическое моделирование промышленных объектов управления. – Самара: СГАСУ, 2004. – 152 с.

*Статья поступила в редакцию 10 июля 2008 г.*

UDC 62.52

## **PORTABLE MANIPULATOR WITH SUSPENDED TRAVERSE BEAM AS AN OBJECT OF CONTROL**

***O.I. Blinchikov<sup>1</sup>, S.Y. Galitskov***

Samara State University of Architecture and Construction  
194, Molodogvardeyskaya str., Samara, 443001

*The design model of the manipulator is developed on the basis of accepted assumptions in the form of two coupled pendulums taking into account limitation of traverse beam vibration amplitude resulting from the structure. The principle of the proposed mathematical model is a Lagrange equation with generalized coordinates. In the synthesized structure of the object the interconnections of hardware, motor and transmission devices are clearly represented; output coordinates, control and perturbation actions are pointed.*

***Key words:*** portable manipulator, control object, Lagrange equation, structure chart

---

<sup>1</sup> *Oleg I. Blinchikov, Postgraduate student.  
Stanislav Y. Galitskov, Doctor of Technical Sciences, professor.*

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЦИИ ПЕРСОНАЛЬНЫХ И ГРУППОВЫХ ЗНАНИЙ

**В.А. Виттих<sup>1</sup>**

Институт проблем управления сложными системами РАН  
443020, Самара, ул. Садовая, 61

*Совершенствование управления на основе интеграции персональных и групповых знаний в процессах принятия решений – чрезвычайно значимый резерв социально-экономического развития, использующий личностные ресурсы людей. В условиях неопределённости в результате локальных взаимодействий людей, каждый из которых обладает своей собственной системой персональных знаний, вырабатываются групповые знания, предназначенные для регулирования отношений между ними на различных уровнях – семьи, производственной группы, предприятия, муниципалитета, региона и страны в целом. Эти знания (экономические, юридические, аксиологические), являясь общедоступными, используются тем не менее сугубо индивидуально членами сообщества с учетом особенностей «местных условий» и специфики их персональных знаний. Решения, таким образом, принимаются там, где всё известно о текущих изменениях и о ресурсах, имеющихся «под рукой», а делают это те, кто взял на себя ответственность за последствия принятых решений.*

**Ключевые слова:** управление, самоорганизация, экономика знаний, персональные знания, групповые знания, интеграция знаний

### Введение

Макс Вебер в своей «идеальной бюрократии» стремился уподобить систему управления машине, элементами которой являются люди, беспрекословно исполняющие приказы и инструкции высших эшелонов власти, – своеобразные «винтики» бюрократического механизма. Однако игнорирование личных качеств и творческих возможностей людей приводит на практике к снижению эффективности и появлению сбоев в системах управления. Поэтому как первая реакция на представления классической бюрократической школы, проповедующей сугубо механистический и обезличенный подход к управлению, в начале 30-х годов прошлого столетия была предложена бихевиористская модель, которая рассматривала человека таким, каков он есть [1]. В ней принимались в расчет человеческие взаимоотношения в организации, расширялся круг сотрудников, участвующих в выработке и принятии решений, придавалось значение их взаимному доверию и увеличению ответственности. При этом изменялась и роль руководителя, который рассматривался скорее как посредник между сотрудниками и группами сотрудников, чем представитель высшей власти [2]. А предложенная Р. Лайкертом в 60-е годы «система взаимодействия и влияния» была построена на принципе взаимозависимости мотивов и организационных

---

<sup>1</sup> Виттих Владимир Андреевич, доктор технических наук, профессор, директор института.  
e-mail: [vittikh@iccs.ru](mailto:vittikh@iccs.ru)

процессов, образующих общую систему, которая координировала, интегрировала и направляла деятельность как организации, так и всех её членов [3].

В энциклопедическом справочнике «Современное управление» [4], в котором отражены изменения и достижения в области управления, характерные для середины 90-х годов, а также тенденции развития менеджмента в преддверии XXI века, говорится о приближающемся «закате бюрократии» и о преобладании антибюрократических стилей поведения. Поощряются личные контакты между сотрудниками различных подразделений организации, отмечается тенденция к децентрализации принятия решений, на передний план выдвигается развитие самоуправления. В монографии Д. Осборна и П. Пластрика [5] речь идёт уже об «управлении без бюрократов» в государственном секторе, а в работе [6] острой критике подвергается система менеджмента, основанная на бюрократических принципах, и в этом контексте прогнозируется «конец менеджмента и становление организационной демократии».

В сфере государственного управления именно человек, а не обезличенные «народные массы», ставится в центр внимания органов власти, а принцип «человек существует для государства» заменяется на противоположный – «государство для человека». Соответственно, возрастает значение, придаваемое обеспечению политической включённости человека в диалог с властью, предполагающей такой процесс принятия решений, определяющих общественную жизнь, в котором граждане имеют возможность участвовать. Граждане становятся не бесправными «объектами управления», а выступают в роли партнёров государства, участвуя в формировании публичной этики – концентрированном выражении основных ценностей общества, поскольку «развитое общество способно воспринимать только те ценности, которое выработало само» [7]. Построение гражданского общества связывается с тем, что общественность и отдельные граждане начинают выступать с законодательными инициативами, реализующими в нормативных актах выработанные ценности.

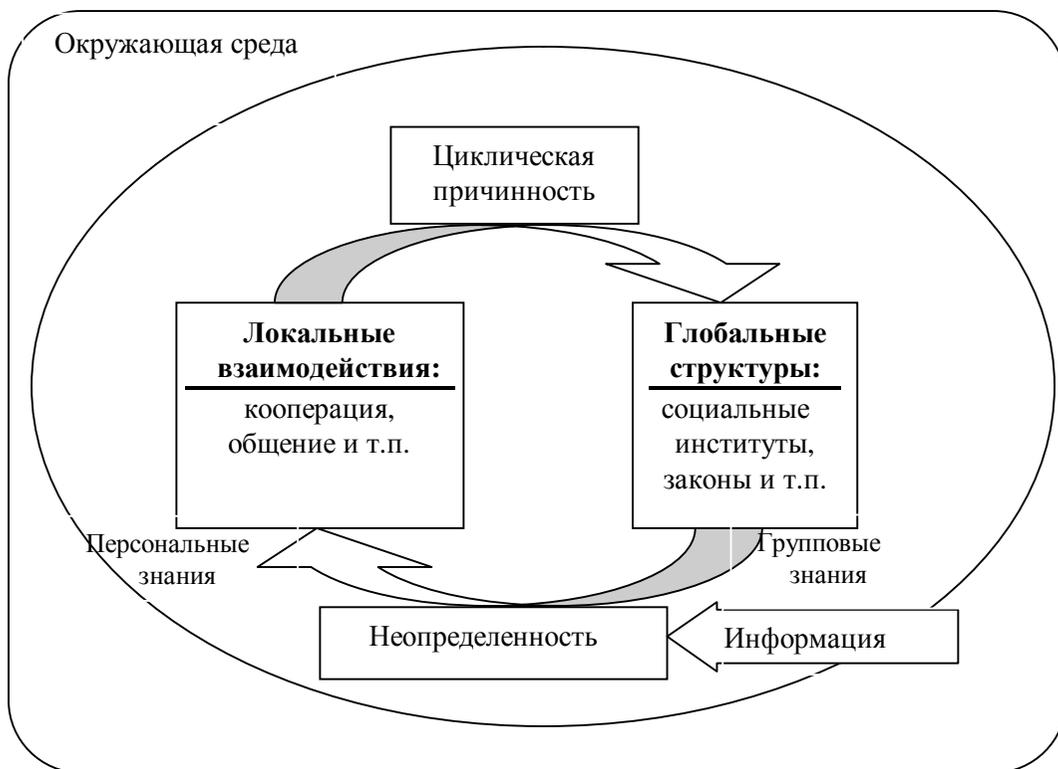
Таким образом, в конце XX – начале XXI века возникла потребность в совершенствовании управления, т.е. в переходе от систем, построенных на принципах идеальной бюрократии, в которых принятие решений является исключительной прерогативой высших эшелонов власти, к системам управления, использующим с этой целью в значительной степени *личностные ресурсы* рядовых сотрудников организаций и государственных служащих, отдельных граждан и институтов гражданского общества. Одновременно, как это отмечается в [6], «возникает и новая концепция власти, основанной на сотрудничестве и разумности, которая заменяет собой модель, базирующуюся на принуждении и угрозе».

Неутихающие дискуссии о том, какова должна быть степень проникновения демократических институтов в системы государственного и корпоративного управления, приводят к необходимости поиска адекватного теоретического фундамента, методов и средств подготовки и принятия решений в новых условиях. В данной статье излагается точка зрения, в соответствии с которой *совершенствование управления связывается с пониманием фундаментальной роли процессов самоорганизации в социуме* [8, 9] и *необходимости интеграции персональных и групповых знаний* [10].

### **Модель социальной самоорганизации**

На рисунке представлена модель социальной самоорганизации [8, 11].

Неопределенность в социуме, связанная, прежде всего, с непредсказуемостью индивидуального и группового поведения людей, побуждает их вступать во взаимодействие на локальном уровне с тем, чтобы снизить степень этой неопределённости. С этой целью создаются разнообразные *глобальные структуры* (социальные институты, органы власти и т.п.) и вырабатываются *правила* (законы, нормативные документы и т.п.), *регулирующие отношения людей на локальном уровне*. Возникает так называемая *циклическая причинность*: локальные взаимодействия порождают глобальные структуры, которые, в свою очередь, воздействуют на локальный уровень, снижая (в какой-то степени) неопределённость в социуме. Если по какой-то причине неопределённость снова возрастает, формируются новые правила. Циклическая причинность и составляет основу социальной *самоорганизации*, понимаемой как возникновение социального порядка из локальных взаимодействий.



*Динамическое равновесие* в социальных системах представляет собой взаимное воспроизводство локальных взаимодействий и глобальных структур на некотором уровне неопределённости. Флуктуации во внутренней динамике и возмущения окружающей среды постоянно «проверяют» такое взаимное воспроизводство на стабильность. Если в случае критических воздействий какая-либо форма воспроизводства оказывается нестабильной, возникает новая форма. В этом смысле самоорганизация является гарантом приспособления к критическим изменениям среды [11]. Таким образом, динамическое равновесие предполагает переход системы в новое равновесное состояние в ответ на возмущения среды, а не возврат в первоначальное состояние. Поэтому устойчивость в социальных самоорганизующихся системах следу-

ет понимать как их устойчивое развитие, сопровождающееся сменой состояний динамического равновесия [8].

Важно понимать, что *результатом «работы» механизмов социальной самоорганизации, в конечном счете, являются знания.* Это и цены, сформировавшиеся на рынке товаров и услуг, и законодательные акты, рождённые в правовой сфере, и ценностные приоритеты, определившиеся в ходе обсуждения проблем публичной этики, и многое другое. *Все эти знания являются общими, групповыми для всех членов социума, каждый из которых тем не менее может использовать их в соответствии со своими духовными и материальными потребностями, имеющимися ресурсами, а также особенностями ситуации, в которой он оказался.*

Однако наряду с такими общедоступными групповыми знаниями каждый индивидуум имеет свою собственную *систему персональных знаний*, в которой отражаются его субъективное видение мира и уникальный жизненный опыт [10]. Используются персональные знания сугубо индивидуально, хотя при наличии механизма «взаимного наложения», допускающего возможность их совместного применения с групповыми знаниями, можно получить дополнительный выигрыш в эффективности принимаемых решений. Такая интеграция персональных и групповых знаний является важным резервом социального и экономического развития. Исторически впервые (более шестидесяти лет назад) об этом писал лауреат Нобелевской премии Ф. Хайек [12].

### **Экономика знаний**

Исходная позиция Ф. Хайека состояла в том, что «знание обстоятельств, которыми мы должны пользоваться, никогда не существует в концентрированной или интегрированной форме, но только в виде рассеянных частиц неполных и зачастую противоречивых знаний, которыми обладают все отдельные индивиды» [13]. Каким же образом решить проблему использования «рассеянного знания», которое никому не дано во всей его полноте? Ф. Хайек показал, что таким инструментом обмена знаниями является рынок, который одновременно координирует действия миллионов людей, вовлеченных в хозяйственную деятельность. Рынок, таким образом, формирует среду, где происходит процесс созидательного взаимодействия, порождающий знание, превосходящее знание каждого отдельного индивидуального участника.

В центре внимания Ф. Хайека находится знание особого рода, которое по своей природе не может охватываться статистикой и, соответственно, не может передаваться никакому центральному органу. «Если мы согласимся с тем, что экономическая *проблема общества* заключается, прежде всего, в *быстрой адаптации к изменениям конкретных обстоятельств* времени и места, из этого, по-видимому, будет следовать, что *принятие окончательных решений следует оставлять людям, знакомым с этими обстоятельствами, которым непосредственно известно о происходящих изменениях и о ресурсах, имеющихся прямо под рукой, чтобы на них реагировать.* Мы не вправе ожидать, что проблема будет решена путем предварительного сообщения всей такой информации центральному органу, который, интегрировав её, отдаёт соответствующие приказы. Мы должны решать её с помощью той или иной формы *децентрализации*» [13].

Однако «люди на местах» не могут принимать решения исключительно на основе персональных знаний. Им нужны групповые знания, чтобы «вписать свои решения в общую картину изменений более широкой экономической системы». Эта проблема решается системой цен. Ф. Хайек пишет [13], что «в системе, где знание значимых фактов распылено среди множества людей, цены могут координировать разрозненные действия различных лиц так же, как субъективные ценности помогают индивиду координировать части его плана». Таким образом, он смотрит на систему цен как на «механизм по регистрации изменений или как систему телекоммуникаций, позволяющую отдельным производителям следить только за движением нескольких указателей (подобно тому, как инженер мог бы следить за стрелками лишь нескольких датчиков), дабы приспособлять свою деятельность к изменениям, о которых они, возможно, никогда не узнают ничего сверх того, что отражается в движении цен» [13].

Традиционному представлению о конкуренции как об определенном состоянии Ф. Хайек противопоставляет понимание *конкуренции как динамического процесса*. Конкуренция трактуется им как метод открытия, *метод порождения новых знаний* [14]. Приращение знаний в ходе конкуренции достигается не только потому, что благодаря ей производители открывают новые потребности, до сих пор никем не замечавшиеся, а потребители – новые способы их удовлетворения, ранее им не известные. Вдобавок экономические агенты узнают нечто новое и о самих себе: на что они способны по сравнению со всеми остальными (насколько лучше или дешевле они могут удовлетворить чьи-то потребности). И это означает, что *всякое искусственное ограничение конкуренции сокращает объём знаний, доступных обществу*.

Таким образом, есть все основания утверждать, что Ф. Хайек явился предшественником новой экономики – *экономики знаний*, базирующейся на принципах демократизации управления, поскольку решения, зависящие от персональных знаний индивидуума, принимаются им самим или при его участии. Дело в том, что эти знания не поддаются формализации и передаче, *а для приспособления к постоянно меняющимся условиям необходимы оперативные решения*. Однако никакая оперативность не может быть достигнута, если информацию об изменениях нужно сначала передавать в некий центральный орган, где принимаются решения, а затем ждать инструкций о том, как действовать. Поэтому *система жесткого централизованного управления*, как утверждал Ф. Хайек, принципиально *неспособна востребовать огромный объём знаний*, имеющихся у индивидуальных агентов, что приводит к *её низкой результативности функционирования по сравнению с рыночной экономикой*.

## **Приобретение и использование правовых знаний**

Правовые знания, необходимые для регулирования отношений целостностей в условиях неопределённости [15], являются результатом социальной самоорганизации, модель которой рассмотрена в разделе 1 данной статьи. Если людям на основе субъективных представлений о мире, содержащихся в их персональных знаниях, не удастся урегулировать неопределённость на уровне локальных взаимодействий, они иницируют глобальные структуры (органы государственной власти) вырабатывать соответствующие групповые знания – правовые акты, которые становятся нормой, законом для всех (разумеется, в пределах «радиуса действия» нормативного документа). Тогда *каждый человек*, принимая решение в той или иной проблемной си-

туации, *должен иметь возможность оперативно* (в реальном масштабе времени) *получать относящуюся к делу* (релевантную) *информацию, содержащуюся в законодательных актах*. Поскольку эта задача принадлежит к разряду чрезвычайно трудных, хотя и разрешимых, у оппонентов часто возникает вопрос о целесообразности её постановки.

В самом деле, может быть, стоит действовать по традиционной схеме: в случае возникновения проблемы обратиться к профессиональным юристам, которые вникнув в её суть, подскажут, что можно делать с правовой точки зрения, а чего нельзя. Однако в современном динамическом мире такой подход не имеет никаких перспектив в будущем, поскольку появление даже высококвалифицированных посредников всегда приводит к дополнительным задержкам времени и снижению эффективности принимаемых решений. Иметь же персонального юриста-консультанта, работающего по узкой тематике своего заказчика, – непозволительная роскошь не только для простых граждан, но зачастую и для государственных учреждений, и для частных фирм. А речь-то идёт о «погружении в правовое поле» именно всего населения, а не отдельных государственных служащих, предпринимателей и граждан. Эта крупномасштабная задача может решаться только с применением современных информационно-коммуникационных технологий.

В Самарской области с этой целью создаются *базы правовых знаний*, относящиеся к сферам социального развития, здравоохранения, образования, культуры, ЖКХ и т.п., которые позволяют *любому пользователю в диалоге с компьютером получать ответы на интересующие его вопросы в реальном масштабе времени*. Такая возможность обеспечивается специальным образом организованным представлением и обработкой правовых знаний в компьютерах, созданием сети общественного доступа к базам правовых знаний с применением интернет-киосков (их на сегодня около 300) и использованием социального паспорта жителя Самарской области [16]. Практическое применение всего этого комплекса средств должно привести не только к возрастанию уровня правовой грамотности, но и к повышению законотворческой активности населения.

### **Индивидуальные и групповые ценности**

В процессе социальной самоорганизации формируются не только правовые знания, но и ценностные приоритеты, которые регулируют отношения между людьми и группами людей на «метаюридическом» уровне. В демократическом обществе конфликт моральных ценностей и права может стать сигналом к пересмотру правовых норм или свидетельством необходимости их корректировки [7]. Регулятивная функция ценностей в управлении в высшей степени значима, но и в не меньшей степени «размыта», поскольку приверженность тем или иным ценностям «на словах» ещё не означает, что человек будет придерживаться их «на деле». Иными словами, он может декларировать групповые ценности «для других», а руководствоваться в своих действиях отличными от них индивидуальными ценностями «для себя». Поэтому *основная проблема состоит в обеспечении прозрачности и интеграции индивидуальных и групповых ценностей*.

В бюрократических структурах, где «начальство» навязывает свою волю подчиненным, истинные мотивы поведения последних, как правило, будут скрыты, поскольку они осознают свою чисто исполнительскую функцию. Ценности – это

«слишком личные, субъективные, восприимчивые к изменениям категории, которые легко разрушаются при попытке их навязать» [6]. Свою «приверженность» групповым ценностям рядовые сотрудники организации будут декларировать, но это вовсе не означает, что они их будут придерживаться. И этот разбаланс ценностей увеличивается за счёт того, что власть, в свою очередь, имеет «латентный мотив», связанный с обеспечением своего самосохранения. В конечном счёте, вся эта непрозрачность ценностей ведёт к взаимному недоверию, непониманию и образованию «пропасти» между властью и населением.

В то же самое время ценности, разделяемые членами человеческого общества, являются его нравственным капиталом, без которого оно не может успешно развиваться. В повседневной практике «основное внимание сосредоточено на итогах, целях, тактических задачах и ориентирах, в то время как этическому значению и ценностному подтексту этих целей и средств их достижения уделяется несравнимо меньшее внимание» [6]. Поэтому необходим новый подход к организации управления, создающий условия, при которых человек со своими индивидуальными интересами начинает ощущать потребность их согласования с групповыми ценностями [17].

Например, как отмечается в [18], собственники бразильской компании Natura говорят, что капитал для них не главное. На первом месте ценности, которых они придерживаются. И сотрудник либо разделяет эти ценности, либо нет. Если разделяет – ему там комфортно. Его не интересуют сверхбольшие заработки, а интересуется атмосфера, комфорт, нормальная жизнь в компании. В Natura детские сады расположены прямо на территории предприятия. Мать, которая приносит туда грудного ребёнка, имеет право сходить и покормить его тогда, когда считает нужным. Если нет места в этом садике, компания оплачивает любой другой садик. В целом атмосфера в компании скорее напоминает атмосферу университета. Тем не менее при такой «ненапряженной» работе компания успешно конкурирует на рынке в Латинской Америке, открыла продажи в Париже, собирается выходить на североамериканский и российский рынок. Natura – новый тип предприятия с демократической формой управления, в котором гуманитарные ценности и социальное развитие в сравнении с максимизацией прибыли выступают на передний план. Необходимо «создать в глобальном масштабе такие новые формы экономической организации, которые были бы одновременно основаны на ценностях и на производственной эффективности» [6].

## **Заключение**

Совершенствование управления на основе интеграции персональных и групповых знаний в процессах принятия решений – чрезвычайно значимый *резерв социально-экономического развития, использующий личностные ресурсы людей*. В условиях неопределённости в результате локальных взаимодействий людей, каждый из которых обладает своей собственной системой персональных знаний, вырабатываются групповые знания, предназначенные для регулирования отношений между ними на различных уровнях – семьи, производственной группы, предприятия, муниципалитета, региона и страны в целом. Эти знания (экономические, юридические, аксиологические), являясь общедоступными, используются, тем не менее, сугубо индивидуально членами сообщества с учетом особенностей «местных условий» и спе-

цифики их персональных знаний. Решения, таким образом, принимаются там, где всё известно о текущих изменениях и о ресурсах, имеющих «под рукой», а делают это те, кто взял на себя ответственность за последствия принятых решений. Только такой подход к организации процессов управления обеспечивает свободу выбора лицам, принимающим решения, – какие действия им целесообразно предпринять в сложившейся проблемной ситуации, опираясь как на персональные, так и на групповые знания и ценности. И, наконец, как отмечается в [18], «чтобы истинная пирамида ценностей индивида и окружающая его экономическая среда не противоречили друг другу, место капитала в новой экономике (экономике знаний) должен занять человеческий свободный дух».

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Джонсон Р., Каст Ф., Розенцвейг Д. Системы и руководство (теория систем и руководство системами). – М.: Советское радио, 1971.
2. Shepard H. Superiors and Subordinates in Research // Journal of Business. – 1956. – October.
3. Likert R. New Patterns of Management // McGraw – Hill Book Company. – New York, 1961.
4. Современное управление (энциклопедический справочник). Т.1, 2. – М.: Издатцентр, 1997.
5. Осборн Д., Пластрик П. Управление без бюрократов: пять стратегий обновления государства. – М.: ОАО «Прогресс», 2001.
6. Клок К., Голдсмит Дж. Конец менеджмента и становление организационной демократии. – СПб.: Питер, 2004.
7. Медушевский А.Н. О трёх уровнях социальной деятельности // Проблемы современного государственного управления в России: Матер. науч. семинара. – Вып. №1. – М.: Научный эксперт, 2006. – С. 179-183.
8. Виттих В.А. Целостность сложных систем // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды IV междунар. конф. – Самара: Самар. науч. центр РАН, 2002. – С.48-58.
9. Виттих В.А. Самоорганизация в процессах принятия решений // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды VIII междунар. конф. – Самара: Самар. науч. центр РАН, 2006. – С. 17-22.
10. Виттих В.А. Персонализация знаний // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды VIII междунар. конф. – Самара: Самар. науч. центр РАН, 2007. – С.441-446.
11. Küppers G. Self-organization – The Emergence of Order. From local interactions to global structures // [http://www.uni-bielefeld.de/iwt/sein/paper no 2.pdf](http://www.uni-bielefeld.de/iwt/sein/paper%20no%202.pdf), July 1999.
12. Hayek F.A. The use of knowledge in society // American Economic Review, vol. XXXV. – 1945.– №4. – September. – P. 519-530.
13. Хайек Ф.А. Индивидуализм и экономический порядок. – М.: Изограф, 2001.
14. Хайек Ф.А. Конкуренция как процедура открытия // Мировая экономика и международные отношения. – 1989. – №12.
15. Виттих В.А. Управление как регулирование отношений целостностей // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды X междунар. конф. – Самара: Самар. науч. центр РАН, 2008. – С. 34-40.
16. Виттих В.А., Волхонцев Д.В., Гриценко Е.А., Светкина Г.Д., Скобелев П.О., Сурнин О.Л., Шамашов М.А. Основные результаты разработки первой очереди системы управления регионом с применением мультиагентных технологий и их внедрение в Самарской области // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды VIII междунар. конф. – Самара: Самар. науч. центр РАН, 2006. – С. 320-329.

17. *Виттих В.А.* Аксиология принятия решений // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды IX междунар. конф. – Самара: Самар. науч. центр РАН, 2007. – С.83-87.
18. *Краснова В.* Когда демократия соберется с духом // Эксперт. – 2007. – №3. – С. 27-32.

*Статья поступила в редакцию 18 сентября 2008 г.*

UDK 658.01

## **THE IMPROVEMENT OF MANAGEMENT ON THE BASE OF PERSONAL AND GROUP KNOWLEDGE INTEGRATION**

**V.A. Vittikh<sup>1</sup>**

Institute for the Control of Complex Systems, RAS  
61, Sadovaya str., Samara, 443020

*The improvement of management on the base of personal and group knowledge integration in decision making processes is a very important reserve of social and economic development. It uses personal resources of people. In the state of uncertainty the group knowledge is developed as a result of local interactions between people each of whom has its own system of personal knowledge. This group knowledge is intended for the regulation of relations between these people on different levels – the level of a family, the level of production groups, the level of an enterprise, the municipal level, the regional level and the level of the whole country. This knowledge (economical, legal, axiological) being generally accessible is nevertheless used purely individually by the members of societies taking into consideration features of local conditions and specifics of personal knowledge. Thus, decisions are made where everything is known about current changes and about accessible resources. And they are made by those who take the responsibility for the consequences of these decisions.*

**Key words:** *management, self-organization, knowledge economics, personal knowledge, group knowledge, knowledge integration*

---

<sup>1</sup> *Vladimir A. Vittikh, Doctor of Technical Sciences, professor, Director of Institute.*

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КРИВОЙ РАЗГОНА НА ОСНОВЕ СТОХАСТИЧЕСКИХ РАЗНОСТНЫХ УРАВНЕНИЙ

**В.Е. Зотеев<sup>1</sup>**

Самарский государственный технический университет  
443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244

*Рассматривается численный метод определения параметров передаточной функции по кривой разгона объекта управления. В основе метода лежит среднеквадратичное оценивание коэффициентов стохастического разностного уравнения, описывающего результаты измерений мгновенных значений переходной характеристики объекта.*

**Ключевые слова:** передаточная функция, стохастическое разностное уравнение, параметрическая идентификация, среднеквадратичное оценивание

Важнейшей задачей при анализе и синтезе систем автоматического регулирования является параметрическая идентификация объекта управления. С этой целью применяются различные тестовые воздействия, например, импульсное или ступенчатое. В практике экспериментальных исследований для определения параметров передаточной функции объекта управления широко используется переходная характеристика или кривая разгона (реакция системы на ступенчатое воздействие) [1, 2, 3]. Известны различные способы определения параметров передаточной функции объекта по его экспериментально снятой переходной характеристике, например, графический метод [2] или метод площадей [4]. Однако эти способы имеют ряд недостатков. Во-первых, они используют детерминированные математические модели, принципиально не учитывающие случайный характер возмущений в результатах эксперимента. Во-вторых, алгоритмы вычислений громоздки, применяют графические построения, а результаты расчетов содержат методическую погрешность, которая может существенно повлиять на точность оценивания параметров передаточной функции. В-третьих, известные методы, как правило, не позволяют достоверно оценить погрешность результатов вычисления коэффициентов передаточной функции. Таким образом, используемые в практике эксперимента способы оценки параметров передаточной функции по кривой разгона не ориентированы на современный уровень развития средств вычислений и эффективное применение статистических методов обработки информации.

Устранить недостатки известных методов и тем самым существенно повысить достоверность оценок динамических характеристик системы можно на основе линейно-параметрических дискретных моделей, описывающих в форме стохастических разностных уравнений результаты измерений мгновенных значений кривой разгона технологического объекта. Метод определения параметров передаточной функции объекта управления на основе разностных уравнений состоит из двух основных этапов. Вначале с использованием статистических методов анализа [3, 5, 6] вычисляются среднеквадратичные оценки коэффициентов линейно-параметрической дискретной модели. На втором этапе по найденным коэффициентам определяются парамет-

---

<sup>1</sup> Зотеев Владимир Евгеньевич, кандидат физико-математических наук, доцент.  
e-mail: [zoteev@pm.samgtu.ru](mailto:zoteev@pm.samgtu.ru)

ры кривой разгона и коэффициенты передаточной функции объекта, а также проводится оценка погрешности результатов вычислений.

Алгоритм метода, в основе которого лежат стохастические разностные уравнения, рассмотрим на примере определения параметров передаточной функции котельного агрегата [4]. В табл. 1 приведены результаты измерений  $y_k$ ,  $k = \overline{0, 26}$ , изменения давления пара за переходной зоной прямооточного котла высокого давления (в относительных к  $\Delta p_{\max} = 5 \text{ ата}$  единицах), обусловленного ступенчатым возмущением топлива (газа) на величину  $7000 \frac{\text{м}^3}{\text{час}}$ .

Таблица 1

**Экспериментальные данные изменения давления пара (в относительных единицах) за переходной зоной прямооточного котла высокого давления**

$k$	$t_k, \text{ мин}$	$y_k$	$k$	$t_k, \text{ мин}$	$y_k$	$k$	$t_k, \text{ мин}$	$y_k$
0	0,00	0,000	9	2,25	0,330	18	4,50	0,830
1	0,25	0,020	10	2,50	0,379	19	4,75	0,885
2	0,50	0,045	11	2,75	0,430	20	5,00	0,950
3	0,75	0,065	12	3,00	0,485	21	5,25	0,980
4	1,00	0,090	13	3,25	0,540	22	5,50	0,998
5	1,25	0,133	14	3,50	0,595	23	5,75	0,999
6	1,50	0,175	15	3,75	0,650	24	6,00	1,000
7	1,75	0,233	16	4,00	0,710	25	6,25	1,000
8	2,00	0,285	17	4,25	0,780	26	6,50	1,000

Передаточную функцию технологического объекта управления принимаем в виде

$$W(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{k_{\Pi}}{a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + 1}, \quad (1)$$

где  $a_i, i = \overline{1, 3}$  – коэффициенты передаточной функции, подлежащие определению;

$k_{\Pi} = \frac{y(\infty)}{x(\infty)}$  – коэффициент передачи в установившемся режиме;  $Y(s)$  – изображение

Лапласа функции  $y(t)$ , описывающей изменение давления пара за переходной зоной прямооточного котла, и  $X(s)$  – изображение Лапласа функции  $x(t)$ , описывающей входное возмущение топливом (газом). Соответствующее дифференциальное уравнение для нулевых начальных условий  $y(0) = y'(0) = y''(0) = 0$  и при ступенчатом воздействии  $x(t)$  может быть представлено в виде

$$x(t) = \begin{cases} 7000 \frac{\text{м}^3}{\text{час}}, & t \geq 0; \\ 0, & t < 0, \end{cases} \quad \text{может быть представлено в виде}$$

$$a_3 y'''(t) + a_2 y''(t) + a_1 y'(t) + y(t) = k_1, \quad (2)$$

где  $k_1 = k_{\Pi} \cdot 1400 \frac{\text{м}^3}{\text{ата} \cdot \text{час}}$ . Решение этого уравнения описывается функцией  $\mathcal{Y}(t)$  в относительных к  $\Delta p_{\max} = 5 \text{ ата}$  единицах.

Характеристическое уравнение, соответствующее обыкновенному дифференциальному уравнению (2), описывается выражением

$$r^3 + \frac{a_2}{a_3}r^2 + \frac{a_1}{a_3}r + \frac{1}{a_3} = 0. \quad (3)$$

В зависимости от характера его корней решение соответствующего дифференциального уравнения (ДУ) принимает различный вид (табл. 2).

Таблица 2

**Систематизация корней характеристического уравнения  
в зависимости от коэффициентов разностного уравнения**

№	Идентификатор $\bar{D}$ (6)	Характер корней кубического уравнения (5)	Тип корней характеристического уравнения (3) и вид решения ДУ (2)
1	$\bar{D} < 0$	Три различных действительных положительных корня $m_i > 0, i = \overline{1, 3}$ .	Три различных действительных корня $r_i = -\frac{1}{t} \ln m_i, i = \overline{1, 3}$ . $\mathcal{Y}(t) = C_1 e^{r_1 t} + C_2 e^{r_2 t} + C_3 e^{r_3 t} + k_1$
2	$\bar{D} = 0,$ $I_2 \neq -\frac{I_1^2}{3},$ $I_2 I_3 < 0;$ $\left\{ \begin{array}{l} \sqrt[3]{-\frac{q}{2}} < -\frac{I_2}{3I_3} \\ \sqrt[3]{-\frac{q}{2}} > -\frac{I_2}{3I_3} \end{array} \right.$	Один действительный положительный корень $m_1 = 2\sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \frac{I_2}{3I_3}} > 0;$ два равных положительных действительных корня $m_2 = m_3 = -\sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \frac{I_2}{3I_3}} > 0$	Один действительный корень $r_1 = -\frac{1}{t} \ln m_1$ и два равных действительных корня $r_2 = r_3 = -\frac{1}{t} \ln m_2, \quad q = \frac{2I_2^3 - 9I_1 I_2 I_3 - 27I_3^2}{27I_3^3}.$ $\mathcal{Y}(t) = C_1 e^{r_1 t} + (C_2 + C_3 t) e^{r_2 t} + k_1$
3	$\bar{D} = 0,$ $I_2 \neq -\frac{I_1^2}{3},$ $I_2 I_3 > 0$ или $I_2 I_3 < 0;$ $\left\{ \begin{array}{l} \sqrt[3]{-\frac{q}{2}} > -\frac{I_2}{3I_3} \\ \sqrt[3]{-\frac{q}{2}} < -\frac{I_2}{3I_3} \end{array} \right.$	Один действительный положительный корень $m_1 = 2\sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \frac{I_2}{3I_3}} > 0;$ два равных отрицательных действительных корня $m_2 = m_3 = -\sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \frac{I_2}{3I_3}} < 0.$	Один действительный корень $r_1 = -\frac{1}{t} \ln m_1$ и два комплексно-сопряженных корня $r_{2,3} = -\frac{1}{t} \ln(-m_2) \pm i \frac{p}{t} = a \pm iw.$ $\mathcal{Y}(t) = C_1 e^{r_1 t} + e^{at} (A \cos wt + B \sin wt) + k_1$
4	$\bar{D} = 0,$ $I_2 = -\frac{I_1^2}{3},$ $I_1 > 0, I_2 < 0,$ $I_3 > 0$	Три равных положительных действительных корня $m_1 = m_2 = m_3 = m = \frac{3}{I_1} > 0$	Три равных действительных корня $r_1 = r_2 = r_3 = -\frac{1}{t} \ln m.$ $\mathcal{Y}(t) = (C_1 + C_2 t + C_3 t^2) e^{r_1 t} + k_1$
5	$\bar{D} > 0$	Один действительный положительный корень $m_1 > 0$ и два комплексно-сопряженных корня $m_{2,3} = u \pm iv$	Один действительный корень $r_1 = -\frac{1}{t} \ln m_1$ и два комплексно-сопряженных корня $r_{2,3} = -\frac{1}{t} \ln(u^2 + v^2) \pm i \frac{1}{t} \arctg \frac{v}{u} = a \pm iw.$ $\mathcal{Y}(t) = C_1 e^{r_1 t} + e^{at} (A \cos wt + B \sin wt) + k_1$

При равномерной дискретизации непрерывной функции  $\mathcal{Y}(t)$  получаем дискретную функцию  $\mathcal{Y}_k = y(tk)$ ,  $k=0,1,2,\mathbf{K}$ , которая описывает мгновенные значения решения дифференциального уравнения (2), где  $t$  – шаг (период) дискретизации. Используя алгоритм формирования линейно-параметрической дискретной модели [7], можно получить единую формулу, рекуррентно связывающую четыре последовательных мгновенных значения  $\mathcal{Y}_k$ ,  $\mathcal{Y}_{k-1}$ ,  $\mathcal{Y}_{k-2}$  и  $\mathcal{Y}_{k-3}$  каждой дискретной функции, соответствующей своему типу решения дифференциального уравнения (2):

$$\mathcal{Y}_k = I_1 \mathcal{Y}_{k-1} + I_2 \mathcal{Y}_{k-2} + I_3 \mathcal{Y}_{k-3} + I_4, \quad k = 3, 4, 5, \mathbf{K}. \quad (4)$$

Можно показать, что коэффициенты  $I_j$ ,  $j=\overline{1,3}$  разностного уравнения (4) связаны с корнями  $r_i$  характеристического уравнения (3) через кубическое уравнение

$$I_3 m^3 + I_2 m^2 + I_1 m - 1 = 0, \quad (5)$$

корни которого описываются формулой  $m_i = e^{-r_i t}$ ,  $i=\overline{1,3}$ , причем комплексно-сопряженным корням  $m_{2,3} = u \pm iv$  уравнения (5) соответствуют так же комплексно-сопряженные корни  $r_{2,3} = a \pm iw$  характеристического уравнения (3). Формулы, позволяющие находить корни  $r_i$  характеристического уравнения (3) через решение  $m_i$  кубического уравнения (5) в зависимости от типа этого решения, представлены в табл. 2. Коэффициент  $I_4$  в разностном уравнении (4) функционально связан с параметром  $k_1$  входного ступенчатого воздействия:  $I_4 = k_1(1 - I_1 - I_2 - I_3)$ .

Проведенные аналитические исследования зависимости между типом корней характеристического уравнения (3) и характером корней кубического уравнения (5) позволили решить задачу идентификации типа решения дифференциального уравнения (2) на основе коэффициентов  $I_j$  разностного уравнения (4). Для этого вычисляется идентификатор

$$\bar{D} = 27I_3^2 + 2I_1(2I_1^2 + 9I_2)I_3 - I_2^2(I_1^2 + 4I_2), \quad (6)$$

по величине которого можно судить о типе корней характеристического уравнения (3) и, следовательно, характере решения ДУ (2), в частности, монотонном апериодическом ( $\bar{D} < 0$ ) или колебательном ( $\bar{D} > 0$ ). Результаты систематизации корней характеристического уравнения в зависимости от значения идентификатора  $\bar{D}$ , а также некоторых других дополнительных условий, представлены в табл. 2.

При обработке экспериментальных данных следует учитывать, что результаты измерений  $y_k$  содержат аддитивную случайную помеху  $e_k$ :  $y_k = \mathcal{Y}_k + e_k$ . В первом приближении можно считать, что случайные величины  $e_k$  нормально распределены, независимы, имеют нулевое математическое ожидание и одинаковые дисперсии  $S_e^2$ . Тогда модель (4) принимает вид стохастических разностных уравнений

$$\begin{cases} y_1 = I_5 + e_1, & y_2 = I_6 + e_2, & y_3 = I_1 y_2 + I_2 y_1 + I_4 - I_2 e_1 - I_1 e_2 + e_3, \\ y_k = I_1 y_{k-1} + I_2 y_{k-2} + I_3 y_{k-3} + I_4 + h_k, \\ h_k = -I_3 e_{k-3} - I_2 e_{k-2} - I_1 e_{k-1} + e_k, \end{cases} \quad k = \overline{4, N-1}, \quad (7)$$

где коэффициенты  $I_5 = \mathcal{Y}_0$  и  $I_6 = \mathcal{Y}_1$  позволяют оценить начальные условия, соответствующие данному частному решению ДУ.

Представив систему стохастических уравнений (7) в матричной форме, получаем обобщенную регрессионную модель [8]

$$\begin{cases} b = FI + h, \\ h = P_1 e, \end{cases} \quad (8)$$

где  $I = (I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_6)^T$  – вектор неизвестных коэффициентов линейно-параметрической дискретной модели;  $b = (y_1, y_2, y_3, \mathbf{K}, y_{N-2}, y_{N-1})^T$  – вектор в левой части регрессионной модели (8);  $e = (e_1, e_2, \mathbf{K}, e_{N-1})^T$  – вектор случайного возмущения в результатах наблюдений;  $h = (e_1, e_2, -I_2 e_1 - I_1 e_2 + e_3, \mathbf{K}, -I_3 e_{N-4} - I_2 e_{N-3} - I_1 e_{N-2} + e_{N-1})^T$  – вектор эквивалентного случайного возмущения в обобщенной регрессионной модели. Описание элементов матрицы  $F$  в первом уравнении обобщенной регрессионной модели (8), а также элементов матрицы  $P_1$  линейного преобразования вектора случайного возмущения  $e$  в результатах эксперимента легко получить из формул (7).

Обобщенная регрессионная модель (8), описывающая результаты измерений мгновенных значений переходной характеристики, лежит в основе метода определения параметров кривой разгона, а также коэффициентов передаточной функции (1) исследуемого технологического объекта – котельного агрегата.

Алгоритм метода параметрической идентификации на основе стохастических разностных уравнений (7) состоит из двух основных этапов: среднеквадратичного оценивания коэффициентов разностного уравнения (4) и вычисления на основе этих оценок параметров кривой разгона и коэффициентов передаточной функции.

Среднеквадратичные оценки коэффициентов линейно-параметрической дискретной модели вычисляются на основе минимизации функционала  $\|e\|^2 = \|P_1^{-1}b - P_1^{-1}FI\|^2 \rightarrow \min$ . Для этого используется итерационная процедура уточнения среднеквадратичных оценок  $\hat{I}$ , которую можно описать рекуррентной формулой

$$\hat{I}^{(k)} = \left[ F^T \left( P_{\hat{I}^{(k-1)}}^{-1} \right)^T P_{\hat{I}^{(k-1)}}^{-1} F \right]^{-1} F^T \left( P_{\hat{I}^{(k-1)}}^{-1} \right)^T P_{\hat{I}^{(k-1)}}^{-1} b, \quad k = 1, 2, 3, \mathbf{K}. \quad (9)$$

При вычислении матрицы  $P_{\hat{I}^{(k-1)}}^{-1}$  компоненты  $\hat{I}_j^{(k-1)}$ ,  $j = \overline{1, 3}$ ,  $(k-1)$ -го приближения вектора оценок  $\hat{I}^{(k-1)}$  подставляются в обратную матрицу  $P_1^{-1}$ , элементы которой описываются формулами

$$P_{ij}^{-1} = \begin{cases} 0, & j = 1, 2; \quad i < j; \\ 1, & j = 1, 2; \quad i = j; \\ I_2, & j = 1; \quad i = 3; \\ I_1, & j = 2; \quad i = 3; \\ I_1 P_{i-1, j}^{-1} + I_2 P_{i-2, j}^{-1} + I_3 P_{i-3, j}^{-1}, & j = 1, 2; \quad i \geq 4; \\ 0, & j \geq 3; \quad i < j; \\ 1, & j \geq 3; \quad i = j; \\ P_{i-1, j-1}^{-1}, & j \geq 3; \quad i > j. \end{cases} \quad (10)$$

Вначале в матрице  $P_I$  полагается  $I_1 = I_2 = I_3 = 0$ , т.е.  $P_I \equiv E$ , где  $E$  – единичная матрица. В этом случае начальные среднеквадратичные оценки  $\hat{I}^{(0)}$  находятся из условия  $\|h\|^2 = \|b - FI\|^2 \rightarrow \min$  по формуле  $\hat{I}^{(0)} = (F^T F)^{-1} F^T b$ . Полученные значения  $\hat{I}^{(0)}$  подставляются в матрицу  $P_I^{-1}$  и минимизируется функционал  $\|P_{\hat{I}^{(0)}}^{-1} b - P_{\hat{I}^{(0)}}^{-1} FI\|^2 \rightarrow \min$ , в результате чего получаем новые оценки коэффициентов линейно-параметрической дискретной модели  $\hat{I}^{(1)} = \left[ F^T (P_{\hat{I}^{(0)}}^{-1})^T P_{\hat{I}^{(0)}}^{-1} F \right]^{-1} F^T (P_{\hat{I}^{(0)}}^{-1})^T P_{\hat{I}^{(0)}}^{-1} b$ . Эти оценки вновь подставляются в матрицу  $P_I^{-1}$  и по формуле (9) при  $k=2$  находится следующее приближение  $\hat{I}^{(2)}$  и т.д. Процесс уточнения следует продолжать до тех пор, пока не будет выполнено условие  $\|\hat{I}^{(k)} - \hat{I}^{(k-1)}\| < 0,01 \|\hat{I}^{(k)}\|$  (обычно требуется не более трех-четырёх итераций). Полученные на последней итерации оценки  $\hat{I}$  принимаются за среднеквадратичные оценки коэффициентов разностного уравнения, минимизирующие сумму квадратов отклонений экспериментальных данных  $y_k$  от значений  $\hat{y}_k$ , вычисленных на основе построенной модели (7).

На втором этапе оценивания параметров передаточной функции вначале решается кубическое уравнение (5), коэффициентами которого являются среднеквадратичные оценки  $\hat{I}_j$ ,  $j = \overline{1, 3}$ . Затем по найденным корням этого уравнения  $\hat{m}_j > 0$ ,  $j = \overline{1, 3}$  вычисляются оценки параметров кривой разгона  $\hat{r}_j$ ,  $j = \overline{1, 3}$ . При действительных корнях  $\hat{m}_j$  применяется формула

$$\hat{r}_j = -\frac{1}{t} \ln \hat{m}_j. \quad (11)$$

Если уравнение (5) имеет два комплексно-сопряженных корня  $\hat{m}_{2,3} = \hat{u} \pm i\hat{v}$ , то оценки соответствующих комплексно-сопряженных корней  $\hat{r}_{2,3} = \hat{a} \pm i\hat{w}$  характеристического уравнения (3) могут быть найдены по формулам

$$\hat{a} = -\frac{1}{t} \ln |\hat{m}_2|, \quad \hat{w} = \frac{1}{t} |\arg \hat{m}_2|. \quad (12)$$

Оценка коэффициента передачи  $k_1$  вычисляется из выражения

$$\hat{k}_1 = \frac{\hat{I}_4}{1 - \hat{I}_1 - \hat{I}_2 - \hat{I}_3}. \quad (13)$$

Оценки  $\hat{a}_j$ ,  $j = \overline{1, 3}$  коэффициентов передаточной функции (1) могут быть вычислены по формулам  $\hat{a}_1 = -\frac{1}{\hat{r}_1} - \frac{1}{\hat{r}_2} - \frac{1}{\hat{r}_3}$ ,  $\hat{a}_2 = \frac{1}{\hat{r}_1 \hat{r}_2} + \frac{1}{\hat{r}_1 \hat{r}_3} + \frac{1}{\hat{r}_2 \hat{r}_3}$ ,  $\hat{a}_3 = -\frac{1}{\hat{r}_1 \hat{r}_2 \hat{r}_3}$  при действительных корнях  $\hat{r}_j$  характеристического уравнения (3) или по формулам

$$\hat{a}_1 = -\frac{2\hat{a}\hat{r}_1 + \hat{a}^2 + \hat{w}^2}{\hat{r}_1(\hat{a}^2 + \hat{w}^2)}, \quad \hat{a}_2 = \frac{\hat{r}_1 + 2\hat{a}}{\hat{r}_1(\hat{a}^2 + \hat{w}^2)}, \quad \hat{a}_3 = -\frac{1}{\hat{r}_1(\hat{a}^2 + \hat{w}^2)}, \quad (14)$$

если характеристическое уравнение имеет один действительный  $\hat{r}_1$  и два комплексно-сопряженных корня  $\hat{r}_{2,3} = \hat{a} \pm i\hat{w}$ .

Оценки произвольных постоянных  $\hat{C}_j$ ,  $j = \overline{1, 3}$  в решении дифференциального уравнения, описывающего кривую разгона, для случая действительных корней характеристического уравнения можно найти из системы линейных алгебраических

$$\text{уравнений } \begin{cases} \hat{C}_1 + \hat{C}_2 + \hat{C}_3 = -\hat{k}_1; \\ \hat{C}_1 \hat{m}_1^{-1} + \hat{C}_2 \hat{m}_2^{-1} + \hat{C}_3 \hat{m}_3^{-1} = \hat{I}_5 - \hat{k}_1; \\ \hat{C}_1 \hat{m}_1^{-2} + \hat{C}_2 \hat{m}_2^{-2} + \hat{C}_3 \hat{m}_3^{-2} = \hat{I}_6 - \hat{k}_1. \end{cases} \text{ При комплексно-сопряженных корнях ха-}$$

рактеристического уравнения (3) оценки произвольных постоянных  $\hat{C}_1$ ,  $\hat{A}$  и  $\hat{B}$  в соответствующем решении (см. табл. 2) находятся из системы уравнений

$$\begin{cases} \hat{C}_1 + \hat{A} = -\hat{k}_1; \\ \hat{C}_1 \hat{m}_1^{-1} + \hat{A} e^{\hat{a}t} \cos \hat{w}t + \hat{B} e^{\hat{a}t} \sin \hat{w}t = \hat{I}_5 - \hat{k}_1; \\ \hat{C}_1 \hat{m}_1^{-2} + \hat{A} e^{2\hat{a}t} \cos 2\hat{w}t + \hat{B} e^{2\hat{a}t} \sin 2\hat{w}t = \hat{I}_6 - \hat{k}_1. \end{cases} \quad (15)$$

Применение описанного выше алгоритма определения параметров передаточной функции объекта управления на основе разностных уравнений к экспериментальным данным, представленным в табл. 1, дает следующие результаты.

Период дискретизации кривой разгона определяется шагом измерения и составляет  $t = 0,25 \text{ мин}$ . Объем выборки результатов измерений принимаем равным  $N = 40$ , учитывая, что при времени эксперимента  $t_k > 6 \text{ мин}$  результаты наблюдений практически не изменяются. С учетом вида передаточной функции (1) объекта управления выбираем дискретную модель в форме разностного уравнения (4).

В соответствии с (7) сформирована матрица  $F$  размера  $[25 \times 6]$  и вектор  $b$ , содержащий 25 элементов. Вычисленные по формуле  $\hat{I}^{(0)} = (F^T F)^{-1} F^T b$  первоначальные оценки коэффициентов разностного уравнения оказались равными следующим величинам:  $\hat{I}_1^{(0)} = 1,765$ ;  $\hat{I}_2^{(0)} = -0,709$ ;  $\hat{I}_3^{(0)} = -0,070$ ;  $\hat{I}_4^{(0)} = 0,014$ ;  $\hat{I}_5^{(0)} = 0,020$ ;  $\hat{I}_6^{(0)} = 0,045$ .

Применение итерационной процедуры уточнения первоначальных оценок коэффициентов разностного уравнения с использованием формул (10) и (9) показало, что уже на четвертой итерации результаты вычислений совпадают с точностью до трех знаков после запятой и равны следующим значениям:  $\hat{I}_1^{(0)} = 2,813$ ;  $\hat{I}_2^{(0)} = -2,681$ ;  $\hat{I}_3^{(0)} = 0,864$ ;  $\hat{I}_4^{(0)} = 0,003$ ;  $\hat{I}_5^{(0)} = 0,029$ ;  $\hat{I}_6^{(0)} = 0,055$ .

Таким образом, линейно-параметрическая дискретная модель, описывающая в форме разностного уравнения результаты измерений мгновенных значений кривой разгона, может быть представлена в виде  $\hat{y}_0 = 0$ ,  $\hat{y}_1 = 0,029$ ,  $\hat{y}_2 = 0,055$ ,  $\hat{y}_k = 2,813\hat{y}_{k-1} - 2,681\hat{y}_{k-2} + 0,864\hat{y}_{k-3} + 0,003$ ,  $k = 3, 4, \mathbf{K}$ . Соответствующее кубическое уравнение (5) принимает вид  $0,864m^3 - 2,681m^2 + 2,813m - 1 = 0$ . Это уравнение имеет один действительный корень  $m_1 = 1,070$  и два комплексно-сопряженных корня

$m_{2,3} = 1,016 \pm i0,223$ . Идентификатор  $\bar{D}$  в соответствии с (6) равен  $\bar{D} = 0,00031 > 0$ . Следовательно, характеристическое уравнение (3) также имеет один действительный и два комплексно-сопряженных корня, которые вычисляются по формулам (11) и (12):  $r_1 = -0,270$  и  $r_{2,3} = -0,157 \pm i0,863$ . Коэффициент передачи  $\hat{k}_1$  рассчитывается по формуле (13) и составляет  $\hat{k}_1 = 1,156$ . Произвольные постоянные в математической модели кривой разгона определяются из решения системы уравнений (15):  $\hat{C}_1 = -1,236$ ,  $\hat{A} = 0,080$  и  $\hat{B} = -0,229$ . Таким образом, кривая разгона описывается уравнением вида

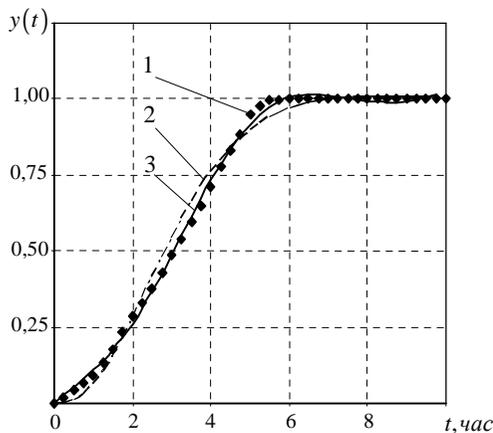
$$\hat{y}(t) = 1,156 - 1,236e^{-0,27t} + e^{-0,157t} (0,08 \cos 0,86t - 0,229 \sin 0,86t). \quad (16)$$

Коэффициенты  $\hat{a}_i$  передаточной функции (1) определяются по формулам (14):  $\hat{a}_1 = 4,117$ ,  $\hat{a}_2 = 2,808$  и  $\hat{a}_3 = 4,819$ . При этом коэффициент передачи в передаточной функции (1)  $k_{II} = \frac{k_1}{1400} \frac{ama \cdot час}{м^3} = 0,000826 \frac{ama \cdot час}{м^3}$ .

Таким образом, передаточная функция котельного агрегата имеет вид

$$W(s) = \frac{0,000826}{4,819s^3 + 2,808s^2 + 4,117s + 1} \frac{ama \cdot час}{м^3}. \quad (17)$$

На рисунке в виде точек 1 изображены экспериментальные данные, представленные в табл. 1. Кривая 2 на рисунке описывает переходную характеристику, соответствующую передаточной функции, найденной методом площадей [4]. Среднеквадратичное отклонение точек этой кривой от экспериментальных данных (в относительных единицах) равно 4,2%. Кривая 3 на рисунке описывается уравнением (16) и соответствует передаточной функции (17). Среднеквадратичное отклонение этой кривой от экспериментальных данных, представленных в табл. 1, в относительных единицах составляет 1,8%.



Экспериментальные данные (точки 1) и восстановленные по ним кривые разгона методом площадей (кривая 2) и на основе разностного уравнения (кривая 3)

Таким образом, очевидно, что построение передаточной функции на основе разностных уравнений, описывающих результаты наблюдений мгновенных значений переходной характеристики объекта управления, позволяет существенно (более чем в два раза) повысить адекватность математической модели экспериментальным данным.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дейч А.М. Методы идентификации динамических объектов. – М.: Энергия, 1979. – 240 с.
2. Грон Д. Методы идентификации систем / Под ред. Е.И. Кринецкого. – М.: Мир, 1979. – 302 с.
3. Эйкхофф П. Основы идентификации систем управления. Оценивание параметров и состояния. – М.: Мир, 1975. – 241 с.
4. Стефани Е.П. Основы расчета настройки регуляторов теплоэнергетических процессов. – М.: Энергия, 1972. – 248 с.
5. Себер Дж. Линейный регрессионный анализ. – М.: Мир, 1980. – 456 с.
6. Штейнберг Ш.Е. Идентификация в системах управления. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 80 с.
7. Радченко В.П., Зотеев В.Е. Определение динамических характеристик механической системы на основе стохастических разностных уравнений колебаний // Известия вузов. Машиностроение. – 2007. – №1. – С. 3-10.
8. Вучков И., Бояджиева Л., Солаков О. Прикладной линейный регрессионный анализ. – М.: Финансы и статистика, 1987. – 238 с.

*Статья поступила в редакцию 16 сентября 2008 г.*

UDK 519.246

## TRANSIENT RESPONSE PARAMETERS DEFINITION ON THE BASE OF STOCHASTIC DIFFERENCE EQUATIONS

**V.E. Zoteev<sup>1</sup>**

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya str., Samara, 443100

*A numerical method for determining parameters of the transfer function according to the control object transient response is considered. Mean-square evaluation of the coefficients of the stochastic difference equation describing the measuring results of the instantaneous values of the object transient response is at the heart of the method.*

**Key words:** *transfer function, stochastic difference equation, parametric identification, mean-square evaluation*

---

<sup>1</sup> Vladimir E. Zoteev, Candidate of Physics and Mathematics, Associate professor.

## **ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В СИСТЕМАХ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

**К.Л. Куликовский<sup>1</sup>, Д.В. Петров**

Самарский государственный технический университет  
443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244

*Своевременное принятие оптимальных управленческих решений является одной из главных проблем в управлении предприятием. Важным помощником руководителей становятся информационные системы поддержки принятия решений. Сложность решаемых задач обуславливает невозможность использования в таких системах аналитических и статистических методов в отличие от современных информационных методов – искусственных нейронных сетей. Их применение позволяет решать задачи комплексного анализа показателей финансовой деятельности предприятия и на основе этого определять наиболее перспективные варианты управленческих решений.*

**Ключевые слова:** *система поддержки принятия решений, искусственная нейронная сеть, показатели работы предприятий, погрешность моделирования производственных функций*

В современных экономических реалиях принятия эффективных управленческих решений только на основании одного опыта и интуиции руководителя уже явно недостаточно. Наиболее важным помощником руководителя становятся информационные системы поддержки принятия решений (СППР), которые позволяют смоделировать сложившуюся ситуацию, спрогнозировать её развитие и на основе этого рекомендовать наилучший план действий на будущее.

Практика показала, что эффективным подходом к разработке системы поддержки принятия управленческих решений для предприятий является создание СППР на базе открытых мультиагентных систем (МАС) [1, 2]. В таких системах подразделения предприятия условно представляются интеллектуальными агентами, действующими в рамках предоставленных им полномочий. Координация деятельности каждого агента осуществляется базовой МАС предприятия с целью максимизации значения целевой функции предприятия, состоящей из аналогичных целевых функций агентов. Особенно эффективна работа СППР на базе МАС при реструктуризации предприятий, управлении финансовыми потоками, оптимизации систем обязательных платежей и т.д.

Однако особенности работы современных предприятий характеризуются многомерными финансово-экономическими динамическими связями с множеством различных ограничений. В связи с этим используемые в СППР только аналитические или статистические методы не всегда подходят для анализа прогнозов развития и последствий принимаемых решений, так как эти методы в основном хорошо развиты только для одномерных случайных величин. Многомерные статистические модели

---

<sup>1</sup> Куликовский Константин Лонгинович, доктор технических наук, профессор.  
Петров Дмитрий Владимирович, аспирант.

предполагают обычно гауссовское распределение наблюдений, что редко выполняется на практике; зачастую они не обоснованы теоретически. В многомерной статистике, за неимением лучшего, нередко применяются малообоснованные эвристические методы.

Из-за этих недостатков для решения таких задач наиболее эффективным становится применение систем искусственного интеллекта – искусственных нейронных сетей (ИНС) [3]. Методы ИНС предназначены для решения очень сложных нелинейных задач, которые либо превышают возможности общепринятых алгоритмических методов, либо требуют для своего решения слишком больших материальных и временных затрат. ИНС хорошо зарекомендовали себя при решении различных практических задач, но в СППР они до сих пор не использовались.

ИНС в СППР могут применяться для решения двух классов задач. В первом из них проводится комплексный анализ деятельности предприятий, а также «проигрывание» возможных прогнозных результатов их работы при принятии различных решений по изменению совокупности производственных и финансовых показателей. Второй класс задач связан с принятием решений о принадлежности совокупности показателей производственной и финансовой деятельности предприятий к той или иной категории.

Решение задач с помощью ИНС состоит из нескольких этапов. Первоначально проводится анализ поставленной задачи, выполняется предварительная обработка исходных данных и все они условно разбиваются на обучающее и тестовое множества. Основное требование к этим множествам состоит в том, чтобы они были статистически репрезентативны относительно используемой базы данных или подчеркивали некоторые специфические признаки данных. На следующем этапе создается структура ИНС, определяется количество нейронов во входном, выходном и скрытых слоях.

На обучающем множестве данных проводится настройка и обучение сети, благодаря чему ИНС приобретает способность правильно реагировать не только на шаблоны, предъявленные ей в процессе тренировки, но хорошо справляться с другими наборами данных из допустимого пространства входов, которые она никогда не «видела». Созданная таким образом ИНС позволяет проводить комплексный анализ и прогнозировать изменение показателей работы предприятия.

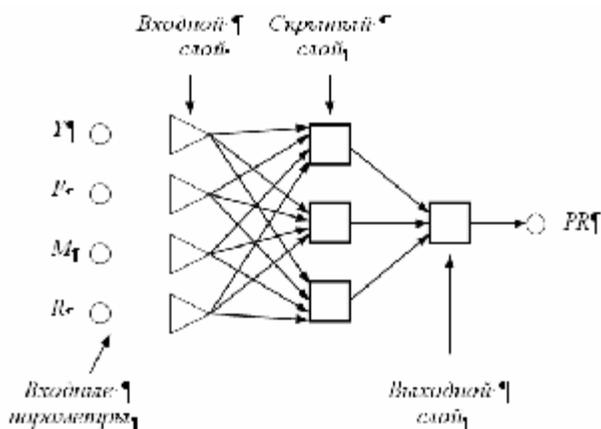
Одним из этапов такого анализа, например, является оценка рисков составляющих при принятии управленческих решений, поэтому совместное использование в СППР мультиагентных систем и ИНС позволяет разработать способы распределения свободных денежных средств для финансирования производства с оценкой появляющихся при этом рисков и определением вероятностей возврата предоставляемых средств. Так как методами МАС такую оценку провести невозможно, то эти показатели можно проанализировать с помощью ИНС на основе метода кластеризации и самоорганизующихся карт.

Сущность метода заключается в том, что по имеющейся исходной базе многомерного пространства производственных и финансовых показателей можно получить на двумерной карте такое их отображение, которое сохраняет топологию и распределение исходного многомерного пространства.

Для проведения кластеризации с помощью ИНС в качестве входных векторов используются различные значения производственных и финансовых показателей, а также кредитная история анализируемых предприятий. В результате применения

ИНС появляются возможности определения вероятности возврата предоставляемых предприятиям кредитов либо отнесения этих предприятий к различным классам – «надежный», «малонадежный», «ненадежный». Эти показатели впоследствии можно использовать при принятии решений о предоставлении или отказе в получении финансовых кредитов конкретным предприятиям [4].

Возможности ИНС для анализа и прогнозирования результатов работы были апробированы нами на примере конкретного предприятия. С этой целью ставилась задача по определению влияния различных производственных показателей на величину прибыли, а также прогнозированию возможности ее изменения на ближайшие периоды времени (кварталы). При этом учитывались известные ежеквартальные показатели работы предприятия за последние пять лет. Для решения



Архитектура ИНС для оценки влияния производственных показателей на прибыль предприятия

исследования те из них ( $K$ ,  $N$ ), которые не оказывают на него существенного влияния. Это упростило структуру создаваемой сети и сократило время на ее обучение.

Результатом работы ИНС явился вывод, согласно которому основными параметрами, определяющими величину прибыли, являются показатели  $F$  и  $R$ . Относительные значимости этих показателей в рассмотренном нами примере равны соответственно 0,95 и 0,78. Для проверки погрешности выдаваемых ИНС результатов было проведено сравнение имеющихся реальных значений прибыли за последний год работы предприятия с аналогичными показателями, выдаваемыми ИНС в качестве прогнозных. Сравнение этих значений показало, что погрешность предсказания величины прибыли ИНС за весь этот период (4 квартал) не превышает 1,4%.

Оценку влияния различных производственных показателей на эффективность работы предприятий, кроме ИНС, можно также оценивать и статистическими методами. С этой целью с помощью метода наименьших квадратов составляется множественное линейное регрессионное уравнение, связывающее между собой все исследуемые показатели. Затем проводится анализ величин коэффициентов такого уравнения, на основании анализа определяются наиболее значимые, которые обычно и используются в дальнейших расчетах. Однако этот метод не всегда можно использовать.

поставленной задачи была создана ИНС, показанная на рисунке, входной слой которой содержал следующие показатели работы предприятия: объем выпускаемой продукции ( $Y$ ), фонд оплаты труда ( $F$ ), основные производственные фонды ( $K$ ), численность персонала ( $N$ ), затраты на материалы ( $M$ ), производительность ( $R$ ), а выходной слой – величину прибыли ( $PR$ ). Предварительная обработка исходных данных и определение влияния каждого из них на выходной параметр позволили исключить из дальнейшего

В качестве примера была проведена статистическая обработка имеющихся показателей работы предприятия и с помощью метода наименьших квадратов получено следующее регрессионное уравнение:

$$PR = 30,5 - 0,52 * F - 0,18 * N - 0,21 * R + 1,49 * Y + 2,26 * M - 0,04 * K . \quad (1)$$

Значения показателей множественной корреляции (0,97), коэффициента детерминации (0,95), стандартной ошибки (0,28), критерия Фишера (27,12) показывают хорошую аппроксимацию этим регрессионным уравнением имеющихся данных. В то же время проверка на адекватность коэффициентов регрессии по величинам  $t$ -критериев Стьюдента при 95% вероятности показала, что статистически значимым является только один коэффициент (2,26). Таким образом, линейное регрессионное уравнение (1) в данном случае неприменимо для определения влияния исходных показателей на работу предприятия. В то же время методами ИНС такая задача решается.

СППР вырабатывает различные варианты управленческих решений на основании предварительно созданных математических моделей. Одним из основных элементов, используемых в таких моделях, является производственная функция предприятия (ПФ). В настоящее время в различных математических моделях применяются в основном три типа ПФ, приведенных ниже в таблице. Конкретный тип ПФ определяется эконометрическими методами по имеющимся данным за истекший период времени работы предприятия [5]. Но при этом возникает сложность, связанная с тем, что имеющиеся данные описывают только прошедший период, а ПФ используется для предсказания будущих показателей работы предприятия при различных вариантах принимаемых управленческих решений. Как показывает практика, такой способ определения и использования в дальнейших расчетах ПФ зачастую не может гарантировать успешный результат. Для повышения точности расчетов предлагается следующий метод.

Вначале на основании имеющихся данных по работе предприятия и планируемых значений  $K$ ,  $N$  с помощью ИНС определяются величины  $Y$  на весь прогнозный период. Затем с использованием этих и имеющихся показателей работы предприятия за истекший период времени его работы эконометрическими методами уточняются показатели ПФ, которые теперь уже могут более точно предсказывать динамику изменения работы предприятия. Эффективность применения такого метода проверялась при проведении анализа показателей работы конкретного предприятия и отражена в таблице.

**Погрешность прогнозных значений выпуска продукции, %**

Вид производственной функции		Квартал 1	Квартал 2	Квартал 3	Квартал 4
Пропорциональная: $Y=a*K$	$\lambda$	13,38	14,56	10,66	7,14
	$\omega$	9,31	10,13	6,68	3,53
Линейная: $Y=a+b*K+c*N$	$\lambda$	5,62	5,94	4,65	12,63
	$\omega$	0,93	1,42	4,22	3,98
Кобба-Дугласа: $Y=a*K^\alpha * N^\beta$	$\lambda$	4,24	3,75	6,47	7,83
	$\omega$	1,31	0,78	2,63	3,74

Здесь приведены как погрешность предсказания  $Y$  на 4 квартала вперед для различных ПФ с использованием данных только за 16 кварталов работы предприятия (строки  $\lambda$ ), так и аналогичные показатели, полученные с использованием ИНС (строки  $\omega$ ). При этом в качестве сравнения использовались показатели работы предпри-

ятия за последний год его работы. Видно, что предлагаемый метод определения показателей ПФ с использованием ИНС позволяет значительно повысить точность расчетов и моделирования в СППР различных последствий принимаемых управленческих решений.

Таким образом, применение ИНС дает возможность решать задачи комплексного анализа показателей производственной и финансовой деятельности предприятий и определять принадлежность этих показателей к той или иной категории. При эффективной настройке на анализ работы конкретных предприятий ИНС совместно с СППР способна поставлять обширную информацию лицам, принимающим решения, в том ракурсе, который наиболее подходит для проведения всестороннего анализа и принятия на основе этого оптимальных управленческих решений.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Интеллектуальная система поддержки принятия решений по управлению финансовыми потоками / К.Л. Куликовский, А.А. Вейс, Ю.В. Вейс, А.А. Ангельцев // Вестник СамГТУ. – 2007. – №1(19). – С. 22-27.
2. Москвин Б.В. Математические методы оптимального управления экономическими системами – СПб.: ГУЭФ, 2005. – 230 с.
3. Хайкин С. Нейронные сети. – М.: ИД «Вильямс», 2006. – 1103 с.
4. Кузнецов А.В. Методические основы оценки кредитоспособности организации и задача распознавания образа потенциально невозвратного кредита // Известия Самарского научного центра РАН. Актуальные проблемы экономики и права. – 2006. – №3. – С. 81-89.
5. Айвэзьян С.А., Мхитарян В.С. Прикладная статистика и основы эконометрики. – М.: ЮНИТИ, 1998. – 1022 с.

*Статья поступила в редакцию 15 марта 2008 г.*

UDC 330.47

## USAGE OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS IN MANAGEMENT DECISION SUPPORT SYSTEMS OF INDUSTRIAL ENTERPRISES

***K.L. Kulikovskiy<sup>1</sup>, D.V. Petrov***

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya str., Samara, 443100

*Timely decision-making for optimal management decisions is one of the major issues in enterprise management. Information decision support systems are increasingly turning into helpful assistants for managers. The complexity of objectives to be solved makes analytical and statistic methods unusable and forces to use up-to-date informational methods for these systems such as artificial neural networks. They allow managers to implement complex analysis of enterprise financial workflow performance indicators and determine best management decisions based on the results of such analysis*

***Key words:*** *decision making support system, artificial neural network, enterprise KPIs, simulation error of industrial activities*

---

<sup>1</sup> *Konstantin L. Kulikovskiy, Doctor of Technical Sciences, Professor.  
Dmitriy V. Petrov, Postgraduate student.*

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОТЛАДКА АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

**В.С. Семенов<sup>1</sup>, В.А. Зуб<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Самарский государственный технический университет  
443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244

<sup>2</sup> ОАО «Гипровостокнефть»  
443041, Самара, ул. Красноармейская, 93

*Рассматриваются методы математического описания и программной реализации имитационных моделей технологических объектов нефтегазового комплекса для моделирования и отладки автоматизированных систем управления и повышения их эффективности.*

**Ключевые слова:** *имитационное моделирование, имитационная модель, математическая модель, типовые звенья, узел, связь, объект, граф, алгоритм*

Главной особенностью сложных систем следует считать высокую степень автоматизации, основанную на использовании быстродействующей микропроцессорной техники с развитой сетевой структурой.

Входящие в состав сложных систем элементы, как правило, различны по своему назначению, конструктивному оформлению и степени сложности. Так, например, наряду с быстродействующим контроллерным оборудованием, обеспечивающим высокую точность обработки входной информации и выдачи управляющих воздействий в соответствии с заданным алгоритмом, в сложных системах применяют и относительно простые механизмы и агрегаты [1].

Примером сложной системы могут служить автоматизированные системы управления технологическими процессами объектов нефтегазового комплекса. Эти системы представляют собой совокупность аппаратно-программных средств, работающих в реальном масштабе времени. Они построены на основе использования современной высоконадежной микропроцессорной техники, сетевого оборудования, интеллектуального датчикового оборудования и исполнительных механизмов.

Очевидно, что сформулировать единый критерий оптимальности системы управления и решить задачу ее построения как задачу оптимизации не представляется возможным. Поэтому общая задача создания системы управления может быть разбита на ряд подзадач: формирование функциональной схемы; определение архитектуры построения и параметров системы; выбор аппаратных средств реализации системы; разработка математического, организационного и программного обеспечения.

Для решения задач разработки и отладки автоматизированных систем управления нами предлагается программно-аппаратный комплекс моделирования АСУТП (ПАК АСУТП). Программно-аппаратный комплекс предназначен для моделирования процессов сбора информации, разработки и отладки алгоритмов, программ кон-

---

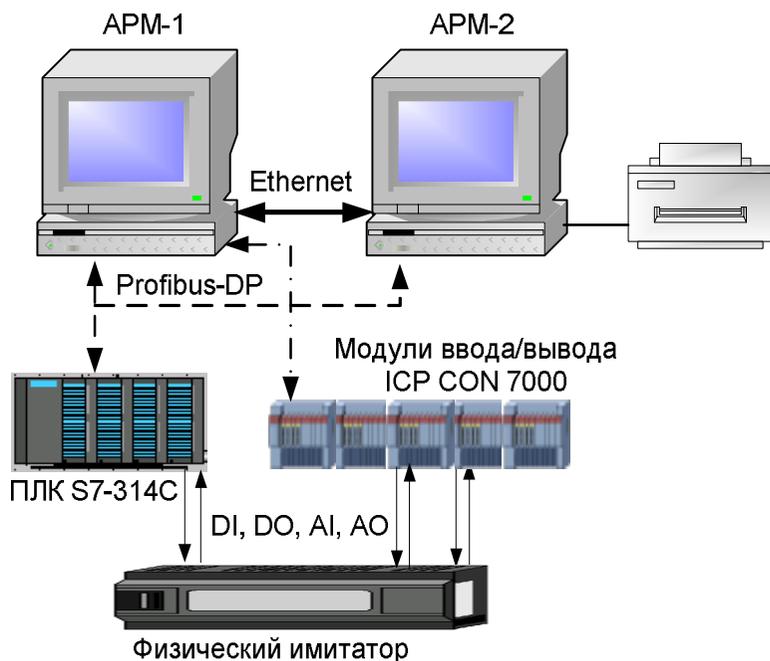
*Семенов Владимир Семенович, Заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор.*

*Зуб Валерий Анатольевич, аспирант, ОАО «Гипровостокнефть», заведующий группой.*

троля и управления технологическими процессами. Структурная схема программно-аппаратного комплекса моделирования АСУТП представлена на рис. 1.

Программно-аппаратный комплекс позволяет реализовать трехуровневую иерархическую структуру управления:

- 1 уровень (нижний) – уровень имитации технологического процесса (КИПиА);
- 2 уровень (средний) – уровень автоматического управления и сбора информации (ПЛК);
- 3 уровень (верхний) – уровень визуализации и диспетчерского управления технологическим процессом



Р и с. 1. Структурная схема программно-аппаратного комплекса моделирования АСУТП

Разработка математических моделей сложных систем связана с проведением достаточно трудоемких и разнообразных исследований. Обычно эти исследования начинаются на этапе создания и заканчиваются на этапе натурных испытаний или в процессе эксплуатации системы. На этапе создания системы в первую очередь решают вопросы выбора методов и способов реализации математических моделей на средствах вычислительной техники. При решении этих вопросов определяющим фактором является ожидаемая сложность модели.

В большинстве случаев этот фактор приводит к тому, что на этапе теоретических исследований приходится рассматривать целый комплекс вопросов, связанных с поисками наиболее точных и в то же время достаточно простых в программном исполнении форм математического описания процессов в исследуемых системах управления [2].

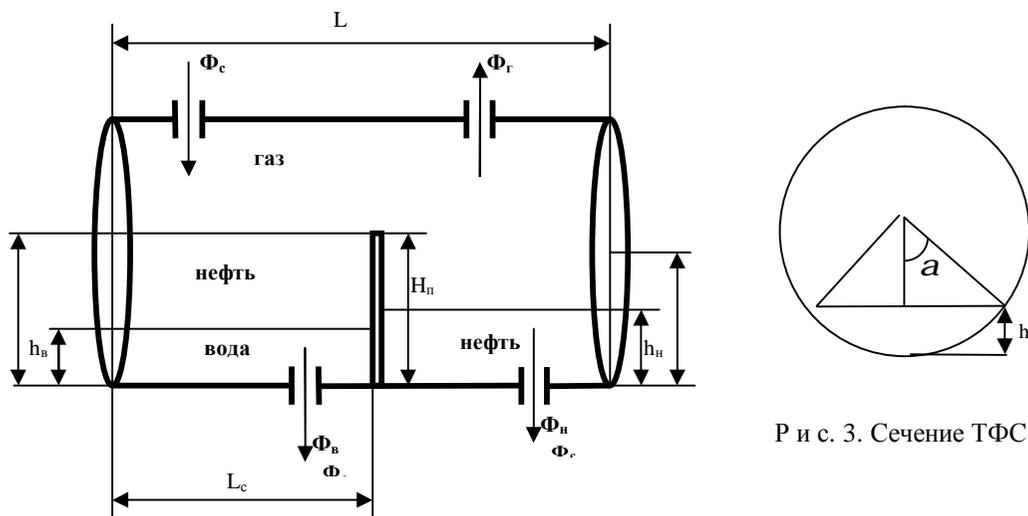
На практике при изучении указанных вопросов обычно предполагается, что процессы в элементах исследуемой системы могут быть описаны с помощью решений дифференциальных, разностных или функциональных уравнений.

Подобным образом в ПАК АСУТП реализована модель трехфазного сепаратора.

На рис. 2 показана схема, использованная для построения математической модели трехфазного сепаратора.

Уровни смеси, воды и нефти в сепараторе рассчитываются исходя из соответствующих объемов.

Чтобы рассчитать объем жидкости для заданного уровня, необходимо определить площадь сечения, заполняемого жидкостью (рис. 3). Формулы для расчета представлены ниже:



Р и с. 2. Схема трехфазного сепаратора

Р и с. 3. Сечение ТФС

$$\cos a = \frac{h - R}{R};$$

$$a = \arccos \left[ \frac{h - R}{R} \right].$$

Площадь сечения определяется как площадь сектора и двух треугольников:

$$S = pR^2 \frac{2a}{2p} + 2 \times \frac{1}{2} (h - R) \sqrt{2Rh - h^2};$$

$$S = \arccos \left( \frac{R - h}{R} \right) R^2 + (h - R) \sqrt{2Rh - h^2}.$$

Площадь перегородки сепаратора определяется по следующей формуле:

$$S_n = \left[ \arccos \left( \frac{H_n - R}{R} \right) R^2 + (H_n - R) \sqrt{2RH_n - H_n^2} \right].$$

Объем жидкости определяется как  $V = SL$ .

Таким образом, можно определить начальные объемы воды, смеси и нефти по заданным начальным значениям уровней.

Далее определяется максимальный объем смеси в левом отсеке сепаратора

$$V_{c \max} = S_n L_c.$$

Изменение объема воды в сепараторе:

$$\frac{dV_g}{dt} = \Phi_c k_g - \Phi_g,$$

где  $k_g$  – процент воды во входном потоке.

Изменение объема смеси в сепараторе:

$$\frac{dV_c}{dt} = \Phi_c (1 - k_u) - \Phi_g,$$

где  $k_u$  – процент газа во входном потоке.

Если  $V_c + \frac{dV_c}{dt} < V_{c \max}$ , тогда принимаем  $V_c = V_n$ .

Изменение объема нефти в правом отсеке сепаратора составит величину

$$\frac{dV_n}{dt} = \left\{ \begin{array}{l} -\Phi_n, V_c + \frac{dV_c}{dt} < V_{c \max} \\ V_c + \frac{dV_c}{dt} - V_{c \max} - \Phi_n, V_c + \frac{dV_c}{dt} \geq V_{c \max} \end{array} \right\},$$

где  $\frac{dV_c}{dt} = \Phi_c (1 - k_u) - \Phi_g$ .

Для реализации обмена информацией между моделью и программой управления технологическим процессом необходимо решить обратную задачу – рассчитать уровень жидкости для заданного объема.

Площадь сечения, заполненного жидкостью, определяется как отношение объема к длине:

$$S = \frac{V}{L}.$$

Представим площадь сечения, заполненного жидкостью (см. рис. 2), следующей формулой:

$$S = aR^2 - \frac{1}{2} \sin 2aR^2;$$

$$\frac{2S}{R^2} = b - \sin b,$$

где  $b = 1a$ .

Численное решение данного уравнения позволяет найти угол  $a$  и определить уровень жидкости:

$$h = (1 - \cos a)R.$$

Таким образом, рассчитываются искомые уровни  $h$ ,  $h_b$ ,  $h_n$ .

Давление в сепараторе определяется как избыточное по отношению к атмосферному:

$$p_c = p_o - p.$$

Согласно уравнению Менделеева-Клапейрона

$$\frac{pV_g}{m} = RT,$$

где  $V_z$  – объем газа,  $m$  – масса газа.

При постоянной температуре  $\frac{pV_z}{m} = RT = const.$

Дифференцируем:

$$\left(\frac{pV_z}{m}\right)' = 0$$

$$\frac{(pV_z)'m - pV_z m'}{m^2} = 0;$$

$$\frac{(p'V_z + pV_z')m}{m^2} = \frac{pV_z m'}{m^2}.$$

Таким образом, получаем

$$mV_z \frac{dp}{dt} = pV_z \frac{dm}{dt} - mp \frac{dV_z}{dt}.$$

Масса газа и ее приращение будут равны соответственно:

$$m = rV_z;$$

$$\frac{dm}{dt} = r_0(\Phi_c k_z - \Phi_z),$$

где  $r_0$  – начальная плотность газа.

Следовательно, можно записать:

$$rV_z^2 \frac{dp}{dt} = pV_z (r_0(\Phi_c k_z - \Phi_z)) - mp \frac{dV_z}{dt};$$

$$\frac{dp}{dt} = \frac{pV_z}{rV_z^2} (r_0(\Phi_c k_z - \Phi_z)) - \frac{rV_z p}{rV_z^2} \frac{dV_z}{dt}.$$

Отсюда

$$\frac{dp}{dt} = \frac{pr_0}{rV_z} (\Phi_c k_z - \Phi_z) - \frac{p}{V_z} \frac{dV_z}{dt}.$$

Учитывая, что

$$p = p_0 + p_c;$$

$$\frac{p}{p_0} = \frac{r}{r_0},$$

получим:

$$\frac{dp_c}{dt} = \frac{1}{V_z} \left\{ \frac{pp_0}{p} (\Phi_c k_z - \Phi_z) - (p_0 + p_c) \frac{dV_z}{dt} \right\}$$

$$\frac{dp_z}{dt} = \frac{1}{V_z} \left\{ p_0 (\Phi_c k_z - \Phi_z) - (p_0 + p_c) \frac{dV_z}{dt} \right\}$$

Объем газа и его приращение, соответственно, составят величины:

$$V_z = pR^2L - (V_c + V_n);$$

$$\frac{dV_z}{dt} = -(\Phi_c(1 - k_u) - \Phi_n - \Phi_\theta).$$

Отсюда следует:

$$\frac{dp_c}{dt} = \frac{1}{pR^2L - (V_c + V_n)} (p_0(\Phi_c k_z - \Phi_z) + (p_0 + p_c)(\Phi_c(1 - k_u) - \Phi_n - \Phi_\theta));$$

$$\frac{dp_c}{dt} = \frac{1}{pR^2L - (V_c + V_n)} \left( \begin{array}{l} p_0\Phi_c k_z - p_0\Phi_z + p_0\Phi_c - p_0\Phi_c k_z - p_0\Phi_n - p_0\Phi_\theta + p_c\Phi_c - \\ - p_c\Phi_c k_z - p_c\Phi_n - p_c\Phi_\theta \end{array} \right).$$

Приращение давления газа вычислим по формуле

$$\frac{dp_c}{dt} = \frac{1}{pR^2L - (V_c + V_n)} [(p_0 + p_c)(\Phi_c - \Phi_\theta - \Phi_n) - p_0\Phi_z - p_c\Phi_c k_z].$$

Для численного решения дифференциальных уравнений применяется метод Рунге-Кутты четвертого порядка.

На основе полученных математических зависимостей разработана программа имитационного моделирования трехфазного сепаратора (ТФС). Модель ТФС используется в составе программно-аппаратного комплекса.

Применяя рассматриваемый метод подобным образом, можно математически описать многие моделируемые технологические объекты.

На базе структурного объединения математических описаний моделей реализуется алгоритм моделирования АСУТП.

При проведении работ по созданию программно-аппаратного комплекса моделирования АСУТП была поставлена задача в максимальной степени упростить процесс разработки моделей, обеспечив при этом достаточные динамические характеристики моделей объектов и системы в целом. В основу решения поставленной задачи был заложен метод типовых звеньев. Суть этого метода состоит в том, что, используя описания каждого элемента, на основании формальных правил, которые соответствуют типовым соединениям, определяются значения выходных (передаточных) функций в заданной точке системы. Необходимо заметить, что такой способ создания динамических систем в определенной степени условен, однако применим для решения задач отладки алгоритмов и программ АСУТП.

Метод типовых звеньев предполагает некоторые определения и допущения, приведенные ниже.

**Узел** – любой моделируемый технологический объект, представляющий собой емкость или точку соединения трубопроводов (труб). В зависимости от функционального назначения узлы подразделяются на два типа: 1-й тип – узлы, имеющие статические и динамические характеристики; 2-й тип – узлы соединений с неограниченным количеством ответвлений.

**Связь** – это трубопровод, имеющий определенную длину и диаметр. Связь может содержать обратный клапан или активный (регулирующий) объект. Связи разделены на два типа: связи по жидкости и газу соответственно. Жидкость и газ перемещаются только по своим связям, замещения не происходит. Связь не имеет объема, в ней не происходит дегазация и теплообмен.

Параметры потока жидкости через связи рассчитывается по 2-му закону Ньютона исходя из давлений на концах трубы и ее динамического сопротивления.

$$a = \frac{dP - \frac{Q}{\nu}}{L * S * r},$$

где  $a$  – приращение расхода;  $dP$  – перепад давления на концах;  $Q$  – текущий расход;  $\nu$  – проводимость трубы;  $L$  – длина трубы;  $S$  – площадь сечения трубы;  $r$  – плотность среды.

На каждом шаге рассчитывается приращение ( $a$ ) и вычисляется текущий расход:

$$Q = Q + a * dt.$$

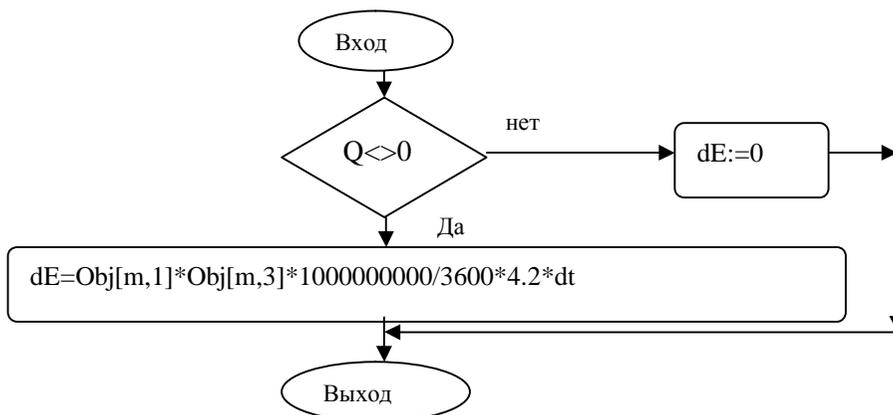
Перепады высот источника и приемника, давление столба жидкости, работа насосов учитываются при подсчете  $dP$ .

**Объекты** – задвижки, клапаны, теплообменники, т.е. всё оборудование, которое не имеет собственного свободного от жидкости объема и расположено на **связи**.

Для примера рассмотрим представление в программе моделирования некоторых объектов.

В программе моделирования печь описывается как источник фиксированной тепловой энергии, размерность – «Гкал/час», параметр  $Obj[m,3]$ . У печи имеется свойство  $Obj[m,1]$  – работает или нет, где  $m$  – номер печи. Если работает – признак работы равен 1 и она выдает полную номинальную производительность. Если признак равен 0, то прироста тепла от неё нет.

Алгоритм расчета тепла, получаемого нефтью ( $dE$ , Дж), протекающей через печь с удельным расходом  $Q$  за одну итерацию длительностью  $dt$  (секунды), показан на рис. 4.



Р и с. 4. Алгоритм расчета нагрева

Проверка на наличие потока нефти необходима, так как в случае отсутствия нефти рост температуры неограничен.

Расчет теплообменника производится упрощенно, без учета реальной пропускной способности. Формулы изменения температуры после прохождения теплообменника имеют вид

$$dT2 = (T01 - T02) * \frac{Q1 * C1}{Q1 * C1 + Q2 * C2};$$

$$dT1 = -(T01 - T02) * \frac{Q2 * C2}{Q1 * C1 + Q2 * C2};$$

где  $dT_{1,2}$  – изменения температур в первичном и вторичном контуре;  $T_{01}$  и  $T_{02}$  – температуры сред на входе;  $Q_1, C_1$  и  $Q_2, C_2$  – удельные расходы в контурах и теплоемкость сред соответственно.

Расчет центробежного насоса производится по линеаризованной расходной характеристике. Крайние точки – давление, развиваемое насосом при нулевой подаче ( $Obj[m,3]$ ) и подача при нулевом давлении ( $Obj[m,4]$ ). Расчет насоса заключается в определении давления ( $dp$ ), которое он развивает при текущей подаче.

$$dp := Obj[m,3] * (1 - Q / Obj[m,4]).$$

**Датчики** – элементы модели, предназначенные для передачи состояния моделируемых объектов в управляющий контроллер. В системе предусмотрено 3 типа датчиков: датчик узла – аналоговый выход; датчик связи – аналоговый выход; датчик предельных значений с дискретным выходом, реализуемый на базе вышеприведенных датчиков.

В программе реализуется 6 видов датчиков 1-го типа для узлов и 3 вида датчиков 2-го типа для связей.

Датчики 1-го типа: давление газа избыточное, атм.; дифференциальное давление между двумя узлами абсолютное, атм.; температура, °С; уровень жидкости, абсолютный, м; уровень воды до перегородки (для сепаратора), м; уровень нефти после перегородки (для сепаратора), м;

Датчики 2-го типа: расход по линии, м<sup>3</sup>/час; скорость потока, средняя за итерацию, м/с; ускорение, м/с<sup>2</sup>.

Дискретные датчики не имеют непосредственной связи с физическими величинами, всю информацию они могут брать только от датчиков 1 и 2 типа. Приняты два вида подобных датчиков: срабатывают при превышении установленного порога; срабатывают при значениях ниже установленного порога.

Для обоих видов датчиков устанавливается величина гистерезиса срабатывания, минимальное время нахождения в состоянии «сработал», чем обеспечивается гарантированная передача состояния датчика в управляющий контроллер.

Для объектов и датчиков предусмотрено задание ручного и автоматического режимов работы.

В процессе работы модели объекты управляются контроллером, от датчиков в контроллер поступает информация о текущем состоянии процесса.

Рассматриваемый метод позволяет моделировать любую исследуемую систему посредством имеющегося набора первичных элементов, состоящих в определенных функциональной схемой связях. Для описания технологического процесса вводится понятие «Граф», который состоит из узлов и связей между ними. В состав связей входят объекты, которые изменяют свойства связей – проводимость, создают перепад давлений, осуществляют теплообмен и т.д.

Разработанная на основе указанного выше метода система позволяет моделировать физические процессы, связанные с жидкостями и газами и их потоками между емкостями.

Необходимо заметить, что на данном этапе основной целью рассматриваемой системы является ее использование для отладки алгоритмического и прикладного программного обеспечения автоматизированных систем управления, поэтому задача моделирования технологического процесса решается в определенной степени условно. В процессе дальнейшей разработки предполагается максимально возможная идентификация моделей и реальных объектов.

Необходимо заметить, что программы имитационного моделирования в ПАК АСУТП работают совместно с прикладным программным обеспечением АСУТП реальных технологических объектов.

Таким образом, благодаря использованию различных подходов к построению моделей технологических объектов в программно-аппаратном комплексе успешно решаются задачи моделирования и отладки автоматизированных систем управления с целью повышения их функциональности и эффективности.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Шаракианэ А.С., Железнов И.Г.* Испытания сложных систем. – М.: Высшая школа, 1974.
2. *Городецкий В.И., Дмитриев А.К., Марков В.М., Петухов Г.Б., Юсупов Р.М.* Элементы теории испытаний и контроля технических систем. – Л.: Энергия, 1978.

*Статья поступила в редакцию 1 сентября 2008 г.*

UDK 658.012.011.56:681.3.06

### **SIMULATION AND DEBUGGING OF AUTOMATED PROCESS CONTROL SYSTEMS.**

**V.S. Semenov<sup>1</sup>, V.A. Sub<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya str., Samara, 443100

<sup>2</sup> ОАО «Giprovostokheft»  
93, Krasnoarmeyskaya str., Samara 443041

*The article addresses methods of mathematical description and software representation of gas & oil process facility models aimed at simulation and debugging of automated control systems as well as their efficiency improvement.*

**Key words:** *simulation, simulation model, mathematical model, model link, node, link/coil, object, graph, algorithm*

## УСТОЙЧИВОСТЬ И КОЛЕБАНИЯ УПРУГОГО СПУТНИКА ПРИ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОМ УПРАВЛЕНИИ РЕКТИВНЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ <sup>1</sup>

*С.Е. Сомов*<sup>2</sup>

Институт проблем надежности механических систем при СамГТУ  
443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244

*Представляется подход к анализу устойчивости и колебаний упругих слабодемпфированных спутников при неполном дискретном измерении состояния и широтно-импульсном управлении реактивными двигателями.*

**Ключевые слова:** космический аппарат, широтно-импульсное управление

### Введение

Методы пространства состояний стационарных линейных непрерывно-дискретных систем [1] с многократной фильтрацией дискретных измерений доступных координат и дискретным идентификатором состояния [2] применяются к анализу устойчивости и колебаний упругих космических аппаратов при широтно-импульсном управлении реактивными двигателями в начальных режимах.

### Модель многократной системы с запаздыванием

Рассматривается линейный стационарный объект с кусочно-постоянным управлением

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A} \mathbf{x}(t) + \mathbf{B} \mathbf{u}_k(t), \quad \mathbf{u}_k(t) = \mathbf{0}; \quad \mathbf{y}(t) = \mathbf{C} \mathbf{x}(t - T_{zy}); \quad \mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0, \quad t \in T_0 \equiv [t_0, +\infty), \quad (1)$$

где  $t_0 = 0$ , вектор-функция управления  $\mathbf{u}_k(t) = \{u_{jk}(t)\} \in \mathbf{R}^r$  с определением  $\mathbf{u}_k(t_k) = \mathbf{u}_k = \mathbf{v}_{k-1}$  и  $\mathbf{u}_k(t_k + T_{zu}) = \mathbf{u}_{k+1} = \mathbf{v}_k$  формируется в дискретные моменты времени  $t_k + T_{zu}$  и далее при использовании широтно-импульсной модуляции (ШИМ) управления с запаздыванием  $T_{uz}$ , причем  $0 \leq T_{zu} < T_u$ , формируется как  $u_{jk}(t) = U_j^m \text{PWM}(t - T_{zu}, t_k, v_{jk})$ ;  $U_j^m = \text{const} > 0$ ,

$$\text{PWM}(t, t_k, v_{jk}) \equiv \begin{cases} \text{sign } v_{jk} & t \in [t_k, t_k + \tau_{jk}) \\ 0 & t \in [t_k + \tau_{jk}, t_{k+1}) \end{cases}; \quad \tau_{jk} = \text{Sat}(T_u, |v_{jk}|) \equiv \begin{cases} |v_{jk}| & |v_{jk}| \leq T_u \\ T_u & |v_{jk}| > T_u \end{cases}, \quad (2)$$

где  $t_k = k \cdot T_u$ ,  $k \in N_0 \equiv \{0, 1, 2, 3, \dots\}$ , вектор  $\mathbf{x}(t) \in \mathbf{R}^n$  описывает состояние объекта, а вектор  $\mathbf{v}_k = \{v_{jk}\} \in \mathbf{R}^r$  представляет дискретную текущую команду – выход дис-

<sup>1</sup> Работа поддержана РФФИ (гранты 07-08-97611, 08-08-99101, 08-08-00512), Президиумом РАН (программа фундаментальных исследований №22) и Отделением энергетики, механики, машиностроения и процессов управления РАН (программа №15)

<sup>2</sup> Сомов Сергей Евгеньевич, научный сотрудник  
[s\\_somov@mail.ru](mailto:s_somov@mail.ru)

кретного алгоритма управления, формируемый БЦВМ только в дискретные моменты времени  $t_k$ .

Измерение  $\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t - T_{zy})$  состояния объекта (1) является неполным и выполняется только в моменты времени  $t_s = sT_q$ ,  $s \in N_0$  с периодом  $T_q \leq T_u$ , кратным периоду управления  $T_u$ , что при произвольном фиксированном запаздывании  $T_{zy}$  в процессе измерения описывается так:

$$\mathbf{y}_s \equiv \mathbf{y}(t_s) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t'_s); \quad t'_s = t_s - T_{zy}; \quad s \in N_0; \quad \mathbf{y}_s \in R^l, l < n. \quad (3)$$

Для учета запаздывания  $T_{zy}$  при измерении, кратного периоду  $T_q$ , формально вводится дискретная система с вектором состояния  $\mathbf{h}_s$  размерности  $l_z = l(1 + E[n_{zy}])$ :

$$\mathbf{h}_{s+1} = \mathbf{A}_\eta \mathbf{h}_s + \mathbf{B}_\eta \mathbf{C}\mathbf{x}_s; \quad \mathbf{h}_s \in R^{l_z}; \quad \mathbf{y}_s = \mathbf{C}_\eta \mathbf{h}_s, \quad (4)$$

где  $n_{zy} = T_{zy}/T_q$ , а матрицы

$$\mathbf{A}_\eta = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{(l_z-l) \times l} & \mathbf{I}_{l_z-l} \\ \mathbf{0}_{l \times l} & \mathbf{0}_{l \times (l_z-l)} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B}_\eta = \{\mathbf{0}, \mathbf{0}, \dots, \mathbf{I}_l\}; \quad \mathbf{C}_\eta = [\mathbf{I}_l \mid \mathbf{0} \mid \mathbf{0} \mid \dots \mid \mathbf{0}].$$

При реализации алгоритма управления имеется также постоянное запаздывание  $T_{zc}$  ( $0 \leq T_{zc} < T_u$ ), обусловленное затратами времени БЦВМ. Для  $T_q < T_u$  при вычислении вектора  $\mathbf{v}_{k+1} = \mathbf{v}(t_{k+1})$  могут использоваться измерения, не более поздние, чем

$$\mathbf{y}(t'_k) \equiv \mathbf{y}((k+1)T_u - n_{zc}T_q) \equiv \mathbf{y}(kT_u + n_{vc}T_q) = \mathbf{C}\mathbf{x}((k+1)T_u - (n_{zy} + n_{zc})T_q), \quad (5)$$

где  $n_q = T_u/T_q$ ;  $T_{vc} = T_u - T_{zc}$ ;  $n_{vc} = E[T_{vc}/T_q]$ ;  $n_{zc} = n_q - n_{vc}$ ;  $k = E[s/n_q]$ ,  $E[\cdot]$  – символ целой части, причем в общем случае  $T_{zc} \neq T'_{zc} \equiv n_{zc}T_q$ .

Будем считать, что при вычислении вектора дискретной команды управления  $\mathbf{v}_k$  применяется дискретный фильтр рекуррентного типа

$$\tilde{\mathbf{x}}_{s+1} = \tilde{\mathbf{A}}\tilde{\mathbf{x}}_s + \tilde{\mathbf{B}}\mathbf{y}_s, \quad \tilde{\mathbf{x}}_s \in R^m; \quad \tilde{\mathbf{y}}_s = \tilde{\mathbf{C}}\tilde{\mathbf{x}}_s + \tilde{\mathbf{D}}\mathbf{y}_s; \quad \mathbf{y}_s, \tilde{\mathbf{y}}_s \in R^l, \quad s \in N_0 \quad (6)$$

с периодом квантования  $T_q$  и выходным сигналом  $\mathbf{y}(t'_k) = \mathbf{y}_k^F = \tilde{\mathbf{y}}_s /_{s=n_q \cdot k^*}$  при  $t'_k = k^*T_u$ , где  $k^* = E[(s + n_{zc})/n_q]$ , а  $\tilde{\mathbf{A}}$ ,  $\tilde{\mathbf{B}}$ ,  $\tilde{\mathbf{C}}$ ,  $\tilde{\mathbf{D}}$  – матрицы соответствующей размерности. Сигналы  $\mathbf{y}_k^F$  фильтра (6) поступают в дискретный динамический регулятор с идентификатором состояния Луенбергера полного порядка с периодом дискретизации  $T_u$ :

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1} = \mathbf{A}_{0d}\hat{\mathbf{x}}_k + \mathbf{B}_{0d}\mathbf{v}_k + \mathbf{Q}_{0d}\mathbf{y}_k^F, \quad \hat{\mathbf{x}}_k \in R^p; \quad \mathbf{v}_{k+1} = \mathbf{K}_u(\mathbf{r}_{k+1} - \mathbf{c}_u\mathbf{C}\hat{\mathbf{x}}_{k+1}), \quad (7)$$

где  $\mathbf{r}_k = \mathbf{C}\mathbf{x}_k^r$  – сигнал внешней команды,  $\mathbf{r}_k \in R^l$ ,  $\mathbf{r}_k = \{r_{ik}\}$ ;  $\mathbf{x}_k^r$  – вектор эталонных переменных состояния системы;  $\mathbf{c}_u$  – диагональная матрица с элементами, равными 1 либо 0 при замыкании либо размыкании системы по отдельным каналам соответственно, а  $\mathbf{A}_{0d}$ ,  $\mathbf{B}_{0d}$ ,  $\mathbf{Q}_{0d}$  и  $\mathbf{K}_u$  – постоянные матрицы соответствующей размерности.

## Линеаризация системы с ШИМ управления

В случае ШИМ управления (2) с запаздыванием возможно лишь приближенное представление управляемого объекта (1) в виде линейной дискретной модели. При отсутствии запаздывания (при  $T_{zu} = 0$ ) и обозначениях  $\mathbf{x}_k \equiv \mathbf{x}(t_k)$ ;  $\mathbf{u}_k \equiv \mathbf{u}_k(t_k)$  нелинейное разностное уравнение с периодом  $T_u$  получается в виде  $\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{A}_d \mathbf{x}_k + \sum \mathbf{Q}(\tau_{jk}) \mathbf{b}_j U_j^m \text{sign } v_{jk}$ , где

$$\tau_{jk} = \text{Sat}(T_u / |v_{jk}|); \quad \mathbf{A}_d = \exp(T_u \mathbf{A}); \quad \mathbf{Q}(\tau) \equiv \exp((T_u - \tau) \mathbf{A}) \int_0^\tau \exp(t \mathbf{A}) dt.$$

С использованием известных свойств матричной экспоненты и интеграла от нее имеем  $\mathbf{Q}(\tau) = \mathbf{A}_d (\mathbf{I} - (\mathbf{A}\tau)/2! + (\mathbf{A}\tau)^2/3! - \dots) \tau$ . Поэтому в предположении выполнения условий  $\tau_{jk} \ll T_u$ ;  $T_u \ll 2\pi/|\lambda_i|$ , где  $\lambda_i$  – собственные значения матрицы  $\mathbf{A}$  в (1), выделяется линейная часть матриц  $\mathbf{Q}(\tau_{jk})$  по отношению к  $\tau_{jk} = |v_{jk}|$  и выполняется линеаризация ШИМ управления, т.е. приближенное представление векторного разностного уравнения движения объекта в виде  $\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{A}_d \mathbf{x}_k + \mathbf{B}_d \mathbf{v}_k$ , где матрица  $\mathbf{B}_d = \mathbf{A}_d \mathbf{B} \text{diag}\{U_j^m\}$ . Данной модели формально можно придать форму эквивалентной дискретной системы с постоянным значением эквивалентного управления на основном цикле дискретности. В обозначениях  $\mathbf{B}_d^e = \mathbf{B}_d T_u$  и  $\mathbf{u}_k^e = \mathbf{v}_k / T_u$  имеем тождество  $\mathbf{B}_d \mathbf{v}_k = \mathbf{B}_d^e \mathbf{u}_k^e$ , а линеаризованная дискретная модель объекта управления представляется в виде  $\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{A}_d \mathbf{x}_k + \mathbf{B}_d^e \mathbf{u}_k^e$  с эквивалентным управлением  $\mathbf{u}_k^e$ , постоянным на всем полуинтервале  $T_k = [t_k, t_{k+1})$  времени. Используя это понятие, нетрудно убедиться, что линеаризованная дискретная модель объекта (1) с ШИМ управления (2) и учетом запаздывания имеет явный вид

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{A}_d \mathbf{x}_k + \mathbf{A}_d^v \mathbf{B}_d^e \mathbf{u}_k + \mathbf{B}_d^v \mathbf{v}_k; \quad \mathbf{u}_{k+1} = \mathbf{v}_k, \quad k \in N_0, \quad (8)$$

где  $T_{vu} = T_u - T_{zu}$ ;  $\varepsilon_u = T_{zu}/T_u$ ;  $v_u = T_{vu}/T_u = 1 - \varepsilon_u$ ;  $\mathbf{A}_d = \exp(T_u \mathbf{A}) = \mathbf{A}_d^v \mathbf{A}_d^{\varepsilon_u}$ ;

$$\mathbf{A}_d^{\varepsilon_u} = \exp(T_{zu} \mathbf{A}); \quad \mathbf{A}_d^v = \exp(T_{vu} \mathbf{A}); \quad \mathbf{B}_d^e = \int_0^{T_{zu}} \exp(\tau \mathbf{A}) d\tau \cdot \mathbf{B};$$

$$\mathbf{B}_d^v = \int_0^{T_{vu}} \exp(\tau \mathbf{A}) d\tau \cdot \mathbf{B}.$$

## Агрегирование и анализ устойчивости многократных систем

При векторе внешней команды  $\mathbf{r}_k = \mathbf{0}$  определение устойчивости нулевого решения

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{0}, \quad t \in T_0; \quad \tilde{\mathbf{x}}_s = \mathbf{0}; \quad \dot{\mathbf{x}}_k = \mathbf{0}, \quad s, k \in N_0 \quad (9)$$

непрерывно-дискретной системы управления (1) – (7) понимается как прямая композиция понятий устойчивости ее непрерывной и дискретной частей. Для получения линеаризованной модели замкнутой непрерывно-дискретной системы многократного типа, в общем случае с запаздыванием трех типов (при измерении  $T_{zy}$ , при вычисле-

нии команды  $T_{zc}$  и при физическом формировании управления  $T_{zu}$ ), используются методы пространства состояний линейных систем управления [1, 2]. Здесь первая задача состоит в построении эквивалентной дискретной модели системы с главным периодом  $T_u$  как *наибольшим* из имеющихся периодов квантования. Решение этой задачи подробно представлено в [2], в результате получают дискретные модели как замкнутой, так и разомкнутой системы по любому из компонентов выходного вектора относительно любого компонента входного вектора  $\mathbf{r}_k$  системы. Далее для исследования устойчивости и получения гарантированных оценок качества замкнутой системы применяются классические частотные (критерий Найквиста в логарифмическом масштабе псевдочастоты) и спектральные методы линейной теории дискретных систем в векторно-матричном представлении.

### Моделирование и анализ динамических свойств КА

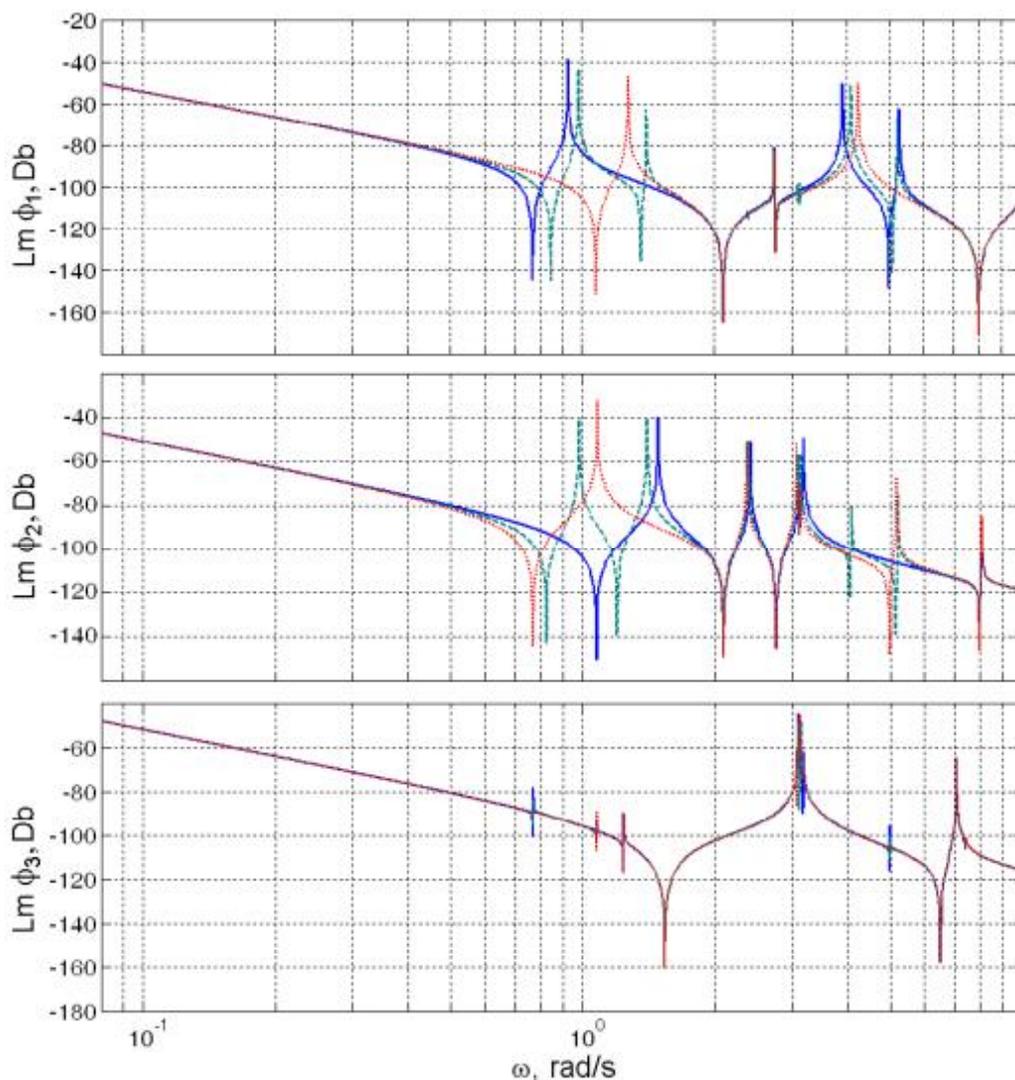
При получении приближенных моделей движения упругих КА наиболее распространен метод Рунге-Кутты-Галеркина в форме метода конечных элементов (МКЭ). Особенность применяемого подхода заключается в представлении упругих колебаний элементов конструкции в виде конечного числа тонов. Здесь расчет форм колебаний выполняется на основе МКЭ с *конденсацией* (редукцией) по тонам колебаний, на ЭВМ вычисляются также матрицы коэффициентов взаимовлияния движений всех подконструкций как абсолютно твердых, включая корпус КА, так и деформируемых тел. Модель динамики углового движения КА с упругими крупногабаритными панелями солнечных батарей (СБ), составленная при упрощающих предположениях [3-6], имеет вид

$$\begin{aligned} \ddot{\mathbf{e}}^o &= \frac{1}{2}(\mathbf{L}^o \mathbf{ow} - \mathbf{K}_o^o \mathbf{L}^o); \\ \mathbf{A}^o &= \begin{bmatrix} \mathbf{J} & \mathbf{D}^q \\ (\mathbf{D}^q)^T & \mathbf{I}_{2n^q} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{A}^o \begin{bmatrix} \mathbf{w} \\ \mathbf{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mathbf{w} \times \mathbf{G} + \mathbf{M}_o^{do} + \mathbf{M}_o \\ -(\delta/\pi) \mathbf{W} \mathbf{q} - \mathbf{W}^2 \mathbf{q} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (10)$$

Здесь  $\mathbf{w}$  – вектор угловой скорости КА в связанной с КА системе координат (ССК)  $Oxuz$ ,  $\mathbf{q}$  – вектор-столбец обобщенных координат упругих колебаний двух панелей СБ,  $\mathbf{J}$  – тензор инерции КА при произвольном фиксированном положении панелей СБ, прямоугольная матрица  $\mathbf{D}^q$  отражает инерционное взаимовлияние движений панелей СБ и корпуса КА,  $\mathbf{G} = \mathbf{J}\mathbf{w} + \mathbf{D}^q \mathbf{q}$  – вектор кинетического момента упругого КА, диагональная матрица  $\mathbf{W} = \text{diag}\{\Omega_s\}$  составлена из парциальных частот  $\Omega_s, s=1 \div n^q$ ,  $\delta$  – логарифмический декремент колебаний панелей СБ,  $\mathbf{M}_o = \mathbf{M}_o^g + \mathbf{M}_o^s$  – суммарный вектор возмущающих моментов относительно центра масс О КА, где  $\mathbf{M}_o^g$  – вектор гравитационного момента и  $\mathbf{M}_o^s$  – вектор момента возмущающих сил солнечного давления;  $\mathbf{M}_o^{do} = \{M_x, M_y, M_z\}$  – вектор-столбец моментов двигательной установки ориентации (ДУО) с ШИМ длительности тяги двигателей. Ориентация ССК  $Oxuz$  относительно орбитальной системы координат (ОСК)  $Ox^o y^o z^o$  определяется кватернионом  $\mathbf{L}^o$  и вектором-столбцом  $\mathbf{f} = \{\phi_1, \phi_2, \phi_3\}$  углов рыскания, крена и тангажа, вектор-столбец  $\mathbf{K}_o^o = \{0, 0, \mathbf{K}_o\}$  представляет вектор угло-

вой скорости  $\dot{\mathbf{M}}_0$  орбитального движения КА в проекциях на оси ОСК и  $v_o(t)$  – истинная аномалия. Орбита КА считается известной, при этом вектор возмущающих моментов  $\mathbf{M}_0$  представляется аналитической зависимостью только от кватерниона  $L^o$  ориентации КА в ОСК.

Динамические свойства упругой модели (1) КА существенно зависят от положения панелей СБ, которое определяется углом  $\gamma \in [0, 2\pi]$ . На рис. 1 представлены логарифмические амплитудные частотные характеристики (ЛАЧХ) непрерывной модели упругого спутника по каналам управления его ориентацией для различных фиксированных положений панелей СБ с шагом  $45^\circ$ .

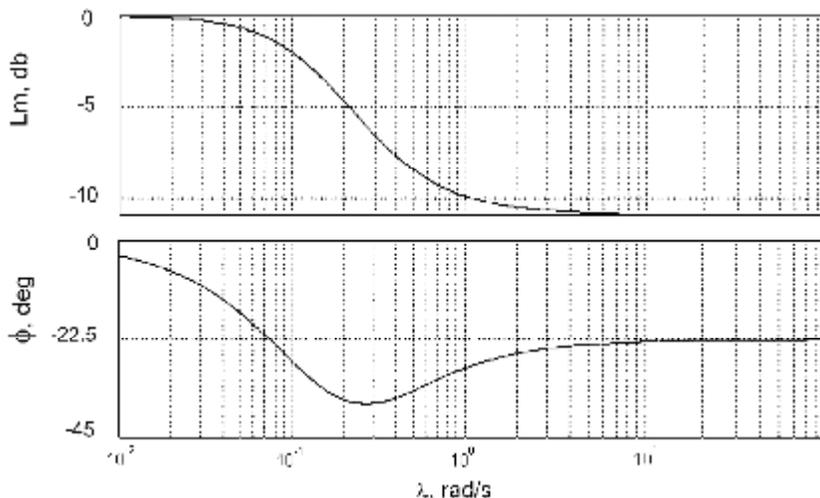


Р и с. 1. ЛАФХ упругого КА по каналам для различных положений панелей СБ

## Модели компонентов системы ориентации и алгоритмы управления

В начальных режимах (успокоения – РУ, начального наведения на Солнце – РНОС и начального наведения на Землю – РНОЗ) система управления ориентацией КА состоит из ДУО на основе шести термokatалитических реактивных двигателей с ШИМ тяги, трех одноосных гироскопических датчиков угловой скорости, оптико-электронных приборов ориентации на Солнце и на Землю, редукторного шагового привода и датчика углового положения двух панелей СБ относительно корпуса КА, а также БЦВМ, реализующей алгоритмы цифрового управления. Непрерывно-дискретные модели этих компонентов контура управления подробно представлены в [3-6].

Цифровые законы формирования ШИМ управления ДУО подробно описаны в [3-6]. Применяемый дискретный фильтр измерений с периодом дискретизации  $T_q$  имеет передаточную функцию  $W_f(z_q) = (1 + b_1)/(1 + b_1 z_q^{-1})$ ,  $z_q \equiv \exp(sT_q)$  с условием  $W_f(1) = 1$ , где  $b_1 \equiv -\exp(-T_q/T_f)$  и  $T_f$  – постоянная времени. Частотная функция  $\tilde{W}_f(j\lambda_q)$  в зависимости от абсолютной псевдочастоты фильтрации  $\lambda_q = (2/T_q)\text{tg}(\omega T_q/2)$  имеет вид  $\tilde{W}_f(j\lambda_q) \equiv \tilde{W}_f(\tilde{s}_q) = K_f^\lambda \cdot (\tilde{s}_q - q_q^\lambda)/(\tilde{s}_q - p_q^\lambda)$ , где коэффициент усиления  $K_f^\lambda = (1 + b_1)/(1 - b_1) < 1$ , а  $q_q^\lambda = -(2/T_q)$  и  $p_q^\lambda = -K_f^\lambda(2/T_q)$  являются ее нулем и полюсом. Псевдочастота фильтрации  $\lambda_q = (2/T_q)\text{tg}(\omega T_q/2)$  связана с абсолютной псевдочастотой управления  $\lambda = (2/T_u)\text{tg}(\omega T_u/2)$  нелинейным соотношением  $\lambda_q = n_q(2/T_u)\text{tg}(\arctg(\lambda T_u/2)/n_q)$ . На рис. 2 представлены ЛЧХ такого рекуррентного дискретного фильтра с постоянной времени  $T_f = 2$  с при периоде дискретности фильтрации измерений  $T_q = T_u/n_q = 1$  с и периоде управления  $T_u = 4$  с. Данный фильтр вносит амплитудное подавление ЛАХ с выходом на постоянный уровень –11 dB, при этом вносимые им отрицательные значения ЛФХ являются вполне приемлемыми в отношении получаемых запасов устойчивости по фазе.



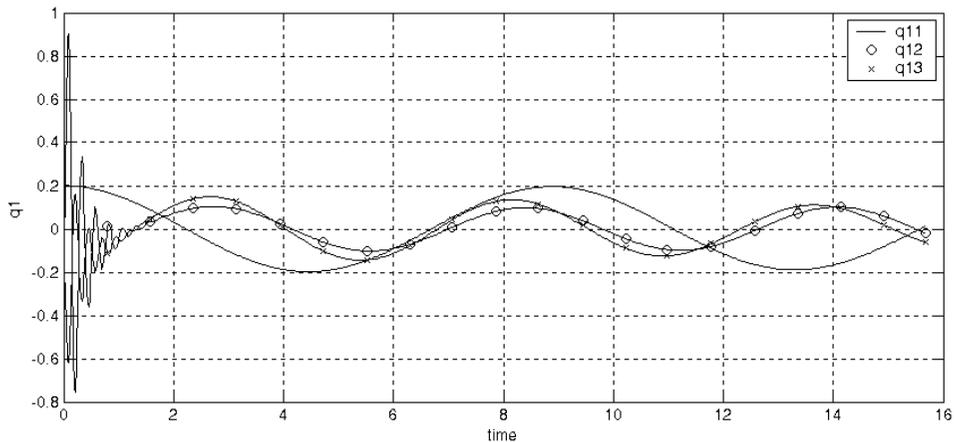
Р и с. 2. ЛЧХ дискретного фильтра

## Анализ устойчивости дискретных моделей каналов

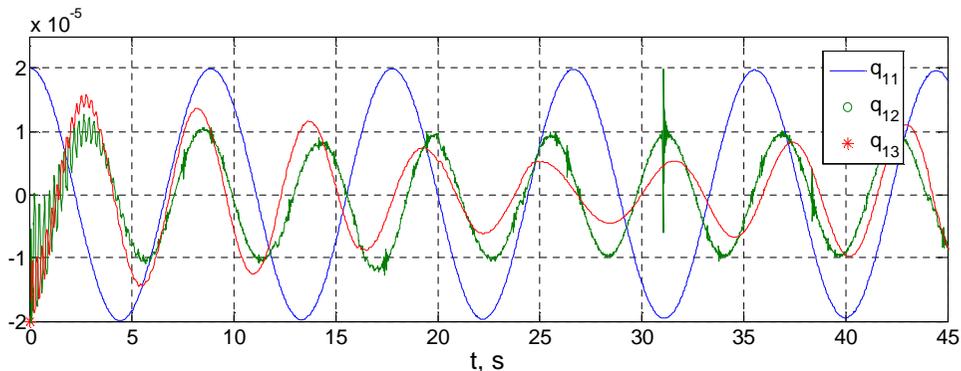
Если не учитывать запаздывание и дискретную фильтрацию, то при векторе состояния  $\mathbf{x}_k = \{\delta\phi_k, \delta\omega_k\}$  упрощенная нелинейная дискретная модель любого канала имеет следующий вид [5]:

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{A}_d \mathbf{x}_k + (\mathbf{b}_d + \delta\mathbf{b}_d(\tau_k)) \text{Sat}(T_u, v_k),$$

где  $v_k = \mathbf{K}_d \mathbf{x}_k$ ;  $\mathbf{K}_d = [\bar{k}^\phi \bar{k}^\omega]$ ;  $\tau_k = \text{Sat}(T_u, |v_k|)$ . Асимптотическая устойчивость положения равновесия  $\mathbf{x}_k = 0$  такой нелинейной дискретной модели доказывается с помощью дискретной функции Ляпунова  $v_k \equiv v(\mathbf{x}_k) = (\mathbf{x}_k^T \mathbf{V} \mathbf{x}_k)^{1/2}$ ;  $\mathbf{V} = (\mathbf{T}^T \mathbf{T})^{-1}$ , где матрица  $\mathbf{T}$  составлена из собственных векторов матрицы  $\mathbf{A}_d^o \equiv \mathbf{A}_d + \mathbf{b}_d \mathbf{K}_d$  замкнутой линейной дискретной системы для ее собственных значений внутри единичного круга. Первая разность такой функции Ляпунова удовлетворяет неравенству  $v_{k+1} \leq (\mu^2 + av_k + bv_k^2)^{1/2} v_k$ , где постоянные положительные параметры  $a$  и  $b$  появляются в процессе мажорирования. Используя данный результат, рассчитываются положительные значения коэффициентов  $\bar{k}^\phi, \bar{k}^\omega$  в законах управления ДУО, при которых будет обеспечена не только асимптотическая устойчивость каждого канала управления КА в соответствующем режиме, но и приемлемые показатели качества как переходного процесса, и точностные характеристики.



Р и с. 3. Колебания первой панели СБ по первым трем тонам в РУ, первые 16 секунд



Р и с. 4. Упругие колебания первой панели СБ в РНОС

## Параметрический синтез дискретных алгоритмов

Параметрический синтез дискретных алгоритмов фильтрации и ШИМ управления слабодемпфированным спутником (декремент  $\delta = 0.005$ ) выполнен на основе тщательной имитации движения его полной непрерывно-дискретной модели в среде Matlab. На рис. 3 и 4 представлены результаты численного моделирования колебаний первой панели СБ в РУ и РНОС.

### Заключение

Представлены результаты анализа устойчивости и колебаний упругих слабодемпфированных спутников при неполном дискретном измерении состояния, многократной фильтрации и широтно-импульсном управлении реактивными двигателями. Установлено, что даже при логарифмическом декременте  $\delta \cong 0.005$  упругих колебаний панелей СБ синтезированные дискретные алгоритмы фильтрации и управления обеспечивают устойчивость и приемлемое качество переходных процессов в начальных режимах ориентации крупногабаритных космических аппаратов.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Стрейц В.* Метод пространства состояний в теории линейных дискретных систем управления. – М.: Наука, 1985. – 296 с.
2. *Сомов Е.И.* Робастная стабилизация упругих космических аппаратов при неполном дискретном измерении и запаздывании в управлении // Изв. РАН. Теория и системы управления. – 2001. – №2. – С. 124-143.
3. *Сомов С.Е.* Нелинейная динамика упругого спутника при начальном успокоении // Изв. Самарского научного центра РАН. – 2005. – Т. 7. – №1. – С. 107-117.
4. *Сомов С.Е.* Динамика успокоения упругого спутника при широтно-импульсной модуляции управления двигателями // Изв. вузов. Авиационная техника. – 2005. – №4. – С. 17-23.
5. *Сомов С.Е.* Анализ колебаний конструкции спутника при наведении на Солнце и Землю с широтно-импульсной модуляцией управления двигателями // Изв. Самарского научного центра РАН. – 2007. – Т. 9. – №3. – С. 813-823.
6. *Сомов С.Е.* Моделирование движения упругого спутника // Актуальные проблемы авиационных и аэрокосмических систем. – 2007. – Т. 12. – №3 (25). – С. 75-84.

*Статья поступила в редакцию 7 марта 2008 г.*

UDK 681.51: 629.78

## STABILITY AND OSCILLATIONS OF A FLEXIBLE SATELLITE AT WIDTH-PULSE CONTROL BY THE JET ENGINES

*S.Ye. Somov<sup>1</sup>*

Research Institute of Mechanical Systems Reliability, Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya str., Samara, 443100

*An approach for analysis of stability and oscillations by the flexible weak-damped satellites at incomplete discrete measurement of the state and a width-pulse control by the jet engines, is presented.*

**Key words** : spacecraft, width-pulse control

---

<sup>1</sup> *Sergey Ye. Somov, researcher.*