

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана»
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Калужский филиал МГТУ имени Н. Э. Баумана»

55 лет
Калужскому филиалу
МГТУ им. Н.Э. Баумана

**НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ
В ПРИБОРО - И МАШИНОСТРОЕНИИ
И РАЗВИТИЕ ИННОВАЦИОННОЙ
ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В ВУЗЕ**

**Материалы
Всероссийской научно-технической конференции**

Том 2



Москва 2014

УДК 378:001.891
ББК 74.58:72
НЗ4

Руководители конференции

А. В. Царьков (директор КФ МГТУ им. Н. Э. Баумана);
А. А. Столяров (зам. директора по научной работе)

Оргкомитет конференции

А. А. Столяров (председатель оргкомитета);
В. В. Лебедев (ученый секретарь);
Е. Н. Малышев; Г. В. Орлик; А. П. Коржавый; А. А. Жинов;
Ю. П. Корнюшин; А. И. Пономарев; А. К. Рамазанов; А. А. Анкудинов;
Б. М. Логинов; В. Г. Косушкин; В. В. Андреев; А. В. Мазин; А. А. Шубин;
А. К. Горбунов; А. В. Максимов; М. В. Астахов; Е. Н. Сломинская;
О. Л. Перерва; Г. И. Ловецкий; А. Ю. Красноглазов; В. М. Алакин

НЗ4 Научное технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе : материалы Всероссийской научно-технической конференции, 25–27 ноября 2014 г. Т. 2. — М. : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. — 324 с.

ISBN 978-5-7038-4078-8 (т. 2)
ISBN 978-5-7038-4076-4

В сборнике материалов Всероссийской научно-технической конференции представлены результаты научных исследований, выполненных учеными в течение ряда лет. Систематизированы материалы различных научных школ. Результатами научных исследований являются новые методы, вносящие вклад в развитие теории, а также прикладные задачи, воплощенные в конструкции и материалы.

УДК 378:001.891
ББК 74.58:72

ISBN 978-5-7038-4078-8 (т. 2)
ISBN 978-5-7038-4076-4

© Коллектив авторов, 2014
© Калужский филиал МГТУ
им. Н. Э. Баумана
© Издательство МГТУ
им. Н. Э. Баумана, 2014

СЕКЦИЯ 5.

**КЛАССИЧЕСКИЕ И СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ
ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ;
АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ
И ПРОИЗВОДСТВОМ**

Ю.П. Корнюшин, Н.Д. Егупов, П.Ю. Корнюшин

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ РЕГУЛЯТОРОВ ПАРОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ТУРБИНЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АППАРАТА МАТРИЧНЫХ ОПЕРАТОРОВ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Предложен алгоритм идентификации параметров - постоянных времени турбины с использованием градиентного метода с настраиваемой моделью. Настраиваемая математическая модель имеет ту же структуру, что и объект идентификации. Критерий идентификации формируется на основе функции потерь, которая представляет собой невязку между левой и правой частями уравнения, описывающего настраиваемую модель. Тем самым удастся избежать необходимости нахождения в явном виде решения нелинейного уравнения для настраиваемой модели. Вместо выходного сигнала в модели используется сигнал, наблюдаемый на выходе идентифицируемого объекта. Поскольку математические модели являются нелинейными, для решения задачи применяется линеаризация Ньютона – Канторовича и аппарат матричных операторов. Рассматриваются особенности вычисления вектора градиента, особенности алгоритма идентификации и его организация. Приведены результаты идентификации двух постоянных времени для математической модели турбины ПТ-12/15-35/10М.

Ключевые слова: идентификация, турбина, градиентный, оператор, критерий, параметры, постоянные времени

Введение. Эффективность функционирования любой системы определяется тем, как работают ее управляющие устройства. Их проектирование предполагает наличие достаточно полной информации о математических моделях объектов управления. Без знания математической модели объекта нельзя синтезировать оптимальные для данной системы регуляторы. В этой связи одной из определяющих задач при проектировании любой системы управления является идентификация ее математической модели. Наиболее часто это параметрическая идентификация. Результаты решения задачи идентификации являются основой для проектирования систем управления, не располагая которыми часто нельзя выполнить ни оптимизацию, ни синтез регуляторов, ни анализа систем управления. Для одних объектов управления идентификация может выполняться при тестовых ис-

следованиях, с последующей обработкой выходных сигналов на заданные испытательные сигналы и построением математической модели. Для других объектов тестовые испытания недопустимы и идентификация может выполняться только в режиме их нормальной эксплуатации. К таким объектам управления относятся энергетические паровые турбины.

Особенностью энергетических турбин является то, что параметры их систем регулирования не являются постоянными в течение всего времени эксплуатации. В зависимости от нагрузки меняется эффективная мощность турбины, соответственно меняются давление, температура, расход пара на турбину, меняются усилия, действующие на клапаны и т.д. Подобного рода отклонения носят, как правило, случайный характер. В заданной по структуре математической модели меняются коэффициенты передачи и постоянные времени отдельных звеньев. Поэтому необходимо при проектировании более совершенных регуляторов более точно знать истинные значения параметров объекта управления.

В работе предлагается алгоритм, позволяющий проводить идентификацию в режиме нормальной эксплуатации объекта.

Отметим также, что рассматриваемый подход применим не только к конкретному рассматриваемому объекту – турбине ПТ-12/15-35/10М, но и к другим турбинам и турбоагрегатам, например, К-8-0,65ПА, К-800-130/3000 [1, 2, 3] поскольку они имеют близкие по структуре математические модели.

Постановка задачи. Полагаем, что математическая модель объекта идентификации - турбины и ее системы регулирования по частоте вращения ротора описывается следующей системой дифференциальных уравнений [4]

$$\begin{cases} T_{\varphi} d\varphi/dt = (1 - \theta)(\xi - \lambda)/\delta - \theta\varphi, \\ T_{\xi} d\xi/dt = \mu - \xi, \\ T_{\mu} d\mu/dt = \begin{cases} 0,5 \frac{z^2}{\Delta z_0} \text{sign} z, & \text{при } |z| \leq \Delta z_0, \\ z - 0,5\Delta z_0 \text{sign} z, & \text{при } |z| > \Delta z_0, \end{cases} \\ T_z \frac{dz}{dt} = -z + \left(-\frac{\varphi}{\delta} - \mu \right). \end{cases} \quad (1)$$

Здесь, φ – относительное изменение частоты вращения ротора турбины; ξ – относительное изменение расхода пара в турбину; μ – относительное отклонение поршня сервомотора; z – относительное отклонение поршня золотника; δ – степень неравномерности системы регулирования; $T_z, T_{\mu}, T_{\xi}, T_{\varphi}$ – соответствующие постоянные времени; λ – относительное отклонение электрической нагрузки генератора, Δz_0 – относительная высота треугольного профиля кромок поршня отсечного золотника сервомотора.

Структурная схема системы регулирования турбины по угловой скорости, изображена на рис. 1.

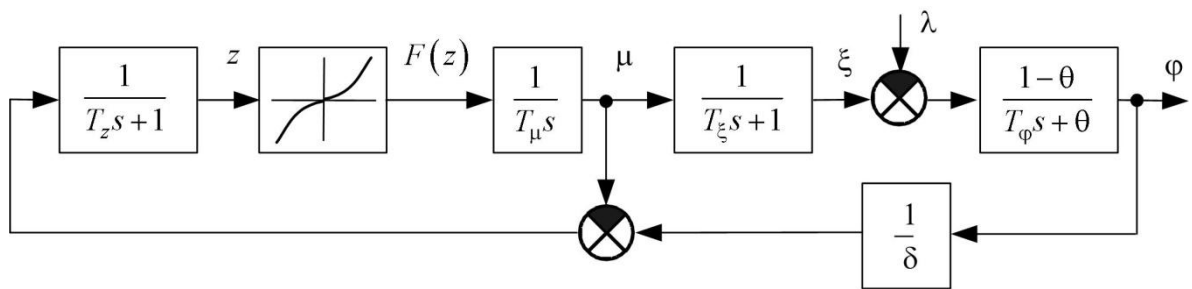


Рис. 1 Структурная схема системы регулирования турбины

Требуется определить постоянные времени сервомотора T_μ и отсечного золотника T_z .

Решение задачи. В основу положена известная концепция идентификации с настраиваемой моделью [5]. Алгоритм идентификации можно пояснить схемой, представленной на рис. 2.

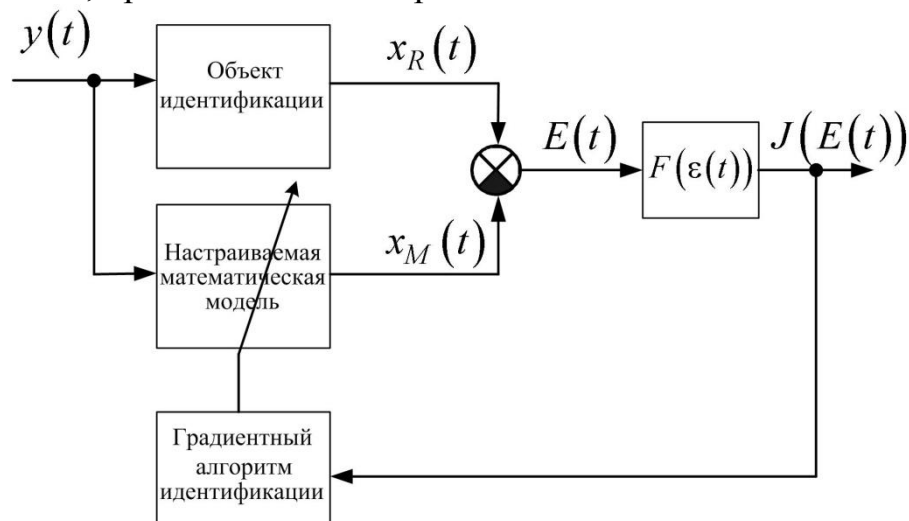


Рис. 2. Схема алгоритма идентификации

Полагаем, что настраиваемая модель имеет ту же структуру, что и объект идентификации. Идентификации подлежат только параметры объекта $\mathbf{P} = [p_1 \ p_2]$, $p_1 = T_\mu$, $p_2 = T_z$. Соответственно настраиваемая модель описывается системой уравнений вида

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{\varphi} \frac{dx_1}{dt} = -\theta x_1 + \frac{(1-\theta)}{\delta} x_2 - \frac{1}{\delta} \lambda, \\ T_{\xi} \frac{dx_2}{dt} = -x_2 + x_3, \\ p_1 \frac{dx_3}{dt} = \begin{cases} 0,5 \frac{z^2}{\Delta z_0} \text{sign} z, \text{ при } |z| \leq \Delta z_0, \\ z - 0,5 \Delta z_0 \text{sign} z, \text{ при } |z| > \Delta z_0, \end{cases} \\ p_2 \frac{dx_4}{dt} = -\frac{1}{\delta} x_1 - x_3 - x_4, \end{array} \right. \quad (2)$$

Под выходами объекта идентификации и настраиваемой модели будем понимать соответствующие их математическим моделям векторы фазовых координат: $\mathbf{X}_R(t) = [\varphi(t) \quad \xi(t) \quad \mu(t) \quad z(t)]^T$ - вектор фазовых координат объекта, $\mathbf{X}_M(t) = [x_1(t) \quad x_2(t) \quad x_3(t) \quad x_4(t)]^T$ - вектор фазовых координат модели. Поскольку вектор $\mathbf{X}_M(t)$ зависит косвенно от вектора настраиваемых параметров $\mathbf{P}$, то можно записать, что $\mathbf{X}_M(t, \mathbf{P})$. Необходимо также отметить, что все элементы вектора $\mathbf{X}_R(t)$, являются измеряемыми.

В ненормированной нормальной форме Коши уравнения запишутся следующим образом

$$\tilde{\mathbf{P}} \cdot \dot{\mathbf{X}}_M(t, \mathbf{P}) = \mathbf{F}(\mathbf{X}_M(t, \mathbf{P})) + \mathbf{B}\lambda(t), \quad (3)$$

где

$$\tilde{\mathbf{P}} = \begin{bmatrix} T_{\varphi} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & T_{\xi} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F}(\mathbf{X}_M(t, \mathbf{P})) = \begin{bmatrix} -\theta x_1 + \frac{(1-\theta)}{\delta} x_2 \\ -x_2 + x_3 \\ 0,5 \frac{z^2}{\Delta z_0} \text{sign} z, \text{ при } |z| \leq \Delta z_0, \\ z - 0,5 \Delta z_0 \text{sign} z, \text{ при } |z| > \Delta z_0, \\ -\frac{1}{\delta} x_1 - x_3 - x_4 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\delta} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T.$$

Очевидным является тот факт, что выходной сигнал настраиваемой модели зависит от вектора настраиваемых параметров $\mathbf{P}$. Согласно алгоритма идентификации (рис. 2.) разность выходных сигналов объекта и настраиваемой модели образует невязку

$$\mathbf{E}(t, \mathbf{P}) = \mathbf{X}_R(t) - \mathbf{X}_M(t, \mathbf{P}).$$

Для оценки соответствия настраиваемой модели идентифицируемому объекту используем следующий критерий качества идентификации

$$J(\mathbf{P}) = F(\mathbf{E}(t, \mathbf{P})). \quad (4)$$

Здесь $F(\mathbf{E}(t, \mathbf{P}))$ - функция потерь, которую можно принять в виде

$$F(\mathbf{E}(t, \mathbf{P})) = \int_{t_i}^{t_{i+1}} (\mathbf{X}_R(t) - \mathbf{X}_M(t, \mathbf{P}))^T (\mathbf{X}_R(t) - \mathbf{X}_M(t, \mathbf{P})) dt,$$

$\Delta t = (t_i, t_{i+1})$ - интервал времени, на котором выполняется один шаг итерационного процесса идентификации.

В соответствии с отмеченным, критерий качества идентификации принимает вид

$$J(\mathbf{P}) = F(\mathbf{X}_R(t), \mathbf{X}_M(t, \mathbf{P})). \quad (5)$$

Чем меньше значение функции потерь, тем выше качество идентификации.

Однако данная функция потерь требует нахождения в явном виде вектора фазовых координат модели $\mathbf{X}_M(t, \mathbf{P})$.

Более эффективной, с точки зрения реализации градиентного метода идентификации, является функция потерь, формируемая как невязка между левой и правой частями уравнения (3). В данном случае необходимо вместо выходного сигнала модели $\mathbf{X}_M(t)$ использовать сигнал, наблюдаемый на выходе идентифицируемого объекта $\mathbf{X}_R(t)$. То есть функцию потерь представить в виде

$$F(\mathbf{X}_R(t), \mathbf{X}_M(t, \mathbf{P})) = \int_{t_i}^{t_{i+1}} \left[\left(\tilde{\mathbf{P}} \cdot \dot{\mathbf{X}}_R(t) - \mathbf{F}(\mathbf{X}_R(t)) - \mathbf{B}\lambda(t) \right)^T \times \right. \\ \left. \times \left(\tilde{\mathbf{P}} \cdot \dot{\mathbf{X}}_R(t) - \mathbf{F}(\mathbf{X}_R(t)) - \mathbf{B}\lambda(t) \right) \right] dt. \quad (6)$$

Критерий качества идентификации по-прежнему имеет форму (5).

Полагаем, что критерий качества идентификации, представляющий собой функцию от идентифицируемых параметров, дважды дифференцируем по своим аргументам. Тогда условия оптимальности искомых параметров $\mathbf{P}$ запишутся следующим образом

$$\nabla J(\mathbf{P}) = \left[\frac{\partial J(\mathbf{P})}{\partial p_1} \quad \frac{\partial J(\mathbf{P})}{\partial p_2} \right]^T = 0, \quad (7)$$

$$\nabla \nabla^T J(\mathbf{P}) = \left\{ \frac{\partial^2 J(\mathbf{P})}{\partial p_i \partial p_j} \right\}_{i,j=1}^2 > 0. \quad (8)$$

Полагаем также, что достаточное условие оптимальности (8) выполнено. Тогда можно построить следующий простейший градиентный алгоритм идентификации

$$\mathbf{P}_{i+1} = \mathbf{P}_i - \rho_i \nabla J(\mathbf{P}_i), \quad (9)$$

где ρ_i - коэффициент, изменяющий скорость движения по градиенту.

Задача, как видим, сводится к выражению вектора градиента $\nabla J(\mathbf{P})$ через искомые параметры настраиваемой модели.

Вычисление вектора градиента $\nabla J(\mathbf{P})$. Недостатком рассмотренной функции потерь вида (6) является то, что в подынтегральное выражение входит производная измеряемого сигнала $\dot{\mathbf{X}}_R(t)$. Выходной сигнал объекта, как правило, измеряется с использованием цифровых датчиков, поэтому при вычислении его производных возможны большие погрешности. Последние вносят ошибки в результаты идентификации. Эффект тем более усиливается тем, что вектор измеряемых фазовых координат содержит четыре элемента.

Избежать операции дифференцирования сигнала $\mathbf{X}_R(t)$ можно, если преобразовать функцию потерь вида (6). Для этого необходимо воспользоваться линеаризацией Ньютона – Канторовича и методом матричных операторов.

Метод линеаризации Ньютона – Канторовича требует, чтобы нелинейные зависимости в математической модели имели аналитический вид. Наличие нелинейной зависимости в реальной системе обусловлено конструкцией поршня отсечного золотника сервомотора. Нелинейная характеристика отсечного золотника является нечетно симметричной. При малых значениях сигнала нелинейная характеристика изменяется по квадратичному закону, при больших значениях по линейному закону. Хотя характеристика нелинейного элемента и содержит точки разрыва, однако может быть хорошо аппроксимирована аналитической полиномиальной зависимостью с нечетной высшей степенью аргумента вида

$$F(z) = \sum_{i=0}^l c_i z^i. \quad (10)$$

Для рассматриваемой нелинейности с параметром $\Delta z_0 = 0,3$, для $l = 5$ имеют место коэффициенты c_i со следующими значениями: $c_0 = 0,0$; $c_1 = 0,475$; $c_2 = 0,0$; $c_3 = 1,295$; $c_4 = 0,0$; $c_5 = -0,832$.

Полагаем, что в настраиваемой модели нелинейная характеристика является аналитической вида (10). Тогда настраиваемая модель описывается системой уравнений (3) с правой частью $\mathbf{F}(\mathbf{X}_M(t, \mathbf{P}))$ вида

$$\mathbf{F}(\mathbf{X}_M(t, \mathbf{P})) = \begin{bmatrix} -\theta x_1 + \frac{(1-\theta)}{\delta} x_2 \\ -x_2 + x_3 \\ \sum_{i=0}^5 c_i x_4^i \\ -\frac{1}{\delta} x_1 - x_3 - x_4 \end{bmatrix}.$$

Линеаризация Ньютона – Канторовича достаточно подробно рассмотрена в [6]. С использованием данной процедуры можно перейти от уравнения (3) к последовательности уравнений

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{P}} \cdot \dot{\mathbf{X}}_{M_{k+1}}(t) &= \mathbf{A}^k(t) \mathbf{X}_{M_{k+1}}(t) + \mathbf{B} \lambda(t) + \mathbf{Z}^k(t), \\ \mathbf{X}_{M_{k+1}}(t_i) &= \mathbf{X}_0, \quad k = 0, 1, 2, \dots \end{aligned} \quad , \quad (11)$$

где $\mathbf{A}^k(t) = \mathbf{F}'_{\mathbf{X}}(\mathbf{X}_{M_k}(t))$,

$$\mathbf{Z}^k(t) = -\mathbf{A}^k(t) \mathbf{X}_{M_k}(t) + \mathbf{F}(\mathbf{X}_{M_k}(t)), \quad \mathbf{F}'_{\mathbf{X}}(\mathbf{X}_{M_k}(t)) = \left\{ \frac{\partial f_i}{\partial x_j^k} \right\}_{i,j=1}^4.$$

Уравнения (11) являются линейными на каждом шаге итерационного процесса по отношению к искомому решению $\mathbf{X}_{M_k}(t)$.

Для рассматриваемой настраиваемой модели матрица $\mathbf{A}^k(t)$ и вектор $\mathbf{Z}^k(t)$ имеют вид

$$\mathbf{A}^k(t) = \begin{bmatrix} -\theta & \frac{(1-\theta)}{\delta} & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sum_{i=1}^l i c_i x_{4k}^{i-1}(t) \\ -\frac{1}{\delta} & 0 & -1 & -1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{Z}^k(t) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \sum_{i=0}^l (1-i) c_i x_{4k}^i(t) & 0 \end{bmatrix}^T.$$

С учетом (11) критерий качества идентификации можно записать следующим образом

$$J(\mathbf{P}) = \int_{t_i}^{t_{i+1}} \left[\begin{aligned} & \left(\tilde{\mathbf{P}} \cdot \dot{\mathbf{X}}_R(t) - \mathbf{A}^k(t) \mathbf{X}_R(t) - \mathbf{B} \lambda(t) - \mathbf{Z}^k(t) \right)^T \times \\ & \times \left(\tilde{\mathbf{P}} \cdot \dot{\mathbf{X}}_R(t) - \mathbf{A}^k(t) \mathbf{X}_R(t) - \mathbf{B} \lambda(t) - \mathbf{Z}^k(t) \right) \end{aligned} \right] dt \quad (12)$$

Уравнения (11) а также критерий (12), можно параметризовать и тем самым избежать процедуры дифференцирования сигнала, наблюдаемого на выходе идентифицируемого объекта. Для этого воспользуемся аппаратом матричных операторов [7].

Представим сигналы $\mathbf{X}_R(t)$, $\lambda(t)$, функцию $\mathbf{Z}^k(t)$ и начальные условия $\mathbf{X}_R(t_i)$ в виде разложения по заданному ортонормированному базису $\Phi = \{\varphi_j(t) : j = \overline{1, \infty}, t \in [t_i, t_{i+1}]\}$:

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_R(t) &= \mathbf{F} \mathbf{T}_4(t) \hat{\mathbf{C}}^{\mathbf{X}}, & \lambda(t) &= \mathbf{F} \mathbf{T}_1(t) \hat{\mathbf{C}}^{\lambda}, & \mathbf{Z}^k(t) &= \mathbf{F} \mathbf{T}_4(t) \hat{\mathbf{C}}^{\mathbf{Z}}, \\ \mathbf{X}(t_i) &= \mathbf{F} \mathbf{T}_4(t_i) \hat{\mathbf{C}}^{\mathbf{X}_0}. \end{aligned}$$

$$\text{Здесь} \quad \mathbf{F} \mathbf{T}_4(t) = \text{diag} \left(F T^1(t) \quad F T^2(t) \quad F T^3(t) \quad F T^4(t) \right),$$

$$\mathbf{F} \mathbf{T}_1(t) = F T^1(t),$$

$$F T^1(t) = \dots = F T^4(t) = [\varphi_1(t) \varphi_2(t) \dots \varphi_N(t)].$$

Спектральные характеристики $\hat{\mathbf{C}}^{\mathbf{X}}$, $\hat{\mathbf{C}}^{\mathbf{Z}}$, $\hat{\mathbf{C}}^{\lambda}$ имеют вид

$$\hat{\mathbf{C}}^{\mathbf{X}} = [\mathbf{C}^{x_1} \mathbf{C}^{x_2} \mathbf{C}^{x_3} \mathbf{C}^{x_4}]^T, \quad \hat{\mathbf{C}}^{\mathbf{Z}} = [\mathbf{C}^{z_1} \mathbf{C}^{z_2} \mathbf{C}^{z_3} \mathbf{C}^{z_4}]^T,$$

$$\text{где } \mathbf{C}^{x_i} = [C_1^{x_i} C_2^{x_i} \dots C_N^{x_i}]^T, \quad \mathbf{C}^{z_i} = [C_1^{z_i} C_2^{z_i} \dots C_N^{z_i}]^T, \quad \hat{\mathbf{C}}^{\lambda} = [C_1^{\lambda} C_2^{\lambda} \dots C_N^{\lambda}]^T,$$

$$C_j^{x_k} = \int_{t_i}^{t_{i+1}} x_k(t) \varphi_j(t) dt, \quad j = \overline{1, N}, \quad k = \overline{1, 4}, \quad \hat{\mathbf{C}}_j^{\lambda} = \int_{t_i}^{t_{i+1}} \lambda(t) \varphi_j(t) dt, \quad j = \overline{1, N},$$

$$C_j^{z_k} = \int_{t_i}^{t_{i+1}} z_k(t) \varphi_j(t) dt, \quad j = \overline{1, N}, \quad k = \overline{1, 4}.$$

Уравнение (11) и критерий (12) в этом случае запишется следующим образом

$$\hat{\mathbf{P}} \cdot (\hat{\mathbf{C}}^{\mathbf{X}} - \hat{\mathbf{C}}^{\mathbf{X}_0}) = \mathbf{K}^{\mathbf{A}} \hat{\mathbf{C}}^{\mathbf{X}} + \mathbf{K}^{\lambda} \hat{\mathbf{C}}^{\lambda} + \mathbf{K}^{\mathbf{Z}} \hat{\mathbf{C}}^{\mathbf{Z}}, \quad (13)$$

$$\begin{aligned} J(\mathbf{P}) &= \left(\hat{\mathbf{P}} \cdot (\hat{\mathbf{C}}^{\mathbf{X}} - \hat{\mathbf{C}}^{\mathbf{X}_0}) - \mathbf{K}^{\mathbf{A}} \hat{\mathbf{C}}^{\mathbf{X}} - \mathbf{K}^{\lambda} \hat{\mathbf{C}}^{\lambda} - \mathbf{K}^{\mathbf{Z}} \hat{\mathbf{C}}^{\mathbf{Z}} \right)^T \times \\ &\times \left(\hat{\mathbf{P}} \cdot (\hat{\mathbf{C}}^{\mathbf{X}} - \hat{\mathbf{C}}^{\mathbf{X}_0}) - \mathbf{K}^{\mathbf{A}} \hat{\mathbf{C}}^{\mathbf{X}} - \mathbf{K}^{\lambda} \hat{\mathbf{C}}^{\lambda} - \mathbf{K}^{\mathbf{Z}} \hat{\mathbf{C}}^{\mathbf{Z}} \right) \end{aligned} \quad (14)$$

где

$$\hat{\mathbf{P}} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{T}}_{\varphi} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \tilde{\mathbf{T}}_{\xi} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \tilde{\mathbf{P}}_1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \tilde{\mathbf{P}}_2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{0} = \{0\}_{i,j=1}^4,$$

$$\tilde{\mathbf{T}}_{\varphi} = \text{diag}(T_{\varphi} \quad T_{\varphi} \quad T_{\varphi} \quad T_{\varphi}), \quad \tilde{\mathbf{T}}_{\xi} = \text{diag}(T_{\xi} \quad T_{\xi} \quad T_{\xi} \quad T_{\xi}),$$

$$\tilde{\mathbf{P}}_1 = \text{diag}(p_1 \quad p_1 \quad p_1 \quad p_1), \quad \tilde{\mathbf{P}}_2 = \text{diag}(p_2 \quad p_2 \quad p_2 \quad p_2).$$

Начальные условия определяют исходный (начальный) запас энергии имеющийся у объекта, перед началом его работы. Поскольку в процессе функционирования объекта энергия диссипирует, то можно положить начальные условия нулевыми и несколько упростить критерий (14)

$$J(\mathbf{P}) = \left(\hat{\mathbf{P}} \cdot \hat{\mathbf{C}}^{\mathbf{X}} - \mathbf{K}^A \hat{\mathbf{C}}^{\mathbf{X}} - \mathbf{K}^{\lambda} \hat{\mathbf{C}}^{\lambda} - \mathbf{K}^Z \hat{\mathbf{C}}^Z \right)^T \times$$

$$\times \left(\hat{\mathbf{P}} \cdot \hat{\mathbf{C}}^{\mathbf{X}} - \mathbf{K}^A \hat{\mathbf{C}}^{\mathbf{X}} - \mathbf{K}^{\lambda} \hat{\mathbf{C}}^{\lambda} - \mathbf{K}^Z \hat{\mathbf{C}}^Z \right). \quad (15)$$

В выражения (13) и (15) входят матрицы $\mathbf{K}^A, \mathbf{K}^{\lambda}, \mathbf{K}^Z$, представляющие собой спектральные характеристики ядер

$$\mathbf{K}_X(t, \tau) = \left\{ K_{ij}^X(t, \tau) = 1(t, \tau) a_{ij}^k(\tau) \right\}_{i,j=1}^4,$$

$$\mathbf{K}_{\lambda}(t, \tau) = \left\{ K_i^{\lambda}(t, \tau) = 1(t - \tau) b_i \right\}_{i=1}^4,$$

$$\mathbf{K}_Z(t, \tau) = \left\{ K_i^Z(t, \tau) = 1(t, \tau) \right\}_{i=1}^4$$

интегрального уравнения Фредгольма 2-го рода

$$\tilde{\mathbf{P}} \cdot (\mathbf{X}_{Mk+1}(t) - \mathbf{X}_{Mk+1}(0)) =$$

$$= \int_0^T \mathbf{K}_X(t, \tau) \mathbf{X}_{Mk+1}(\tau) d\tau + \int_0^T \mathbf{K}_{\lambda}(t, \tau) \lambda(\tau) d\tau + \int_0^T \mathbf{K}_Z(t, \tau) \mathbf{Z}^k(\tau) d\tau,$$

следующего из дифференциального уравнения (11) при интегрировании последнего. Соответственно матрицы $\mathbf{K}^A, \mathbf{K}^{\lambda}, \mathbf{K}^Z$ имеют вид:

$$\mathbf{K}^A = \left\{ \tilde{\mathbf{A}}_{ij}^x \right\}_{i,j=1}^4, \quad \mathbf{K}^{\lambda} = \left\{ \tilde{\mathbf{B}}_i^{\lambda} \right\}_{i=1}^4, \quad \mathbf{K}^Z = \left\{ \tilde{\mathbf{Z}}_i \right\}_{i=1}^4,$$

$$\tilde{\mathbf{A}}_{ij}^x = \left\{ a_{sp}^{ij} \right\}_{s,p=1}^N, \quad \tilde{\mathbf{B}}_i^{\lambda} = \left\{ b_{sp}^i \right\}_{s,p=1}^N, \quad \tilde{\mathbf{Z}}_i = \left\{ z_{sp}^i \right\}_{s,p=1}^N.$$

Элементы матриц $\tilde{\mathbf{A}}_{ij}^x$, $\tilde{\mathbf{B}}_i^{\lambda}$, и $\tilde{\mathbf{Z}}_i$ определяют по формулам:

$$a_{sp}^{ij} = \int_{t_0}^T \int_{t_0}^T K_{ij}^X(t, \tau) \varphi_s(t) \varphi_p(\tau) d\tau dt, \quad b_{sp}^i = \int_{t_0}^T \int_{t_0}^T K_i^{\lambda}(t, \tau) \varphi_s(t) \varphi_p(\tau) d\tau dt,$$

$$z_{sp}^i = \int_{t_0}^T \int_{t_0}^T K_i^Z(t, \tau) \varphi_s(t) \varphi_p(\tau) d\tau dt.$$

Найденные спектральные характеристики однозначно определяют критерий качества идентификации. Выполняя операцию вычисления вектора $\nabla J(\mathbf{P})$, имеем

$$\nabla J(\mathbf{P}) = \frac{\partial \hat{\mathbf{P}}}{\partial \mathbf{P}} \cdot (\hat{\mathbf{P}} \cdot \hat{\mathbf{C}}^X - \mathbf{K}^A \hat{\mathbf{C}}^X - \mathbf{K}^\lambda \hat{\mathbf{C}}^\lambda - \mathbf{K}^Z \hat{\mathbf{C}}^Z) \quad (15)$$

Таким образом, все необходимые элементы для выполнения идентификации определены.

Особенности алгоритма идентификации и его организация. Назначение системы регулирования - стабилизация частоты вращения ротора турбины. Если электрическая нагрузка генератора не будет изменяться, то система регулирования через определенное время выполнит свою задачу - частота вращения ротора будет стабилизирована. Поэтому даже при «ненастроенных» параметрах модели может возникнуть такая ситуация, что выходные сигналы объекта и модели будут не только постоянными, но и равными. В этом случае функция потерь примет нулевое значение и возникнет эффект достижения поставленной цели, хотя задача идентификации не была решена. Таким образом, обязательным условием правильно решенной задачи является изменчивость электрической нагрузки генератора в процессе идентификации. Алгоритм реализуется следующим образом. Выбирается интервал времени, на котором выполняется один шаг итерационного процесса идентификации $\Delta t = (t_i, t_{i+1})$. Величина Δt может выбираться экспериментально, либо задаваться соизмеримой или несколько большей, чем максимальная идентифицируемая постоянная времени. Это связано с тем, чтобы за заданное время не прошли переходные процессы в случае установления постоянного значения электрической нагрузки. За заданный интервал времени Δt вычисляются элементы градиента по формуле (15) и выполняется один шаг итерационного градиентного алгоритма идентификации, определенного формулой (9). Далее процесс повторяется. Условием окончания итерационного процесса является достижение заданной точности. Другой особенностью является то, что организовывать итерационный процесс, предписанный линеаризацией Ньютона – Канторовича нет необходимости, поскольку в выражение для критерия идентификации входит выходной сигнал объекта, а он всегда представляет собой точное решение для системы уравнений (2).

Пример. Приведем результаты идентификации указанных выше двух постоянных времени T_μ и T_z . В качестве базиса используются функции Уолша ($N = 32$).

Начальные значения для постоянных времени $T_\mu = 0,04$ с. и $T_z = 0,01$ с.

Известные параметры объекта – турбины ПТ-12/15-35/10М: $T_{\xi} = 0,12$ с., $T_{\varphi} = 6$ с., $\delta = 0,04$, $\Delta z_0 = 0,3$, $\theta = 0,05$ - коэффициент самовыравнивания.

Интервал времени, на котором проводится идентификация $\Delta t = 0,1$ с. Параметры итерационного процесса: $\rho_1 = 0,0085$ $\rho_2 = 0,005$.

На рис. 3., 4. приведены графики изменения значений идентифицируемых параметров - постоянных времени в процессе итераций.

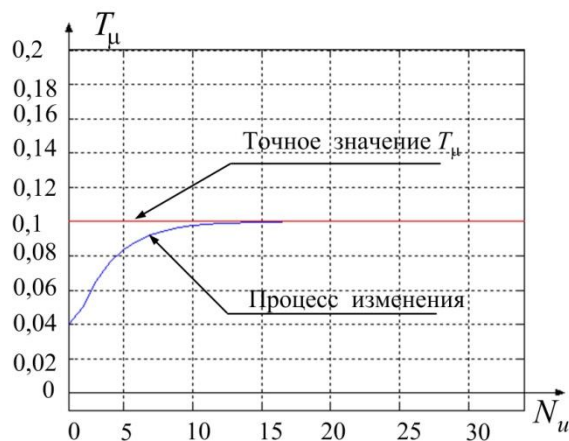


Рис.3. Изменение значения постоянной времени T_{μ} в процессе итераций

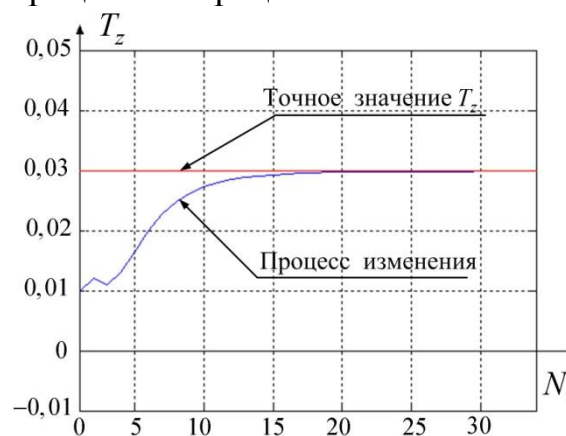


Рис.4. Изменение значения постоянной времени T_z в процессе итераций

Выводы. Из графиков видно, что предложенный алгоритм обеспечивает необходимое качество идентификации. Потребовалось лишь $n = 20$ итераций для получения заданной точности. Традиционно используемые в системах регулирования данного класса турбин постоянные времени имеют значения близкие к значениям $T_{\mu} = 0,1$ с., $T_z = 0,03$ с. Как видим, идентификация выполнена вполне адекватно текущей ситуации работы турбины.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Калужской области (гранты № 14-41-03071, № 14-48-03013).

ЛИТЕРАТУРА

1. Мельников Д.В., Фишер М.Р. Математическая модель контура регулирования частоты вращения ротора паровой турбины К-800-130/3000. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение, Спец. вып. "Энергетическое и транспортное машиностроение"*, 2011, с. 197–215.
2. Корнюшин Ю.П., Мельников Д.В., Егупов Н.Д., Корнюшин П.Ю. Исследование и расчет параметров элементов системы регулирования частоты вращения ротора турбины с учетом параметрической неопределенности математической модели. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2014, № 1, с. 78-93.
3. Мельников Д.В., Егупов Н.Д. Синтез систем регулирования энергетических турбин в условиях параметрической неопределенности. *Известия*

Тулъского государственного университета. Технические науки, 2011, № 5-1. с. 108-113.

4. Калашников А.А. *Динамика регулирования турбин*. Москва, Энергоатомиздат, 1999, 328 с.

5. Цыпкин Я.З. *Основы информационной теории идентификации*. Москва, Наука, 1984, 320 с.

6. Гайский В.А., Егупов Н.Д., Корнюшин Ю.П. *Применение функций Уолша в системах автоматизации научных исследований*. Киев, Наукова думка, 1993, 212 с.

7. Пупков К.А., Егупов Н.Д., ред. *Методы инженерного синтеза сложных систем управления: аналитический аппарат, алгоритмы приложения в технике. Часть II. Вычислительно-аналитический эксперимент: аппарат матричных операторов и вычислительные технологии*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012, 416 с.

Корнюшин Юрий Петрович – д-р техн. наук, заведующий кафедрой “Системы автоматического управления” КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: theroland@yandex.ru.

Егупов Николай Дмитриевич – д-р техн. наук, профессор кафедры “Системы автоматического управления” КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: theroland@yandex.ru.

Корнюшин Петр Юрьевич – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: kornyushin.petr@gmail.com.

Yu. P. Korniushein, N.D. Egupov, P.Yu. Kornyushin

IDENTIFICATION OF THE PARAMETERS OF EXECUTIVE REGULATORS DEVICES OF STEAM ENERGY TURBINE WITH USING APPARATUS MATRIX OPERATOR

Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch, Kaluga, 248000, Russia

Proposed identification algorithm of parameters - time constants of the turbine using the gradient method with a custom model. Customizable mathematical model has tighter structure as object identification. Criterion of identification is based on the loss function, which is the discrepancy between the left and right sides of the equation, which describes the custom model. Thereby is avoided the need to find in an explicit form solution of a nonlinear equation for the configurable model. Instead, the output of the model used by the signal observed at the output of the identified object. As mathematical models are nonlinear, to solve the problem applies lineariza-

tion Newton - Kantorovich and unit matrix operators. The features of computation the gradient vector, features of the identification algorithm and its organization. The results of the identification of the two time constants for the mathematical model of turbine PT-12 / 15-35 / 10M.

Keywords: *identification, turbine, gradient operator, criteria, parameters, time constants.*

REFERENCES

1. Mel'nikov D.V., M.R. Fisher A mathematical model of the speed control loop steam turbine rotor K 800-130 / 3000. Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Ser. "Machine construction", Spec. MY. "The power and transport engineering," 2011, p. 197-215.
2. Korniyushin Yu.P., Mel'nikov D.V., Egupov N.D., Korniyushin P.Yu. Studying and calculating parameters of components of the rotation speed control system of a turbine rotor taking into account the parametric uncertainty of the mathematical model. Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Ser. "Natural Sciences", 2014, № 1, p. 78-93.
3. Mel'nikov D.V., Egupov N.D. Synthesis of control systems of power turbines under parametric uncertainty. Proceedings of the Tula State University. Technical science, 2011, № 5-1. p. 108-113.
4. Kalashnikov A.A. Dynamics turbine control. Moscow, Energoatomizdat, 1999, 328 p.
5. Zipkin Y.Z. Foundations of the theory of identification. Moscow, Nauka, 1984, 320 p.
6. Gaisky V.A., Egupov N.D., Korniyushin Yu.P. Application of the Walsh functions in automation research. Kiev, Naukova Dumka, 1993, 212 p.
7. Pupkov K.A., Egupov N.D. Ed. Methods for the synthesis of complex engineering systems management: an analytical apparatus, algorithms, applications in engineering. Part II. Computational and analytical experiment: The unit matrix operators and the computational technology. Moscow, Publishing House of the BMSTU, 2012, 416 p.

Korniushin Yu.P., Dr. Sci. (Eng.), the Head of the Automatic control systems Department of Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University. E-mail: theroland@yandex.ru.

Egupov N.D., Dr. Sci. (Eng.), professor of the Automatic control systems Department of Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University. E-mail: theroland@yandex.ru.

Korniyushin P.Yu., Post-graduate of Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University. E-mail: korniyushin.petr@gmail.com.

КЛАССИФИКАЦИЯ СПЕКТРОВ, ОСНОВАННАЯ НА ВЕЙВЛЕТАХ И МЕТОДАХ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Данная статья представляет собой исследование возможности классификации сигналов на основе вейвлет преобразования и методов машинного обучения. Применение вейвлет анализа в данной работе рассматривается с позиций использования его как инструмента, с помощью которого можно получить признаковое пространство для последующей разработки алгоритмов классификации. Для признаков, основанных на вейвлетах, значение выходного спектра вейвлет разложения обучающих образцов получается с помощью двухуровневого вейвлет разложения. В качестве алгоритма классификации используется классификатор минимального расстояния (также называемый классификатором ближайших соседей). Мерой оценки близости между объектами является метрика, или способ задания расстояния - евклидово расстояние. Экспериментальные результаты показывают, что набор признаков на основе вейвлетов может применяться при классификации.

Ключевые слова: Вейвлет, классификация, спектры

Введение. Классификация является из одной важнейшей задачей анализа данных.

Классификацию данных можно рассматривать как процесс, состоящий из двух этапов. На первом этапе строится модель, описывающая предварительно определенный набор классов. Модель строится на основе анализа записей множества данных, содержащих признаки объектов и соответствующую им метку класса. Такое множество называется обучающей выборкой. Поскольку метка класса для каждого примера обучающей выборки предварительно задана, построение классификационной модели часто называют обучением с учителем. В процессе обучения формируются правила, по которым производится отнесение объекта к одному из классов.

На втором этапе модель применяется для классификации новых, ранее неизвестных объектов и наблюдений. Перед этим оценивается точность построенной классификационной модели. Одним из наиболее простых способов такой проверки является использование тестового множества. Из доступного набора данных случайным образом выбирается подмножество примеров (5-10 % от общего объема), которые не используются для настройки параметров модели, а подаются на ее вход для проверки результа-

тов обучения. Заданный класс каждого тестового примера сравнивается с классом, к которому пример был отнесен моделью. Точность модели, оцененная с помощью тестового множества, будет определяться процентом правильно классифицированных тестовых примеров [1].

Целью работы является определение принадлежности сигнала к одному из классов.

Схема классификации. Применение вейвлет-анализа в данной работе рассматривается с позиций использования его как инструмента, с помощью которого можно получить признаковое пространство для последующей разработки алгоритмов классификации.

Классификация на основе вейвлетов разрабатывается на основе теории вейвлетов, первоначально разработанной для обработки сигналов.

В основе вейвлет-преобразования лежит использование двух функций – масштабирующей и самого вейвлета. На основе каждой из этих функций строится свой фильтр, соответственно – низкочастотный и высокочастотный.

Цифровая последовательность, представляющая собой дискретизированный обрабатываемый сигнал, прошедшая через высокочастотный фильтр вейвлет-преобразования характеризуется детализирующими коэффициентами. Последовательность, прошедшую через низкочастотный фильтр определяется аппроксимирующими коэффициентами.

Процесс разложения можно представить в виде следующей схемы (рис.1):

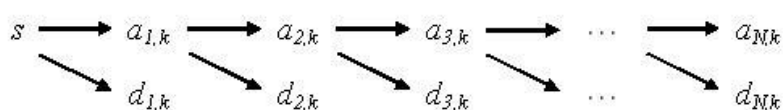


Рис.1. Процесс вейвлет-разложения.

В этом разложении аппроксимирующие коэффициенты $a_{N,k}$ содержат в себе информацию о сглаженном сигнале, а детализирующие коэффициенты $d_{j,k}$ – информацию о погрешностях и/или высокочастотных компонентах сигнала. Как правило, разложение прекращается на 4-6 уровне разложения.

Выходной спектр вейвлет-разложения можно представить в виде вектора структуры $[A_N, D_N, D_{N-1}, \dots, D_1]$, где $A_N = \{a_{N,k}\}$, $D_m = \{d_{j-m,k}\}$, $m = 1, 2, \dots, N$ [2].

В качестве алгоритма классификации используется классификатор минимального расстояния (также называемый классификатором ближайших соседей). Классификатор минимального расстояния (МР) применяется во всех классификациях вследствие своей простоты. Он заключается в следующем. Вводится мера сходства различных объектов. Если она введена достаточно удачно, то оказывается, что схожим объектам, как правило, соответствуют схожие ответы. В задачах классификации это означает, что схожие объекты гораздо чаще лежат в одном классе, чем в разных. Распространенной мерой оценки близости между объектами является метрика,

или способ задания расстояния. Наиболее популярная метрика - евклидово расстояние [3].

$$D_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^n |x_{ik} - x_{jk}|^2},$$

где $D_{i,j}$ - расстояние между объектом i и j ,

n – число признаков в описании объектов,

k – номер признака,

x_{ik} - значение k -го признака.

На обучающем этапе, значения признаков измеряются на обучающих данных, и эти значения признаков сохраняются в виде набора векторов признаков для каждого класса. Для классификации неизвестного образца вектор признаков образца сравнивается со всеми сохраненными векторами признаков для того, чтобы найти ближайший.

Для признаков, основанных на вейвлетах, значение выходного спектра вейвлет-разложения обучающих образцов получается с помощью двухуровневого вейвлет-разложения.

Процесс классификации. В качестве экспериментальных данных используются спектры различных минералов.

Таким образом, формируются два класса, относящихся к карбонатам: первый класс - кальциты (CaCO_3), второй класс - доломиты ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$).

Обучающая выборка состоит из пяти образцов спектров кальцита и шести образцов спектров доломита.

На рис. 2 представлен один из образцов спектров кальцита (CaCO_3), а на рис. 3 один из образцов спектров доломита ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$).

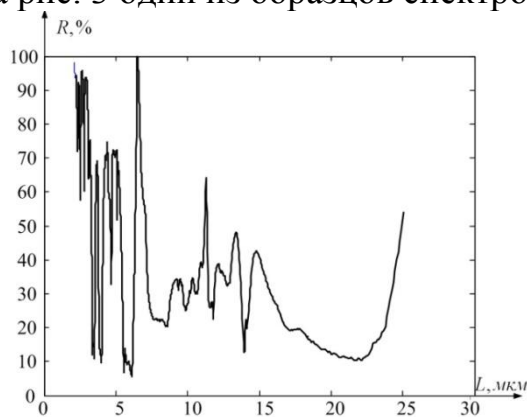


Рис. 2. Спектр кальцита (CaCO_3).

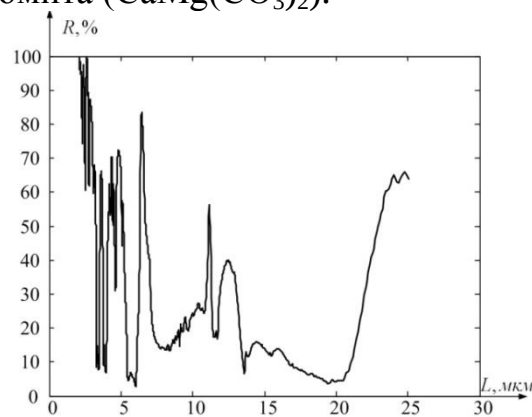


Рис.3. Спектр доломита ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$).

Можно заметить, что вид спектров кальцита и доломита схож.

Для подготовки данных к классификации, необходимо разложить каждый спектр минералов с помощью вейвлет-преобразования, с глубиной разложения равной 2 и выделить из него вектор аппроксимирующих коэффициентов $A_2 = [a_1 \ a_2]$.

На рис. 4 представлен вектор аппроксимирующих коэффициентов одного из образца спектра кальцита (CaCO_3).

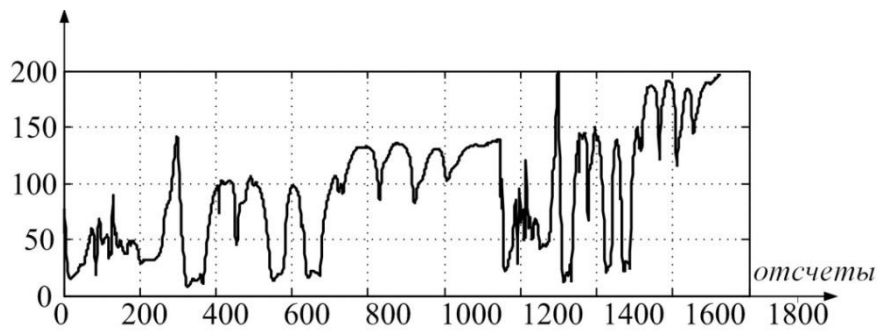


Рис. 4. Вектор аппроксимирующих коэффициентов спектра кальцита (CaCO_3).

На рис. 5 представлен вектор аппроксимирующих коэффициентов одного из образца спектра доломита (CaMgCO_3).

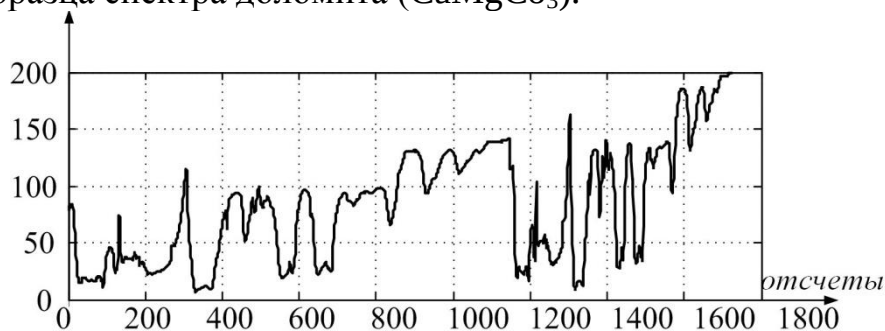


Рис. 5. Вектор аппроксимирующих коэффициентов спектра доломита ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$).

Группа вектора аппроксимирующих коэффициентов каждого класса формирует признаковое пространство этого класса. Анализ вектора аппроксимирующих коэффициентов вейвлет-разложения обеспечит разделимость различных классов.

На этом первый этап построения модели, описывающей классы завершен.

На втором шаге применяется классификатор минимальных расстояний для классификации новых объектов.

Возьмем неизвестный спектр минерала (рис. 6), и определим, к какому классу он относится.

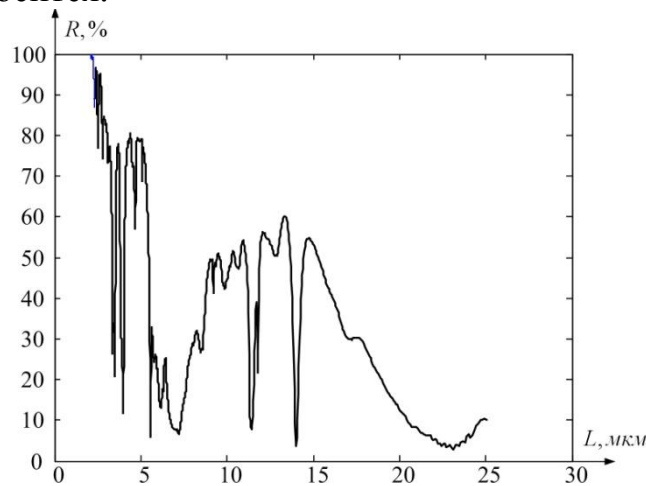


Рис. 6. Неизвестный спектр минерала.

Разложим спектр с помощью вейвлет-преобразования, с глубиной разложения равной 2 и выделим из него вектор аппроксимирующих коэффициентов $A_2 = [a_1 \ a_2]$.

На рис. 7 представлен вектор аппроксимирующих коэффициентов неизвестного образца спектра.

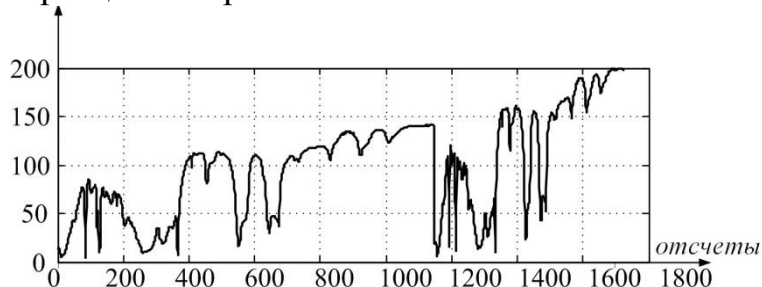


Рис. 7. Вектор аппроксимирующих коэффициентов неизвестного образца спектра.

Необходимо найти расстояние между вектором аппроксимирующих коэффициентов вейвлет-преобразования нового объекта и каждым вектором аппроксимирующих коэффициентов спектров классов (таблица 1).

В случае получения наименьшего значения расстояния между одним классом и новым образцом, можно судить о принадлежности этого образца к этому классу.

Таблица 1

Расстояния между векторами аппроксимирующих коэффициентов

D(Новый объект, CaCO_3)	D(Новый объект, CaMgCO_3)
0,0082	0,0076
0,0462	0,0125
0,00032	0,0018
0,00023	0,0675
0,0096	0,0189

Из таблицы видно, что наименьшим расстоянием является значение 0,00023, следовательно, неизвестный образец относится к классу CaCO_3 .

Вывод. В данной статье исследовалась эффективность признаков для классификации, основанных на вейвлет-преобразовании. На основе экспериментальных результатов, можно сделать следующий вывод: набор признаков на основе вейвлетов может применяться при классификации. Это происходит потому, что вейвлеты обладают способностью различать классы с определенной степенью аппроксимации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Паклин Н. Б., Орешков В. И. *Бизнес-аналитика: от данных к знаниям*: Учебное пособие. 2-е изд., испр. - СПб.: Питер, 2013. - 704 с.: ил.
2. Сергиенко А.Б. *Цифровая обработка сигналов* – СПб.: Питер, 2006. – 751 с.

3. Воронцов К.В. *Лекции по метрическим алгоритмам классификации*. 2009. - 15с.

Корнюшина Елизавета Юрьевна – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: liza.kornyushina@gmail.com.

E.Yu. Kornyushina

CLASSIFICATION OF SPECTRA BASED ON WAVELETS AND MACHINE LEARNING METHODS

Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch, Kaluga,
248000, Russia

This article is a investigation of the possibility of signal classification based on wavelet transformation and machine learning techniques. Application of wavelet analysis in this paper is considered from the standpoint of using it as a tool with which you can get the feature space for further development of classification algorithms. For signs, wavelet-based, the output spectrum of the wavelet decomposition of training samples obtained by means of a two-level wavelet decomposition As a classification algorithm uses the minimum distance classifier (also called nearest neighbor classifier). Measure of proximity between objects is a metric, or a way to specify the distance - Euclidean distance. Experimental results show that a set of features based on wavelet can be applied in the classification.

Keywords: wavelet, classification, spectra.

REFERENCES

1. Paklin N.B., Oreshkov V.I. *Business Intelligence: from data to knowledge*: Textbook. 2nd ed., rev. - St. Peter .:, 2013 – 704 p .
2. Sergienko A.B. *Digital Signal Processing* - St. .: Peter, 2006 - 751 p.
3. Vorontsov K.V. *Lectures on the metric classification algorithms*. 2009 – 15p.

Kornyushina E.Yu. – student of the Kaluga Branch of the Bauman Moscow State Technical University. E-mail: liza.kornyushina@gmail.com.

**МАТРИЧНЫЕ ОПЕРАТОРЫ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ: АНАЛИТИЧЕСКАЯ СХЕМА ПОСТРОЕНИЯ [I]**

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Известно, что методы вычислительной алгебры являются эффективным инструментом решения сложных задач исследования систем и, главное, их синтеза. В связи с этим актуальной является задача разработки математического описания систем операторных уравнений с матричным оператором. Ключевым фактором, определившим высокую степень эффективности указанного подхода для широкого класса систем, включая линейные и нелинейные с постоянными и переменными параметрами, является то, что метод матричных операторов для сложных систем позволяет получить соотношение, определяющее выходной сигнал системы, в котором имеет место явная зависимость от параметров регулятора. Это позволяет найти с помощью параметрической оптимизации в известном смысле параметры системы. Изучены положения, связанные с построением математических моделей сигналов и систем.

Ключевые слова: цифровой систем управления, матричный оператор, метод моментов, ортонормированный базис

1. Дискретные матричные операторы: общие положения

Будем рассматривать дискретный аналог уравнения Фредгольма 2 рода:

$$x(t_i) - \sum_{j=1}^N A_j k_x^{\phi}(t_i, \tau_j) x(\tau_j) = f(t_i), \quad 1 \leq i \leq N. \quad (1)$$

Поскольку интегральные уравнения (1) описывает поведение элементов САУ, то (1) можно рассматривать как общий вид описания дискретных аналогов всех элементов САУ.

На основе (1) ниже строятся новые математические модели элементов в форме матричных операторов.

1.1. Дискретный матричный оператор Галеркина-Петрова

Методы, основанные на применении матричного оператора Галеркина, позволяющего установить тесную взаимосвязь между многими разновидностями вычислительных методов, могут рассматриваться как основа метода конечных элементов, метода конечных разностей, а так же спектральных методов.

Метод Галеркина применительно к интегральным уравнениям обычно называют **методом моментов**.

Изложим лишь основные положения аналитической схемы метода Галеркина-Петрова, теоретические же положения метода рассмотрены М.К. Гавуриным в [1].

Перепишем (1) в виде

$$Ax = f. \quad (2)$$

Решение $x(t_j)$, $j = \overline{1, N}$, находится в виде разложения по полной системе функций $\varphi_{k,N}(t)$, которая называется координатной системой

$$\Phi(t) = \left\{ \varphi_{k,N}(t) : k = \overline{0, l}; \sum_{t=0}^N \varphi_{k_1,N}(t) \varphi_{k_2,N}(t) = \delta_{k_1 k_2} \right\}, \quad (3)$$

где в $\varphi_{k,N}$ k — степень полинома, $N+1$ — число равноотстоящих точек $t = \overline{0, N}$, т.е. t может принимать только положительные целочисленные значения; $\delta_{k_1 k_2} = \begin{cases} 1, & k_1 = k_2; \\ 0, & k_1 \neq k_2. \end{cases}$ — символ Кронекера.

В рассматриваемом случае $\Phi(t)$ — ортонормированная система, например, полиномиальная

$$\varphi_{k,N}(t) = c_{k0} + c_{k1}t + c_{k2}t^2 + \dots + c_{kk}t^k; \quad k = \overline{0, l}. \quad (4)$$

Если P_l — оператор ортогонального проектирования на линейную оболочку L_l , то метод моментов заключается в том, что за приближенное принимается решение в L_l уравнения

$$P_l Ax = P_l f \quad (5)$$

Введем в рассмотрение две системы функций:

- координатная система

$$\Phi(t) = \{ \varphi_{k,N}(t) : k = \overline{0, l} \};$$

- проекционная система

$$F(t) = \{ f_{k,N}(t) : k = \overline{0, l} \}. \quad (6)$$

В соответствии с методом Галеркина-Петрова решение уравнения (1) находится в виде разложения по проекционной системе $\Phi(t)$:

$$\tilde{x}(t) = \sum_{v=0}^l c_v^x \varphi_{v,N}(t), \quad (7)$$

а коэффициенты разложения $c_v^x, v = \overline{0, l}$ определяются зависимостью

$$c_v^x = \sum_{t=1}^N x(t) \varphi_{v,N}(t), \quad v = \overline{0, l}.$$

Подставляя разложение (7) в уравнение Фредгольма (2) и требуя ортогональности невязки ко всем функциям $f_{k,N}(t)$, $k = \overline{0, l}$ проекционной системы $F(t)$, получим линейную систему алгебраических уравнений вида

$$\sum_{v=0}^l c_v^x \left[\underbrace{\sum_{t=1}^N \left(\varphi_{v,N}(t) - h \sum_{j=1}^N A_j k_x^\phi(t_i, \tau_j) \varphi_{v,N}(t) \right)}_{A_1} f_{k,N}(t) \right] = \underbrace{\sum_{t=1}^N [f(t) \varphi_{k,N}(t)]}_{c^f}. \quad (8)$$

С учетом обозначений $A_1 = (A_1)_{v,k=0}^l$ и $c^f = (c_k^f)_{k=0}^l$ соотношение (8) принимает вид

$$A_1 C^x = C^f, \quad (9)$$

где A_1 — матричный оператор Галеркина-Петрова.

Зависимость (9) можно рассматривать как форму описания цифровой скалярной нестационарной системы уравнением с матричным оператором Галеркина-Петрова.

Полученные выше зависимости определяют три формы описания цифровой САУ — уравнения с дифференциальным, интегральным и матричным операторами.

1.2. Дискретный матричный оператор Бубнова-Галеркина

Если $f_k = \varphi_k$, то метод моментов называют *методом Галеркина* (в другой терминологии — Бубнова-Галеркина). Для этого случая матричная форма описания цифровой скалярной САУ имеет вид

$$\sum_{v=0}^l c_v^x \left[\underbrace{\sum_{t=1}^N \left(\varphi_{v,N}(t) - h \sum_{j=1}^N A_j k_x^\phi(t_i, \tau_j) \varphi_{v,N}(t) \right)}_{A_2} \right] = \sum_{t=1}^N [f(t) \varphi_{k,N}(t)]. \quad (10)$$

Если воспользоваться обозначением

$$A_2 = (A_2)_{v,k=0}^l \quad (11)$$

и рассуждениями, которые были приведены выше, (50) можно записать в форме операторного уравнения с матричным оператором A_2

$$A_2 C^x = C^f, \quad (12)$$

где A_2 — матричный оператор Бубнова-Галеркина.

Работа Галеркина была опубликована в 1915г., строгое же математическое обоснование продолжалось несколько десятков лет. Метод Галеркина был с успехом применен для решения большого числа линейных и нелинейных прикладных задач. В настоящее время метод Галеркина — один из наиболее хорошо математически обоснованных и часто применяемых методов решения инженерных задач.

В [2] автор сделал попытку изложить целую серию вычислительных методов, разработанных на основе представлений Галеркина. В книге подробно описывается техника применения методов Галеркина к решению конкретного спектра задач. Некоторые из приводимых примеров служат своеобразными модельными задачами, методика решения которых позволяет наглядно выявить преимущества и недостатки различных подходов.

Есть примеры, позволяющие оценить возможность применения методов к таким сложнейшим задачам, как проектирование САУ [7].

1.3. Метод наименьших квадратов: аппарат матричных операторов математического описания и исследования цифровых систем

Напомним, что некоторые положения n - мерных векторных пространств. Поскольку в рассуждениях, которые при водятся здесь, применяется векторное описание процессов, например, $\mathbf{C}^x = (c_0^x, c_1^x, \dots, c_l^x)$ или $x(t) = (x(t_1), x(t_2), \dots, x(t_N))$, то используется ряд терминов, например:

- норма вектора определяется формулой

$$\|\mathbf{C}^x\| = \sqrt{(c_0^x)^2 + (c_1^x)^2 + \dots + (c_l^x)^2}; \quad (13)$$

- скалярное произведение имеет вид: если

$$x(t) = (x(t_1), x(t_2), \dots, x(t_N)), \quad (14)$$

$$y(t) = (y(t_1), y(t_2), \dots, y(t_N)), \quad (15)$$

то

$$(x, y) = \sum_{i=1}^N x(t_i) y(t_i). \quad (16)$$

Метод наименьших квадратов (МНК) заключается в том, что приближенное решение уравнения (41) находится в форме

$$\tilde{x}(t) = \sum_{v=0}^l c_v^x \varphi_{v,N}(t) \quad (17)$$

и минимизирует функционал [1]

$$\|\mathbf{A}x - f\|^2 = (\mathbf{A}x, \mathbf{A}x) - 2(\mathbf{A}x, f) + \|f\|^2. \quad (18)$$

Тогда коэффициенты $c_1^x, c_2^x, \dots, c_l^x$ удовлетворяют уравнениям

$$\sum_{v=0}^l c_v^x (\mathbf{A} \varphi_{v,N}, \mathbf{A} \varphi_{k,N}) = (f(t), \mathbf{A} \varphi_{k,N}), \quad k = \overline{0, l}. \quad (19)$$

а соответствующее уравнение с матричным оператором имеет вид

$$\mathbf{A}_3 \mathbf{C}^x = \mathbf{C}^f, \quad (20)$$

где $\mathbf{A}_3$ — матричный оператор который определяет алгоритмическую реализацию метода наименьших квадратов (матричный оператор МНК)).

1.4. Построение матричного оператора элемента системы в базисе многочленов Чебышева

Полагаем, что для всех элементов сложной системы получены дискретные аналоги вида:

$$x(t_i) + \sum_{j=0}^{N-1} A_j k_x^\phi(t_i, \tau_j) x(\tau_j) = f(t_i). \quad (21)$$

Далее уравнение (21) будем записывать в форме

$$x(t) + \sum_{\tau=0}^{N-1} A_j k_x^\phi(t, \tau) x(\tau) = \sum_{\tau=0}^{N-1} A_j k_y^\phi(t, \tau) y(\tau). \quad (22)$$

Для построения решения $x(t)$ уравнения (4) можно воспользоваться аналитическими схемами построения матричных операторов Галеркина-Петрова, Бубнова-Галеркина, оператора МНК, рассмотренными выше.

Ниже детально изучим одну из аналитических схем, а в качестве базиса воспользуемся многочленами Чебышева.

Будем находить решение $x(t)$ в форме разложения по многочленам $T_{k,N}(t)$:

$$\tilde{x}(t) = \sum_{k=0}^l c_k^x T_{k,N}(t), \quad (23)$$

причем система $T = \{T_{k,N}(t) : k = 0, 1, \dots, l\}$ ортонормирована, т.е.

$$\sum_{t=0}^{N-1} T_{k,N}(t) T_{j,N}(t) = \delta_{kj} = \begin{cases} 1, & k = j; \\ 0, & k \neq j. \end{cases}$$

Все функции, входящие в (22), представим в виде

$$\begin{aligned} \tilde{x}(t) &= (T_{k,N}(t))^T C^x; \quad \tilde{y}(t) = (T_{k,N}(t))^T C^y; \\ A_j \tilde{k}_x^\phi(t, \tau) &= (T_{k,N}(t))^T A_0^x T_{m,N}(\tau); \\ A_j \tilde{k}_y^\phi(t, \tau) &= (T_{k,N}(t))^T A^y T_{m,N}(\tau), \end{aligned} \quad (24)$$

где T — знак транспонирования,

$$\begin{aligned} C^x &= (c_0^x, c_1^x, \dots, c_l^x)^T; \quad C^y = (c_0^y, c_1^y, \dots, c_l^y)^T; \\ c_k^x &= \sum_{t=0}^{N-1} x(t) T_{k,N}(t); \quad c_k^y = \sum_{t=0}^{N-1} y(t) T_{k,N}(t); \\ A_0^x &= \left[\sum_{t=0}^{N-1} \sum_{\tau=0}^{N-1} A_j k_x^\phi(t, \tau) T_{k,N}(t) T_{m,N}(\tau) \right]_{k,m=0}^l; \\ A^y &= \left[\sum_{t=0}^{N-1} \sum_{\tau=0}^{N-1} A_j k_y^\phi(t, \tau) T_{k,N}(t) T_{m,N}(\tau) \right]_{k,m=0}^l. \end{aligned} \quad (25)$$

Подставим (24) в (22):

$$\begin{aligned} (T_{k,N}(t))^T C^x + \sum_{\tau=0}^{N-1} (T_{k,N}(t))^T A_0^x T_{m,N}(\tau) (T_{k,N}(\tau))^T C^x = \\ = \sum_{\tau=0}^{N-1} (T_{k,N}(t))^T A^y T_{m,N}(\tau) (T_{k,N}(\tau))^T C^y. \end{aligned} \quad (26)$$

Поскольку справедлива зависимость

$$\begin{aligned}
& \left(\cancel{T_{k,N}(t)} \right)^T C^x + \left(\cancel{T_{k,N}(t)} \right)^T A_0^x \underbrace{\sum_{\tau=0}^{N-1} T_{m,N}(\tau) (T_{k,N}(\tau))^T}_{\delta_{mk} = \begin{cases} 1, & k=m; \\ 0, & k \neq m. \end{cases}} C^x = \\
& = \left(\cancel{T_{k,N}(t)} \right)^T A^y \underbrace{\sum_{\tau=0}^{N-1} T_{m,N}(\tau) (T_{k,N}(\tau))^T}_{\delta_{mk} = \begin{cases} 1, & k=m; \\ 0, & k \neq m. \end{cases}} C^y. \quad (27)
\end{aligned}$$

из (27) получаем $C^x + A_0^x C^x = A^y C^y$, или $A^x C^x = A^y C^y$, где $A^x = (I + A_0^x)$;

$$\begin{aligned}
& = \left(\cancel{T_{k,N}(t)} \right)^T A^y \underbrace{\sum_{\tau=0}^{N-1} T_{m,N}(\tau) (T_{k,N}(\tau))^T}_{\delta_{mk} = \begin{cases} 1, & k=m; \\ 0, & k \neq m. \end{cases}} C^y. \quad (28)
\end{aligned}$$

отсюда следует

$$C^x = (A^x)^{-1} A^y C^y = A C^y = \begin{pmatrix} a_{00} & a_{01} & \cdots & a_{0l} \\ a_{20} & a_{21} & \cdots & a_{2l} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{l0} & a_{l1} & \cdots & a_{ll} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_0^y \\ c_1^y \\ \vdots \\ c_l^y \end{pmatrix} \quad (29)$$

Полученный результат можно получить в соответствии с положениями метода Бубнова-Галеркина: подставляется разложение решения $\tilde{x}(t)$ в форме (23) в уравнение (22), а выполнение требования ортогональности невязки

$$\sum_{k=0}^l c_k^x \left[T_{k,N}(t) + \sum_{\tau=0}^{N-1} A_j k_x^\phi(t, \tau) T_{k,N}(\tau) \right] = f(t), \quad (30)$$

ко всем элементам ортонормированного базиса $\{T_{k,N}(t) : k = 0, 1, \dots, l\}$, т.е. ко всем функциям $T_{m,N}(t)$, $0 \leq m \leq N$, записанное в форме (31), после элементарных преобразований позволяет получить линейную алгебраическую систему уравнений (32), совпадающую с

$$\sum_{k=0}^l c_k^x \left[\sum_{t=0}^{N-1} \left(T_{k,N}(t) + \sum_{\tau=0}^{N-1} A_j k_x^\phi(t, \tau) T_{k,N}(\tau) \right) T_{m,N}(t) \right] = (f(t), T_{m,N}(t)), \quad (31)$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{k=0}^l c_k^x \left[\underbrace{\sum_{t=0}^{N-1} T_{k,N}(t) T_{m,N}(t)}_{\delta_{km} = \begin{cases} 1, & \text{пу } k=m; \\ 0, & \text{пу } k \neq m. \end{cases}} + \underbrace{\sum_{t=0}^{N-1} \sum_{\tau=0}^{N-1} A_j k_x^\phi(t, \tau) T_{k,N}(\tau) T_{m,N}(t)}_{A_0^x} \right] = \underbrace{(f(t), T_{m,N}(t))}_{A^y C^y} \quad (32)
\end{aligned}$$

В качестве ортонормированного базиса можно использовать многочлены Кравчука.

В соответствии с общей формулой (см. табл. 1) запишем несколько первых полиномов Кравчука в явном виде [3]:

$$\begin{aligned}
K_{0,N}(t) &= 1; \\
K_{1,N}(t) &= (p+q)t - N_p; \\
K_{2,N}(t) &= \frac{p^2}{2}(N-t)(N-t-1) - pqt(N-t) + \frac{q^2}{2}t(t-1); \\
K_{3,N}(t) &= \frac{p^3}{6}(N-t)(N-t-1)(N-t-2) + \frac{p^2q}{2}t(N-t)(N-t-1) - \\
&\quad - \frac{pq^2}{2}t(t-1)(N-t) + \frac{q^3}{6}(t-1)(t-2); \\
K_{4,N}(t) &= \frac{p^4}{24}(N-t)(N-t-1)(N-t-2)(N-t-3) - \\
&\quad - \frac{p^3q}{6}t(N-t)(N-t-1)(N-t-2) + \frac{p^2q^2}{4}t(t-1)(N-t)(N-t-1) - \\
&\quad - \frac{pq^3}{6}(t-1)(t-2)(N-t) + \frac{q^4}{24}(t-1)(t-2)(t-3).
\end{aligned} \tag{33}$$

.....
Функция скачков:

$$\rho(t) = \frac{N!}{t!(N-t)!} p^t q^{N-t}. \tag{34}$$

Норма полиномов Кравчука определяется формулой

$$\|K_{k,N}(t)\| = \sqrt{\frac{N!}{k!(N-k)!}} (pq)^{0,5k}. \tag{35}$$

Зависимость для вычисления коэффициентов Фурье-Кравчука функции $f(t)$ имеет вид

$$c_k^f = \sum_{t=0}^N f(t) K_{k,N}(t) \sqrt{\frac{k!(N-k)!}{N!}} \frac{N!}{t!(N-t)!} p^{t-0,5k} q^{N-t-0,5k}, k = \overline{0, l}. \tag{36}$$

Формула построения $\tilde{f}(t)$ записывается так:

$$\tilde{f}(t) = \sum_{k=0}^l \sqrt{\frac{k!(N-k)!}{N!}} (pq)^{-0,5k} B_k K_k(t). \tag{37}$$

Многочлены Кравчука связаны с биномиальным распределением в теории вероятностей [3].

Полиномы Кравчука, так же как и полиномы Чебышева, имеют конечный промежуток ортогональности $(0, N)$. Особенностью данного бази-

са является наличие в аналитических выражениях полиномов и в функции скачков постоянных p и q , изменение которых существенно меняет свойства базиса и характер функции скачков.

Из табл. 1 (часть 1) видно, что условия, накладываемые на эти параметры определяются формулами

а) $p > 0; q > 0;$

б) $p + q = 1.$

Характер изменения базисных функций и функции скачков отражен на рис. 1 и рис. 2. Чем меньше p и больше q , тем ближе к оси ординат смещается экстремум функции скачков. Базисные функции при этом возрастают к концу промежутка, а их нули группируются в его левом конце.

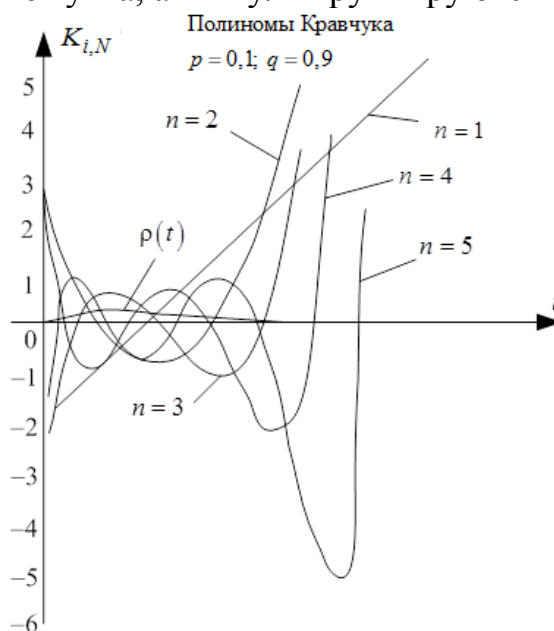


Рис. 1. Графики первых пяти полиномов Кравчука при $p = 0,1; q = 0,9$

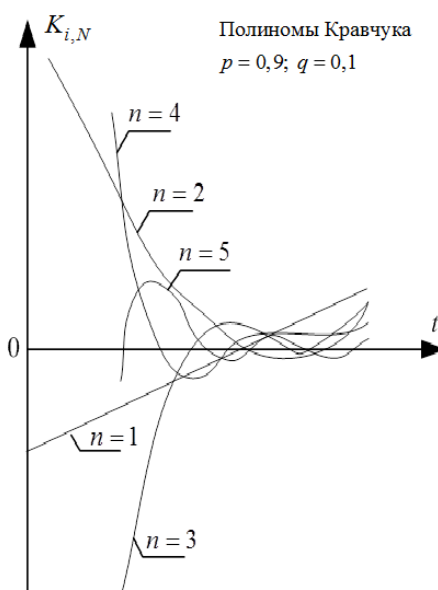


Рис. 2. Графики первых пяти полиномов Кравчука при $p = 0,9; q = 0,1$

Если же увеличивать p и уменьшать q , то максимум функции скачков перемещается вправо от оси ординат, а значения полиномов Кравчука к концу промежутка уменьшаются. Нули полиномов перемещаются к правому концу промежутка ортогональности.

Обратимся к формуле вычисления коэффициентов разложения функции $f(t)$ по полиномам Кравчука. В соответствии с (66) имеем:

$$c_k^f = \sqrt{k!N!(N-k)!} \sum_{t=0}^N f(t) K_{k,N}(t) \frac{p^{t-0,5k} q^{N-t-0,5k}}{t!(N-t)!}. \quad (38)$$

В общем виде явная запись полиномов Кравчука может быть представлена так:

$$K_{k,N}(t) = \sum_{i=0}^k c_{k,i}(p, q, N) t^i. \quad (39)$$

С учетом (39) перепишем выражение (38):

$$\begin{aligned} c_k^f &= \sqrt{k!N!(N-k)!} \sum_{t=0}^N \sum_{i=0}^k c_{k,i}(p, q, N) t^i \frac{p^{t-0,5k} q^{N-t-0,5k}}{t!(N-t)!} f(t) = \\ &= \sqrt{k!N!(N-k)!} \sum_{i=0}^k c_{k,i}(q, p; N) \sum_{t=0}^N \frac{p^{t-0,5k} q^{N-t-0,5k}}{t!(N-t)!} t^i f(t) = \\ &= \sqrt{k!N!(N-k)!(pq)^k} \sum_{i=0}^k c_{k,i}(p, q; N) \sum_{t=0}^N \frac{p^t q^{N-t}}{t!(N-t)!} t^i f(t). \end{aligned} \quad (40)$$

Обозначим

$$I_i = \sum_{t=0}^N \left(\frac{p}{q} \right)^t q^N \frac{1}{t!(N-t)!} t^i f(t), \quad (41)$$

тогда

$$c_k^f = \frac{\sqrt{k!N!(N-k)!} \sum_{i=0}^k c_{k,i}(pq; N) I_i}{\sqrt{(pq)^k}} \quad (42)$$

Итак, для вычисления коэффициентов Фурье-Кравчука функции $f(t)$ необходимо вычислять взвешенные моменты по формуле (41).

Каждый элемент имеет математическую модель в форме

$$\begin{pmatrix} c_0^x \\ c_1^x \\ \vdots \\ c_l^x \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} a_{00} & a_{01} & a_{02} & \dots & a_{0l} \\ a_{10} & a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1l} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{l0} & a_{l1} & a_{l2} & \dots & a_{ll} \end{pmatrix}}_{\mathbf{A}} \begin{pmatrix} c_0^y \\ c_1^y \\ \vdots \\ c_l^y \end{pmatrix}, \quad (43)$$

$\mathbf{c}^x \qquad \qquad \qquad \mathbf{c}^y$

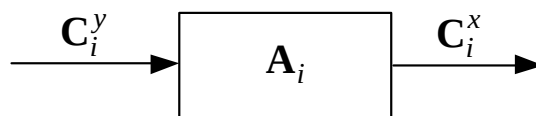


Рис. 3. Схема i -го элемента системы с математической моделью в форме матричного оператора A .

Список литературы

1. Гавурин М.К. Лекции по методам вычислений. — М.: Издательство «Наука», 1971. — 248 с.
2. Флетчер К. Численные методы на основе метода Галеркина / Пер. с англ. — М.: Мир, 1988. — 352 с.
3. Дедус Ф.Ф. Классические ортогональные базисы дискретной переменной. Спектральные методы обработки информации в научных исследованиях. — Пущино. 1980.
4. Солодовников В.В. Частотный и спектральные методы в теории автоматического управления. Спектральные методы обработки информации в научных исследованиях. — Пущино. 1980.
5. Егупов Н.Д. Спектральный анализ нестационарных систем в специальных базисах. Спектральные методы обработки информации в научных исследованиях. — Пущино. 1980.
6. Мирошник И.В. Теория автоматического управления. Линейные системы. — СПб.: Питер, 2005. — 336 с.
7. Методы инженерного синтеза сложных систем управления: аналитический аппарат, алгоритмы приложения в технике. Вычислительно-аналитический эксперимент: аппарат матричных операторов и вычислительные технологии. / Под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. — М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. — 416 с.
8. Бейтмен Г., Эрдейи А. Высшие трансцендентные функции. — М.: Издательство «Наука», 1974. — 296 с.
9. Михлин С.Г. Вариационные методы в математической физике. ГИТТЛ. — М.: Издательство «Наука», 1957. — 476 с.
10. Березин И.С., Жидков Н.П. Методы вычислений (том 1). ГИФМЛ. — М.: 1962. — 464 с.
11. Солодовников В.В. Частотный метод в теории автоматического регулирования. — В сб. «Автоматичное управление и вычислительная техника». / Под ред. В.В. Солодовникова, выпуск 8. Издательство «Машиностроение», — М.: 1968. — 342 с.
12. Пупков К.А., Егупов Н.Д., Колесников Д.В., Мельников Д.В., Трофимов А.И. Высокоточные системы самонаведения. Расчет и проектирование, вычислительный эксперимент. — М.: Физматлит, 2011.—512 с.
13. Мизрохи В.Я. Проектирование управления зенитных ракет. — М.: Издательство ООО «Экслибрис-Пресс», 2010. — 253 с.
14. Востриков А.С., Французова Г.А. Теория автоматического регулирования. — Новосибирск: Издательство НГТУ, 2006. — 368 с.

15. Ньютон Дж.К., Гулд Л.А., Кайзер Дж.Ф. Теория линейных следящих систем. Аналитические методы расчета. / Под ред. А.М. Летова., ГИФМЛ. — М.: 1961. — 407 с.

Наинг Аунг Со – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: naingaungsoe128@gmail.com.

Ней Тве – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: naythway1984@gmail.com.

Naing Aung Soe, Nay Thway

MATRIX OPERATORS OF DIGITAL CONTROL SYSTEMS: ANALYTICAL SCHEME FOR SYSTEM

Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch, Kaluga, 248000, Russia

It is known that the computational algebra methods are effective tools meet the challenges of research systems and, more importantly, their synthesis. In this regard, relevant is the task of developing a mathematical description of the system of operator equations with matrix operator. A key factor in the high degree of effectiveness of this approach for a wide class of systems, including linear and non-linear with constant and variable parameters, is that the method of matrix operators for complex systems provides a ratio that determines the output of the system in which there is a clear dependence on the controller parameters. This allows you to find with the help of parametric optimization in a sense, the system parameters. Examine the provisions relating to the construction of mathematical models of signals and systems.

Keywords: digital control systems, matrix operator, moment method, orthonormal basis.

Naing Aung Soe, postgraduate of Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University. E-mail: naingaungsoe128@gmail.com.

Nay Thway, postgraduate of Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University. E-mail: naythway1984@gmail.com.

МАТРИЧНЫЕ ОПЕРАТОРЫ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ: АНАЛИТИЧЕСКАЯ СХЕМА ПОСТРОЕНИЯ [III]

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Известно, что методы вычислительной алгебры являются эффективным инструментом решения сложных задач исследования систем и, главное, их синтеза. В связи с этим актуальной является задача разработки математического описания систем операторных уравнений с матричным оператором. Ключевым фактором, определившим высокую степень эффективности указанного подхода для широкого класса систем, включая линейные и нелинейные с постоянными и переменными параметрами, является то, что метод матричных операторов для сложных систем позволяет получить соотношение, определяющее выходной сигнал системы, в котором имеет место явная зависимость от параметров регулятора. Это позволяет найти с помощью параметрической оптимизации в известном смысле параметры системы. Изучены положения, связанные с построением математических моделей сигналов и систем.

Ключевые слова: цифровой систем управления, матричный оператор, метод моментов, ортонормированный базис.

1.5 Построение математической модели системы управления

Для построения матричного оператора системы в целом разработан аппарат структурных преобразований матричных операторов. В основе построения аппарата лежат формулы, связывающие:

- параллельное соединение звеньев

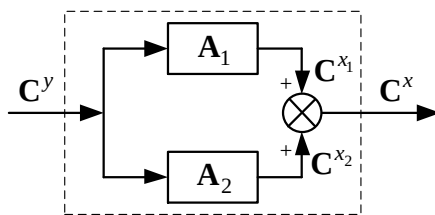


Рис. 4. Схема параллельного соединения звеньев

Матричный оператор параллельного соединения звеньев равен сумме матричных операторов

$$\mathbf{A} = \mathbf{A}_1 + \mathbf{A}_2 \quad (44)$$

- последовательное соединение звеньев

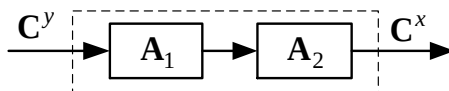


Рис.5. Схема последовательного соединения звеньев

Матричный оператор последовательного соединения звеньев равен произведению матричных операторов отдельных элементов: формула имеет вид

$$\mathbf{A} = \mathbf{A}_1 \mathbf{A}_2 \quad (45)$$

- соединение с обратной связью

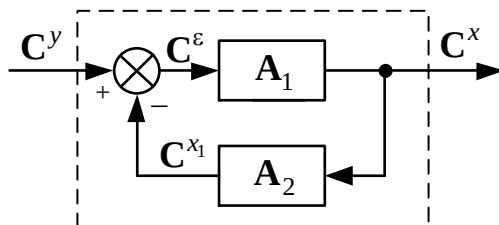


Рис.6. Схема соединения элементов с обратной связью

Формула, определяющая матричный оператор соединения элементов с обратной связью имеет вид

$$\mathbf{A} = (\mathbf{I} + \mathbf{A}_1 \mathbf{A}_2)^{-1} \mathbf{A}_1 \quad (46)$$

Изложим основные положения применения аппарата структурных преобразований для сложных систем. Для реализации процесса структурных преобразований находят применение сигнальные графы. Проиллюстрируем сказанное. Положим, что задача структурная схема системы, математические модели которых заданы в форме матричных операторов (рис. 7).

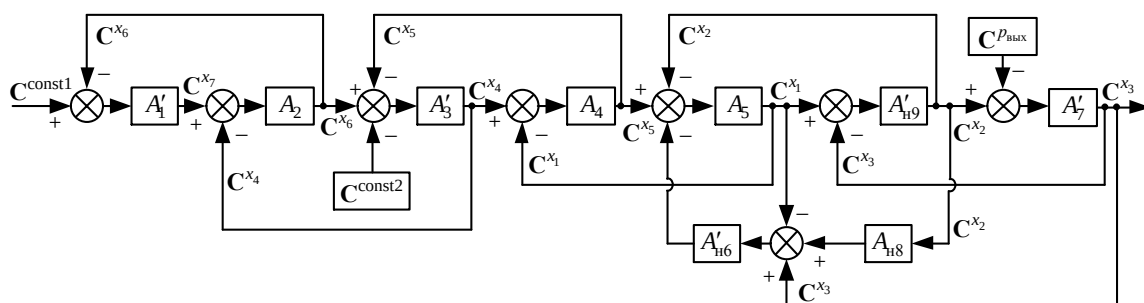


Рис.7. Структурная схема системы

Применением сигнального графа системы (рис.8), структурная схема системы (рис. 9) преобразуется к простейшему виду (рис. 10).

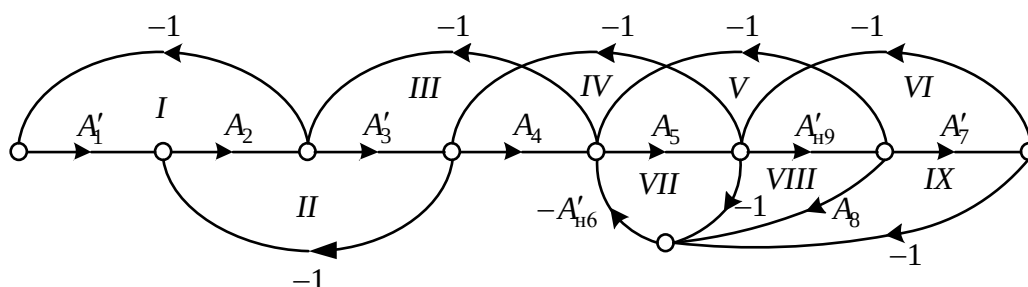


Рис. 8. Сигнальный граф системы в терминах теории матричных операторов

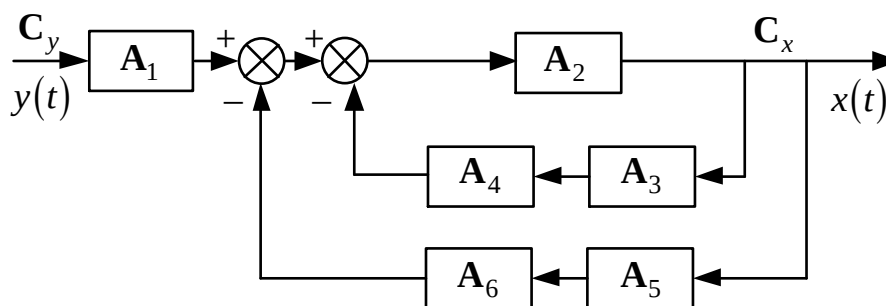


Рис. 9. Структурная схема системы

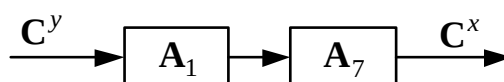


Рис. 10. Структурная схема системы

На основе схемы (рис. 10) ведется расчет матричного оператора системы в целом $\mathbf{A} = \mathbf{A}_7 \mathbf{A}_1$, связывающего вход $\mathbf{C}^x$ и выход $\mathbf{C}^y$ в форме

$$\mathbf{C}^x = \mathbf{A} \mathbf{C}^y \quad (47)$$

1.6. Исследование и синтез сложных систем автоматического управления: особенности процесса проектирования

Здесь будем рассматривать САУ, полагая, что система многомерна и в этом случае ее эффективность определяют процессы на соответствующих (больше одного) выходах (например, задача управления перехватчиком в пространстве); имеет место большое число элементов, запасующих энергию, что позволяет говорить о высоком порядке дифференциальных уравнений, описывающих поведение системы в целом; структурная схема системы включает пересекающиеся цепи обратной связи и др. При проектировании многомерных систем, включающих кроме стационарных элементов звенья с переменными параметрами, нелинейные и распределенные элементы, методы исследования во многих случаях не позволяют сделать выводы по таким вопросам, как оценка влияния на качество системы изменения того или другого параметра, изменения характеристик системы при введении в структурную схему дополнительных контуров; важным является вопрос не только качественного, но и количественного влияния на динамику системы вводимых нелинейностей, например, нелинейных элементов типа идеальных ограничителей (например, для перехватчиков, скорость которых достигает несколько километров в секунду). Необходимо указать и на тот факт, что в случае многоконтурных систем расчеты проводятся непосредственно с многоконтурными схемами системы в целом.

Уже на стадии разработки аванпроекта, на которой ведется изыскание структуры системы, обеспечивающей безусловное выполнение требований технического задания с учетом перспектив развития класса изделий (например, на ближайшие 5 лет), реализуется аргументированный выбор или принимается решение о разработке новых технических средств системы, учитывающих современные достижения в конкретных областях, важной

является задача выбора методов проектирования. Из приведенного далека не полного перечня задач следует важность ведения на этом этапе для предварительной оценки основных характеристик системы аналитического рассмотрения вопросов и математического моделирования на ЭВМ. При эскизном проектировании, на стадии реализации которого производится уточнение и конкретизация структурной схемы, определяется ее детальный приборный состав, аналитические исследования и моделирования, включая физическое, продолжаются. Основной принцип формулируется так: *при проектировании сложных систем исследования аналитического содержания и моделирование на ЭВМ дополняют друг друга.*

Сказанное подтверждают основные этапы разработки моделей управления сложными системами:

- разработка теории и алгоритмов моделей управления объектом и алгоритмов аппаратуры;
- отработка программы модели на персональных компьютерах;
- отработка модели на математическом имитационном стенде (МИМС);
- отработка модели на комплексном имитационном стенде (КИМС);
- аттестация модели по результатам натурных испытаний.

Подчеркнем: **работа над моделью управления объектом продолжается в течение всего времени разработки системы.** Разработка полной динамической модели управления объектом ведется после выполнения эскизных проектов технических средств (элементов) системы.

Отметим следующее: КИМСы в свой состав включают, насколько это возможно, штатные элементы (например, бортовые ЭВМ) и, имеет место имитация физических процессов (например, излучатели, имитирующие отраженный и/или излучаемый сигнал).

В качестве примера рассмотрим сложную систему автоматического управления летательным аппаратом, структурная схема которой представлена на рис. 2.

Полагаем, что на этапе предварительного проектирования выбрана структурная схема контура наведения и технические средства для его реализации. При эскизном проектировании структурная схема была уточнена, определен приборный состав контура.

Структурная схема контура самонаведения, которая представлена на рис.2, содержит два канала управления:

- аэродинамический канал;
- газодинамический канал.

Как указывалось выше, перехватчик, использующий аэродинамическую схему, представляет собой осесимметричный летательный аппарат с четырьмя крестообразно расположенными крыльями (если они имеются) и рулями. Рули и крылья могут располагаться в одной плоскости или быть смещены относительно друг друга на 45° . Встречаются перехватчики не крестокрылой, а самолетной схемы.

Наибольшее распространение получили следующие аэродинамические схемы перехватчиков: нормальная схема с крылом, нормальная бескрылая схема и схема «утка».

С точки зрения управления критерием сравнения аэродинамических схем перехватчиков, а также способов создания управляющих сил и моментов, является маневренность ракеты.

К газодинамическим и комбинированным способам создания сил и моментов относятся отклонение вектора тяги маршевого двигателя и создание аэрореактивных сил с помощью специальных двигателей управления.[12]

Структурная схема системы в операторной форме представлена на рис. 3 На схеме нелинейные элементы также представлены матричными эквивалентами. При решении задачи синтеза рассматриваемого контура хорошо иллюстрируется эффективность аппарата структурных преобразований, причем элементами преобразований являются матрицы, что для ЭВМ являются удобным объектом расчетов. Легко выделяются основные и дополнительные цепи обратной связи с целью выявления их влияния на динамические свойства контура наведения в целом. Структурная схема наглядно отображает взаимосвязи между элементами схемы, пути прохождения сигналов в системе, указывает возможные способы эквивалентных замен сложных соединений на более простые и позволяет глубже проникать в физический смысл работы элементов и контура в целом.

Ключевой этап исследований — построение оператора системы управления ЛА в целом. Знание оператора позволяет рассмотреть основные задачи проектирования — синтез регулятора и анализ синтезированной системы.

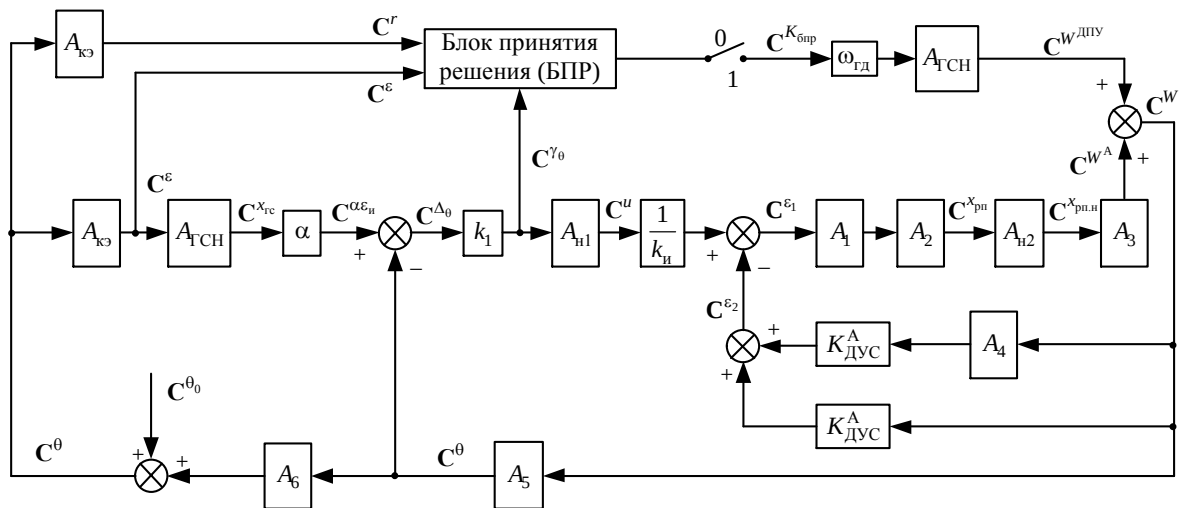


Рис.11. Структурная схема системы самонаведения в операторной форме с нелинейным кинематическим звеном, ограничением на управление и на выход рулевого привода

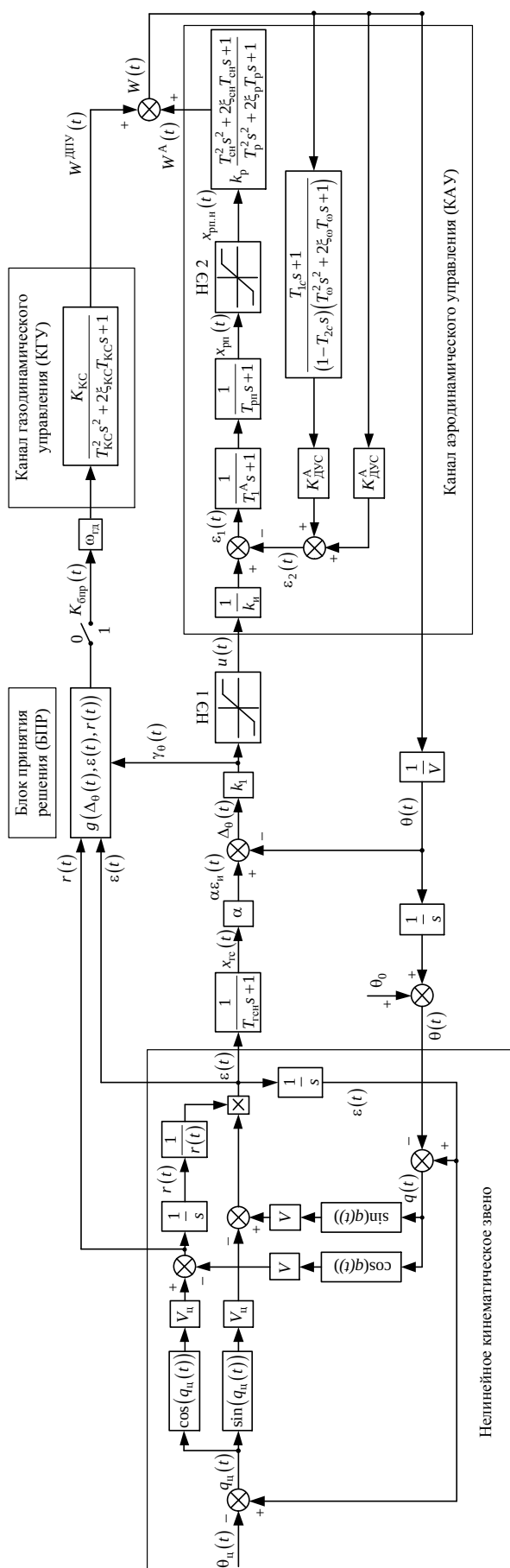


Рис.12. Структурная схема системы самонаведения наводимой по методу пропорционального сближения с нелинейным кинематическим звеном, ограничением на управление и на рулевой привод

При решении задач анализа матричные операторы всех элементов системы управления известны и, следовательно, можно рассчитать оператор $\mathbf{A}$ системы в целом, а с использованием приведенных выше формул решаются задачи детерминированного и, как будет показано ниже, корреляционного анализа (легко строятся и алгоритмы расчета статистических моментов высокого порядка, а также законов распределения).

Обратимся к рассмотрению структурной схемы (рис. 9)

Матричные операторы линейных элементов схемы вычисляются по следующим формулам:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{A}_{\text{гсн}} &= (\mathbf{T}_{\text{гсн}} \mathbf{I} + \mathbf{A}_{\text{и}})^{-1} \mathbf{A}_{\text{и}}; \mathbf{A}_1 = (\mathbf{T}_1^A \mathbf{I} + \mathbf{A}_{\text{и}})^{-1} \mathbf{A}_{\text{и}}; \\ \mathbf{A}_2 &= (\mathbf{T}_{\text{пр}} \mathbf{I} + \mathbf{A}_{\text{и}})^{-1} \mathbf{A}_{\text{и}}; \\ \mathbf{A}_3 &= (\mathbf{T}_p^2 \mathbf{I} + 2\mathbf{T}_p \xi_p \mathbf{A}_{\text{и}} + \mathbf{A}_{\text{и}}^2)^{-1} (\mathbf{T}_\omega^2 \mathbf{I} + 2\mathbf{T}_\omega \xi_\omega \mathbf{A}_{\text{и}} + \mathbf{A}_{\text{и}}^2) \mathbf{k}_p; \\ \mathbf{A}_4 &= \mathbf{A}_4^1 \mathbf{A}_4^2; \mathbf{A}_4^1 = (\mathbf{A}_{\text{и}} - \mathbf{T}_{2c} \mathbf{I})^{-1} (\mathbf{A}_{\text{и}} + \mathbf{T}_{2c} \mathbf{I}); \\ \mathbf{A}_4^2 &= (\mathbf{T}_\omega^2 \mathbf{I} + 2\mathbf{T}_\omega \xi_\omega \mathbf{A}_{\text{и}} + \mathbf{A}_{\text{и}}^2)^{-1} \mathbf{A}_{\text{и}}^2; \\ \mathbf{A}_5 &= \frac{1}{\mathbf{V}\mathbf{I}}; \mathbf{A}_6 = \mathbf{A}_{\text{и}}; \mathbf{A}_{\text{дпу}} = (\mathbf{T}_{\text{KC}}^2 \mathbf{I} + 2\mathbf{T}_{\text{KC}} \xi_{\text{KC}} \mathbf{A}_{\text{и}} + \mathbf{A}_{\text{и}}^2)^{-1} \mathbf{A}_{\text{и}}^2 \mathbf{K}_{\text{KC}}. \end{aligned} \right\} \quad (48)$$

Таким образом, построена математическая модель неизменяемой части системы. далее рассмотрим решение задач анализа и синтеза САУ.

Список литературы

1. Гавурин М.К. Лекции по методам вычислений. — М.: Издательство «Наука», 1971. — 248 с.
2. Флетчер К. Численные методы на основе метода Галеркина / Пер. с англ. — М.: Мир, 1988. — 352 с.
3. Дедус Ф.Ф. Классические ортогональные базисы дискретной переменной. Спектральные методы обработки информации в научных исследованиях. — Пушино. 1980.
4. Солодовников В.В. Частотный и спектральные методы в теории автоматического управления. Спектральные методы обработки информации в научных исследованиях. — Пушино. 1980.
5. Егупов Н.Д. Спектральный анализ нестационарных систем в специальных базисах. Спектральные методы обработки информации в научных исследованиях. — Пушино. 1980.
6. Мирошник И.В. Теория автоматического управления. Линейные системы. — СПб.: Питер, 2005. — 336 с.
7. Методы инженерного синтеза сложных систем управления: аналитический аппарат, алгоритмы приложения в технике. Вычислительно-аналитический эксперимент: аппарат матричных операторов и вычисли-

тельные технологии. / Под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. — М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. — 416 с.

8. Бейтмен Г., Эрдеи А. Высшие трансцендентные функции. — М.: Издательство «Наука», 1974. — 296 с.

9. Михлин С.Г. Вариационные методы в математической физике. ГИТТЛ. — М.: Издательство «Наука», 1957. — 476 с.

10. Березин И.С., Жидков Н.П. Методы вычислений (том 1). ГИФМЛ. — М.: 1962. — 464 с.

11. Солодовников В.В. Частотный метод в теории автоматического регулирования. — В сб. «Автоматичное управление и вычислительная техника». / Под ред. В.В. Солодовникова, выпуск 8. Издательство «Машиностроение», — М.: 1968. — 342 с.

12. Пупков К.А., Егупов Н.Д., Колесников Д.В., Мельников Д.В., Трофимов А.И. Высокоточные системы самонаведения. Расчет и проектирование, вычислительный эксперимент. — М.: Физматлит, 2011.—512 с.

13. Мизрохи В.Я. Проектирование управления зенитных ракет. — М.: Издательство ООО «Экслибрис-Пресс», 2010. — 253 с.

14. Востриков А.С., Французова Г.А. Теория автоматического регулирования. — Новосибирск: Издательство НГТУ, 2006. — 368 с.

15. Ньютон Дж.К., Гулд Л.А., Кайзер Дж.Ф. Теория линейных следящих систем. Аналитические методы расчета. / Под ред. А.М. Летова., ГИФМЛ. — М.: 1961. — 407 с.

Наинг Аунг Со – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: naingaungsoe128@gmail.com.

Ней Тве – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: naythway1984@gmail.com.

Naing Aung Soe, Nay Thway

MATRIX OPERATORS OF DIGITAL CONTROL SYSTEMS: ANALYTICAL SCHEME FOR CONTROL SYSTEM [II]

Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch, Kaluga,
248000, Russia

It is known that the computational algebra methods are effective tools meet the challenges of research systems and, more importantly, their synthesis. In this regard, relevant is the task of developing a mathematical description of the system of operator equations with matrix operator. A key factor in the high degree of effectiveness of this approach for a wide class of systems, including linear and non-linear with constant and variable parameters, is that the method of matrix operators for complex systems provides a ratio that determines the output of the system in which there is a clear dependence on the controller parameters. This allows you to find with the help of parametric optimization in a sense, the system parameters. Examine the provisions relating to the construction of mathematical models of signals and systems.

Keywords: *digital control systems, matrix operator, moment method, orthonormal basis.*

Naing Aung Soe, postgraduate of Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University. E-mail: naingaungsoe128@gmail.com.

Nay Thway, postgraduate of Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University. E-mail: naythway1984@gmail.com.

МАТРИЧНЫЕ ОПЕРАТОРЫ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ: ОРТОГОНАЛЬНЫЕ БАЗИСЫ ДИСКРЕТНОЙ ПЕРЕМЕННОЙ [1]

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

В настоящее время для сложных объектов, например, для летательных аппаратов различного назначения разрабатываются сложные информационно-вычислительные системы, в состав которых входит совокупность датчиков параметров собственного и относительного движения ЛА и цели, бортовую вычислительную систему для решения задач наведения. О степени сложности таких систем можно судить по требованиям, которые предъявляются, например, к высокоточным ракетам, обеспечивающих попадание в габариты цели, или к ракетам кинетического поражения целей (прямое попадание в боевой блок (ББ)). Системы управления ЛА относят к классу дискретных систем, учитывая факт обработки сигналов с соответствующими целями с помощью ЭВМ. Для решения задач исследования и синтеза важны является вопрос построения математической модели как элементов САУ, так и системы в целом. В статье рассматриваются методы, основа которых разложения сигналов по ортонормированным базисам дискретного переменного. Изучены положения, связанные с построением математических моделей сигналов и систем.

Ключевые слова: цифровая САУ, матричный оператор, ортогональный базис, математическая модель

Введение

Цифровая САУ — это система, в состав которой входит ЭВМ — ее центральный элемент. Назначение ЭВМ — обработка информации, поступающей от измерительных устройств (датчиков аналоговой природы, выходом которых являются электрические сигналы постоянного или переменного тока, кодовых датчиков, обеспечивающих получение параллельного цифрового кода, импульсных измерительных устройств, выходной сигнал которых — импульсная последовательность и др.).

Дискретность (обусловлена квантованием по уровню и времени) и **наличие запаздывания** в процессе обработки сигналов — важнейшие модельные особенности управляющей ЭВМ как цифрового регулятора (цифровое устройство формирования команд (ЦУФК)).

Современные ЭВМ имеют большую разрядную сетку, что позволяет квантованием сигналов по уровню пренебрегать и рассматривать их как решетчатые функции. Запаздывание же, порожденное процессом реализации алгоритма на ЭВМ приводит к тому, что сигнал, являющийся выходом ЭВМ, имеет смещение на величину τ относительного идеального процесса (при наличии соответствующей аргументации запаздыванием пренебрегают). С учетом сказанного сигнал после обработки ЭВМ представляет собой решетчатую функцию.

Дискретно-непрерывная природа — основная особенность систем с цифровой ЭВМ в контуре управления, и этим порождаются главные трудности их исследования и синтеза. При решении инженерных задач проектирования указанного класса систем обычно рассматриваются два подхода:[6]

- **первый подход** базируется на теоретической базе непрерывных систем и используя соответствующие положения этой базы формулируются задачи исследования и синтеза регуляторов, рассматриваются методы их решения. При первом подходе строится математическая модель непрерывного регулятора с наличием важной стадии — последующая дискретизация и реализация алгоритма синтеза на ЭВМ.

- теоретическая база **второго подхода** — рассмотрение задач построения математических моделей всех элементов проектируемой системы и системы в целом в классе дискретных систем. Содержание этого подхода позволяет учесть дискретно-непрерывную природу систем, и, кроме этого, принять во внимание запаздывание при реализации соответствующих алгоритмов. Во втором подходе синтезируется дискретный регулятор.

1. Математические модели аналоговых элементов систем управления в форме дифференциальных и интегральных уравнений

Положим, что все элементы системы описываются линейным дифференциальным уравнением, общий вид которого может быть представлен так:

$$\sum_{v=0}^n a_v(t) x^{(v)} = \sum_{v=0}^m b_v(t) y^{(v)}. \quad (1)$$

Приведенным уравнением описываются системы с сосредоточенными параметрами класса линейных (стационарных и нестационарных) систем.

Обозначая

$$L_x = \sum_{v=0}^n a_v(t) \frac{d^v}{dt^v}, \quad L_y = \sum_{v=0}^m b_v(t) \frac{d^v}{dt^v} \quad (2)$$

— линейные дифференциальные операторы соответственно порядка n и m , зависимость (1) можно переписать в виде $L_x x = L_y y$, $L_x^0 x = y_0$.

Описание систем с помощью дифференциальных уравнений или, как принято говорить, уравнениями с дифференциальными операторами, представляет собой **первую форму — дифференциальную**.

2. Математические модели в форме интегральных уравнений 1-го рода и 2-го рода

Интегральным называю уравнение, в котором неизвестная функция $x(t)$ стоит под знаком интеграла. Использование интегральных уравнений в некоторых отношениях является более целесообразным, чем дифференциальных; в частности, интегральное уравнение содержит в себе полную постановку задачи. Например, интегральное уравнение

$$x(t) = x_0 + \int_0^t f(\tau, x(\tau)) d\tau \quad (3)$$

эквивалентно задаче Коши для дифференциального уравнения

$$\frac{dx}{dt} = f(t, x(t)), \quad x(0) = x_0.$$

Таким образом, если задачи Коши требует задания $x(0) = x_0$, то для уравнения (3) не требуется задавать никаких дополнительных условий (начальных и граничных).

Важным является и тот факт, что в интегральных уравнениях переход от одной переменной ко многим является естественным. Так, многомерным аналогом (3) является уравнение

$$\left. \begin{aligned} \int_G K(\bar{t}, \bar{\tau}, x(\bar{\tau})) d\bar{\tau} &= \bar{y}(\bar{t}, x(\bar{t})), \\ \bar{t} &= (t_1, t_2, \dots, t_p) \in G(\bar{t}) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

отличающееся от (3) только тем, что интегрирование проводится по многомерной области G . Поскольку уравнения (3) и (4) не требуют дополнительных условий и полностью определяют задачу, аналогия является полной. Отсюда следует, что теоретическое обоснование постановок и методов решения одномерных задач, описываемых интегральными уравнениями, непосредственно обобщается на случай многих измерений.

В терминах же дифференциальных уравнений переход от одной переменной к нескольким равносильно переходу от описания явлений и процессов обыкновенными дифференциальными уравнениями к описанию уравнениями в частных производных, что является принципиальным усложнением, приводит к новым постановкам задач и требует разработки новых методов для их обоснования и решения.

Сейчас можно говорить о определенном и достаточно обширном круге задач математического и прикладного содержания, для решения которых эффективно используются интегральные уравнения и интегральные преобразования.

Рассматриваемая стадия аналитической схемы построения метода — переход к операторному уравнению с интегральным оператором Вольтерра 2-го рода [7]

$$x(t) - \int_0^t k_x(t, \tau) x(\tau) d\tau = f(t), 0 \leq t \leq T, \quad (5)$$

где

$$k_x(t, \tau) = \sum_{k=0}^{n-1} \frac{(-1)^k}{(n-1)!} \frac{d^k}{d\tau^k} \left[a_k(\tau) (t - \tau)^{n-1} \right];$$

$$f(t) = \int_0^t k_y(t, \tau) y(\tau) d\tau;$$

$$k_y(t, \tau) = \sum_{k=0}^m \frac{(-1)^k}{(n-1)!} \frac{d^k}{d\tau^k} \left[b_k(\tau) (t - \tau)^{n-1} \right].$$

Обратим внимание на то, что в уравнении (5) ядро $k_x(t, \tau)$ отлично от нуля на треугольнике $0 \leq \tau \leq t \leq T$, т.е. $k_x(t, \tau) = 0$ при $t < \tau$.

Ниже будут рассматриваться и уравнение (5), когда левая часть не зависит от $x(t)$, т.е. $x(t)$ входит только под знак интеграла (задача решения уравнения в этом случае оказывается некорректно поставленной). В этом случае имеют место уравнение Вольтерра первого рода

$$\int_0^t k_x(t, \tau) x(\tau) d\tau = \int_0^t k_y(t, \tau) y(\tau) d\tau, \quad (6)$$

где

$$\begin{cases} k_x(t, \tau) = \sum_{k=0}^n \frac{(-1)^k}{n!} \frac{d^k}{d\tau^k} \left[a_k(\tau) (t - \tau)^n \right]; \\ k_y(t, \tau) = \sum_{k=0}^n \frac{(-1)^k}{n!} \frac{d^k}{d\tau^k} \left[b_k(\tau) (t - \tau)^n \right]. \end{cases}$$

Уравнения (5) и (6), являющиеся уравнениями Вольтерра 2-го рода (уравнение (1)) и 1-го рода (уравнение (2)) могут быть записаны в форме уравнений Фредгольма

$$x(t) - \int_0^T k_x^\phi(t, \tau) x(\tau) d\tau = \underbrace{\int_0^T k_y^\phi(t, \tau) y(\tau) d\tau}_{f(t)}, \quad (7)$$

и

$$\int_0^T k_x^\phi(t, \tau) x(\tau) d\tau = \int_0^T k_y^\phi(t, \tau) y(\tau) d\tau, \quad (8)$$

где

$$k_x^\phi(t, \tau) = \begin{cases} k_x(t, \tau), & 0 \leq \tau \leq t; \\ 0, & \tau > t. \end{cases}$$

3. Этап дискретизации — построение дискретных аналогов интегральных уравнений Фредгольма

Уравнение (6) и (8) эквивалентны дифференциальному уравнению (1) при $a_n \neq 1$. Поскольку в рассматриваемом подходе изучается класс цифровых систем, то процесс дискретизации может быть выполнен с помощью метода сеток. Это простейший метод, однако он для одномерных задач позволяет получить решения инженерных задач, как показала практика, с хорошей точностью. Для представления определенных интегралов в (7) и (8) суммой воспользуемся формулой

$$\int_0^T f(t) dt = \sum_{i=1}^N A_i f(t_i) + R[f], \quad (9)$$

где t_i — фиксированные абсциссы отрезка $[0, T]$ (узлы квадратурной формулы) и, таким образом, рассматривается функция $f(t)$, заданная своими значениями в конечном числе точек отрезка $[0, T]$: $t_1, t_2, \dots, t_N$, A_i — известные коэффициенты, не зависящие от $f(t)$, $R[f]$ — остаточный член (ошибка).

Если в интегральном уравнении (7) принять $t = t_i$ ($i = 0, 1, \dots, N$), то можно получить соотношение вида

$$x(t_i) - \int_0^T k_x^\phi(t_i, \tau) x(\tau) d\tau = \int_0^T k_y^\phi(t_i, \tau) y(\tau) d\tau, \quad i = 0, 1, \dots, N, \quad (10)$$

из которого после замены интеграла конечной суммой имеет место результат — система уравнений

$$x(t_i) - \sum_{j=1}^N A_j k_x^\phi(t_i, \tau_j) x(\tau_j) = \sum_{j=1}^N A_j k_y^\phi(t_i, \tau_j) y(\tau_j) \quad (11)$$

— дискретный аналог уравнения Фредгольма 2 рода.

Или, что тоже самое

$$x_i - \sum_{j=1}^N A_j k_{ij}^\phi x_j = f_i, \quad 1 \leq i \leq N, \quad (12)$$

где $x_i = x(t_i)$, $k_{ij}^\phi = k_x^\phi(t_i, \tau_j)$, $f_i = f(t_i)$, коэффициенты A_j определяются типом используемой квадратурной формулы.

Положим, что узлы квадратурной формулы t_i являются равноотстоящими, т.е. следующими друг за другом с шагом $h = T/(N-1)$, $t_i = (i-1)h$, $i = \overline{1, N}$.

Для этого случая числовые коэффициенты A_i , точки t_i и шаг h определяются формулами:

$$A_i = \frac{T}{(N-1)}; \quad t_i = h(i-1), \quad i = \overline{1, N}; \quad h = \frac{T}{(N-1)}$$

— для формулы прямоугольников;

$$A_1 = A_N = \frac{h}{2}; A_2 = A_3 = \dots = A_{N-1} = h; t_i = h(i-1), i = \overline{1, N}; h = \frac{T}{(N-1)}$$

— для формулы трапеций;

$$A_1 = A_{2m+1} = \frac{h}{3}; A_2 = A_4 = \dots = A_{2m} = \frac{4h}{3}; A_3 = A_5 = \dots = A_{2m-1} = \frac{2h}{3};$$

$$t_i = h(i-1), i = \overline{1, N}; h = \frac{T}{(N-1)}$$

— для формулы Симпсона при $N = 2m + 1, m = 1, 2, \dots$

Приведем общие положения, связанные с решением уравнения (12), следуя [1]. Перепишем (12) в виде

$$Ax = f, \quad (13)$$

где x и f — элементы метрических пространств X и F (в общем случае бесконечномерных, например, $X = C[0, T], F = C[0, T]$); $A: X \rightarrow F$ — оператор, действующий из X в F).

Введем пространства X_N и F_N , аппроксимирующие с использованием сеточного представления функций пространства X и F . Связь между парами будем считать заданной операторами $A_x: X \rightarrow X_N; A_f: F \rightarrow F_N$ и $A_b: X_N \rightarrow X$

Тогда уравнение (13) заменяется на приближенное

$$A_N X_N = f_N, \quad (14)$$

где $A_N: X_N \rightarrow F_N$ — оператор, аппроксимирующий оператор A .

Из предыдущих рассуждений следует, что $X_N = F_N = R^N$. Теперь введем следующие понятия. Допустим, что (14) имеет единственное решение

$$\tilde{x}_N(t) = A_b(x_N^*) \in X. \text{ Так как роль } x(t) + \int_0^t k_x(t, \tau)x(\tau)d\tau = y_0(t) \text{ заключается}$$

в построении (14) и нахождении его решения, рассматриваемого как каркас непрерывного решения $x(t)$, то для построения приближенного решения по его каркасу или, что тоже, для восполнения каркаса приближенного решения применяется оператор A_b , который будем называть *оператором восполнения*. Операторы же A_x и A_f — операторы сноса [1].

Пусть r_X — метрическая функция в X . В дальнейшем положим $X = F = C[0, T]$. Близость приближенного решения $\tilde{x}_N$ к точному x^* измеряется величиной $\sigma_N = r_X(x_N^*, x^*) = \|x_N^* - x^*\|_X$; часто представляет интерес и величина

$$\tau_N = r_{X_N}(x_N^*, A_x x^*) = \|A_x x^* - x_N^*\|_{X_N}. \quad (15)$$

Если $\sigma_N \rightarrow 0$ то говорят, что имеет место сходимость приближенных решений в X ; а если $\tau_N \rightarrow 0$, то имеет место сходимость каркасов приближенных решений в X_N .

Рассчитывать на сходимость приближенных решений уравнения (7) к точному можно лишь, если уравнение (14) в указанном выше смысле приближает (аппроксимирует) уравнение (13). Точный смысл такого приближения может рассматриваться только с учетом того, что это — уравнения в разных пространствах. Говорят, что уравнение (14) аппроксимирует уравнение (13) (или что оператор A_N аппроксимирует оператор A) на элементе $x \in D(A)$ если мера аппроксимации

$$\gamma_N(x) = \|A_N A_x x - A_f A x\|_{R^N} \quad (16)$$

стремится к нулю при $N \rightarrow \infty$. Соотношение $\gamma_N(x) \rightarrow 0$ ($N \rightarrow \infty$) называют условием аппроксимации.[1]

Как ранее указывалось, уравнение Фредгольма (7) получают из уравнения Вольтерра (5), полагая в (5) $k_x(t, \tau) = 0$ при $t < \tau$. Тогда дискретный аналог для уравнения (5) представляет собой треугольную алгебраическую систему вида

$$x_i - \sum_{j=1}^i A_j \tilde{k}_{ij} x_j = f_i, \quad 1 \leq i \leq N. \quad (17)$$

Укажем на важное положение: поскольку уравнения (3) и (4) эквивалентны дифференциальному уравнению (1), то в общем случае при выборе квадратурных формул, учитывая, что $k_x^\phi(t, \tau)$ и $f(t)$ имеют достаточное число непрерывных производных, целесообразно применять формулы высокого порядка точности.

При общем же рассмотрении вопроса, не относящегося к изучаемой задаче ядро $k^\phi(t, \tau)$ и(или) правая часть $f(t)$ недостаточно гладки, а в ряде случаев, (особенно типичен случаи на диагонали квадрата $0 \leq t \leq T, 0 \leq \tau \leq T$) имеют место разрывы; встречаются особенности и на других линиях в плоскости (t, τ) .

4. Ортогональные многочлены дискретного переменного приближения функции дискретной переменной по методу наименьших квадратов: аналитическая схема построения многочленов

Рассматриваемая задача состоит в изучении общих положений связанных с важной проблемой, формулируемой как приближение функции $x(t_j)$, $j = 0, 1, \dots, N$, при этом $x(t_j)$ является решением уравнения (17), являющегося дискретным аналогом уравнения Фредгольма 2 рода (7). Положим, что функция $x(t)$ известна (рассматривается первая стадия, т.е. задача только приближения, а затем будет изучена вторая стадия — нахождение

ния $x(t_j)$, $j = 0, 1, \dots, N$ решения уравнению (7) с построенной математической моделью полученной в результате реализации первой стадии) и задана значениями в конечном числе точек отрезка $[0, T]$, $t_0, t_1, \dots, t_N$. Пусть $\varphi_0(t), \varphi_1(t), \dots, \varphi_l(t)$ — некоторая система линейно независимых функций на $[0, T]$, $l \leq N$.

Задача: построение обобщенного многочлена, составленного из указанных функций, такого, чтобы

$$\sum_{i=0}^N [x(t_i) - \hat{\Phi}(t_i)]^2 \quad (18)$$

имело наименьшее возможно значение [10].

Можно рассмотреть задачу с введением весовой функции $\rho(t_i)$; тогда

$$\sum_{i=0}^N [x(t_i) - \hat{\Phi}(t_i)]^2 \rho(t_i) \quad (19)$$

Напомним, что если рассматривать систему функции $X = \{x_k(t) : k = 1, 2, \dots\}$, то скалярное произведение определяется формулой

$$(x_{k_1}(t), x_{k_2}(t)) = \sum_{i=0}^N x_{k_1}(t_i) x_{k_2}(t_i) \rho(t_i), \quad (20)$$

а норма — зависимостью

$$\|x\| = \sqrt{\sum_{i=0}^N x^2(t_i) \rho(t_i)} \quad (21)$$

Полагается, что система $\{\varphi_k(t) : k = 0, 1, \dots\}$ является системой Чебышева (функция $1, t, t^2, \dots, t^N$ образуют систему Чебышева на любом отрезке $[0, T]$ и, следовательно, теория наилучших приближений применима к этой системе функций). Тогда обобщенный многочлен, принимающий в точках $t_i, i = 0, 1, \dots, N$ заданные значения, является единственным. Если

$$\hat{\Phi}(t) = c_0^\phi \varphi_0(t) + c_1^\phi \varphi_1(t) + \dots + c_l^\phi \varphi_l(t)$$

является многочленом наилучшего в указанном смысле приближения, то выполнены условия

$$\sum_{j=0}^l c_j^\phi (\varphi_j, \varphi_k) = (x, \varphi_k), \quad k = 0, 1, \dots, l. \quad (22)$$

Введем обозначения $s_{jk} = \sum_{i=0}^N \varphi_j(x_i) \varphi_k(x_i) \rho(x_i)$, $r_k = \sum_{i=0}^N x(t_i) \varphi_k(t_i) \rho(t_i)$

.

Очевидно, что $c_k^{\phi}, k = \overline{0, l}$ удовлетворяют следующей системе линейных уравнений

[illegible]

Определитель системы (23) является определителем Грама системы линейно независимых элементов и положителен, из чего следует система (23) имеет единственное решение.

Список литературы

1. Гавурин М.К. Лекции по методам вычислений. — М.: Издательство «Наука», 1971. — 248 с.
2. Флетчер К. Численные методы на основе метода Галеркина / Пер. с англ. — М.: Мир, 1988. — 352 с.
3. Дедус Ф.Ф. Классические ортогональные базисы дискретной переменной. Спектральные методы обработки информации в научных исследованиях. — Пущино. 1980.
4. Солодовников В.В. Частотный и спектральные методы в теории автоматического управления. Спектральные методы обработки информации в научных исследованиях. — Пущино. 1980.
5. Егупов Н.Д. Спектральный анализ нестационарных систем в специальных базисах. Спектральные методы обработки информации в научных исследованиях. — Пущино. 1980.
6. Мирошник И.В. Теория автоматического управления. Линейные системы. — СПб.: Питер, 2005. — 336 с.
7. Методы инженерного синтеза сложных систем управления: аналитический аппарат, алгоритмы приложения в технике. Вычислительно-аналитический эксперимент: аппарат матричных операторов и вычислительные технологии. / Под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. — М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. — 416 с.
8. Бейтмен Г., Эрдейи А. Высшие трансцендентные функции. — М.: Издательство «Наука», 1974. — 296 с.
9. Михлин С.Г. Вариационные методы в математической физике. ГИТТЛ. — М.: Издательство «Наука», 1957. — 476 с.
10. Березин И.С., Жидков Н.П. Методы вычислений (том 1). ГИФМЛ. — М.: 1962. — 464 с.
11. Солодовников В.В. Частотный метод в теории автоматического регулирования. — В сб. «Автоматичное управление и вычислительная техника». / Под ред. В.В. Солодовникова, выпуск 8. Издательство «Машиностроение», — М.: 1968. — 342 с.

12. Пупков К.А., Егупов Н.Д., Колесников Д.В., Мельников Д.В., Трофимов А.И. Высокоточные системы самонаведения. Расчет и проектирование, вычислительный эксперимент. — М.: Физматлит, 2011.—512 с.

13. Мизрохи В.Я. Проектирование управления зенитных ракет. — М.: Издательство ООО «Экслибрис-Пресс», 2010. — 253 с.

14. Востриков А.С., Французова Г.А. Теория автоматического регулирования. — Новосибирск: Издательство НГТУ, 2006. — 368 с.

15. Ньютон Дж.К., Гулд Л.А., Кайзер Дж.Ф. Теория линейных следящих систем. Аналитические методы расчета. / Под ред. А.М. Летова, ГИФМЛ. — М.: 1961. — 407 с.

Наинг Аунг Со – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: naingaungsoe128@gmail.com.

Ней Тве – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: naythway1984@gmail.com.

Naing Aung Soe, Nay Thway

MATRIX OPERATORS OF DIGITAL CONTROL SYSTEMS, ORTHOGONAL BASES OF DISCRETE VARIABLES [I]

Currently, for complex objects, such as aircraft for various purposes are developed sophisticated data-processing systems, which include a set of sensors and the parameters of its own relative motion of the aircraft and the target, the onboard computer system for problem solving guidance. On the complexity of such systems can be judged by the requirements that apply, for example, precision missiles, providing ingress in size target, or to kinetic missiles hit targets (direct hit in a combat unit (BB)). Flight control system belongs to a class of discrete systems, consider the fact that the signal processing with the relevant objectives with the help of computers. To solve the problems of research and synthesis is an important question of constructing a mathematical model of how the elements of ACS and the system as a whole. The article discusses the methods, the basis of which the decomposition of signals with respect to orthonormal bases of a discrete variable. Examine the provisions relating to the construction of mathematical models of signals and systems.

Keywords: Digital control systems, matrix operator, orthogonal basis, a mathematical model

Naing Aung Soe, postgraduate of Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University. E-mail: naingaungsoe128@gmail.com.

Nay Thway, postgraduate of Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University. E-mail: naythway1984@gmail.com.

МАТРИЧНЫЕ ОПЕРАТОРЫ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ: ОРТОГОНАЛЬНЫЕ БАЗИСЫ ДИСКРЕТНОЙ ПЕРЕМЕННОЙ [Ш]

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

В настоящее время для сложных объектов, например, для летательных аппаратов различного назначения разрабатываются сложные информационно-вычислительные системы, в состав которых входит совокупность датчиков параметров собственного и относительного движения ЛА и цели, бортовую вычислительную систему для решения задач наведения. О степени сложности таких систем можно судить по требованиям, которые предъявляются, например, к высокоточным ракетам, обеспечивающих попадание в габариты цели, или к ракетам кинетического поражения целей (прямое попадание в боевой блок (ББ)). Системы управления ЛА относят к классу дискретных систем, учитывая факт обработки сигналов с соответствующими целями с помощью ЭВМ. Для решения задач исследования и синтеза важны является вопрос построения математической модели как элементов САУ, так и системы в целом. В статье рассматриваются методы, основа которых разложения сигналов по ортонормированным базисам дискретного переменного. Изучены положения, связанные с построением математических моделей сигналов и систем.

Ключевые слова: цифровая САУ, матричный оператор, ортогональный базис, математическая модель.

Введем понятие системы многочленов, ортогональных на множестве равноотстоящих точек. Положим, что $\rho(t_i)=1$, задано $N+1$ равноотстоящих узлов $t_0, t_1, \dots, t_N$, $t_i - t_{i-1} = h$.

Выполним замену $t' = \frac{t-t_0}{h}$, тогда точкам $t_0, t_1, \dots, t_N$ будут соответствовать точки $0, 1, 2, \dots, N$ (положим, что замена выполнена и вместо t' будем пользоваться принятым обозначением t). Поставим задачу: построение многочленов $\varphi_{k,N}(t)$, $k=0, 1, \dots, l \leq N$, последовательно возрастающих степеней k , обладающих свойством [10]

$$\sum_{i=0}^N \varphi_{k,N}(i) \varphi_{j,N}(i) = 0, \quad k \neq j \quad (24)$$

Введем понятие факториальных многочленов $t^{(N)}$ порядка N , определение которых звучит так: Факториальным многочленом $t^{(N)}$ порядка

N называют многочлен степени N с коэффициентом при старшей степени, равным единице, обращающийся в нуль в точках $0, 1, 2, \dots, N-1$, т.е.

$$t^{(N)} = t(t-1)(t-2)\cdots(t-N+1).$$

Легко показать, что любой многочлен степени N можно представить как линейную комбинацию факториальных многочленов степеней, не превосходящих N , при этом имеют место следующие тождества [10]:

$$\left. \begin{aligned} (t+1)^{(N)} - t^{(N)} &= Nt^{(N-1)}, \\ \sum_{j=0}^N (t+j)^k &= \frac{(t+N+1)^{k+1} - t^{(k+1)}}{k+1}. \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

Вернемся к задаче построения многочлена

$$\varphi_{m,N}(t) = 1 + b_1 t^{(1)} + b_2 t^{(2)} + \dots + b_m t^{(m)}. \quad (26)$$

Приведем зависимости, определяющие $\varphi_{m,N}(t)$ и полученные в [10]:

$$\begin{aligned} \varphi_{0,N}(t) &= 1; \quad \varphi_{1,N}(t) = 1 - \frac{2t}{N}; \\ \varphi_{2,N}(t) &= 1 - \frac{6t}{N-1} + \frac{6t^2}{N(N-1)}; \end{aligned} \quad (27)$$

$$\varphi_{3,N}(t) = 1 - \frac{2(6N^2 - 3N + 2)t}{N(N-1)(N-2)} + \frac{30t^2}{(N-1)(N-2)} - \frac{20t^3}{N(N-1)(N-2)}; \dots$$

Воспользовавшись положениями общей теории, а так же зависимостями для отыскания коэффициентов разложения, например, функции $x(t)$, можно записать соотношения $\tilde{x}_l(t) = c_0^x \varphi_{0,N}(t) + c_1^x \varphi_{1,N}(t) + \dots + c_l^x \varphi_{l,N}(t)$,

где

$$c_i^x (\varphi_{i,N}(t), \varphi_{i,N}(t)) = (x(t), \varphi_{i,N}(t)), \quad i = 0, 1, 2, \dots, l. \quad (28)$$

$$\text{Отсюда следует: } c_i^x = \frac{\sum_{k=0}^N x(k) \varphi_{i,N}(k)}{\sum_{k=0}^N \varphi_{i,N}^2(k)} = \frac{(2i+1)N^{(i)}}{(i+N+1)^{(i+1)}} \sum_{k=0}^N x(k) \varphi_{i,N}(k). \quad (29)$$

Погрешность определяется формулой

$$\delta_l^2 = \sum_{k=0}^N [x(k) - \tilde{x}_l(k)]^2 = \sum_{k=0}^N x^2(k) - \sum_{k=0}^N \frac{(k+N+1)^{k+1}}{(2k+1)N^k} (c_k^x)^2. \quad (30)$$

Пример. Для функции $\sin \pi \xi$ на отрезке $[-1, +1]$ необходимо построить многочлен наилучшего приближения в совокупности многочленов степени не выше третьей. Для расчета будут использоваться значения функции в точках:

- промежуток $[-1, +1]$;
- узлы:
- значения $\sin \pi \xi$ в узлах
- узлы на промежутке $[0, 1]$

$\overline{1}$	$\overline{0,5}$	0	$\overline{0,5}$	1	
0	$\overline{1}$	0	$\overline{1}$	0	$\overline{1}$
0	1	2	3	4	5

Учитывая, что

$$\varphi_{0,4}(t) = 1;$$

$$\varphi_{1,4}(t) = 1 - \frac{t}{2};$$

$$\varphi_{2,4}(t) = 1 - 2t + \frac{t^2}{2};$$

$$\varphi_{3,4}(t) = 1 - \frac{43}{6}t + 5t^2 - \frac{5t^3}{6},$$

соотношение для приближения функции $x(t)$ имеет вид

$$\tilde{x}_3(t) = c_0^x \varphi_{0,4}(t) + c_1^x \varphi_{1,4}(t) + c_2^x \varphi_{2,4}(t) + c_3^x \varphi_{3,4}(t),$$

а зависимости, определяющие коэффициенты $c_0^x, c_1^x, c_2^x, c_3^x$ определены так:

$$c_0^x = \frac{\sum_{k=0}^N x(k) \varphi_{0,4}(k)}{\sum_{k=0}^N \varphi_{0,4}^2(k)} = \frac{1}{5}(0 - 1 + 0 + 1 + 0) = 0,$$

поскольку

$$\sum_{k=0}^4 \varphi_{0,4}^2(k) = 5;$$

$$\sum_{k=0}^4 x(k) \varphi_{0,4}(k) = (1 \cdot 0 + 1 \cdot (-1) + 1 \cdot 0 + 1 \cdot (+1) + 1 \cdot 0) = 0.$$

Аналогично получим: $c_1^x = -\frac{2}{5}$; $c_2^x = 0$; $c_3^x = \frac{2}{5}$;

Выше были рассмотрены вопросы, связанные с построением математических моделей элементов сложных САУ, в структуру которых входят как непрерывные, так и дискретные звенья.

Выше было введено не только понятие многочленов дискретного переменного, но и рассмотрена аналитическая схема построения многочленов наилучшего приближения по методу наименьших квадратов. При изучении вопросов математического или прикладного содержания применяются классические ортогональные многочлены дискретного переменного, имеющие соответствующие весовые функции (функции скачков), а так же промежутки определения (множество $\Omega_1 = [0, N-1]$, $\Omega_2 = [0, N]$, $\Omega_3 = [0, \infty)$). К этим многочленам относят многочлены Чебышева, Кравчука, Шарлье, Мейкснера, В. Гана. Все эти многочлены имеют много общих

свойств, среди которых важным является конечно-разностный аналог формулы Родрига [8]

$$P_n(t) = \frac{\Delta^n [\rho(t-n)M(t)M(t-1)\cdots M(t-n+1)]}{K_n \rho(t)}, \quad (31)$$

где K_n — постоянные, $M(t)$ — многочлен от t , коэффициенты которого не зависят от n , Δ — разностный оператор вида

$$\Delta f(t) = f(t+1) - f(t), \\ \Delta^{n+1} f(t) = \Delta [\Delta^n f(t)], \quad n = 1, 2, \dots$$

Вопросы, связанные с содержанием задач теории управления, с необходимой степенью детализации рассмотрены ниже.

5. Классические ортогональные базисы дискретной переменной [3]. Базисы, определенные на отрезке $[0, N-1]$

В рассмотренных выше положениях, связанных с задачей построения решений дискретных аналогов интегральных уравнений Фредгольма, как решения уравнений, так и правые части определяются их значениями в дискретные моменты времени.

В подобных задачах, а так же при исследовании процессов в цифровых системах можно использовать ортогональные базисы дискретного аргумента. В этом случае при описании сигнала определяются его значения лишь в дискретные моменты времени.

В работах [3,8] и др. исследованы свойства классических ортогональных базисов дискретной переменной, представленных в табл. 1. Их отличительной особенностью является то, что кроме многочленов Чебышева, они имеют от одной до трех варьируемых параметров, *изменение которых в определенных пределах и соотношениях существенно меняет свойства того или иного ортогонального базиса, а также характер весовых функций* (в дискретном варианте их называют функциями скачков).

Важным является тот факт, что возможность рассматриваемых базисов существенно менять свои характеристики в зависимости от изменения варьируемых параметров делает целесообразным применение указанных ортогональных систем при изучении широкого спектра практических задач.

Из табл. 1 следует, что указанные базисы делятся на два класса. К первому классу относятся ортогональные системы Чебышева и Кравчука, *особенностью которых является фиксированный промежуток существования*. Базисы Шарлье, Майкснера и Гана составляют другой класс — *они определены на промежутке $(0, \infty)$* .

Таблица 1

Название многочлена	Обозначение	Общая формула	Функция скачков (функция веса)	Промежуток существования
Чебышева	$T_n(t)$	$n! \Delta^n \left[\binom{t}{n} \binom{t-N}{n} \right]$	1	$0, N-1$
Кравчука	$K_n(t; pq)$	$\frac{(-1)^n t! (N-t)!}{n! p^t q^{N-t}} \Delta^n \left[\frac{p^t q^{N-t+n}}{(t-n)! (N-t)!} \right]$	$\binom{N}{t} p^t q^{N-t}$ $p > 0, q > 0,$	$0, N$

			$p+q=1$	
Шарлье	$C_n(t; \alpha)$	$\frac{t}{\alpha^2} \Delta^n \left[\frac{\alpha^{t-n}}{(t-n)!} \right]$	$e^{-\alpha} \frac{\alpha^t}{t}$ $\alpha > 0$	$0, \infty$
Майкснера	$M_n(t; \beta, c)$	$\frac{t!}{(\beta)_t} \frac{\Delta}{c^{t+n}} \left[\frac{c^t (\beta)_t}{(t-n)!} \right]$	$\frac{c^t (\beta)_t}{t!}$ $0 < c < 1,$ $\beta > 0$	$0, \infty$
В. Гана (обобщенные многочлены Чебышева)	$\Gamma_n(t; \beta, \gamma, \delta)$	$\frac{1}{n!} \frac{t! (\delta)_t}{(\beta)_t (\gamma)_t} \Delta^n \left[\frac{(\beta)_t (\gamma)_t}{(t-n)! (\delta)_{t-n}} \right]$	$\frac{(\beta)_t (\gamma)_t}{t! (\delta)_t}$	$0, \infty$

Рассмотрим свойства ортогональных базисов.

Многочлены Чебышева. Здесь и в дальнейшем независимый аргумент будем обозначать t , имея в виду, что он может принимать только положительные целочисленные значения.

Общее выражение многочленов Чебышева приведено в табл. 1 в виде конечно-разностной формулы Родрига.

Приведем несколько первых многочленов, записанных в явном виде:

$$\begin{aligned}
T_{0,N}(t) &= 1; \\
T_{1,N}(t) &= 1 - N + 2t; \\
T_{2,N}(t) &= (1 - N) + (1 - N)^2 + 6(1 - N)t + 6t^2; \\
T_{3,N}(t) &= 2(1 - N) + 3(1 - N)^2 + (1 - N)^3 + \\
&\quad + 2 \left[2 + 3(1 - N) + 6(1 - N)^2 \right] t + 30(1 - N)t^2 + 20t^3; \\
T_{4,N}(t) &= 6(1 - N) + 11(1 - N)^2 + 6(1 - N)^3 + (1 - N)^4 + \\
&\quad + 10 \left[5(1 - N) + 3(1 - N)^2 + 2(1 - N)^3 \right] t + \\
&\quad + 10 \left[5 + 3(1 - N) + 9(1 - N)^2 \right] t^2 + 140(1 - N)t^3 + 70t^4; \\
T_{5,N}(t) &= 24(1 - N) + 50(1 - N)^2 + 35(1 - N)^3 + 10(1 - N)^4 + (1 - N)^5 + \\
&\quad + 2 \left[24 + 50(1 - N) + 140(1 - N)^2 + 45(1 - N)^3 + 15(1 - N)^4 \right] t + \\
&\quad + 210 \left[3(1 - N) + (1 - N)^2 + (1 - N)^3 \right] t^2 + \\
&\quad + 140 \left[3 + (1 - N) + 4(1 - N)^2 \right] t^3 + 630(1 - N)t^4 + 252t^5; \dots
\end{aligned} \tag{32}$$

$T_{k,N}(t)$ можно записать так $T_{k,N}(t) = c_{k0} + c_{k1}t + c_{k2}t^2 + \dots + c_{kk}t^k$.

Полиномы Чебышева ортонормированы, т.е.

$$\sum_{t=0}^N T_{k,N}(t) T_{j,N}(t) = \delta_{kj}.$$

Полиномы можно записать в форме

$$\begin{pmatrix} T_{0,N}(t) \\ T_{1,N}(t) \\ T_{2,N}(t) \\ \vdots \\ T_{l,N}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{00}(N) & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ c_{10}(N) & c_{11}(N) & 0 & \cdots & 0 \\ c_{20}(N) & c_{21}(N) & c_{22}(N) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{l0}(N) & c_{l1}(N) & c_{l2}(N) & \cdots & c_{ll}(N) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ t \\ t^2 \\ \vdots \\ t^l \end{pmatrix}. \quad (33)$$

Функция скачков (функция веса):

$$\rho(t) = 1.$$

Норма ортогональных полиномов:

$$\|T_{k,N}(t)\| = \frac{\sqrt{N(N^2-1^2)(N^2-2^2)\cdots(N^2-k^2)}}{\sqrt{2k+1}}. \quad (34)$$

Рекуррентная формула:

$$(k+1)T_{(k+1),N}(t) - (2k+1)(2t-N+1)T_{k,N}(t) + k(N^2-k^2)T_{(k-1),N}(t) = 0.$$

Функция дискретного переменного $f(t)$ разлагается в ряд многочленов Чебышева по формуле:

$$c_k^f = \sum_{t=0}^{N-1} f(t)T_{k,N}(t) \frac{\sqrt{2k+1}}{\sqrt{N(N^2-1^2)(N^2-2^2)\cdots(N^2-k^2)}}, \quad k = \overline{0, l}. \quad (35)$$

Формула построения функции $f(t)$ в форме ряда:

$$f(t) \approx \tilde{f}(t) = \sum_{k=0}^l c_k^f \frac{1}{\|T_{k,N}(t)\|} T_{k,N}(t). \quad (36)$$

Многочлены Чебышева выделяются из всех классических тем, что не содержат в общей формуле ни одного варьируемого параметра, в связи с чем свойства многочленов не изменяются в отличие от других базисов дискретного аргумента. Функция скачков на промежутке ортогональности постоянна. Графики первых пяти полиномов Чебышева представлены на рис. 1.

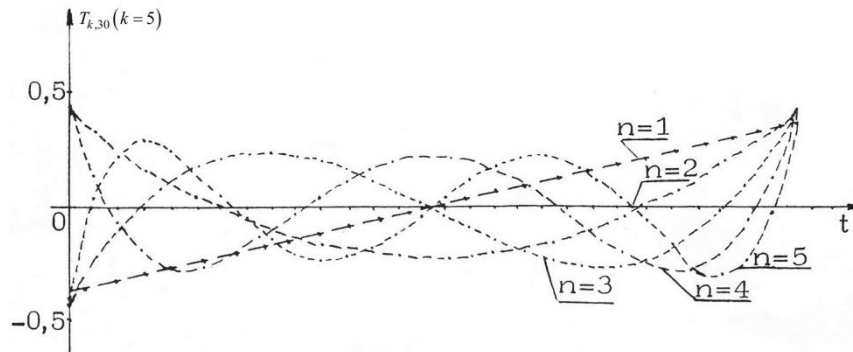


Рис. 1. Графики первых пяти полиномов Чебышева.

При вычислении спектральной характеристики сигнала в базисе многочленов Чебышева количество вычислительных операций на одно дискретное значение $f(t_i)$ минимально по сравнению с другими ортогональными базисами.

В явном виде конкретные значения коэффициентов k -го многочлена Чебышева при степенях дискретного переменного t зависят от заданного промежутка. Полиномы Чебышева, как указывалось выше можно представить так:

$$T_{k,N}(t) = \sum_{i=0}^k c_{k,i} t^i, \quad (37)$$

где зависимости, определяющие элементы матрицы ортогонализации $c_{k,i}$, $k = 0, 1, \dots, l$ в зависимости от N представлены в табл. 2.

Таблица 2. Численные значения коэффициентов $c_{k,i}(N)$

Номер полинома (k)	$\{c_{k,i}\}$, $i = 0, 1, 2, \dots, k$; Значения $i = 0, 1, 2, \dots, k$					
	0	1	2	3	4	5
0	1					
1	$1-N$	2				
2	$1-N+(1-N)^2$	$6(1-N)$	6			
3	$2(1-N)+$ $+3(1-N)^2+$ $+(1-N)^3$	$4+6(1-N)+$ $+12(1-N)^2$	$30(1-N)$	20		
4	$6(1-N)+$ $+11(1-N)^2+$ $+6(1-N)^3+$ $+(1-N)^4$	$50(1-N)+$ $+30(1-N)^2+$ $+20(1-N)^3$	$50+30(1-N)+$ $+90(1-N)^2$	$140(1-N)$	70	
5	$24(1-N)+$ $+50(1-N)^2+$ $+35(1-N)^3+$ $+10(1-N)^4+$ $+(1-N)^5$	$48+100(1-N)+$ $+280(1-N)^2+$ $+90(1-N)^3+$ $+30(1-N)^4$	$630(1-N)+$ $+210(1-N)^2+$ $+210(1-N)^3$	$420+$ $+140(1-N)+$ $+560(1-N)^2$	$630(1-N)$	252

Если функция $f(t)$ характеризуется ее спектральной характеристикой в базисе полиномов Чебышева дискретного аргумента, то элементы спектральной характеристики

$$C^x = (c_0^x, c_1^x, \dots, c_l^x),$$

как указывалось выше, рассчитываются с помощью формулы [3]

$$\begin{aligned}
 c_k^f &= \sum_{t=0}^{N-1} f(t) \frac{\sqrt{2k+1}}{\sqrt{N \prod_{\tau=1}^k (N^2 - \tau^2)}} T_{k,N}(t) = \\
 &= \sum_{t=0}^{N-1} f(t) \sqrt{\frac{2k+1}{N \prod_{\tau=1}^k (N^2 - \tau^2)}} \sum_{i=0}^k c_{k,i} t^i.
 \end{aligned} \quad (38)$$

Если воспользоваться обозначением

$$I_i = \sum_{t=0}^{N-1} f(t)t^i, \quad (39)$$

то зависимость (38) принимает вид

$$c_k^f = \frac{2k+1}{N \prod_{\tau=1}^k (N^2 - \tau^2)} \sum_{i=0}^k J_i. \quad (40)$$

Из сказанного выше следует, что основной операцией при вычислении c_k^f — коэффициентов Фурье-Чебышева функции $f(t)$ является вычисление k первых моментов этой функции, начиная с J_0 . Причем каждый момент необходимо вычислять лишь один раз. Такой подход приводит к существенному упрощению алгоритма расчета спектральной характеристики или решения операторного уравнения (10), или процессов в САУ, анализ которых проводится по содержанию постановки задачи.

Список литературы

1. Гавурин М.К. Лекции по методам вычислений. — М.: Издательство «Наука», 1971. — 248 с.
2. Флетчер К. Численные методы на основе метода Галеркина / Пер. с англ. — М.: Мир, 1988. — 352 с.
3. Дедус Ф.Ф. Классические ортогональные базисы дискретной переменной. Спектральные методы обработки информации в научных исследованиях. — Пущино. 1980.
4. Солодовников В.В. Частотный и спектральные методы в теории автоматического управления. Спектральные методы обработки информации в научных исследованиях. — Пущино. 1980.
5. Егупов Н.Д. Спектральный анализ нестационарных систем в специальных базисах. Спектральные методы обработки информации в научных исследованиях. — Пущино. 1980.
6. Мирошник И.В. Теория автоматического управления. Линейные системы. — СПб.: Питер, 2005. — 336 с.
7. Методы инженерного синтеза сложных систем управления: аналитический аппарат, алгоритмы приложения в технике. Вычислительно-аналитический эксперимент: аппарат матричных операторов и вычислительные технологии. / Под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. — М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. — 416 с.
8. Бейтмен Г., Эрдейи А. Высшие трансцендентные функции. — М.: Издательство «Наука», 1974. — 296 с.
9. Михлин С.Г. Вариационные методы в математической физике. ГИТТЛ. — М.: Издательство «Наука», 1957. — 476 с.
10. Березин И.С., Жидков Н.П. Методы вычислений (том 1). ГИФМЛ. — М.: 1962. — 464 с.
11. Солодовников В.В. Частотный метод в теории автоматического регулирования. — В сб. «Автоматичное управление и вычислительная техника». / Под ред. В.В. Солодовникова, выпуск 8. Издательство «Машиностроение», — М.: 1968. — 342 с.

12. Пупков К.А., Егупов Н.Д., Колесников Д.В., Мельников Д.В., Трофимов А.И. Высокоточные системы самонаведения. Расчет и проектирование, вычислительный эксперимент. — М.: Физматлит, 2011.—512 с.

13. Мизрохи В.Я. Проектирование управления зенитных ракет. — М.: Издательство ООО «Экслибрис-Пресс», 2010. — 253 с.

14. Востриков А.С., Французова Г.А. Теория автоматического регулирования. — Новосибирск: Издательство НГТУ, 2006. — 368 с.

15. Ньютон Дж.К., Гулд Л.А., Кайзер Дж.Ф. Теория линейных следящих систем. Аналитические методы расчета. / Под ред. А.М. Летова, ГИФМЛ. — М.: 1961. — 407 с.

Наинг Аунг Со – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: naingaungsoe128@gmail.com.

Ней Тве – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: naythway1984@gmail.com.

Naing Aung Soe, Nay Thway

MATRIX OPERATORS OF DIGITAL CONTROL SYSTEMS, ORTHOGONAL BASES OF DISCRETE VARIABLES [II]

Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch, Kaluga, 248000, Russia

Currently, for complex objects, such as aircraft for various purposes are developed sophisticated data-processing systems, which include a set of sensors and the parameters of its own relative motion of the aircraft and the target, the onboard computer system for problem solving guidance. On the complexity of such systems can be judged by the requirements that apply, for example, precision missiles, providing ingress in size target, or to kinetic missiles hit targets (direct hit in a combat unit (BB)). Flight control system belongs to a class of discrete systems, consider the fact that the signal processing with the relevant objectives with the help of computers. To solve the problems of research and synthesis is an important question of constructing a mathematical model of how the elements of ACS and the system as a whole. The article discusses the methods, the basis of which the decomposition of signals with respect to orthonormal bases of a discrete variable. Examine the provisions relating to the construction of mathematical models of signals and systems.

Keywords: Digital SAU, matrix operator, orthogonal basis, a mathematical model

Naing Aung Soe, postgraduate of Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University. E-mail: naingaungsoe128@gmail.com.

Nay Thway, postgraduate of Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University. E-mail: naythway1984@gmail.com.

**ПРОБЛЕМА МОМЕНТОВ: ПОСТРОЕНИЕ
МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
В ФОРМЕ МАТРИЧНО-ОПЕРАТОРНЫХ СООТНОШЕНИЙ [П]**

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Основным аппаратом построения моделей, исследования и синтеза линейных стационарных систем, а так же нелинейных систем с аналитическими нелинейностями, является аппарат интегральных преобразований. Его применение, в частности, при использовании частотного метода синтеза затрудняют сложности алгоритмизации. В статье результаты решения проблемы моментов применяются для построения алгоритмической базы численной реализации аппарата интегральных преобразований, ориентированной для решения задач теории управления. На основе интеграла Лапласа созданы математические модели не только класса линейных, но и некоторых нелинейных систем. Разработаны методы исследования систем и синтеза регуляторов, включая частотный метод. Интеграл Лапласа позволил создать эффективный аппарат структурных преобразований. В настоящей статье рассмотрены вопросы построения методов анализа и синтеза систем управления на базе численного аппарата, основа которого – теоретические положения проблемы моментов.

Ключевые слова: матричный оператор, теория моментов, математическая модель

1. Проблема моментов и ее формулировка

Термин проблема моментов впервые встречается у Т. Стилтеса в работе 1894-1895 гг. Одна важная задача, относящаяся к проблеме моментов была поставлена и в частном случае решена П.Л. Чебышевым. К задаче П.Л. Чебышев неоднократно возвращался в течение всего последнего периода своей жизни. Всесторонним изучением задачи П.Л. Чебышева и различным ее обобщениям посвящены работы А.А. Маркова. Он первым осознал, что в этом большом комплексе вопросов существует ключевая проблема и усилия были направлены на ее развитие. Проблема моментов Маркова состоит в следующем: заданы вещественные числа λ и $C(\lambda < C)$ и две конечные последовательности — последовательность чисел $\{\lambda_k\}_0^n$ и последовательность непрерывных функций $\{f_k(t)\}_0^n$ ($0 \leq t \leq T$). Требуется:

а) найти критерий разрешимости; т.е. критерий представимости последовательности $\{\lambda_k\}_0^n$ в виде $\lambda_k = \int_0^T f_k(t)x(t)dt$, $k = 0, 1, \dots, n$, $c \leq x(t) \leq C$;

б) найти условия, при которых разрешимая проблема является определенной или неопределенной;

в) в неопределенном случае описать, если не все решения, то по крайней мере, в известном смысле, простейшие на них.

Крупный ученый в области теории управления профессор А.Г. Бутковский говорит: Обобщение этой задачи впоследствии стало называться *классической проблемой моментов*. Одна из задач этой проблематики состоит в указании необходимых и достаточных условий для существования и единственности неотрицательной функции $x(t)$, для которой заданы ее

степенные моменты $\int_0^T t^k x(t)dt = \lambda_k$, $k = 0, 1, \dots$, т.е. числа λ_k .

Естественным обобщением такого рода задачи является задача с рассмотрением моментов более общего вида, чем степенные. Вместо последовательности степенных функций $1, t, t^2, \dots$ можно рассмотреть последовательность более-менее произвольных функций, скажем $f_0(t), f_1(t), f_2(t), \dots$. Тогда: k -м моментом функции $x(t)$ относительно последовательности функций $f_0(t), f_1(t), \dots, f_k(t), \dots$ естественно назвать

интеграл $\int_0^T f_k(t)x(t)dt$. Соответствующая проблема моментов формулируется аналогично. Заданы моменты $s_0, s_1, \dots, s_l$ функции $x_y(t)$ относительно

функций $x(t)$. Число заданных моментов может быть как конечное ($k = 0, 1, \dots, n$), так и бесконечное ($k = 0, 1, \dots$). Как мы увидим в дальнейшем, задание конечного числа моментов соответствует сосредоточенной системе управления. Для исследования управляемых систем с распределенными параметрами необходимо рассматривать бесконечное (обычно счетное) число моментов. Итак, здесь требуется найти условия существования, единственности, а по возможности вычислить или оценить искомую функцию $x(t)$ из набора моментных равенств или моментных уравнений

$$\int_0^T f_k(t)x(t)dt = \lambda_k, \quad k = 0, 1, \dots, n, \dots$$

Интегралы являются одномерными, однако можно рассматривать многомерные моменты, когда функции $f_k(s)$ и $x(s)$ заданы на некоторой многомерной области D . В этом случае моментные равенства принимают вид

$$\int_D f_k(s)x(s)dS = \lambda_k, \quad k = 0, 1, \dots, n, \dots$$

Всякая проблема моментов, в сущности, представляет ряд вопросов, из которых важнейшими являются вопрос о разрешимости, вопрос о числе решений и вопрос о построении всех решений, если они существуют.

Применение положения проблемы моментов для решения задач проектирования систем управления изложено в работах А.Г. Бутковского. Он пишет [4]: Н. Н. Красовский замечательным образом использовал метод *l*-проблемы моментов для решения задачи оптимального управления системами с сосредоточенными параметрами. Он в своих работах показал, что проблема оптимального управления в линейных системах во многих случаях может быть сведена к решению *проблемы моментов* и, в частности, *l-проблемы моментов*, разработанной в трудах М.Г. Крейна. Аппарат теории моментов, как впервые показал Н.Н. Красовский, дал эффективные точные и приближенные методы вычисления оптимальных управляющих воздействий, причем одновременно решаются и краевые задачи.

После этого оказалось также, что этот метод может быть с успехом обобщен, и использован для решения более сложных задач, связанных с бесконечномерной проблемой моментов и с задачами оптимального управления системами с распределенными параметрами. Метод моментов оказался очень общим и мощным аппаратом исследования многих задач управления. Использование результатов, найденных математиками, принесло существенную пользу для развития соответствующей теории управления, что еще раз показывает, что удачно найденный адекватный математический аппарат в сильной степени способствует решению прикладных задач управления. Метод моментов, и в частности метод *l*-проблемы моментов, дает единый аппарат рассмотрения различного вида линейных управляемых систем:

- 1) с сосредоточенными и распределенными параметрами произвольного порядка,
- 2) непрерывных и дискретных,
- 3) стационарных и нестационарных,
- 4) автономных и неавтономных,
- 5) с одним и несколькими управляющими воздействиями,
- 6) с ограничениями на управляющие воздействия и фазовые координаты.

При этом допускаются весьма разнообразные оптимизируемые функционалы. Это прежде всего функционалы времени, линейные функционалы и функционалы типа норм.

Заметим также, что метод позволяет найти вид управляющих воздействий в замкнутой аналитической форме, а в тех случаях, когда это сделать невозможно, дает единую вычислительную процедуру для определения точного или приближенного решения задачи. При этом сложность этой процедуры не зависит от числа управляющих воздействий, она зависит от порядка уравнения и характера собственных функции задачи.

О подходе, связанном с проектированием систем автоматического управления на основе применения теории моментов выдающийся ученый

академик АН СССР, А.А. Воронов говорил: развивается оригинальный метод характеристик мнимых частот....

Используя передаточные функции, аргумент которых изменяется в вещественной области, принимая положительные значения, существенно упрощаются выкладки и в результате можно получить не менее ценные, а иногда и более эффективные результаты, чем те которые удалось получить с помощью частотных характеристик... идея получила свое логическое развитие вплоть до получения инженерных методов синтеза сложных линейных систем по динамическим характеристикам, заданным в области мнимых частот.

Основные положения отражены в [6]. Направление, содержание которого — применение теории метода моментов для разработки алгоритмов анализа и синтеза, удобных для реализации на ЭВМ, развивалось на кафедре САУ МВТУ им. Н.Э. Баумана под руководством выдающегося ученого, профессора В.В. Солодовникова. В [8] на этот счет сказано так: «На наш взгляд, целесообразно для решения интегрального уравнения Лапласа использовать известную в математике идею восстановления функции, определенной на конечном интервале, по ее моментам. Причем в отличие от классической проблемы моментов Стильеса, Чебышева—Маркова и Гамбургера предлагается рассматривать ядро изображения Лапласа как моментную функцию для оригинала. Такая постановка задачи позволяет не только решить интегральное уравнение Лапласа, но дает простую схему численного решения на основе преобразования Лапласа интегральных и дифференциальных уравнений. Этим достигается единство методики при анализе и синтезе линейных квазистационарных САУ.»

2. Аналитическая схема решения проблемы моментов применительно к уравнению Лапласа: дискретные варианты

Как известно, интеграл Лапласа является важным разделом математического аппарата теории автоматического управления. На основе интеграла Лапласа созданы математические модели не только класса линейных, но и некоторых нелинейных систем. Разработаны методы исследования систем и синтеза регуляторов, включая частотный метод. Интеграл Лапласа позволил создать эффективный аппарат структурных преобразований. В настоящей статье рассмотрены вопросы построения методов анализа и синтеза систем управления на базе численного аппарата, основа которого — теоретические положения проблемы моментов.

Аппарат теории моментов крупный математик В.А. Диткин, академик В.М. Амербаев, академик В.И. Крылов и их ученики, а также другие авторы использовали для решения проблемы численного обращения интегральных преобразований. Формулировка задачи: положим, что известно изображение функции $x(t)$:

$$X(s) = \int_0^{\infty} x(t) e^{-st} dt. \quad (1)$$

Интеграл Лапласа (1) путем замены переменной $\xi = e^{-t}$ приводится к виду:

$$X(s) = \int_0^1 \xi^{s-1} x(-\ln \xi) d\xi, \quad (2)$$

который сходится всюду в плоскости $\operatorname{Re} s \geq 0$, в связи с чем переменной s можно придать значения $s=1, 2, \dots$, и, таким образом, легко получить формулы, определяющие моменты функции $x(-\ln \xi)$ относительно моментной системы $F(\xi) = \{\xi^k, k=0, 1, 2, \dots, l-1\}$

$$\lambda_k = X(s) \Big|_{s=k+1} = \int_0^1 \xi^k x(-\ln \xi) d\xi, k=0, 1, 2, \dots, l-1. \quad (3)$$

Задача построения функции $x(t)$ (предполагается, что функция $x(t)$ интегрируема на любом конечном отрезке $[0, T]$ и принадлежит классу $L^2[0, \infty)$) формулируется так: найти функцию $x(t)$ по её моментам λ_k , $k=0, 1, 2, \dots$, или, что тоже самое, найти функцию $x(t)$ по значениям изображения $X(s)$ в целочисленных точках $s=1, 2, \dots$.

Таким образом, если известно множество вида

$$\lambda_k = \{X(s_k) : k=0, 1, \dots, l; s_0=1; s_1=2; \dots; s_k=l+1\},$$

где
$$\lambda_k = \int_0^1 \xi^k x(-\ln \xi) d\xi = \int_0^\infty x(t) e^{-kt} dt, k=0, 1, 2, \dots, l, \quad (4)$$

то можно поставить задачу нахождения по первым $(l+1)$ моментам некоторого многочлена

$$q_l(\xi) = \sum_{k=0}^l c_k \xi^k,$$

такого, что бы его моменты λ_k совпадали с заданными моментами функции $x(-\ln \xi)$, т.е. что бы выполнялось равенство:

$$X(s) \Big|_{s=k+1} = \int_0^1 \xi^k q_e(\xi) d\xi = \lambda_k, k=0, 1, \dots, l. \quad (5)$$

Если такой многочлен существует, то изображения функций $q_e(\xi)$ и $x(-\ln \xi)$ совпадают в точках $s=1, s=2, \dots, s=l+1$.

Показано, что такой многочлен существует [3] и здесь ставится задача разложения функции $x(-\ln \xi)$ в ряд по ортонормированным полиномам вида:

$$P_k(\xi) = c_{k0} + c_{k1}\xi + c_{k2}\xi^2 + \dots + c_{kk}\xi^k, \xi \in [0, 1], \quad (6)$$

для которых выполнено условие:

$$\int_0^1 P_i(\xi) P_j(\xi) d\xi = \delta_{ij} = \begin{cases} 0 & i \neq j; \\ 1 & i = j; \end{cases} \quad (7)$$

разложение функции $x(-\ln \xi)$ по указанной системе имеет вид:

$$x(-\ln \xi) = \sum_{k=0}^{\infty} c_k^x P_k(\xi), \quad (8)$$

где

$$\begin{aligned} c_k^x &= \int_0^1 x(-\ln \xi) P_k(\xi) d\xi = \int_0^1 x(-\ln \xi) \left(\sum_{v=0}^k c_k^x \xi^v \right) d\xi = \\ &= \sum_{v=0}^k c_k^x \int_0^1 \xi^v x(-\ln \xi) d\xi = \sum_{v=0}^k c_{kv} \lambda_v. \end{aligned} \quad (9)$$

Последняя формула отражает содержание алгоритма вычисления коэффициентов разложения $c_0^x, c_1^x, \dots, c_l^x$, функции $x(-\ln \xi)$ через её моменты $\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_l$, определяемые соотношением (3).

Для решения проблемы моментов применительно к сформулированной задаче можно применять многочлены Лежандра [9].

Смещенными на отрезок $[t_0, t_f]$ многочленами Лежандра называются многочлены, определяемые формулой Родрига [9]

$$\left. \begin{aligned} P_0(t) &= 1; \\ P_k(t) &= \frac{1}{k! 2^k} \left\{ \left[\left(\frac{2(t-t_0)}{t_f-t_0} - 1 \right)^2 - 1 \right]^k \right\}^{(k)}, \quad k = 1, 2, \dots \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Многочлены Лежандра легко получать из известных рекуррентных формул: для $k = 1, 2, \dots$:

$$(k+1)P_{k+1}(t) = (2k+1) \left(\frac{2(t-t_0)}{t_f-t_0} - 1 \right) P_k(t) - kP_{k-1}(t). \quad (11)$$

С помощью этих формул можно построить и явные зависимости для многочленов Лежандра:

$$P_n(t) = \frac{1}{2^n} \sum_{k=0}^{[n/2]} \frac{(-1)^k (2n-2k)!}{k!(n-k)!(n-2k)!} \left(\frac{2(t-t_0)}{t_f-t_0} - 1 \right)^{n-2k}. \quad (12)$$

Многочлены Лежандра являются ортогональными на отрезке $[t_0, t_f]$ с весовой функцией $\rho(t) = 1$. Соотношение ортогональности:

$$\int_{t_0}^{t_f} P_n(t) P_m(t) dt = \begin{cases} 0, & n \neq m; \\ \frac{t_f - t_0}{2n+1}, & n = m. \end{cases}$$

Для функций $x(t) \in L^2[t_0, t_f]$ коэффициенты Фурье-Лежандра определяются выражением

$$c_k^x = \frac{2k+1}{2} \int_{t_0}^{t_1} x(t) P_k(t) dt, \quad k = 0, 1, \dots \quad (13)$$

Ряд Фурье-Лежандра, сходящийся к функции $x(t)$ в метрике $L^2[t_0, t_f]$ имеет вид $\sum_{k=0}^{\infty} c_k^x P_k(t)$. Частичные суммы порядка l ряда Фурье-Лежандра будем обозначать тем же символом $\tilde{x}_l(t)$.

Справедлив следующий результат: если $x(t) \in W^r(M, s)$, $r = 1, 2, \dots$, то $\tilde{x}_l(t)$ сходится к $x(t)$ равномерно на отрезке $[t_0, t_f]$ и имеет место оценка

$$\|x - \tilde{x}_l\| \leq \frac{CM}{l^{r-1/2}}, \quad (14)$$

где постоянная C зависит от r и $[t_0, t_f]$, но не зависит от l .

Если $E_l(x)$ — наилучшее приближение функции $x(t)$ многочленами степени не выше l , то имеет место следующая теорема [9]:

Пусть функция $x(t)$ определена на отрезке $[0, T]$, и пусть $\lim_{l \rightarrow \infty} l E_l(t) = 0$; тогда ряд Фурье функции $x(t)$ по системе полиномов Лежандра равномерно сходится к самой функции $x(t)$ на отрезке $[0, T]$.

Последняя теорема позволяет сделать важный вывод: если $x(t)$ дважды непрерывно дифференцируема, то ряд Фурье этой функции по системе полиномов Лежандра сходится равномерно на $[0, T]$ и

$$\|x - \tilde{x}_l\| \leq \frac{KM}{m^r}, \quad (15)$$

где постоянная K также зависит от r и отрезка $[0, T]$, но не зависит от m .

Ниже приведены явные выражения, определяющие первые семь полиномов Лежандра, ортонормированных на интервале $[0, 1]$:

$$\begin{aligned} P_0(\xi) &= 1; \\ P_1(\xi) &= (2\xi - 1)\sqrt{3}; \\ P_2(\xi) &= (6\xi^2 - 6\xi + 1)\sqrt{5}; \\ P_3(\xi) &= (20\xi^3 - 30\xi^2 + 12\xi - 1)\sqrt{7}; \\ P_4(\xi) &= (210\xi^4 - 420\xi^3 + 270\xi^2 - 60\xi + 1)\sqrt{9}; \\ P_5(\xi) &= (252\xi^5 - 630\xi^4 + 560\xi^3 - 210\xi^2 + 30\xi - 1)\sqrt{11}; \\ P_6(\xi) &= (924\xi^6 - 2772\xi^5 + 3150\xi^4 - 1680\xi^3 + 420\xi^2 - 42\xi + 1)\sqrt{13}; \end{aligned} \quad (16)$$

Найдем зависимости, определяющие коэффициенты Фурье разложения функции $x(t)$ по полиномам Лежандра, предварительно записав их в матричной форме (удерживаются первые 10 полиномов Лежандра):

$$\underbrace{\begin{pmatrix} P_0(\xi) \\ P_1(\xi) \\ P_2(\xi) \\ \vdots \\ P_9(\xi) \end{pmatrix}}_{P(\xi)} = \underbrace{\begin{pmatrix} c_{00} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ c_{10} & c_{11} & 0 & \cdots & 0 \\ c_{20} & c_{21} & c_{22} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{90} & c_{91} & c_{92} & \cdots & c_{910} \end{pmatrix}}_{U - \text{матрица ортогонализации}} \underbrace{\begin{pmatrix} 1 \\ \xi \\ \xi^2 \\ \vdots \\ \xi^9 \end{pmatrix}}_{\xi} \quad (17)$$

Соотношение, определяющее спектр коэффициентов Фурье по полиномам Лежандра функции $x(t)$ (спектральная характеристика функции $x(t)$ в базисе полиномов Лежандра) имеет вид:

Если $\tilde{x}_l(-\ln \xi) = \sum_{k=0}^l c_k^x P_k(\xi)$, то для коэффициентов Фурье справедливо соотношение:

$$\begin{aligned} c_k^x &= \int_0^1 x(-\ln \xi) \left[c_{k0} + c_{k1}\xi + c_{k2}\xi^2 + \dots + c_{kk}\xi^k \right] d\xi = \\ &= c_{k0} \underbrace{\int_0^1 x(-\ln \xi) d\xi}_{\lambda_0} + c_{k1} \underbrace{\int_0^1 x(-\ln \xi) \xi d\xi}_{\lambda_1} + c_{k2} \underbrace{\int_0^1 x(-\ln \xi) \xi^2 d\xi}_{\lambda_1} + \dots + \\ &+ c_{kk} \underbrace{\int_0^1 x(-\ln \xi) \xi^k d\xi}_{\lambda_k} = \sum_{v=0}^k c_{kv} \mu_v, \quad k = 0, 1, 2, \dots, l. \end{aligned} \quad (18)$$

Таким образом, спектральная характеристика функции $x(t)$ в базисе полиномов Лежандра определяется матрично-операторным соотношением вида:

$$\underbrace{\begin{pmatrix} c_0^x \\ c_1^x \\ c_2^x \\ \vdots \\ c_l^x \end{pmatrix}}_{C^x} = \underbrace{\begin{pmatrix} c_{00} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ c_{10} & c_{11} & 0 & \cdots & 0 \\ c_{20} & c_{21} & c_{22} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{l0} & c_{l1} & c_{l2} & \cdots & c_{ll} \end{pmatrix}}_U \underbrace{\begin{pmatrix} \lambda_0 \\ \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_l \end{pmatrix}}_{M^x} \quad (19)$$

Итоги сказанного выше можно отразить так: если известно изображение функции $X(s)$, то по формуле (4) можно рассчитать одностолбцовую матрицу моментов $M = (\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_l, \dots)^T$, а векторно-матричное соотношение

$$C^x = UM, \quad (20)$$

где $C^x = (c_0^x, c_1^x, \dots, c_l^x, \dots)^T$, U – матрица ортогонализации, позволяет рассчитывать коэффициенты Фурье $c_0^x, c_1^x, \dots, c_l^x$ разложения $x(t)$ по полиномам Лежандра и, таким образом, построить функцию $\tilde{x}_l(\xi)$:

$$\tilde{x}_l(-\ln \xi) = \sum_{k=0}^l c_k^x P_k(\xi). \quad (21)$$

Или, переходя к переменной t , запишем

$$\tilde{x}_l(t) = \sum_{k=0}^l c_k^x P_k(e^{-t}). \quad (22)$$

Известно, что ряд (21) сходится в пространстве $L^2[0,1]$. Кроме того, если функция $x(\xi)$ на отрезке $[0,1]$ удовлетворяет условию Липшица порядка $\alpha > 1/2$, то ее ряд Фурье по многочленам Лежандра сходится к ней равномерно на этом сегменте.[3,9]

Литература

1. Егупов Н.Д., Колесников Л.В., Пупков К.А., Трофимов А.И. Алгоритмическая теория систем управления, основанная на спектральных методах. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. Том 1 Аппарат обобщая математической базы частотного метода — 464с. Том 2 Матрично-вычислительные технологии на базе интегральных уравнений. — 464с.
2. Пашковский С. Вычислительные применения многочленов и рядов Чебышева. — М.: Наука, 1983, — 384с.
3. Крылов В.И., Скобля Н.С. Методы приближенного преобразования Фурье и обращения преобразования Лапласа. — М.: Наука, 1974, — 224с.
4. Бутковский А.Г. Методы управления системами с распределенными параметрами. — М.: Наука, 1960, — 310с.
5. Ахиезер Н.И. Классическая проблема моментов. — М.: Наука, 1961., — 310с.
6. Анализ и оптимальный синтез на ЭВМ систем управления/ Под ред. А.А. Воронова и И.А. Огурка. — М.: Наука, 1984, — 344с.
7. Солодовников В.В. Частотный метод в теории автоматического регулирования. Автоматическое управление и вычислительная техника. Выпуск 8. Частотные методы. — М.: Машиностроение, 1968, 5-29с.
8. Солодовников В.В., Дмитриев А.Н., Егупов Н.Д. Ортогональный метод анализа и синтеза линейных САУ на основе понятия моментов. Автоматическое управления и вычислительная техника. Выпуск 8. Частотные методы. — М.: Машиностроение, 1968, 30-85с.
9. Суетин П.К. Классические ортогональные многочлены. — М.: Наука, 1979. — 416с.

Петровичев М.А. – ассистент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: tabblif@yandex.ru.

Ней Тве – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: naythway1984@gmail.com.

Наинг Аунг Со – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: naingaungsoe128@gmail.com.

M.A. Petrovichev, Nay Thway, Naing Aung Soe

THE PROBLEM OF MOMENTS: THE CONSTRUCTION OF MATHEMATICAL MODELS OF CONTROL SYSTEMS IN THE FORM OF A MATRIX-OPERATOR RELATIONS [I]

Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch, Kaluga, 248000, Russia

The main tool for constructing models, research and synthesis of linear stationary systems, as well as nonlinear systems with analytic nonlinearities, is the unit of integral transforms. Its use, in particular, using a frequency synthesis technique difficult algorithmic complexity. In the article the results of solving the problem of moments are used to construct the numerical implementation of algorithmic base unit of integral transforms oriented to solve problems of control theory. On the basis of the Laplace integral mathematical models not only the class of linear, but some nonlinear systems. The methods of research systems and the synthesis of regulators, including the frequency method. Laplace integral allowed to create an effective apparatus of structural reforms. This article describes how to construct methods of analysis and synthesis of control systems based on a numerical system, based on - the theoretical positions of the moment problem.

Keywords: matrix operator, theory of moments, the mathematical model.

Petrovichev M.A., assistant lecturer of Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University. E-mail: tabblif@yandex.ru.

Nay Thway, postgraduate of Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University. E-mail: naythway1984@gmail.com.

Naing Aung Soe, postgraduate of Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University. E-mail: naingaungsoe128@gmail.com.

ПРОБЛЕМА МОМЕНТОВ: ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ В ФОРМЕ МАТРИЧНО-ОПЕРАТОРНЫХ СООТНОШЕНИЙ [III]

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Основным аппаратом построения моделей, исследования и синтеза линейных стационарных систем, а так же нелинейных систем с аналитическими нелинейностями, является аппарат интегральных преобразований. Его применение, в частности, при использовании частотного метода синтеза затрудняют сложности алгоритмизации. В статье результаты решения проблемы моментов применяются для построения алгоритмической базы численной реализации аппарата интегральных преобразований, ориентированной для решения задач теории управления. На основе интеграла Лапласа созданы математические модели не только класса линейных, но и некоторых нелинейных систем. Разработаны методы исследования систем и синтеза регуляторов, включая частотный метод. Интеграл Лапласа позволил создать эффективный аппарат структурных преобразований. В настоящей статье рассмотрены вопросы построения методов анализа и синтеза систем управления на базе численного аппарата, основа которого – теоретические положения проблемы моментов.

Ключевые слова: матричный оператор, теория моментов, математическая модель.

Рассмотрим один дискретный вариант применительно к линейным стационарным системам. Пусть математическая модель системы с постоянными параметрами описывается дифференциальным уравнением n -го порядка вида:

$$\sum_{i=0}^n a_i x^{(i)}(t) = \sum_{j=0}^m b_j y^{(j)}(t), \quad (23)$$

где $y(t), x(t)$ — соответственно входной и выходной сигналы системы. В силу условия технической реализуемости системы управления, считаем $n \geq m$.

После проведения элементарных преобразований при рассмотрении задачи на промежутке $[0, \infty)$ из (23) следует

$$\int_0^{\infty} x(t) \left[\sum_{k=0}^n (a_k s^k) \right] e^{-st} dt = \int_0^{\infty} y(t) \left[\sum_{k=0}^m (b_k s^k) \right] e^{-st} dt. \quad (24)$$

Положим, что поставлена задача нахождения $x(t) \in L^2[0, \infty)$ при заданном входе $y(t)$.

Из (24) следует

$$\underbrace{\int_0^{\infty} x(t) e^{-st} dt}_{X(s)} = \frac{\sum_{k=0}^m (b_k s^k)}{\underbrace{\sum_{k=0}^n (a_k s^k)}_{W(s)}} \underbrace{\int_0^{\infty} y(t) e^{-st} dt}_{Y(s)}. \quad (25)$$

Или, что тоже самое

$$X(s) = W(s)Y(s) \quad (26)$$

Положим, что s в порождающей функции $p(s, \tau) = e^{-s\tau}$ принимает значения $s_0, s_1, \dots, s_l$ и, таким образом, имеет место система функций

$$p(t) = \{e^{-s_i t} : i = \overline{0, l}\}. \quad (27)$$

В терминах проблемы моментов с учетом (27) соотношение (26) можно записать так:

$$\int_0^{\infty} x(t) f_i^x(t) dt = \lambda_i,$$

где

$$f_i^x(t) = e^{-s_i t}; \lambda_i = X(s_i)W(s_i)Y(s_i), i = 1, 2, \dots, l, \dots \quad (28)$$

Если в (23) учесть $X^0 = (x(0), x'(0), \dots, x^{(n-1)}(0))$, то в (24) имеет место дополнительная составляющая, определяющая свободные колебания системы. Для этой составляющей изображение имеет вид

$$\int_0^{\infty} x_c(t) e^{-st} dt = \underbrace{x(0)D_0(s) + x'(0)D_1(s) + \dots + x^{(n-1)}(0)D_{n-1}(s)}_{X_c(s)} \quad (29)$$

$$\underbrace{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_0}_{X_c(s)}$$

В терминах проблемы моментов (29) может быть представлена так:

$$\int_0^{\infty} x(t) f_i^{x_c}(t) dt = \lambda_i^c, i = 0, 1, 2, \dots, l, \dots \quad (30)$$

Таким образом, как вынужденная составляющая

$$x_{\theta}(t) = x_{\Pi}(t) + x_y(t), \quad (31)$$

где $x_{\Pi}(t)$ — переходная составляющая в устойчивых системах, $x_y(t)$ — установившееся движение системы, так и свободные колебания имеют математическое описание в терминах проблемы моментов:

$$\int_0^{\infty} (x_{\Pi}(t) + x_y(t)) f_i^x(t) dt = \lambda_i, i = 0, 1, 2, \dots, l, \dots \quad (32)$$

$$\int_0^{\infty} x_c f_i^{x_c}(t) dt = \lambda_i^c, i = 0, 1, 2, \dots, l, \dots, \quad (33)$$

где

$$f_i^x(t) = f_i^{x_c}(t) = e^{-st}$$

— моментная система функций;

$$\lambda_i = W(s_i)Y(s_i), \lambda_i^c = X_c(s_i) \quad (34)$$

— моменты функций $(x_n(t) + x_y(t))$ и $x_c(t)$ относительно моментной системы; $s = s_0, s_1, s_2, s_3, \dots, s_l, \dots$

Если рассматривать задачу по содержанию теории управления, то ее формулировка заключается в том, что бы, полагая известными (30), (32), (33) построить аналитическую схему расчета функций $x(t)$, $x_c(t)$, $(x_n(t) + x_y(t))$, при этом важным является факт ориентации алгоритмов на применение ЭВМ и на возможность построения математических модели сложных систем, включающих десятки элементов, их исследования и синтеза.

Далее детально рассмотрим соотношение (25), записав его в форме:

$$\int_0^\infty e^{-st} \left(\sum_{k=0}^n a_k s^k \right) x(t) dt = \int_0^\infty e^{-st} \left(\sum_{k=0}^n b_k s^k \right) y(t) dt \quad (35)$$

или, что тоже самое:

$$\int_0^1 \underbrace{\xi^{s-1} \left(\sum_{k=0}^n a_k s^k \right)}_{K_x(\xi, s)} x(-\ln \xi) d\xi = \int_0^1 \underbrace{\xi^{s-1} \left(\sum_{k=0}^m b_k s^k \right)}_{K_y(\xi, s)} y(-\ln \xi) d\xi \quad (36)$$

придавая s значения $s_0 = 1, s_1 = 2, \dots, s_l = l + 1$, из (36) получим:

$$\int_0^1 \underbrace{K_x(\xi, s_i)}_{f_i^x(\xi)} x(-\ln \xi) d\xi = \underbrace{\int_0^1 \underbrace{K_y(\xi, s_i)}_{f_i^y(\xi)} y(-\ln \xi) d\xi}_{\lambda_i^x}, i = 0, 1, \dots, l \quad (37)$$

Таким образом, задача построения выходного сигнала $x(t)$, являющееся реакцией системы на входное воздействие $y(t)$ свелась к решению проблемы моментов вида:

$$\int_0^1 f_i^x(\xi) x(\xi) d\xi = \lambda_i^x, i = 0, 1, 2, \dots, l, \quad (38)$$

Общий подход к решению проблемы моментов состоит в следующем. Поскольку функции $f_0^x(\xi), f_1^x(\xi), \dots, f_l^x(\xi)$ известны, то их можно разложить в ряд Фурье по выбранной ортонормированной системе, если например излучается линейчатый спектр функции $x(t)$ или после замены переменной $x(\xi)$, то используется тригонометрический базис и математическая модель $x(t)$ представляется в форме:

$$\begin{aligned}
\tilde{x}_l(t) &= \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^l (a_k \cos k\omega_0 t + b_k \sin k\omega_0 t) = \\
&= \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^l \left[\frac{1}{2}(a_k - jb_k)e^{jk\omega_0 t} + \frac{1}{2}(a_k + jb_k)e^{-jk\omega_0 t} \right] =. \quad (39) \\
&= \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^l F_k e^{jk\omega_0 t} + \sum_{k=-1}^{-l} F_k e^{jk\omega_0 t}
\end{aligned}$$

Полагая, что при $k=0$

$$F_k e^{jk\omega_0 t} = F_0 e^0 = \frac{a_0}{2}, \quad b_0 = 0, \quad F_0 = \frac{a_0}{2},$$

зависимость (39) принимает вид:

$$x_l(t) = \sum_{k=-l}^l F_k e^{jk\omega_0 t}. \quad (40)$$

Величина ω_0 представляет собой частоту основной гармоники тригонометрического момента (40). Величины $k\omega_0$, где $k=2,3,\dots,l$, представляют частоты высших гармоник. Если ведется исследование на $[0, T]$ (период основной гармоники равен T), то

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$$

поскольку

$$F_k e^{j\omega_k t} + F_{-k} e^{-j\omega_k t} = a_k \cos \omega_k t + b_k \sin \omega_k t,$$

и учитывая, что

$$|F_k| = \frac{1}{2} \sqrt{a_k^2 + b_k^2}$$

приходим к следующему выражению гармоники.

$$F_k e^{j\omega_k t} + F_{-k} e^{-j\omega_k t} = 2|F_k| \cos(\omega_k t - \varphi). \quad (41)$$

Отсюда следует, что сопряженные комплексные гармоники $F_k e^{j\omega_k t}$ и $F_{-k} e^{-j\omega_k t}$ в сумме дают действительную гармонику, амплитуда которой в 2 раза больше модуля комплексной гармоники. Если изобразить амплитуды $|F_k|$ комплексных гармоник в виде пропорциональных им отрезков, откладываемых на вертикалях, соответствующих точкам ω_k оси абсцисс, то получим амплитудный спектр функции $x(t)$, дающий представление об амплитудах отдельных гармоник (он называется линейчатым или дискретным спектром). С ростом k гармоники амплитуда $|F_k|$ убывает

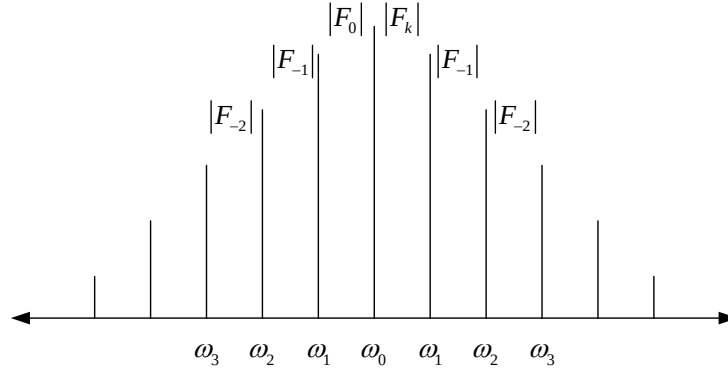


Рис. 2. Линейчатый спектр функции $x(t), t \in [0, T]$

Отметим, что в случае непрерывности функции $x(t)$ и её производных до $(n-1)$ порядка (n -ая производная кусочно-гладкая) порядок убывания амплитуд гармоник $|F_k|$ не ниже $1/k^{m+1}$.

Сказанное выше отражает важный факт, содержание которого – возможность реализации весьма полного частотного анализа сложных систем, включая исследование выходных сигналов соответствующих элементов системы с целью рассмотреть, например, влияние этих элементов на показатели качества системы. В качестве базиса можно выбрать полиномы Чебышева 1 рода и 2 рода, многочлены Лежандра. Алгоритм упрощается, поскольку как полиномы Чебышева, так и многочлены Лежандра допускают представление степеней ξ^k в форме, например, полиномы Чебышева 1 рода (смешанные полиномы промежутка $[0, 1]$)

$$1 = T_0^*(\xi),$$

$$\xi = \frac{1}{2}(T_1^*(\xi) + T_0^*(\xi)).$$

Перейдем к рассмотрению системы

$$\begin{aligned} \int_0^1 f_0^x(\xi) x(\xi) d\xi &= \int_0^1 f_0^y(\xi) y(\xi) d\xi, \\ \int_0^1 f_1^x(\xi) x(\xi) d\xi &= \int_0^1 f_1^y(\xi) y(\xi) d\xi, \\ \int_0^1 f_l^x(\xi) x(\xi) d\xi &= \int_0^1 f_l^y(\xi) y(\xi) d\xi. \end{aligned} \quad (42)$$

где

$$\left. \begin{aligned} f_k^x(\xi) &= \underbrace{(a_n s_k^n + a_{n-1} s_k^{n-1} + \dots + a_0)}_{A(s_k)} \xi^{s_k-1}, s_k = 1, 2, \dots, l+1; k = \overline{0, l}; \\ f_k^y(\xi) &= \underbrace{(b_m s_k^m + b_{m-1} s_k^{m-1} + \dots + b_0)}_{B(s_k)} \xi^{s_k-1}, s_k = 1, 2, \dots, l+1; k = \overline{0, l}. \end{aligned} \right\} \quad (43)$$

Представим сигналы $x(\xi)$ и $y(\xi)$ в форме

$$x(\xi) = \sum_{v=0}^l c_v^x \phi_v(\xi), \quad y(\xi) = \sum_{v=0}^l c_v^y \phi_v(\xi), \quad (44)$$

а известные функции $f_k^x(\xi), k = \overline{0, l}$ и $f_k^y(\xi), k = \overline{0, l}$ в виде разложений

$$\left. \begin{aligned} f_k^x(\xi) &= \sum_{v=0}^l \tilde{a}_{kv}(p) \phi_v(\xi), \quad k = \overline{0, l}; \\ f_k^y(\xi) &= \sum_{v=0}^l \tilde{b}_{kv}(p) \phi_v(\xi), \quad k = \overline{0, l}. \end{aligned} \right\} \quad (45)$$

где $p = (p_1, p_2, \dots, p_l)$ — параметры системы. В зависимостях (4) запись $\tilde{a}_{kv}(p)$ и $\tilde{b}_{kv}(p)$ отражает важный для задач синтеза факт явной зависимости коэффициентов Фурье разложения функций $f_k^x(\xi)$ и $f_k^y(\xi)$ от параметров системы, включая параметры регулятора.

Подставляя (3) и (4) в (1) получим систему соотношений

$$\begin{aligned} & \int_0^1 \left(\sum_{v_1=0}^l \tilde{a}_{kv_1}(p) \phi_{v_1}(\xi) \right) \left(\sum_{v_2=0}^l c_{v_2}^x(p) \phi_{v_2}(\xi) \right) d\xi = \\ & = \int_0^1 \left(\sum_{v_1=0}^l \tilde{b}_{kv_1}(p) \phi_{v_1}(\xi) \right) \left(\sum_{v_2=0}^l c_{v_2}^y(p) \phi_{v_2}(\xi) \right) d\xi, \quad k = \overline{0, l}. \end{aligned} \quad (46)$$

Перепишем (5) в виде

$$\begin{aligned} & \sum_{v_1=0}^l \sum_{v_2=0}^l \tilde{a}_{kv_1}(p) c_{v_2}^x(p) \underbrace{\int_0^1 \phi_{v_1}(\xi) \phi_{v_2}(\xi) d\xi}_{\delta_{v_1 v_2} = \begin{cases} 0, & v_1 \neq v_2; \\ 1, & v_1 = v_2. \end{cases}} = \\ & = \sum_{v_1=0}^l \sum_{v_2=0}^l \tilde{b}_{kv_1}(p) c_{v_2}^y(p) \underbrace{\int_0^1 \phi_{v_1}(\xi) \phi_{v_2}(\xi) d\xi}_{\delta_{v_1 v_2}}. \end{aligned} \quad (47)$$

Из чего следует

$$\begin{pmatrix} \tilde{a}_{00}(p) & \tilde{a}_{01}(p) & \cdots & \tilde{a}_{0l}(p) \\ \tilde{a}_{10}(p) & \tilde{a}_{11}(p) & \cdots & \tilde{a}_{1l}(p) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{a}_{l0}(p) & \tilde{a}_{l1}(p) & \cdots & \tilde{a}_{ll}(p) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_0^x \\ c_1^x \\ \vdots \\ c_l^x \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tilde{b}_{00}(p) & \tilde{b}_{01}(p) & \cdots & \tilde{b}_{0l}(p) \\ \tilde{b}_{10}(p) & \tilde{b}_{11}(p) & \cdots & \tilde{b}_{1l}(p) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{b}_{l0}(p) & \tilde{b}_{l1}(p) & \cdots & \tilde{b}_{ll}(p) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_0^y \\ c_1^y \\ \vdots \\ c_l^y \end{pmatrix}. \quad (48)$$

Или, что тоже самое

$$\mathbf{A}^x \mathbf{C}^x = \mathbf{A}^y \mathbf{C}^y, \quad \mathbf{C}^x = (\mathbf{A}^x)^{-1} \mathbf{A}^y \mathbf{C}^y, \quad \mathbf{C}^x = \mathbf{A} \mathbf{C}^y,$$

где

$$\mathbf{A} = (\mathbf{A}^x)^{-1} \mathbf{A}^y,$$

$$\mathbf{A}(p) = \begin{pmatrix} a_{00}(p) & a_{01}(p) & \cdots & a_{0l}(p) \\ a_{10}(p) & a_{11}(p) & \cdots & a_{1l}(p) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{l0}(p) & a_{l1}(p) & \cdots & a_{ll}(p) \end{pmatrix}. \quad (49)$$

Таким образом, основной результат при веденных выше рассуждений состоит в получении матрично-операторного соотношения

$$\mathbf{C}^x = \mathbf{A} \mathbf{C}^y. \quad (50)$$

Все звенья линейной стационарной системы и система в целом имеют математическую модель в форме (9), т.е. в форме операторного соотношения с матричными оператором.

Расчет матрицу операторов $\mathbf{A}^x$ и $\mathbf{A}^y$ упрощается за счет того, что разложения (4) не требуют реализации процесса аппроксимации, так как функции $f_k^x(\xi), k = \overline{0, l}$ и $f_k^y(\xi), k = \overline{0, l}$ являются полиномиальными по ξ : $f_k^x(\xi) = A(s_{k+1})\xi^k, k = \overline{0, l}$.

Для построения моделей функций в форме (2) достаточно воспользоваться известными зависимостями:

- Если используется базис, порожденный смещенными полиномами Чебышева 1-го рода, то

$$\begin{aligned} 1 &= T_0^*(\xi), \\ \xi &= \frac{1}{2}(T_1^*(\xi) + T_0^*(\xi)), \\ \xi^2 &= \frac{1}{8}(T_2^*(\xi) + 4T_1^*(\xi) + 3T_0^*(\xi)), \\ \xi^3 &= \frac{1}{32}(T_3^*(\xi) + 6T_2^*(\xi) + 15T_1^*(\xi) + 10T_0^*(\xi)), \\ \xi^4 &= \frac{1}{128}(T_4^*(\xi) + 8T_3^*(\xi) + 28T_2^*(\xi) + 56T_1^*(\xi) + 35T_0^*(\xi)), \\ \xi^5 &= \frac{1}{512}(T_5^*(\xi) + 10T_4^*(\xi) + 45T_3^*(\xi) + 120T_2^*(\xi) + 210T_1^*(\xi) + 126T_0^*(\xi)), \\ &\dots \end{aligned} \quad (51)$$

- Если применяются полиномы Чебышева 2-го рода, то

$$\begin{aligned} 1 &= U_0^*(\xi), \\ \xi &= \frac{1}{4}(U_1^*(\xi) + 2U_0^*(\xi)), \\ \xi^2 &= \frac{1}{16}(U_2^*(\xi) + 4U_1^*(\xi) + 5U_0^*(\xi)), \end{aligned}$$

$$\xi^3 = \frac{1}{64} \left(U_3^*(\xi) + 6U_2^*(\xi) + 14U_1^*(\xi) + 14U_0^*(\xi) \right), \quad (52)$$

$$\xi^4 = \frac{1}{256} \left(U_4^*(\xi) + 8U_3^*(\xi) + 27U_2^*(\xi) + 48U_1^*(\xi) + 42U_0^*(\xi) \right),$$

$$\xi^5 = \frac{1}{1024} \left(U_5^*(\xi) + 10U_4^*(\xi) + 44U_3^*(\xi) + 110U_2^*(\xi) + 165U_1^*(\xi) + 32U_0^*(\xi) \right),$$

.....

В связи с возможностью применения формул (5) или (6), или аналогичных зависимостей для полиномов Лежандра (они имеют $p(\xi)=1$, что упрощает расчеты), функции (2), например, имеют вид (применяются полиномы (5)):

$$f_0^x(\xi) = A(s) \Big|_{s=1} T_0^*(\xi),$$

$$f_1^x(\xi) = A(s) \Big|_{s=2} \frac{1}{2} \left(T_1^*(\xi) + T_0^*(\xi) \right),$$

$$f_2^x(\xi) = A(s) \Big|_{s=3} \frac{1}{8} \left(T_2^*(\xi) + 4T_1^*(\xi) + 3T_0^*(\xi) \right),$$

.....

Из изложенного следует, что дискретная аппроксимация ядра интеграла Лапласа позволила получить две формы математического описания линейной стационарной системы:

- в форме моментной динамической характеристики

$$\mathbf{M} = \left(\lambda_0(p), \lambda_1(p), \dots, \lambda_l(p) \right)^T. \quad (53)$$

Эта математическая модель может быть использована для описания систем с распределенными параметрами, особенностью которой являются трансцендентные передаточные функции.

Литература

1. Егупов Н.Д., Колесников Л.В., Пупков К.А., Трофимов А.И. Алгоритмическая теория систем управления, основанная на спектральных методах. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. Том 1 Аппарат обобщающей математической базы частотного метода — 464с. Том 2 Матрично-вычислительные технологии на базе интегральных уравнений. — 464с.
2. Пашковский С. Вычислительные применения многочленов и рядов Чебышева. — М.: Наука, 1983, — 384с.
3. Крылов В.И., Скобля Н.С. Методы приближенного преобразования Фурье и обращения преобразования Лапласа. — М.: Наука, 1974, — 224с.
4. Бутковский А.Г. Методы управления системами с распределенными параметрами. — М.: Наука, 1960, — 310с.
5. Ахиезер Н.И. Классическая проблема моментов. — М.: Наука, 1961., — 310с.
6. Анализ и оптимальный синтез на ЭВМ систем управления/ Под ред. А.А. Воронова и И.А. Огурка. — М.: Наука, 1984, — 344с.

7. Солодовников В.В. Частотный метод в теории автоматического регулирования. Автоматическое управление и вычислительная техника. Выпуск 8. Частотные методы. — М.: Машиностроение, 1968, 5-29с.

8. Солодовников В.В., Дмитриев А.Н., Егупов Н.Д. Ортогональный метод анализа и синтеза линейных САУ на основе понятия моментов. Автоматическое управления и вычислительная техника. Выпуск 8. Частотные методы. — М.: Машиностроение, 1968, 30-85с.

9. Суетин П.К. Классические ортогональные многочлены. — М.: Наука, 1979. — 416с.

Петровичев М.А. – ассистент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: tabblif@yandex.ru.

Ней Тве – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: naythway1984@gmail.com.

Наинг Аунг Со – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: naingaungsoe128@gmail.com.

M.A. Petrovichev, Nay Thway, Naing Aung Soe

THE PROBLEM OF MOMENTS: THE CONSTRUCTION OF MATHEMATICAL MODELS OF CONTROL SYSTEMS IN THE FORM OF A MATRIX-OPERATOR RELATIONS [II]

Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch, Kaluga, 248000, Russia

The main tool for constructing models, research and synthesis of linear stationary systems, as well as nonlinear systems with analytic nonlinearities, is the unit of integral transforms. Its use, in particular, using a frequency synthesis technique difficult algorithmic complexity. In the article the results of solving the problem of moments are used to construct the numerical implementation of algorithmic base unit of integral transforms oriented to solve problems of control theory. On the basis of the Laplace integral mathematical models not only the class of linear, but some nonlinear systems. The methods of research systems and the synthesis of regulators, including the frequency method. Laplace integral allowed to create an effective apparatus of structural reforms. This article describes how to construct methods of analysis and synthesis of control systems based on a numerical system, based on - the theoretical positions of the moment problem.

Keywords: matrix operator, theory of moments, mathematical model.

Petrovichev M.A., assistant lecturer of Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University. E-mail: tabblif@yandex.ru.

Nay Thway, postgraduate of Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University. E-mail: naythway1984@gmail.com.

Naing Aung Soe, postgraduate of Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University. E-mail: naingaungsoe128@gmail.com.

ПРОЕКЦИОННЫЙ МЕТОД СИНТЕЗА СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ В КЛАССЕ СИСТЕМ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Рассматривается применение проекционного метода к решению задачи синтеза замкнутых систем управления в классе систем с запаздыванием, позволяющего свести исходную задачу к задаче условной оптимизации. В качестве примера рассмотрена задача определения числовых параметров ПИД-регулятора с предиктором Смита, которая решалась в два этапа: на первом строилась модель объекта управления; на втором этапе – определялись числовые значения параметров регулятора. На каждом этапе задача сводилась к задаче параметрической оптимизации параметров на множестве допустимых их значений. Рассматривается применение проекционного метода к решению задачи синтеза замкнутых систем управления в классе систем с запаздыванием, позволяющего свести исходную задачу к задаче условной оптимизации. В качестве примера рассмотрена задача определения числовых параметров ПИД-регулятора с предиктором Смита, которая решалась в два этапа: на первом строилась модель объекта управления; на втором этапе – определялись числовые значения параметров регулятора. На каждом этапе задача сводилась к задаче параметрической оптимизации параметров на множестве допустимых их значений.

Ключевые слова: Системы с запаздыванием, матричный оператор, целевая функция, оптимизация, ортонормированный базис

Введение. При проектировании систем управления различными технологическими процессами часто приходится сталкиваться с временными задержками сигналов, используемых при формировании управления, что может привести к неустойчивости замкнутой системы. Поэтому одной из актуальных задач является задача построения эффективных алгоритмов синтеза систем управления в классе систем с запаздыванием. Последнее время широкое применение в задачах теории управления нашли проекционные методы. Основными в этих методах являются понятия спектральных характеристик функций и динамических свойств систем, под которыми понимаются совокупности коэффициентов Фурье процесса относительно выбранного ортонормированного базиса. По своему характеру спек-

тральная характеристика в отличие от непрерывных частотных характеристик, базирующихся на интеграле Фурье, является дискретной. Это обстоятельство позволяет перейти от рассмотрения самих сигналов к рассмотрению координат этих сигналов относительно выбранного базиса и заменить операции над функциями на операциями над числами, которые легко реализовать на ЭВМ. Ниже рассматривается решение задачи синтеза замкнутой системы в классе систем с запаздыванием.

Постановка задачи. Имеется некоторая система автоматического управления, представленная уравнением

$$\frac{d^n}{dt^n} x(t) + \sum_{v=0}^{n-1} a_v(t, P) \frac{d^v}{dt^v} x(t) + \sum_{k=1}^p c_k(t, P) x(t - \theta_k) = \sum_{\mu=0}^m b_\mu(t, P) \frac{d^\mu}{dt^\mu} y(t) \quad (1)$$

где коэффициенты $a_v(t, P)$, $v = 0, \dots, n-1$, $b_\mu(t, P)$, $\mu = 0, \dots, m$, $c_i(t, P)$, $i = 1, \dots, p$, зависят от множества неизвестных конструктивных и настраиваемых параметров P . Необходимо найти числовые значения этих параметров из условия реализации на выходе системы сигнала максимально приближенного в известном смысле к заданному эталонному выходу. На искомые значения параметров также могут быть наложены ограничения.

Алгоритм решения. Для решения поставленной задачи воспользуемся проекционным методом [1, 2]. Интегрируя уравнение (1) n раз, с учетом $t \in [0, T]$ (T – верхняя граница интервала исследования), переходим к эквивалентному интегральному уравнению:

$$\begin{aligned} x(t) + \int_0^T K_x(t, \tau, P) x(\tau) d\tau + \sum_{k=1}^p \int_0^T K_{z,k}(t, \tau, P) x(\tau - \theta_k) d\tau = \\ = \int_0^T K_y(t, \tau, P) y(\tau) d\tau, \end{aligned} \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} K_x(t, \tau, P) &= 1(t - \tau) \sum_{v=0}^{n-1} \frac{(-1)^v}{(n-1)!} \frac{d^v}{d\tau^v} \left[a_v(\tau, P) (t - \tau)^{n-1} \right], \\ K_{z,k}(t, \tau, P) &= 1(t - \tau) \frac{1}{(n-1)!} c_k(\tau, P) (t - \tau)^{n-1}, \\ K_y(t, \tau, P) &= 1(t - \tau) \sum_{\mu=0}^m \frac{(-1)^\mu}{(n-1)!} \frac{d^\mu}{d\tau^\mu} \left[b_\mu(\tau, P) (t - \tau)^{n-1} \right]. \end{aligned}$$

Выбирается ортонормированный базис $\Phi(t)$ и все функции в (2), зависящие от времени, раскладываются в ряды Фурье по элементам выбранного базиса. В результате, после соответствующих преобразований можно записать

$$\mathbf{C}^x + \mathbf{A}_x(P)\mathbf{C}^x + \sum_{k=1}^p \mathbf{A}_{z,k}(P)\mathbf{A}_z(\theta_k)\mathbf{C}^x = \mathbf{A}_y(P)\mathbf{C}^y, \quad (3)$$

где $\mathbf{A}_z(\theta_k)$ – матричный оператор звена запаздывания в выбранном базисе.

Таким образом, выходной сигнал, зависящий от значений искомых параметров, определяется выражением:

$$\mathbf{C}^x(P) = \left(\mathbf{I} + \mathbf{A}_x(P) + \sum_{k=1}^p \mathbf{A}_{z,k}(P)\mathbf{A}_z(\theta_k) \right)^{-1} \mathbf{A}_y(P)\mathbf{C}^y. \quad (4)$$

Поскольку известен эталонный выходной процесс $x_s(t)$, то, введя в рассмотрение функционал

$$J(P) = \left[\left(\mathbf{C}^{x_s} - \mathbf{C}^x(P) \right)^T \left(\mathbf{C}^{x_s} - \mathbf{C}^x(P) \right) \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (5)$$

исходную задачу определения числовых значений искомых P можно свести к задаче условной оптимизации функционала $J(P)$ на множестве допустимых значения искомых параметров.

Пример. Рассмотрим в качестве примера определение числовых значений ПИД-регулятора следящей системы, объект которой представлен передаточной функцией

$$W_o(s) = \frac{1,32s + 7,92}{s^4 + 8,088s^3 + 19,62s^2 + 30,89s + 31,82}.$$

Поскольку система имеет четвертый порядок, то в качестве возможной схемы построения замкнутой системы рассмотрим схему с предиктором Смита (рис. 1)

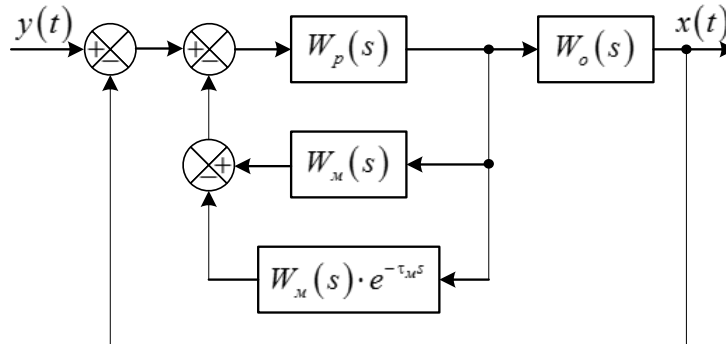


Рис.1. Замкнутая скорректированная система с предиктором Смита

Задача решается в два этапа. Первый этап заключается в построении модели объекта [3]. Исходя из графика реакции объекта на единичное ступенчатое воздействие (рис. 2) в качестве модели объекта выбрана передаточная функция

$$W_m(s) = \frac{b_1^m s + b_0^m}{a_2^m s^2 + a_1^m s + a_0^m} e^{-\tau_m s},$$

где a_i^M , $i = 0, \dots, 2$; b_j^M , $j = 0, 1$; τ_M – параметры модели, которые подлежат определению из условия максимального приближения в известном смысле переходной характеристики модели к характеристике объекта.

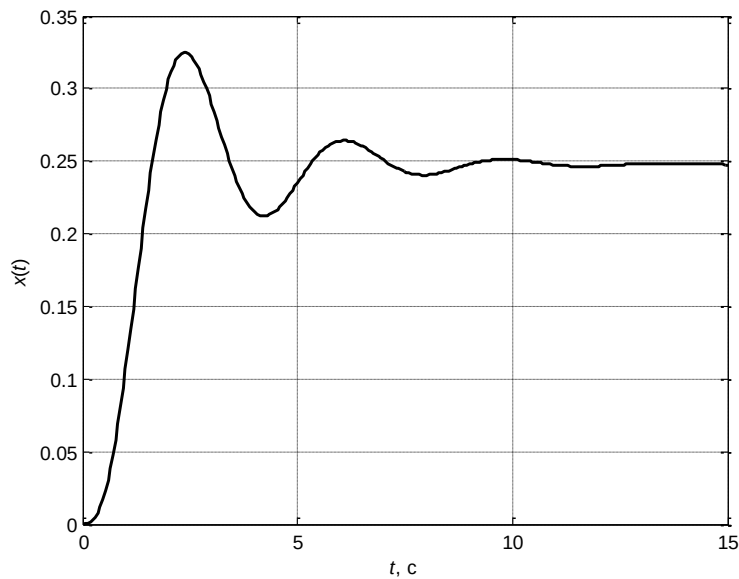


Рис. 2. График переходного процесса объекта

Воспользовавшись проекционным методом, задача определения параметров модели сводится к задаче условной оптимизации на множестве допустимых значений параметров модели:

$$J(P) = \left[\left(C^\varepsilon(P) \right)^T C^\varepsilon(P) \right]^{\frac{1}{2}} \rightarrow \min_P,$$

где $P = \{b_1^M, b_0^M, a_2^M, a_1^M, \tau_M\}$ ($a_0^M = 1$ для однозначности решения); $C^\varepsilon(P) = (A_o - A_M(P) \cdot A_z(P)) C^y$, A_o – матричный оператор объекта в выбранном базисе, $A_M(P)$ – матричный оператор непрерывной части модели, $A_z(P)$ – матричный оператор транспортного запаздывания, C^y – спектральная характеристика входного сигнала.

В результате оптимизации найдены следующие оптимальные значения параметров модели (ограничения – положительность значений искоемых параметров; используемый базис – множество блочно-импульсные функций, состоящая из 128 элементов):

$$b_1^{M*} = 0,0005, b_0^{M*} = 0,2469, a_2^{M*} = 0,34, a_1^{M*} = 0,3836, \tau_M^* = 0,3943,$$

значение целевой функции в оптимальной точке – $J(P^*) = 0,01851$ (стартовые значения искоемых параметров: $b_1^{M0} = 0,001$, $b_0^{M0} = 0,3$, $a_2^{M0} = 0,1$, $a_1^{M0} = 1$, $\tau_M^0 = 0,5$ и $J(P^0) = 0,8443$). На рис. 3 представлены графики выхода объекта и рассматриваемой модели

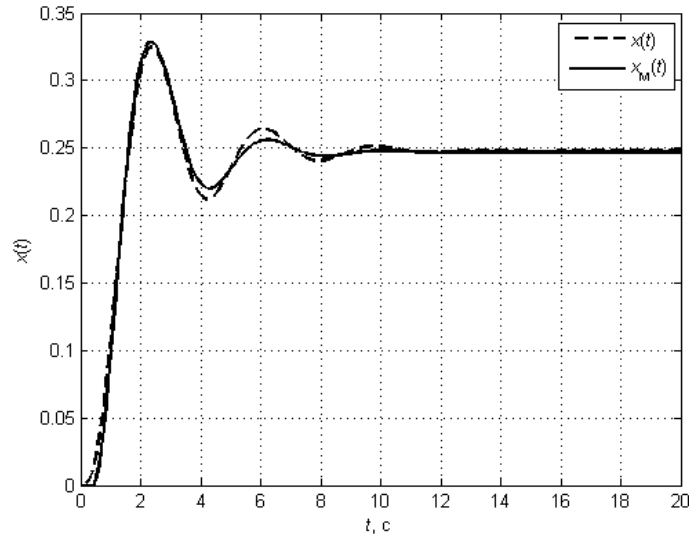


Рис. 3. Графики выходных сигналов объекта и модели

Таким образом, в ходе решения первого этапа задачи получена модель объекта в виде последовательного соединения звена второго порядка и звена чистого запаздывания, которая будет использоваться для реализации предиктора Смита.

Второй этап заключается в определении числовых значений параметров ПИД-регулятора замкнутой системы из условия реализации на выходе скорректированной системы эталонного переходного процесса:

$$x_s(t) = 1 - e^{-\alpha t},$$

где параметр α определяется из условия равенства времени управления 3 секундам.

Переходя к рассмотрению матричных операторов, исходную структурную схему можно заменить схемой, представленной на рис. 4.

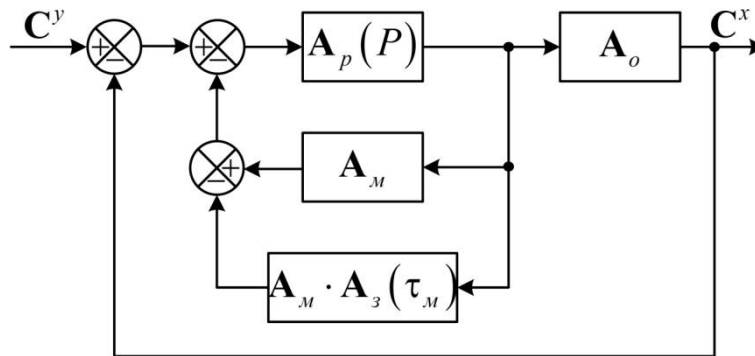


Рис. 4. Схема скорректированной системы в операторной форме

После соответствующих структурных преобразований в операторной форме получим выражения для определения спектральной характеристики выходного сигнала:

$$C^x(P) = (I + A_1(P)A_o)^{-1} A_o C^y,$$

где $A_1(P) = \left[\left(I + (I + A_3(\tau_m)) A_m \right) A_p(P) \right]^{-1} A_p(P)$, $P = \{K_n, K_u, K_d\}$ – множество неизвестных параметров ПИД-регулятора.

Начальные значения искомых параметров при решении поставленной задачи были следующими (в качестве базиса использовались блочно-импульсные функции и удерживались 128 элементов):

$$K_n^0 = 1, K_u^0 = 0,01, K_d^0 = 0,01.$$

Значение целевой функции (5) в стартовой точке: $J(P^0) = 3,3572$. На рис. 5 представлены графики переходного процесса скорректированной системы для начальной точки и эталонного.

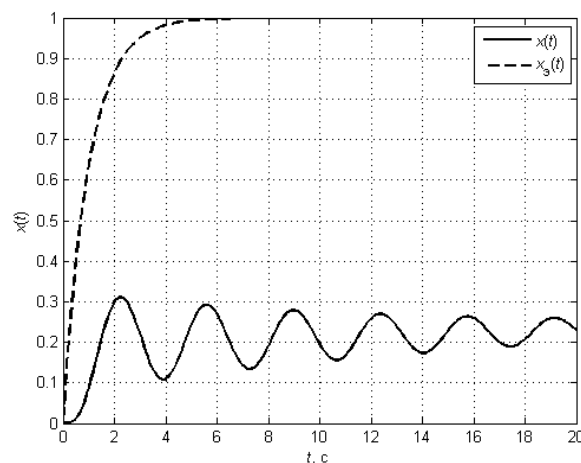


Рис. 5. Графики переходного процесса скорректированной системы для начальной точки и эталонного

В результате условной оптимизации функционала (5) получены следующие оптимальные значения искомых параметров ПИД-регулятора:

$$K_n^* = 3,2659, K_u^* = 6,7721, K_d^* = 3,6714.$$

Значение целевой функции в стартовой точке: $J(P^*) = 0,0991$. На рис. 6 представлены графики переходного процесса скорректированной системы для начальной точки и эталонного.

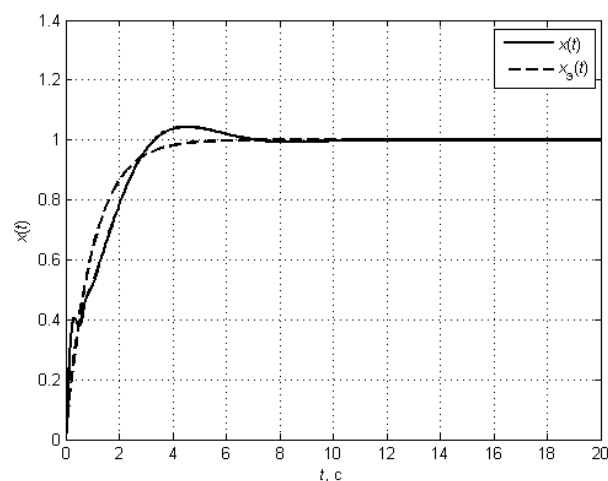


Рис. 6. Графики переходного процесса скорректированной системы для начальной точки и эталонного

Заключение. Применение проекционных методов к решению задач синтеза систем управления в классе систем с запаздыванием позволяет исходную задачу свести к задаче условной оптимизации на множестве допустимых значений искомых параметров и построить эффективные алгоритмы, что демонстрируется приведенным примером.

Литература.

[1] Методы инженерного синтеза сложных систем управления: аналитический аппарат, алгоритмы приложения в технике. Часть II / Под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. – М.: Издательство МГТУ им Н.Э. Баумана, 2012. – 416 с.

[2] Матричные методы расчета и проектирования сложных систем автоматического управления для инженеров / Под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. – М.: Издательство МГТУ им Н.Э. Баумана, 2007. – 664 с.

[3] Тин Зар Аунг, Со Нэй Лин Аунг, Акименко Д. А. Проекционный метод параметрической идентификации объектов / Наука и образование – 2014 [Электронный ресурс] : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Мурманск, 24–28 марта 2014 г. – Стр. 414-417. URL: <http://www.mstu.edu.ru/science/actions/conferences/files/nio-9.pdf> (дата обращения 23.10.2014)

Акименко Д.А. – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: akimenko@kaluga.ru.

Тин Зар Аунг – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: dobary@gmail.com.

Со Нэй Лин Аунг – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: soenla@gmail.com.

D.A. Akimenko, Tin Zar Aung, Soe Nay Lynn Aung

PROJECTION METHOD FOR THE SYNTHESIS OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS IN THE CLASS OF SYSTEMS WITH DELAY

Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch, Kaluga, 248000, Russia

The application of the projection method to solve the problem of synthesis of closed control systems in the class of systems with delay, allows us to reduce the original problem to a constrained optimization problem. As an example, consider the problem of determining the numerical parameters of the PID controller with Smith predictor, which was solved in two stages: the first builds a model of the control object; at the second stage - defines the numerical values of the parameters of the controller. At each stage, the problem reduces to the problem of parametric optimization of parameters in the set of allowable values. The application of the projection method to solve the problem of synthesis of closed control systems in the class of systems with delay, allows us to reduce the original problem to a constrained optimization problem. As an example, consider the problem of determining the numerical parameters of the PID controller with Smith predictor, which was solved in two stages: the first builds a model of the control object; at the second stage - defines the numerical values of the parameters of the controller. At each stage, the problem reduces to the problem of parametric optimization of parameters in the set of allowable values.

Keywords: *Delay system, matrix operator, the objective function, optimization, orthonormal basis*

Akimenko D.A., Ph. D., Assoc. Professor of Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University. E-mail: akimenko@kaluga.ru.

Tin Zar Aung, postgraduate of Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University. E-mail: dobary@gmail.com.

Soe Nay Lynn Aung, postgraduate of Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University. E-mail: soenla@gmail.com.

В.И. Краснощеченко

СТАБИЛИЗАЦИЯ НЕУСТОЙЧИВОГО ПРЕДЕЛЬНОГО ЦИКЛА РЕЛЕЙНОЙ ХАОТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

В данной работе представлен алгоритм синтеза для стабилизации неустойчивого предельного цикла релейной хаотической системы. В алгоритме используется одномерное дискретное отображение Пуанкаре для нахождения неподвижных точек периода один (предельных циклов исходной непрерывной системы). Показано, что классический метод OGY синтеза апериодического регулятора не решает поставленной задачи, так как учёт только скорости выходной координаты не достаточен. Предложенный алгоритм основывается на поиске необходимого коэффициента регулятора решением обратной задачи: сначала задаётся некоторый коэффициент, а затем осуществляется двухэтапная процедура (с коррекцией) перехода системы в следующую точку переключения. Задача коррекции осуществляется в полной окрестности (положения и скорости выходной координаты) и обеспечивает стабилизацию предельного цикла корректирующими импульсами малой амплитуды в выбранной области начальных условий (области стабилизации), что доказывается приведёнными результатами моделирования.

Ключевые слова: хаос, отображение Пуанкаре, предельный цикл, стабилизация, релейная система, синтез регулятора

Введение. Известно, что в пространстве состояний хаотические колебания в непрерывной нелинейной системе могут возникнуть только для систем третьего и более высокого порядка. Самый известный пример такой системы – классический хаотический аттрактор Э. Лоренца [1]. В системах второго порядка ограниченные устойчивые движения имеют место только в виде состояния равновесия или предельного цикла (теорема Пуанкаре-Бендиксона) [2]. Тем не менее, рассматриваемая в данной работе простая система с обратной связью – линейная неустойчивая колебательная система второго порядка с гистерезисным реле в контуре (рис.1), – предложенная П. Куком [3] при определённых значениях коэффициента $0 < \xi < \xi_{кр}$ может генерировать хаотические траектории, которые формируют хаотический аттрактор (рис. 2) с ограниченной областью притяжения. Причина такого отклонения от теоремы Пуанкаре-Бендиксона – не-

единственность вход-выходного соотношения $u = f(y)$, вводимого гистерезисом.

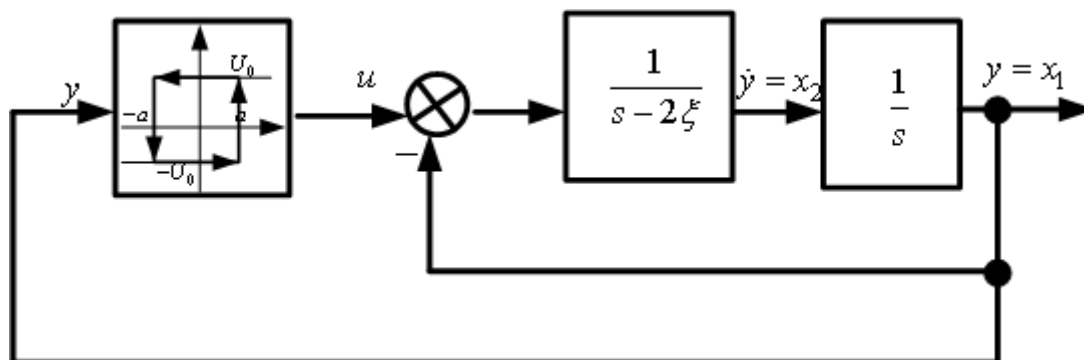


Рис. 1

Аттрактор имеет ограниченную область притяжения и характеризуется бесконечным числом неустойчивых предельных циклов. Если в хаотической системе присутствует неустойчивый предельный цикл с подходящими параметрами, то его стабилизацию можно, в принципе, сделать очень малыми корректирующими сигналами (управлениями), прикладываемыми в небольшой окрестности неподвижной точки отображения Пуанкаре. Этот факт принципиально отличает задачу стабилизации для хаотической системы от традиционной, т.е. системы с регулярным движением.

В данной работе для исследования хаотического движения и определения границы области притяжения аналитически определяется точечное отображение Пуанкаре в *параметрической* форме. Для стабилизации неустойчивого предельного цикла (неподвижной точки периода 1 отображения Пуанкаре) в начале рассматривается синтез регулятора с использованием, уже ставшего классическим, метода OGY [4]. Основой данного метода является линеаризация отображения Пуанкаре в небольшой окрестности неподвижной точки, где и проводится коррекция траектории малыми импульсами. Теоретические исследования по стабилизации неустойчивого предельного цикла данной системы методом OGY представлены в статьях [5,6]. Однако результатов численного моделирования и числовых значений коэффициента регулятора для стабилизации предельного цикла, корректирующих управляющих воздействий малой (или, возможно, не малой) амплитуды в работе представлено не было. Проведённое моделирование показало, что полученный в результате линеаризации (с использованием численного дифференцирования, как в работе [6]) отображения Пуанкаре коэффициент аperiodического регулятора не привёл к желаемому результату стабилизации.

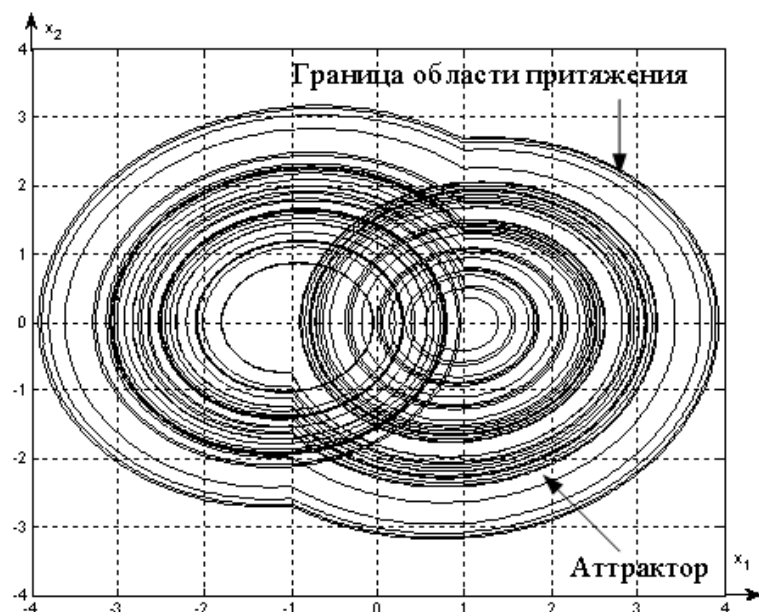


Рис.2

В представленном в данной статье алгоритме коррекция проводится в расширенной окрестности $U_y \times U_{\dot{y}}$, т.е. учитывается локальная окрестность полной системы. Для нахождения коэффициента регулятора *решается обратная задача*: задаётся коэффициент регулятора и определяется результат его локальной работы при переходе системы из точки переключения $(a, p)^T$ в точку $(-a, q)^T$, где a – положение, а p, q – скорость системы в соответствующей точке переключения. При этом размер окрестности выхода U_y точки переключения $(a, p)^T$ играет существенную роль. Предлагаемая методика нахождения коэффициента одномерного регулятора и алгоритма коррекции, помимо того, что позволяет решить задачу стабилизации неустойчивого предельного цикла, объясняет причину неудачных результатов моделирования при синтезе регулятора по методу OGY.

Аналитическое определение отображения Пуанкаре. Как известно, точечное отображение А. Пуанкаре позволяет преобразовать исходную непрерывную систему в дискретную систему размерности на единицу меньше. При этом исследование периодических, нерегулярных, в том числе хаотических, движений намного упрощается. Неподвижные точки отображения Пуанкаре определяют предельные циклы (устойчивые или неустойчивые) непрерывной системы.

Для построения точечного отображения Пуанкаре зададим параметры реле: $U_0 = 1; a = 1$. В качестве секущей Пуанкаре (поверхность, которая трансверсально пересекается траекторией с соответствующей регистрацией точки сечения Пуанкаре) используем линию (одномерную поверхность) $x_1 = a = 1$, на которой будем фиксировать текущее значение скоро-

сти $x_2 = p \geq 0$ при переключении с -1 на $+1$. Следующая точка переключения для линии $x_1 = a = -1$ и скорости $x_2 = -q, q \geq 0$ определяется для момента переключения с $+1$ на -1 (рис.3).

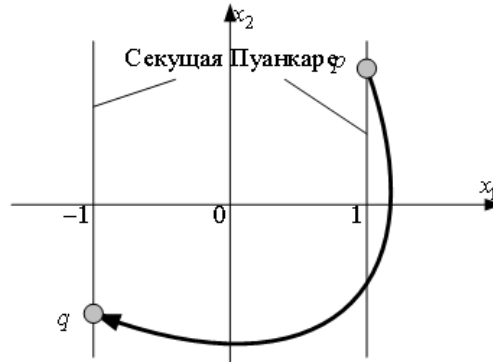


Рис.3

Отображение Пуанкаре определяет дискретное отображение $q = \phi(p)$ между последовательными точками пересечения траекторией соответственно линий $x_1 = 1, x_2 = p \geq 0$ и $x_1 = -1, x_2 = -q, q \geq 0$ при произвольных, но допустимых значениях скорости $p \geq 0, q \geq 0$. Эти точки формируют так называемое сечение Пуанкаре. Отображение будем строить для нахождения только неподвижных точек периода 1, т.е. неустойчивые предельные циклы будут иметь одинаковые, симметричные точки $p^*(k) = q^*(k)$, где

$$k = k_c + 1 \quad (1)$$

– число пересечений (раскручивающейся спиральной) траектории с секущей Пуанкаре до следующего переключения равно числу пересечений *без переключения* k_c (эти пересечения не формируют точки сечения Пуанкаре) плюс единица (учёт первого пересечения, при переключении) с линиями $x_1 = 1, x_2 = p \geq 0$ и $x_1 = -1, x_2 = -q, q \geq 0$ при вращении вокруг точек $(1 \ 0)^T, (-1 \ 0)^T$, соответственно. На секущей (поверхности) Пуанкаре это будет одна точка. Очевидно, что при одном пересечении, $k = 1$, переход из точки $(1 \ p^*(1))^T$ в точку $(-1 \ -q^*(1))^T$ происходит менее чем за один оборот.

Процедура построения отображения Пуанкаре. Начинаем движение с точки $(1 \ p \geq 0)^T$. На вход линейной системы до очередного переключения поступает сигнал $u = +1$. Представим исходную релейную систему в пространстве состояний

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2, \\ \dot{x}_2 &= -x_1 + 2\xi x_2 + 1, \\ y &= x_1, \mathbf{x}(0) = (1 \ p)^T. \end{aligned} \quad (2)$$

и найдём её решение. Имеем

$$x_1(t) = 1 + \frac{p}{\omega} e^{\xi t} \sin \omega t,$$

$$x_2(t) = \frac{p}{\omega} e^{\xi t} (\xi \sin \omega t + \omega \cos \omega t),$$

где $\omega = \sqrt{1 - \xi^2}$ – угловая скорость раскручивания спирали.

Пусть в момент времени $t = \tau > 0$ траектория достигает точки переключения $\mathbf{x}(\tau) = (-1 \ -q)^T$, т.е.

$$\begin{aligned} -1 &= 1 + \frac{p}{\omega} e^{\xi \tau} \sin \omega \tau, \\ -q &= \frac{p}{\omega} e^{\xi \tau} (\xi \sin \omega \tau + \omega \cos \omega \tau). \end{aligned} \quad (3)$$

Из уравнений (3) получим

$$\begin{aligned} p &= -\frac{2\omega e^{-\xi \tau}}{\sin \omega \tau}, \\ q &= 2\xi - p e^{\xi \tau} \cos \omega \tau. \end{aligned} \quad (4)$$

Строго говоря, из уравнений (4) можно в параметрической форме (параметр τ) определить некоторую зависимость $q = q(p)$. Однако, в этом случае невозможно выполнить требование неотрицательности $p \geq 0, q \geq 0$ и, соответственно, получить отображение Пуанкаре. Учитывая, что в соотношениях (4) присутствуют периодические функции, для обеспечения условия $p \geq 0$ перейдём к угловому аргументу θ :

$$\omega \tau = (2k - 1)\pi + \theta, \quad k = 1, 2, \dots; 0 < \theta < \pi, \quad (5)$$

где k числовой параметр, определяющей число пересечений траектории с линией (секущей Пуанкаре) $x_1 = 1, x_2 = p \geq 0$ до переключения (формула (1)). Определяя из соотношения (5) переменную τ

$$\tau = \frac{1}{\omega} ((2k - 1)\pi + \theta) \quad (6)$$

и подставляя (6) в (4), получим

$$p = p(\xi, k, \theta) = \frac{2\omega e^{\left(-\frac{\xi}{\omega}((2k-1)\pi + \theta)\right)}}{\sin \theta}, \quad (7)$$

$$q = q(\xi, \theta) = 2(\xi + \omega \operatorname{ctg} \theta). \quad (8)$$

Формула (8) говорит о том, что точка q не зависит от числа самопересечений k траектории с линией $x_1 = 1, x_2 = p \geq 0$ до переключения: важен сам факт переключения, а как двигалась траектория до точки переключения, учитывает формула (7).

Ясно, что интервал $0 < \theta < \pi$ обеспечивает выполнение условия $p \geq 0$, но для обеспечения требования $q \geq 0$ необходимо уточнить верхнюю границу $\theta_{\max}$. Из уравнения

$$q(\theta_{\max}) = 2(\xi + \omega \operatorname{ctg} \theta_{\max}) = 0 \quad (9)$$

находим

$$\operatorname{ctg} \theta_{\max} = \frac{\cos \theta_{\max}}{\sin \theta_{\max}} = -\frac{\xi}{\omega} = \frac{-\xi}{\omega} = \frac{-\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}.$$

Из последнего выражения (с учётом $\sin \theta_{\max} > 0$) определяем максимальный угол

$$\theta_{\max} = \pi - \arcsin \omega. \quad (10)$$

Обе параметрические функции $p(\theta), q(\theta)$ являются убывающими функциями. Производная $\frac{dp}{d\theta} = -\frac{p}{\omega}(\xi + \omega \operatorname{ctg} \theta) < 0$. Производная

$\frac{dq}{d\theta} = -\frac{2\omega}{\sin^2 \theta} < 0$ также определяет убывающую функцию и при максимальном угле $\theta = \theta_{\max}$ траектория попадает в критическую точку неустойчивого состояния $q(\theta_{\max}) = 2(\xi + \omega \operatorname{ctg} \theta_{\max}) = 0$. В этом случае малейшее отклонение от точки переключения $(-1_0 \quad 0)^T$ приводит к *дополнительному* обороту. При этом *система приходит в точку переключения с одним и тем же значением по скорости* ($q = \nu$), так как этот виток определяется одними и теми же начальными условиями и его конечная точка не зависит от того, сколько до этого сделала система витков с самопересечениями ($k \geq 2$) (рис. 4). На рисунке 5 представлено одномерное отображение Пуанкаре для различных значений k и $\xi = 0,05$.

Очевидно, выполнение равенства

$$p(\xi, k, \theta_{\max}) = p(\xi, k+1, \theta_\nu) \quad (11)$$

задаёт начальное значение θ_ν для нахождения зависимости $q = \phi(p)$ при числе самопересечений $k \geq 2$ (напомним, что функция $q = \phi(p)$ – убывающая). Подставляя соответствующие выражения в (11), получим уравнение для нахождения начального угла θ_ν :

$$e^{\frac{\xi}{\omega}(\pi + \arcsin \omega + \theta_\nu)} \sin \theta_\nu = \omega. \quad (12)$$

Сам уровень ν определяется выражением (8) (рис.5)

$$\nu = q(\xi, \theta_\nu) = 2(\xi + \omega \operatorname{ctg} \theta_\nu). \quad (13)$$

Для коэффициента $\xi = 0,05$ угол $\theta_\nu = 0,860$, уровень $\nu = 1,821$ (см. рис.5).

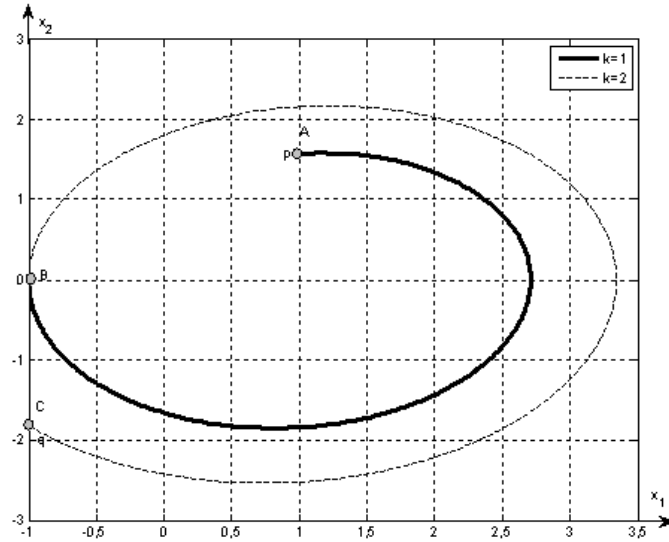


Рис.4

И, наконец, определим предельно допустимый уровень начальной скорости $p_{\max}(\xi, 1, \theta_\mu) = \mu$, определяющий границу области притяжения. Ясно, что $\mu \geq \nu$: в случае строгого неравенства $\mu > \nu$ аттрактор находится внутри области притяжения; для $\mu = \nu$ граница аттрактора совпадает с границей области притяжения. При $\mu < \nu$ – процесс расходится.

Граничная точка $p_{\max}(\xi, 1, \theta_\mu) = \mu$ определяет неустойчивый предельный цикл периода 1 для числа самопересечений $k=1$ (неподвижная точка отображения Пуанкаре), т.е.

$$q(\xi, \theta_\mu) = \mu = 2(\xi + \omega \operatorname{ctg} \theta_\mu). \quad (14)$$

Необходимый угол θ_μ позволяет найти граничную (начальную) точку $p_{\max}(\xi, 1, \theta_\mu) = \mu$ для траектории с одним пересечением $k=1$, которая обеспечивает сходимость к аттрактору. Раскрывая левую часть уравнения

$$p_{\max}(\xi, 1, \theta_\mu) = \mu = 2(\xi + \omega \operatorname{ctg} \theta_\mu)$$

с использованием выражения (7), получим необходимое уравнение для определения угла θ_μ

$$\xi \sin \theta_\mu + \omega \cos \theta_\mu = \omega e^{-\frac{\xi}{\omega}(\pi + \theta_\mu)}. \quad (15)$$

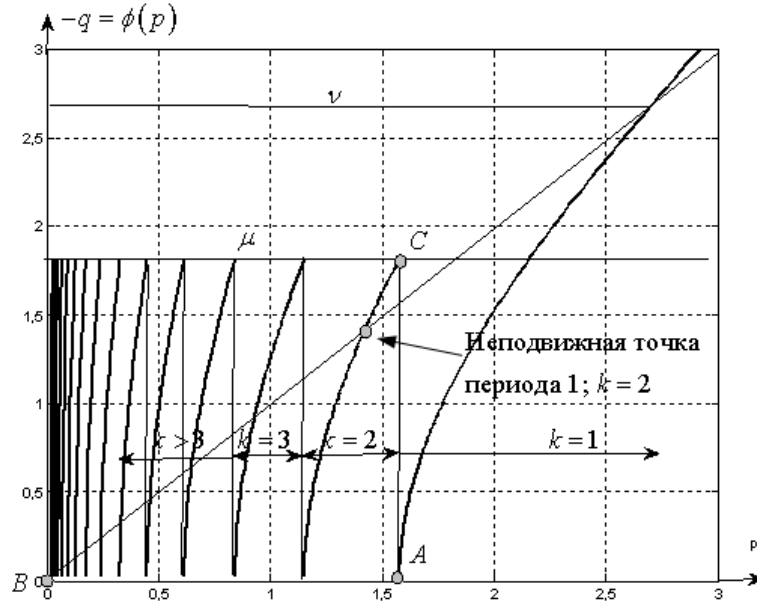


Рис. 5

Для коэффициента $\xi = 0,05$ угол $\theta_\mu = 0,649$, уровень $\mu = 2,736$.

Критическое значение коэффициента ξ_{kp} определяется из граничного условия формирования аттрактора, $\mu = \nu$ или $\theta_\nu = \theta_\mu = \theta_{\nu,\mu}$. Именно, из выражений (12), (15) составляем систему уравнений

$$e^{\frac{\xi_{kp}}{\omega}(\pi + \arcsin \omega + \theta_{\nu,\mu})} \sin \theta_{\nu,\mu} = \omega, \quad (16)$$

$$\xi_{kp} \sin \theta_{\nu,\mu} + \omega \cos \theta_{\nu,\mu} = \omega e^{-\frac{\xi_{kp}}{\omega}(\pi + \theta_{\nu,\mu})},$$

решая которую получаем: $\xi_{kp} = 0,0674$; $\theta_{\nu,\mu} = 0,765$; $\mu = \nu = 2,216$.

Полученное отображение Пуанкаре используем для синтеза регулятора, стабилизирующего выбранный неустойчивый предельный цикл.

Синтез регулятора. В начале мы рассмотрим классический метод синтеза регулятора, так называемый метод OGY, названный так по первым буквам фамилий авторов [4].

Метод OGY. Для синтеза линейного регулятора и стабилизации неподвижной неустойчивой точки периода 1 (p^*, U_0) отображения Пуанкаре проведём линеаризацию этого отображения в окрестности данной точки. Получим

$$\begin{aligned} \phi(p, U) &= \phi(p^*, U_0) + \left. \frac{\partial \phi(p, U)}{\partial p} \right|_{\substack{U=U_0 \\ p=p^*}} (p - p^*) + \left. \frac{\partial \phi(p, U)}{\partial U} \right|_{\substack{U=U_0 \\ p=p^*}} (U - U_0) = \\ &= \phi(p^*, U_0) + A(p - p^*) + B(U - U_0), \end{aligned}$$

где для определения коэффициентов линейного разложения A, B используем численное дифференцирование, как в работе [6]. Именно,

$$A = \left. \frac{\partial \phi(p, U)}{\partial p} \right|_{\substack{U=U_0 \\ p=p^*}} \approx \frac{\phi(p_2, U_0) - \phi(p_1, U_0)}{p_2 - p_1},$$

$$B = \left. \frac{\partial \phi(p, U)}{\partial U} \right|_{\substack{U=U_0 \\ p=p^*}} \approx \frac{\phi(p^*, u_2) - \phi(p^*, u_1)}{u_2 - u_1},$$

$$p_2 = p^* + \varepsilon_p / 2; p_1 = p^* - \varepsilon_p / 2, u_2 = U_0 + \varepsilon_u / 2; u_1 = U_0 - \varepsilon_u / 2.$$

Синтезируем линейный регулятор, действующий в окрестности $U_{\dot{y}} = \{ \dot{y} = p \in R : |p - p^*| \leq \varepsilon_{\dot{y}} \}$

$$U - U_0 = \Delta u = K(p - p^*) : p \in U_{\dot{y}}.$$

В этом случае линеаризация одномерного отображения Пуанкаре имеет вид:

$$\phi(p, U) = \phi(p^*, U_0) + A(p - p^*) + B(U - U_0) = \phi(p^*, U_0) + (A + BK)(p - p^*)$$

Используем апериодический регулятор, т.е. потребуем в точке переключения выполнения равенства

$$-q = \phi(p, U) = \phi(p^*, U_0).$$

В этом случае необходимо решить уравнение

$$A + BK = 0,$$

из которого определяем необходимый коэффициент регулятора

$$K = -\frac{A}{B}. \quad (17)$$

Таблица

Коэффициенты апериодического регулятора K линеаризованного отображения Пуанкаре при различных вариациях параметров $\varepsilon_p, \varepsilon_u$

$\varepsilon_p = \varepsilon_{\dot{y}(0)} = p_2 - p_1$ $p_2 = p^* + \varepsilon_p / 2$ $p_1 = p^* - \varepsilon_p / 2$	$\varepsilon_u = u_2 - u_1$ $u_2 = U_0 + \varepsilon_u / 2$ $u_1 = U_0 - \varepsilon_u / 2$	$-K$
0,1	0,1	2,786
0,1	0,05	2,785
0,05	0,05	2,777
0,2	0,2	2,824
0,05	0,1	2,778
0,3	0,3	2,895

По формуле (17) рассчитан коэффициент K при различных вариациях скорости ε_p и управления ε_u в момент переключения. В представленной таблице приведены результаты расчёта. Из анализа полученных коэффициентов следует, что размер окрестности слабо влияет на значение коэффициента K . При моделировании принято $\varepsilon_{\dot{y}} = \varepsilon_p = 0,05$ и $K_{OGY} = -2,75$. Результаты моделирования для параметров $\varepsilon_{\dot{y}} = 0,05; T = 100$ с; $x(0) = (1,001; 1,38)^T$ изображены на рисунке 6. Как видно, стабилизации предельного цикла не наблюдается.

Исследуем причину отсутствия стабилизации предельного цикла по методу OGY. По теории апериодический регулятор должен за один шаг до очередного переключения обеспечить переход из точки $(1, p)^T, p \in [p^-, p^+]$ в точку $(-1, -q^*), -q^* = 1,4226$. При моделировании с коэффициентом $K_{OGY} = -2,75$ и $\varepsilon_{\dot{y}} = \varepsilon_p = 0,05$ были получены следующие результаты:

$$\begin{aligned}
 (1, p^-)^T &\xrightarrow[t=\tau_s(\varepsilon_{\dot{y}})]{u=U_0+K_{OGY}(\dot{y}-p^*)} (1,496; 1,3726)^T \xrightarrow{u=U_0} (-1; -q^- = 1,391)^T, \\
 (1, p^+)^T &\xrightarrow[t=\tau_s(\varepsilon_{\dot{y}})]{u=U_0+K_{OGY}(\dot{y}-p^*)} (1,645; 1,3726)^T \xrightarrow{u=U_0} (-1; -q^+ = 1,510)^T,
 \end{aligned}$$

где

$-q^-$ – терминальная точка (переключения реле с +1 на -1) для начальной точки $p^- = 1,38$, нижней границы области притяжения предельного цикла;

$-q^+$ – терминальная точка (переключения реле с +1 на -1) для начальной точки $p^+ = 1,47$ верхней границы области притяжения предельного цикла;

$\tau_s(\varepsilon_{\dot{y}})$ – момент окончания коррекции (выход на границу $U_{\dot{y}}$).

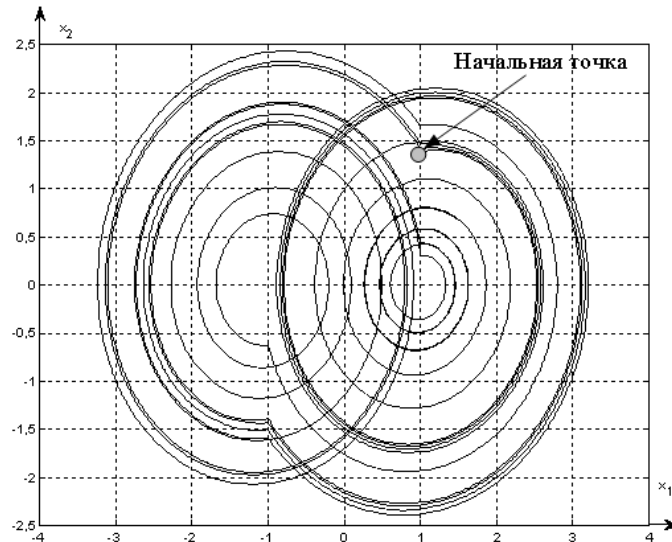


Рис. 6

Из неравенств $-q^- > p^-$, $-q^+ > p^+$ следует, т.е. процесс стабилизации отсутствует.

Предлагаемый метод. Для нахождения коэффициента регулятора решается обратная задача: задаётся коэффициент регулятора и определяется результат его локальной работы при переходе системы из точки переключения $(1, p)^T$ в точку $(-1, q)^T$, где p, q – скорость системы в соответствующей точке переключения. Коррекция траектории с помощью регулятора ($\Delta u \neq 0$) производится в окрестностях точек переключения:

$$(y, \dot{y})^T = (x_1, x_2)^T \in U_y \times U_{\dot{y}},$$

где $U_{\dot{y}} = \{\dot{y} \in R : |\dot{y} - p^*| \leq \varepsilon_{\dot{y}}\}$ – окрестность переменной $\dot{y} = x_2$ при переключении, $p^* = -q^* = 1,4226$; $k = 2$ – неподвижная точка цикла периода 1 отображения Пуанкаре стабилизируемого предельного цикла; принято $\varepsilon_{\dot{y}} = 0,05$, $U_y = \{y \in R : |y - 1| \leq \varepsilon_y\}$ – окрестность выходной переменной $y = x_1$ в точке переключения.

Алгоритм расчёта необходимого коэффициента регулятора следующий.

1. Итерационно с некоторым шагом задаётся коэффициент регулятора K .
2. Для двух начальных значений $(1, p^-)^T, (1, p^+)^T$ на интервале коррекции $(y, \dot{y})^T = (x_1, x_2)^T \in U_y \times U_{\dot{y}}, t \in [0, \tau_s]$ рассчитывается управление $u = U_0 + K \cdot (\dot{y} - p^*)$ и траектория

$$y(t) = x_1(t) = b + \frac{\operatorname{sh}\left(\frac{\beta t}{2}\right) e^{\frac{at}{2}} (x_{10} + a \cdot b + 2c)}{\beta} + \frac{\operatorname{ch}\left(\frac{\beta t}{2}\right) e^{\frac{at}{2}} (x_{10} - b)}{\beta}, \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \dot{y}(t) = x_2(t) = & \frac{\operatorname{sh}\left(\frac{\beta t}{2}\right) e^{\frac{at}{2}} (x_{10} \cdot a + a \cdot b + 2c)}{2\beta} + \frac{\operatorname{ch}\left(\frac{\beta t}{2}\right) e^{\frac{at}{2}} (x_{10} \cdot a + a \cdot b + 2c)}{2} + \\ & + \frac{\operatorname{sh}\left(\frac{\beta t}{2}\right) e^{\frac{at}{2}} \beta (x_{10} - b)}{2} + \frac{\operatorname{ch}\left(\frac{\beta t}{2}\right) e^{\frac{at}{2}} a (x_{10} - b)}{2}, \end{aligned} \quad (19)$$

где

$$\beta = \sqrt{a^2 - 4}, \quad a = 2\xi - K, \quad b = K \cdot p^* + U_0, \quad c = x_{20} - a \cdot x_{10} = p^\pm + a, \quad \xi = 0,05, \quad x_{10} = 1$$

3. После окончания коррекции на интервале $t \in [\tau_s, t_{-1}]$, (t_{-1} – момент переключения выхода реле на -1) по формулам (18), (19) рассчитывается траектория с коэффициентом регулятора $K = 0$. Фиксируется результат перехода от одного переключения до другого.
4. Считается, что при заданной области коррекции процесс стабилизации обеспечивается, если $-q^- < p^-, -q^+ < p^+$.

На рисунке 7 представлены результаты расчета двухэтапного перехода траектории из начальной точки $(+1, p)^T$, $p \in [p^-, p^+]$ в конечную точку $(-1, -q)^T$ при различных размерах области U_y . На первом этапе в окрестности точки переключения, $(y, \dot{y})^T = (x_1, x_2)^T \in U_y \times U_{\dot{y}}$, используется линейный регулятор, формирующий корректирующие импульсы. После выхода траектории из этой окрестности на вход объекта подаётся только сигнал выхода реле $u = U_0 = 1$, т.е., как в ОGY методе, коррекция (управление неустойчивым предельным циклом, проводится в локальной окрестности неподвижной точки отображения Пуанкаре).

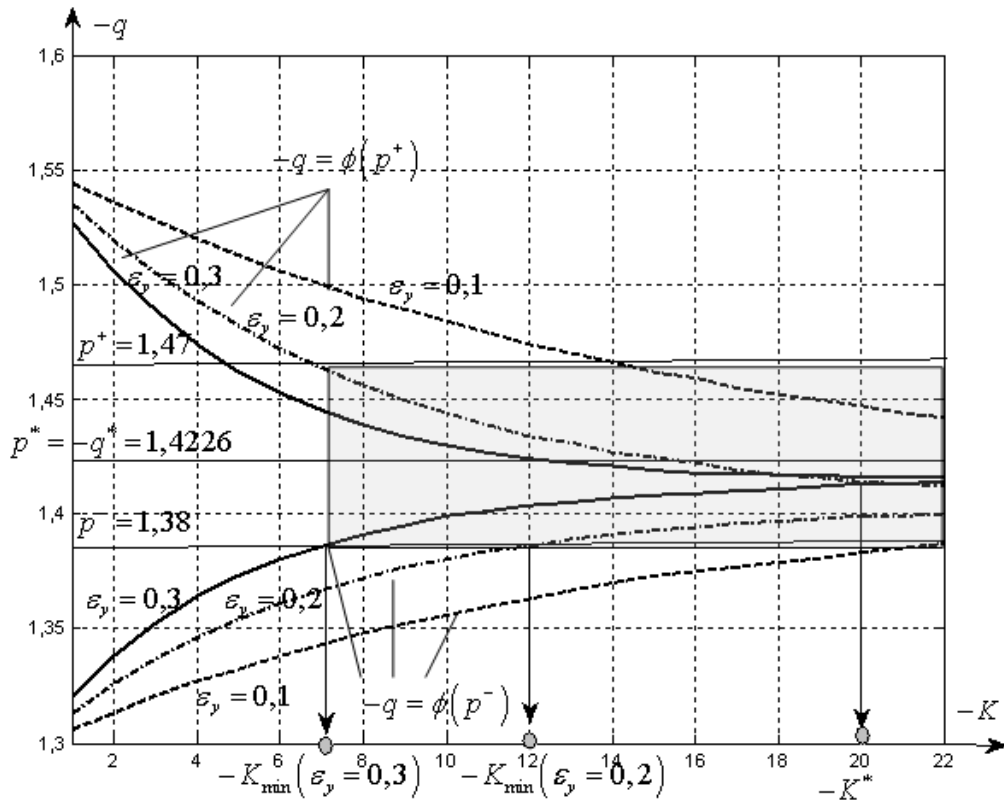


Рис. 7

Анализ по выбору коэффициента регулятора. Из графиков рисунка 7 следует, что для области коррекции $U_y \times U_{\dot{y}}$ с $\varepsilon_y = 0,3$ минимальный коэффициент регулятора $-K_{\min}$, который обеспечит стабилизацию предельного цикла должен быть не менее 7, т.е. $-K_{\min}(\varepsilon_y = 0,3) > 7$. Только в этом случае граничная точка $p = p^- = 1,38$ приближается с течением времени к циклу периода 1 (предельному циклу) для отображения Пуанкаре ($-q^* = p^*$). В подтверждении данного вывода на рисунках 8а, 8б представлены фазовые траектории для коэффициентов $-K = 5$ и $-K = 8$, соответственно. На рисунке 7 выделена область выбора коэффициентов регулятора, обеспечивающих стабилизацию неустойчивого предельного цикла для $\varepsilon_{\dot{y}} = 0,05; \varepsilon_y = 0,3$.

Отметим, что для окрестности $\varepsilon_y = 0,2$ необходимо обеспечить минимальный коэффициент $-K_{\min}(\varepsilon_y = 0,2) > 13$, а для окрестности $\varepsilon_y = 0,1$ регулятор для стабилизации рассматриваемого предельного цикла отсутствует.

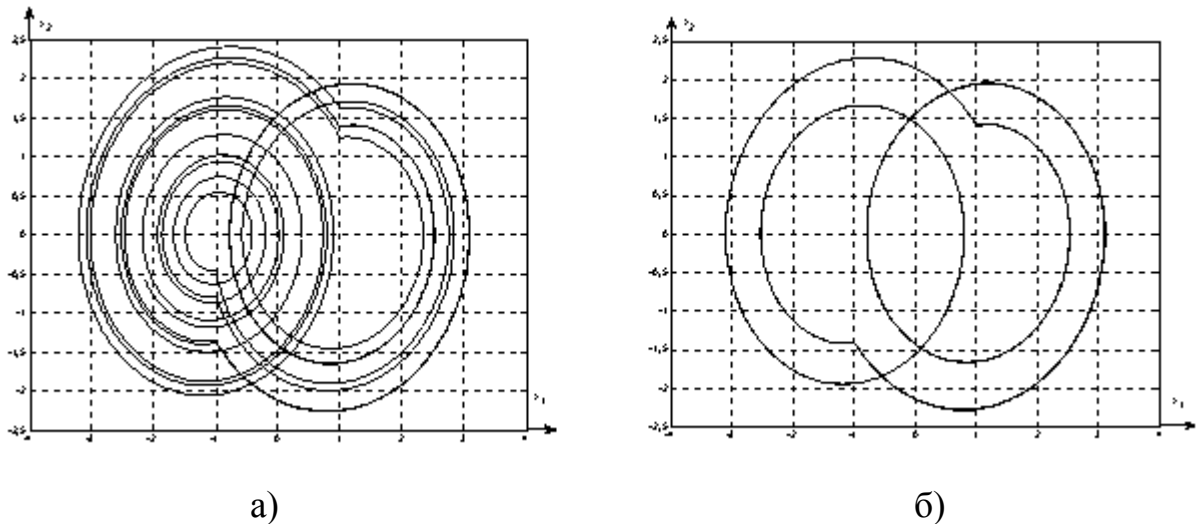


Рис. 8

Из графиков рисунка 7 следует, что для коэффициента регулятора $K = 20$ и размерах области коррекции $\varepsilon_y = 0,3$ имеем небольшое отклонение от желаемого терминального значения $-q^* = 1,4226$, как для верхней $p = p^+$, так и для нижней $p = p^-$ границ скорости p

$$\max(|-q^- + q^*|, |-q^+ + q^*|) = \max(|1,413 - 1,4226|, |1,416 - 1,4226|) = 0,0096.$$

Это позволит на каждом интервале коррекции (кроме первого, компенсирующего начальное рассогласование) *использовать очень малые дополнительные управления* (корректирующие импульсы) для стабилизации неустойчивого предельного цикла. Принимаем $K^* = 20$. В этом случае уже после второго переключения корректирующие добавки управления Δu не превысят значений:

$$\Delta u \in \left[-(p^* - 1,416) \cdot 20, (p^* - 1,416) \cdot 20 \right] = [-0,132, 0,132]$$

На рисунках 9, 10 представлены результаты моделирования для $-K^* = 20$, $\dot{y}(0) = p(0) = p^- = 1,38$; $y(0) = x_1(0) = 1,001$, $T = 300$ с. На рисунке 9а изображён фрагмент входного сигнала объекта, где буквой А отмечен один из корректирующих импульсов. Увеличенный образ этого импульса представлен на рисунке 9б. Отметим, очень малый уровень корректирующих импульсов. На рисунках 10а, 10б представлены фазовая траектория и её увеличенный фрагмент В в окрестности точки $(1, p^*)$. Стабилизация обеспечивается в полной мере.

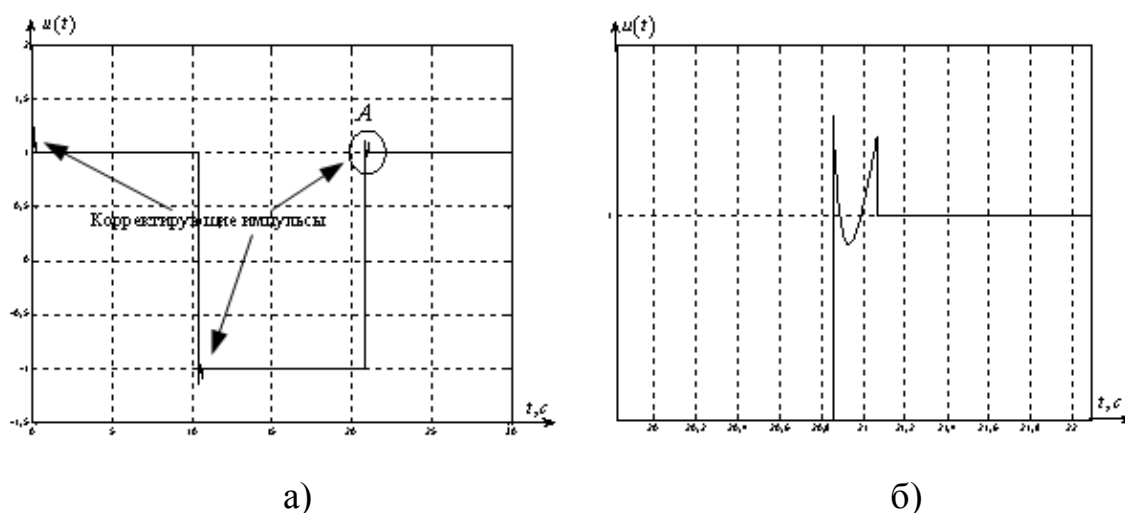


Рис. 9

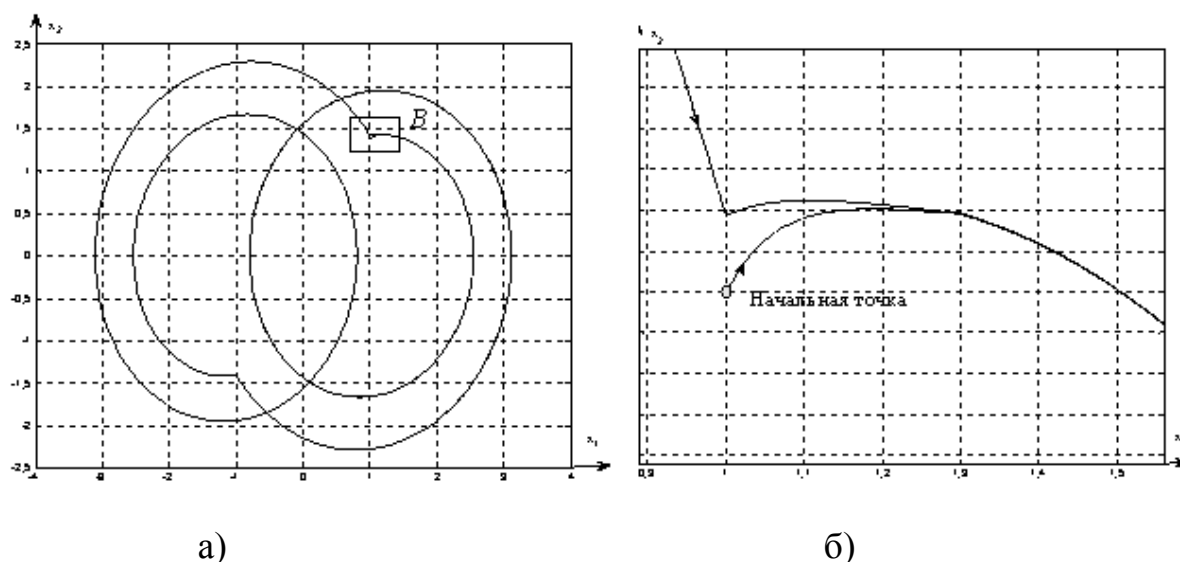


Рис. 10

Заключение. В данной работе предложен алгоритм стабилизации неустойчивого предельного цикла релейной хаотической системы. Показано, что классический метод OGY не обеспечивает необходимую коррекцию данной системы. Основная причина: коррекция траектории апериодическим регулятором с использованием одномерного отображения Пуанкаре по скорости является недостаточной. Необходимо учитывать и положение системы. Этот факт отражён в полной мере в предлагаемом алгоритме.

Список литературы

1. Lorenz E.N. Deterministic Nonperiodic Flow // J. Atmospheric Sci. – 1963. – V. 20. – №2. – Pp. 130-141.
2. Андриевский Б.Р., Фрадков А.Л. Управление хаосом: методы и приложения, части I, II // Автоматика и телемеханика. – 2003. – №5. – С. 3-45. – 2004. – №4. – С. 3-34.

3. Cook P.A. Simple feedback systems with chaotic behavior // Syst.&Cont. Letters. – 1985. – № 6. – P. 223-227.

4. Ott E., Grebogi C., Yorke J. Controlling Chaos // Phys. Rev. Lett. – 1990. – V. 64. – № 11. – Pp. 1196-1199.

5. Holzhuter T., Klinker T. Ein einfaches Relais-System mit chaotischem Verhalten. In "Nichtlineare Dynamik, Chaos und Strukturbildung", Meyer-Spasche, Rast M und Zenger C. (Eds). – Akademischer Verlag: Munchen. – 1997. – Pp. 83-96.

6. Holzhuter T., Klinker T. Control of a chaotic relay system using the OGY method // Z. Naturforsch. – 1998. – V. 53a. – Pp. 1029-1036.

Краснощеченко Владимир Иванович – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: akimenko@kaluga.ru.

V. Krasnoshchechenko

STABILIZATION OF UNSTABLE LIMIT CYCLE OF A CHAOTIC RELAY SYSTEM

Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch, Kaluga, 248000, Russia

In the given work the algorithm of synthesis for stabilization of a unstable limit cycle of relay chaotic system is submitted. In algorithm one-dimensional discrete Poincare map for a finding of fixed points of the period one (limit cycles of initial continuous system) is used. It is shown, that classical method OGY of synthesis dead beat regulator does not solve a task in view as the account only speeds of target coordinate is not sufficient. The offered algorithm is based on search of necessary factor of a regulator by the decision of a back problem: first sets some factor, and then procedure (with correction) transition of system in the following point of switching is carried out. The problem of correction is carried out in a full vicinity (positions and speeds of target coordinate) and provides stabilization of a limit cycle by adjusting pulses of small amplitude in the chosen area of entry conditions (area of stabilization) that is proved by the given results of modeling.

Keywords: *Chaos, Poincare map, limit cycle, stabilization, relay system, regulator*

Krasnoshchechenko Vladimir, Ph. D., Assoc. Professor of Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University. E-mail: akimenko@kaluga.ru.

Ю.И. Мышляев, А.В. Финошин, Я.А. Долгов, А.А. Зюзин

УПРАВЛЕНИЕ КОЛЕБАНИЯМИ СИСТЕМЫ МАЯТНИК-ТЕЛЕЖКА С ПРИВОДОМ МЕТОДОМ СКОРОСТНОГО БИГРАДИЕНТА

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

В статье рассматривается задача управления колебаниями системы «маятник-тележка» с приводом. Тележка с маятником является механической системой, состоящей из маятника, прикрепленного к тележке, которая катится свободно по плоской поверхности. Для синтеза алгоритма управления используется метод скоростного биградиента. Т.к. система управления является двухкаскадной, а цель управления зависит от фазовых переменных только выходного каскада, целесообразно воспользоваться первым и третьим этапами этого метода. Управление механической подсистемой осуществляется на основе энергетического подхода с частичной линеаризацией. Энергетический подход хорошо зарекомендовал себя в задачах стабилизации неустойчивого положения равновесия маятниковых систем и управления колебаниями. В работе приводится процедура синтеза и результаты моделирования, подтверждающие достижение заданной цели управления.

Ключевые слова: управление энергией, метод скоростного биградиента, частичная линеаризация с обратной связью

Введение. Рассматривается задача стабилизации неустойчивого положения тележки с маятником, управляемой приводом.

Свойство «минимального вмешательства» в ход естественных процессов обеспечивается за счет использования подхода, основанного на введении энергетической целевой функции [1, 2, 3]. Так в задаче стабилизации неустойчивого положения тележки с маятником, управляемой приводом целью управления является достижение заданного уровня энергии, в задаче слежения – достижение уровня энергии, соответствующего желаемой траектории системы. Важно отметить, что цель управления в этом случае будет достигаться с сохранением характера собственных движений системы и с минимальными затратами. Для обоснования энергетического подхода используется метод скоростного градиента [1, 2] или метод функций Ляпунова в сочетании с теорией пассивации [4].

Энергетический подход хорошо зарекомендовал себя в задачах стабилизации неустойчивого положения равновесия маятниковой системы (двойной маятник – Марк Спонг [4], маятник с маховиком – Андриевский [5], М. Спонг [4], маятник, тележка с маятником – Фрадков [2] и [6]).

В отличие от приведенных выше примеров, в работе дополнительно рассматривается подсистема формирования силы, приводящей в движение тележку.

Постановка задачи. Тележка с маятником является механической системой, состоящей из маятника, прикрепленного к тележке, которая катится свободно по плоской поверхности. Тележка с маятником имеет две степени свободы.

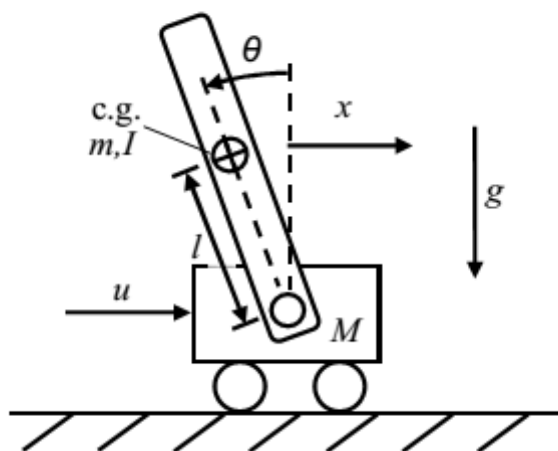


Рис. 1. Система тележка с маятником.

Уравнение системы в лагранжевой форме:

$$\begin{pmatrix} M+m & -ml \cos \theta \\ -ml \cos \theta & I+ml^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{\theta} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & ml \dot{\theta} \sin \theta \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ -mgl \sin \theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} f, \quad (1)$$

где M – масса тележки, m – масса маятника, l – длина маятника, I – момент инерции маятника, f – управляющая сила.

Уравнение (1) можно записать в матричной форме:

$$H(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + \varphi(q, \dot{q}) = Vf, \quad (2)$$

где $q = [x \ \theta]^T$ – вектор обобщенных координат, H – симметричная положительно определенная матрица масс, C – матрица центробежных сил и сил Кориолиса, φ – вектор потенциальных сил, V – матрица из единицы и нуля с соответствующим размером.

Не умоляя общности, будем считать, что динамика привода описывается интегратором. Уравнение привода, генерирующего силу, приводящую тележку в движение:

$$\dot{f} = u, \quad (3)$$

где u – управление.

Целью управления (ЦУ) является раскачивание маятника с достижением колебаний заданного уровня энергии.

$$E = E_d, \quad (4)$$

и стабилизация положения тележки

$$x \rightarrow 0, \dot{x} \rightarrow 0, \quad (5)$$

Синтез алгоритма управления. Т.к. система управления является двухкаскадной, а ЦУ зависит от фазовых переменных выходного каскада, целесообразно воспользоваться первым и третьим этапами метода скоростного биградиента (МСБГ) [7]. Т.к. по постановке задачи параметры считаются заданными, отпадает необходимость использования второго этапа МСБГ.

Этап 1. Синтез алгоритма управления выходных каскадом. На первом этапе синтезируется виртуальное управление маятником на тележке в предположении, что оно совпадает с выходом привода.

Для использования энергетического подхода к синтезу виртуального управления введем линеаризующую обратную связь по следующей схеме.

Перепишем уравнение (2) в скалярной форме с точностью до замены входа механической подсистемы f виртуальным управлением f^{virt}

$$H_{11}\ddot{q}_1 + H_{12}\ddot{q}_2 + C_{11}\dot{q}_1 + C_{12}\dot{q}_2 + \varphi_1 = f^{virt}, \quad (6)$$

$$H_{21}\ddot{q}_1 + H_{22}\ddot{q}_2 + C_{21}\dot{q}_1 + C_{22}\dot{q}_2 + \varphi_2 = 0. \quad (7)$$

Используя линеаризацию с обратной связью, исключим $\ddot{q}_2$ из уравнения (6), в результате получим:

$$H_{11}^*\ddot{q}_1 + C_{11}^*\dot{q}_1 + C_{12}^*\dot{q}_2 + \varphi_1^* = f^{virt}, \quad (8)$$

где $H_{11}^* = H_{11} - H_{12}H_{22}^{-1}H_{21}$, $C_{11}^* = C_{11} - H_{12}H_{22}^{-1}C_{21}$, $C_{12}^* = C_{12} - H_{12}H_{22}^{-1}C_{22}$, $\varphi_1^* = \varphi_1 - H_{12}H_{22}^{-1}\varphi_2$

Линеаризующий вход для (8)

$$f^{virt} = H_{11}^*\ddot{q}_{1d} + C_{11}^*\dot{q}_1 + C_{12}^*\dot{q}_2 + \varphi_1^*,$$

который для тележки с маятником имеет вид

$$f^{virt} = \frac{((M+m) - m^2l^2g \cos \theta^2)}{(ml^2 + I)}\ddot{x}_d + ml\ddot{\theta} \sin \theta - \frac{(m^2l^2g \cos \theta \sin \theta)}{(ml^2 + I)}, \quad (9)$$

Для тележки с маятником данная линеаризация дает следующее

$$\ddot{x} = \ddot{x}_d(t), \quad (10)$$

$$(I + ml^2)\ddot{\theta} - mgl \sin \theta = ml \cos \theta \ddot{x}_d(t), \quad (11)$$

Определим отклонение от желаемого уровня энергии как разность между текущей полной механической энергией маятника E и желаемой E_d

$$\tilde{E} = E - E_d, \quad (12)$$

где

$$E = \frac{1}{2}(I + ml^2)\dot{\theta}^2 + mgl \cos \theta \quad (13)$$

Для выходного каскада с заданной ЦУ (12) используем кандидат на функцию Ляпунова в виде:

$$V(x) = \frac{1}{2} \tilde{E}^2, \quad (14)$$

Закон управления при $K_1 > 0$ будет иметь вид

$$\ddot{x}_d = -K_1 \tilde{E} \dot{\theta} \cos \theta, \quad (15)$$

Можно показать, что при законе управления (15)

$$\dot{V} = -K_1 \tilde{E}^2 \dot{\theta}^2 \cos^2 \theta \leq 0, \quad (16)$$

Для стабилизации положения тележки введем ПД-регулятор. С учетом регулятора управление (15) будет иметь вид:

$$\ddot{x}_d = -K_1 \tilde{E} \dot{\theta} \cos \theta - k_p x - k_d \dot{x}, \quad (17)$$

Этап 2. Синтез алгоритма управления, обеспечивающего сходимость отклонения выхода привода от виртуального управления к нулю. Введем дополнительную цель управления (ДЦУ)

$$f \rightarrow f^{virt},$$

Гладкое управление, обеспечивающее достижение ДЦУ [7]

$$u = -\gamma(f - f^{virt}), \quad \gamma > 0 \quad (18)$$

Результаты моделирования. Проведем моделирование замкнутой системы управления (2), (3), (9), (17), (18), со следующими параметрами.

Условия моделирования:

$$M = 3\hat{e}\hat{a}; m = 0.5\hat{e}\hat{a}; l = 0.5\hat{a}; I = 2\hat{e}\hat{a} \cdot \hat{a}^2.$$

Начальные условия:

$$x(0) = 0, \quad \dot{x}(0) = 0, \quad \theta(0) = \frac{5}{4}\pi, \quad \dot{\theta}(0) = 0. \quad (18)$$

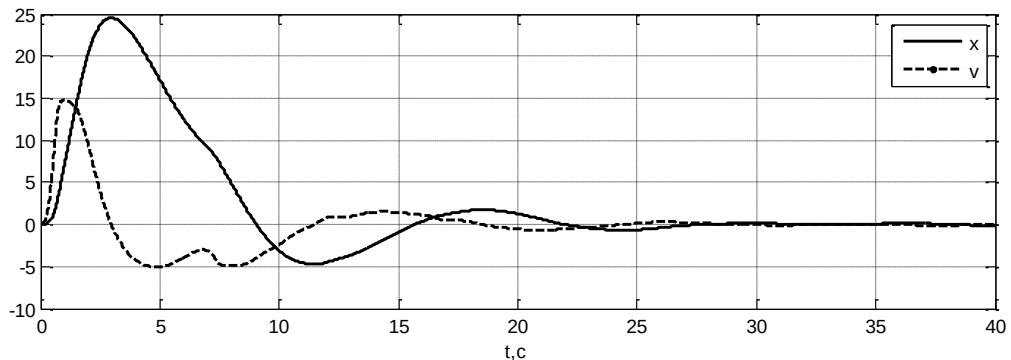


Рис. 2. Перемещение и скорость $v = \dot{x}$ тележки.

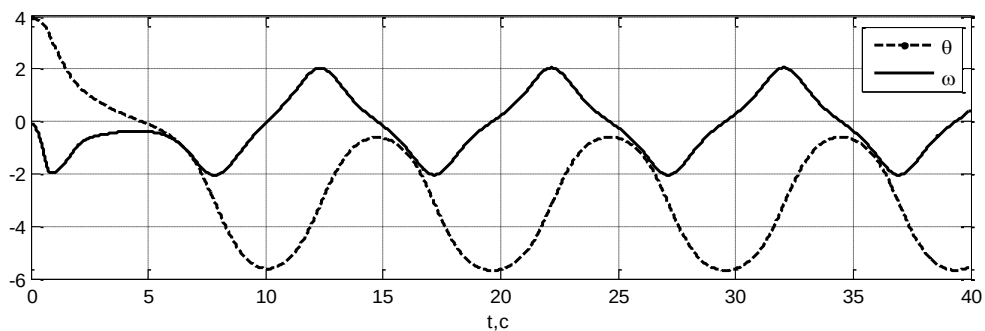


Рис. 3. Угловое перемещение и угловая скорость маятника $\omega = \dot{\theta}$.

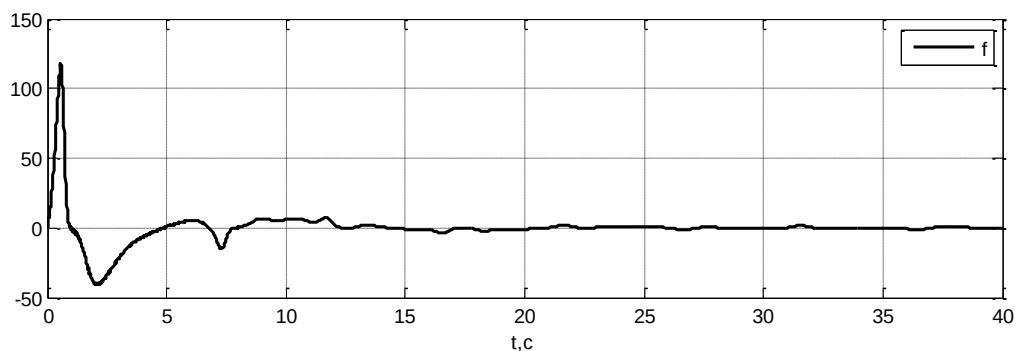


Рис. 4. Управляющая сила.

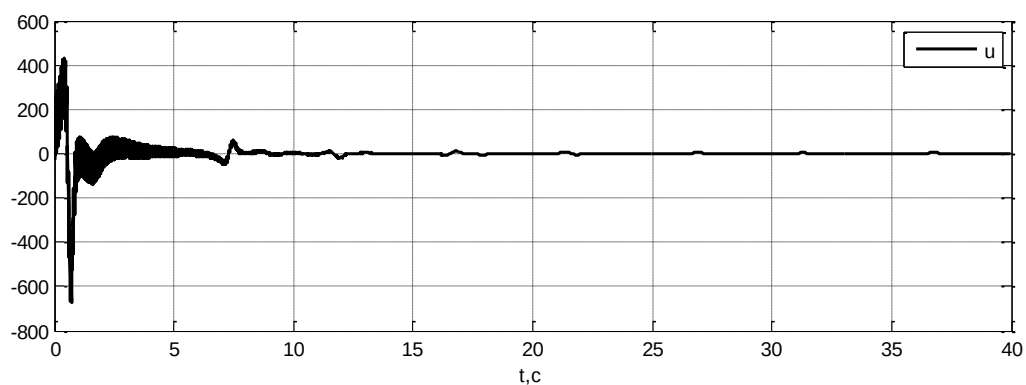


Рис. 5. Управление.

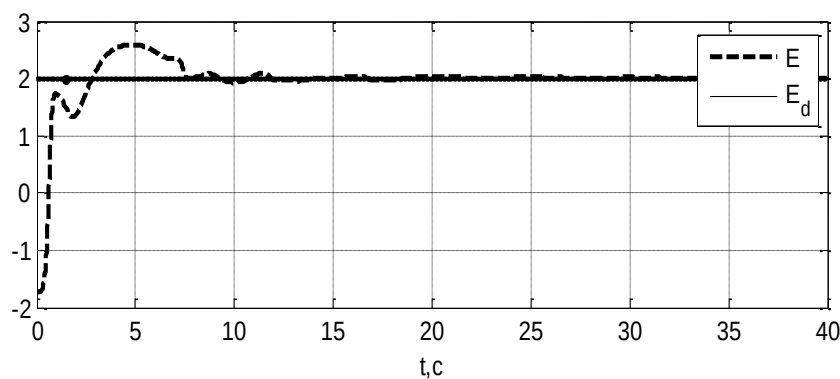


Рис. 6. Энергия маятника и желаемый уровень энергии.

Вывод. Рассмотрена задача стабилизации неустойчивого положения тележки с маятником, управляемой приводом. Синтезирован алгоритм управления первым и третьим этапами метода скоростного биградиента (МСБГ). Проведено моделирование, подтверждающее достижение заданного качества.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Калужской области Правительство (грант № 14-48-03115).

Список литературы

[1] Мирошник И.В., Никифоров В.О., Фрадков А.Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами, СПб.: Наука, 2000, 548 с.

[2] Фрадков А.Л. Кибернетическая физика: принципы и примеры. СПб.: Наука, 2003, 208 с., 47 ил.

[3] Мышляев Ю.И., Финошин А.В. Алгоритмы управления гамильтоновыми системами в условиях параметрической неопределенности [Электронный ресурс]. Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011, №12. URL:<http://technomag.bmstu.ru/doc/282904.html>(дата обращения 10.10.2014)

[4] Spong M.W. Energy Based Control Of A Class Of Underactuated Mechanical Systems, FAC World Congress, 1996, URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.49.9401>(accessed 10.10.2014)

[5] Андриевский Б. Р., Гузенко П. Ю., Фрадков А. Л., “Управление нелинейными колебаниями механических систем методом скоростного градиента”, Автомат. и телемех., 1996, № 4. URL:

[6] Peters S.C., Bobrow J.E., Iagnemma K. Stabilizing a vehicle near rollover: An analogy to cart-pole stabilization. Robotics and Automation (ICRA), IEEE International Conference, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2010. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=5509367> (accessed 10.10.2014)

[7] Мышляев Ю.И. Схема бискоростного градиента. Сборник трудов международной технической конференции «Приборостроение – 2002», Винница-Алушта, с. 180-184. http://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=at&paperid=3173&option_lang=rus (дата обращения 10.10.2014)

Мышляев Юрий Игоревич – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: uimysh@mail.ru.

Финошин Александр Викторович – ассистент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: earlov@gmail.com.

Долгов Ярослав Александрович – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: yaroslav2710@mail.ru.

Зюзин Александр Александрович – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: wendid@yandex.ru.

Y.I. Myshlyaev, A.V. Finoshin, Y.A. Dolgov, A.A. Zyuzin

SWING-UP CONTROL OF THE CART-POLE SYSTEM WITH DRIVE MOTOR BY SPEED BI-GRADIENT METHOD

Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch, Kaluga,
248000, Russia

The problem of swing-up control of the cart-pole with drive is considered. A cart-pole is a mechanical system consisting of a pendulum attached to a cart that rolls freely on a flat surface. The speed bi-gradient method is chosen to design the control law, because the control plant consists of two subsystems, and the control objective is depend on the output subsystem state. The first and third stages of the speed bi-gradient method are used. Control of mechanical subsystem is based on the energy approach with partial feedback linearization and energy shaping. Energy approach is useful in the task of stabilizing the unstable equilibrium position of the pendulum systems and swing-up control. The design procedure and simulation results that confirm the achievement of the specified control objectives are presented.

Keywords: *partial feedback linearization, energy shaping, speed bi-gradient method*

Myshlyaev Y. I., Ph. D., Assoc. Professor of Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University. E-mail: uimysh@mail.ru.

Finoshin A. V., assistant lecturer of Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University. E-mail: earlov@gmail.com.

Dolgov Y. A., student of the Kaluga Branch of the Bauman Moscow State Technical University. E-mail: yaroslav2710@mail.ru.

Zyusun A.A., student of the Kaluga Branch of the Bauman Moscow State Technical University. E-mail: wendid@yandex.ru.

ФОРМИРОВАНИЕ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НЕЙРОСЕТЕВОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ СТЕРЕОРЕКОНСТРУКЦИИ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Рассмотрены особенности решения задачи стереорекострукции точек трехмерной сцены для формирования бортовой системы технического зрения. Представлены результаты моделирования процедуры стереорекострукции в нейронных сетях различной сложности и архитектуры. Рассмотрено влияние объема выборки примеров на результирующие ошибки по каждой из координат и предложено решение задачи нейросетевой стереорекострукции координат объектов сцены с использованием неравномерного размещения примеров обучающей выборки. Показано, что это позволяет изменить характер ошибки координат в интервале до 10 м. Рассмотрены два варианта построения коллектива нейросетей на основе анализа неравномерностей ошибок. Первая модель – иерархическая модель уточнения координат, а второй подход основан на методах бустинга и бегинга при формировании решателя.. На основании результатов моделирования сформирована двухуровневая модель аппроксимации координат в нейросетевом базисе.

Ключевые слова: ассоциация нейронных сетей, обучение нейронных сетей, ошибка обобщения, аппроксимация функций

Введение. В настоящее время в решение практических задач все шире включаются автономные мобильные системы перемещения грузов и патрулирования территорий в естественных средах, которые не подготовлены специально для работы роботов. Любая автономная мобильная платформа должна уметь определять расстояние до объектов, а для этого ей необходимо знать координаты этого объекта в мировой системе координат. Зрение в человека в естественных средах занимает особое место. По оценкам биологов до 90% сенсорной информации составляет зрительная информация [1]. В функции зрительной системы входит создание представления окружающего мира в таком виде, который обеспечивает возможность взаимодействия с этим миром. Очевидно, что автономные мобильные системы должны использовать доступные методы анализа внешней среды, в том числе и на основе визуального ряда.

В качестве средств формирования модели сцены для автономных мобильных систем принято использовать весь комплекс доступных датчиков

[2]: эхолокацию, лазерные дальномеры, системы технического зрения (СТЗ) и т.п. Работа СТЗ является вычислительно сложной задачей, требующей значительных ресурсов, которые должны быть предоставлены вычислительной системой мобильного объекта. Более точно, мозг последовательно выполняет ряд задач распознавание (например, распознавание знакомого лица в незнакомом окружении). На это у него уходит около 100-200 миллисекунд, в то время как выполнение аналогичных задач даже меньшей сложности на компьютере может занять несколько дней. Это делает актуальным применение нейросетевых технологий обработки информации на борту движущегося транспортного средства или в системах навигации роботов, что позволит повысить производительность бортовой СТЗ, не снижая ее точности.

Постановка задачи. Рассмотрим процесс восстановления трехмерных координат по двумерным проекциям и возможность его нейросетевой реализации. Об определении трехмерных координат наблюдаемых точек можно говорить, когда есть как минимум две камеры. Пусть имеются две камеры, заданные своими матрицами P и P' в некоторой системе координат. В таком случае говорят, что имеется пара откалиброванных камер. Если центры камер не совпадают, то эту пару камер можно использовать для определения трехмерных координат наблюдаемых точек. Система координат выбирается так, что матрицы камер имеют вид [3]:

$$P = K[I \mid 0], P' = K'[R' \mid t'],$$

где K и K' матрицы центральной проекции камер, R' - матрица поворота камеры C' относительно камеры C , t' - вектор переноса C' по C .

Это всегда можно сделать, если выбрать начало координат совпадающее с центром первой камеры, и направить ось Z вдоль ее оптической оси. Калибровка камер обычно выполняется, за счет многократной съемки некоторого калибровочного шаблона, на изображении можно легко выделить ключевые точки, для которых известны их относительные положения в пространстве [3]. Далее составляются и решаются (приближенно) системы уравнений, связывающие координаты проекций, матрицы камер и положения точек шаблона в пространстве. Пусть имеются две откалиброванные камеры с матрицами P_1 и P_2 . x_1 и x_2 — однородные координаты проекций некоторой точки пространства X . Тогда можно составить следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} x_1 = P_1 X \\ x_2 = P_2 X \end{cases}$$

Исходя из вышесказанного можно сделать вывод, что для обучения нейронной сети необходимо иметь два набора данных: массив трехмерных точек и проекции их точек на плоскость камер.

Выбор архитектуры нейросети и формирование обучающей выборки. Для начала используя два множества точек (множество трехмерных точек, максимальное удаление которых 40 метров от камер и множество проекций этих точек на плоскости камер), обучим две нейросети: многослойный персептрон и сеть радиально базисных функций. Пусть трехмерные точки равномерно распределены по диапазону от 1 до 40 метров. В ка-

честве многослойного персептрона используется двухслойная сеть с 12 нейронами скрытого слоя. Для ее обучения использовалось множество из 25000 примеров. Сеть RBF содержит 31 нейрон и для ее обучения использовалось 30000 примеров. Средняя абсолютная ошибка обобщения по трем координатам представлена в таблице 1.

Опираясь на полученные данные, нетрудно заметить, что двухслойная сеть справилась с задачей лучше, чем сеть RBF. Кроме того, сеть радиально базисных функций имеет два значительных недостатка:

1. Ограниченное число обучающей выборки
2. Сеть RBF часто должна содержать слишком большое число нейронов скрытого слоя. Это влечет более медленное функционирование RBF сети, чем многослойного персептрона.

Рассмотрим влияние числа примеров обучающей выборки на ошибку обобщения. В качестве нейронных сетей для сравнения будем использовать двухслойную сеть из предыдущего пункта (сеть 1) и такую же двухслойную сеть, но обученную на 50000 примеров (сеть 2). Ошибка обобщения уменьшилась (смотри таблицу 1), но незначительно $E_x = 18mm$, $E_y = 210mm$, $E_z = 494mm$.

Рассмотрим влияние характера распределения примеров обучающей выборки на ошибку обобщения. Для обучения всех сетей использовалась одна и та же обучающая выборка с 50000 числом примеров. Архитектура всех сетей одинакова и соответствует сети 2, описанной выше. Для обучения первой сети данные были распределены по равномерному закону (сеть 2 из предыдущего пункта), для второй – данные распределены равномерно и их число жестко фиксировано (по $\frac{50000}{40} = 1250$ примеров на каждый метр) (сеть 3), для третьей сети количество примеров на каждом метре линейно увеличивалось ($61i, i = 1, 2..40$, где i – расстояние в метрах) (сеть 4).

Наименьшую ошибку обобщения имеет сеть 4, но разница по сравнению с сетью 2 незначительна $E_x = 106mm$, $E_y = 34mm$, $E_z = 119mm$, сеть 3 проигрывает обоим вариантам (смотри таблицу 1).

Все описанные выше сети (кроме RBF) использовали в качестве функции тренировки метод Левенберга-Маркара[4]. Посмотрим, как изменится ошибка обобщения при использовании метода градиентного спуска (сеть 5). Архитектура и обучающая выборка одинаковы и соответствуют сети 2. Ошибка обобщения возросла (смотри таблицу 1).

Рассмотрим влияние архитектуры многослойного персептрона на ошибку обобщения (обучающая выборка одинакова). Для сравнения возьмем двухслойную сеть с 12 нейронами скрытого слоя (сеть 2), двухслойную сеть с 16 нейронами скрытого слоя (сеть 6) и трехслойную сеть 12 и 6 нейронов (сеть 7).

Наименьшую ошибку обобщения имеет сеть 6, но разница по сравнению с сетью 2 незначительна $E_x = 62mm$, $E_y = 18mm$, $E_z = 251mm$, сеть 7 проигрывает обоим вариантам (смотри таблицу 1).

Таблица 1

Результаты экспериментов

Описание сети	Ошибка обобщения, м		
	X	Y	Z
Сеть 1. Нелинейный перцептрон, 2 слоя (12 нейронов), 25000 примеров, равномерный закон распределения	0.6327	0.6791	3.1224
Сеть 2. Нелинейный перцептрон, 2 слоя (12 нейронов), 50000 примеров, равномерный закон распределения	0.6127	0.6327	3.0041
Сеть 3. Нелинейный перцептрон, 2 слоя (12 нейронов), 50000 примеров, выравнивание выборки	0.6237	0.6496	3.0631
Сеть 4. Нелинейный перцептрон, 2 слоя (12 нейронов), 50000 примеров, с постоянным ростом числа примеров в зависимости от глубины	0.6021	0.6293	2.9922
Сеть 5. Нелинейный перцептрон, 2 слоя (12 нейронов), 50000 примеров, с градиентным алгоритмом обучения	0.6698	0.7288	3.2417
Сеть 6. Нелинейный перцептрон, 2 слоя (16 нейронов), 50000 примеров	0.6065	0.6309	2.9790
Сеть 7. Нелинейный перцептрон, 3 слоя (12 и 6 нейронов)	0.6462	0.6672	3.0418
RBF сеть, 30000 примеров, 31 нейрон	0.6504	0.7184	3.2301

Наилучшие результаты показали двухслойная сеть с 16 нейронами скрытого слоя (сеть 6) и сеть, обученная с увеличением числа примеров на каждом метре (сеть 4).

По итогам анализа была построена двумерная сеть с 16 нейронами скрытого слоя и обученная с увеличением числа примеров на каждом метре. Средняя абсолютная ошибка обобщения данной сети по трем координатам в метрах равна:

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.5951 \\ 0.6258 \\ 2.9838 \end{pmatrix}$$

Таким образом, была достигнута минимальная ошибка обобщения. Разница между полученной сетью и предыдущим наилучшим результатом (сеть 2) составляет $\Delta x = 176 \text{ мм}$, $\Delta y = 69 \text{ мм}$, $\Delta z = 203 \text{ мм}$
 $\Delta E_x = 176 \text{ мм}$, $\Delta E_y = 69 \text{ мм}$, $\Delta E_z = 203 \text{ мм}$

При увеличении глубины количество трехмерных точек, попадающих в область видимости камеры, значительно увеличивается, поэтому в качестве решателя логично использовать не одну нейросеть, а их объединение.

Формирование комитета решателей. Ассоциативные машины являются универсальными аппроксиматорами [4]. Создание коллектива решателей позволяет снизить уровень ошибок и их дисперсий за счет независимого обучения моделей и интеграции их результатов. Наиболее известные модели формирования коллективов решателей разработаны для решения задач классификации. Например алгоритм AdaBoost[2, 5] и его модификации. Однако решение задач аппроксимации в условиях ограничений по ресурсам требует некоторого изменения модели поиска коллективной модели принятия решений. Рассмотрим модель коллектива решателей, построенную на основе исследования неоднородности ошибок аппроксимации для процедуры стереореконструкции.

Разобьем интервал от 0 до 40 метров на отдельные пересекающиеся участки по 12 метров так, чтобы вторая половина предыдущего интервала принадлежала следующему. Длина участка (12 метров) была выбрана по правилу 3σ из соображений, что средняя ошибка обобщения сети, обученной на глубине 20 метров, составляет 3 метра. Таким образом мы получим ряд интервалов: [0,12], [6,18], [12,24], [18,30], [24,36], [30,40] метров. Для каждого из полученных интервалов обучим свою нейросеть. Таким образом, мы получим два уровня иерархии: сначала проекции точек подаются в общую нейросеть (глубина 20 метров и ширина глубины 20 метров), а потом, исходя из полученных результатов, каждая точка попадает в свою конкретную нейросеть узкого диапазона.

В таблице 2 представлены ошибка сетей, соответствующих интервалам [0,12], [6,18], а также ошибка исходной сети для трех точек.

Таблица 2

Средняя абсолютная нейросетей для интервала [0,12] и [6,18] метров

Тип сети	Ошибка сети 1 уровня, мм			Ошибка сети 2 уровня, мм		
	x	y	z	x	y	z
[0,12]	301	24	224	37	7	124
[6,18]	107	6	371	30	53	62

Ошибка координат сети второго уровня составляет менее 1% дальности. Однако при увеличении глубины ошибка возрастает и начиная с интервал [6,18] потребность во втором уровне иерархии отпадает, так как сеть первого и второго уровня дают близкую ошибку. Эксперименты показали, что введение третьего слоя неэффективно с точки зрения снижения ошибки.

Рассмотрим второй подход к построению комитета нейросетей. Будем формировать ассоциативную машину по идеям из [6], с использованием бустинга и бегинга. При решении этой задачи были использованы перцептроны (2 слоя, 16 нелинейных нейронов). Кроме того, введено ограничение на число решателей комитета (3 сети), для получения модели эквивалентной предшествующему случаю сложности. Решение модели формируется как усреднение решений отдельных нейросетей. Ошибки модели для глубины [0,40] и [0,12] м. приведены в Таблице 4.

Таблица 4

Результаты работы коллектива решателей в интервале [0,40] и [0,12] м.

	Средняя абсолютная ошибка обучения, м			Средняя абсолютная ошибка обобщения, м		
	X	Y	Z	X	Y	Z
[0,40]						
1 сеть	0.4399	0.454 3	2.121 8	0.603 9	0.647 4	3.007 8
2 сети	0.4195	0.454 4	2.091 0	0.614 7	0.664 0	3.100 0
3 сети	0.4182	0.438 1	2.037 5	0.624 1	0.661 1	3.132 9
[0,12]						
1 сеть	0.077	0.086	0.378	0.078	0.088	0.383
2 сети	0.078	0.088	0.398	0.077	0.087	0.386
3 сети	0.079	0.087	0.399	0.077	0.085	0.384

Очевидно, что ошибка ассоциативной модели больше, что обусловлено основным свойством таких моделей. Чем ниже целевая ошибка, тем больше будет решателей в коллективе [2]. Таким образом, при ограничениях на ресурсы была выбрана модель, сформированная на основе анализа неоднородности ошибок по глубине.

Выводы. Рассмотрев несколько разновидностей моделей нейросетевых аппроксиматоров, удалось сформировать иерархическую структуру с различной компетентностью решателей на разных интервалах дальности и ошибкой координат до 1% дальности. Дальнейшая работа будет направлена на перенос разработанной схемы в среду бортовой вычислительной системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Козлов В.Н. *Элементы математической теории зрительного восприятия*, Москва, Издательство ЦПИ при механико-математическом факультете МГУ, 2001, 122 с.
2. Визильтер Ю. В., Желтов С. Ю. *Проблемы технического зрения в современных авиационных системах* // Техническое зрение в системах управления мобильными объектами-2010: Труды научно-технической конференции-семинара. Вып. 4, под ред. Р. Р. Назирова. — М.: КДУ, 2011. — 328 с.
3. Яне Б. *Цифровая обработка изображений*. — М.: Техносфера, 2007г. - 584с.
4. Хайкин Саймон *Нейронные сети: полный курс, 2-е издание*. Пер. с англ. — М., Издательский дом «Вильямс», 2006, 1104 с.
5. Fercoq O. *Parallel coordinate descent for the Adaboost problem* // (Submitted on 7 Oct 2013) - <http://arxiv.org/abs/1310.1840v1>
6. Бурнаев Е.В., Приходько П.В. *Теоретические свойства процедуры построения регрессионного ансамбля на основе беггинга и бустинга* // Труды конференции «Информационные технологии и системы» (ИТиС'11), 2011- с 438-443

Ивашина Екатерина Алексеевна – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: katya_bam@mail.ru

Корлякова Мария Олеговна – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: mkorlyakova@yandex.ru

Прокопов Евгений Юрьевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: evgen-prokopov@rambler.ru

E.A. Ivashina, M.O. Korlyakova, E.Yu. Prokopov

THE FORMATION OF HIERARCHICAL NEURAL NETWORK MODEL FOR SOLVING THE PROBLEM FOR THE STEREO RECONSTRUCTION

Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch, Kaluga, 248000, Russia

We consider solving the problem of the stereo osobennsti dots to form a three-dimensional scene on-board vision systems. The results of the simulation procedure stereorekonstrukcii in neural networks of varying complexity and architecture. The effect of sample size on the examples of the resulting errors in each of the coordinates, and provides a solution to the problem of neural network coordinates the stereo scene objects with uneven distribution of examples of training sample. It has been shown that it allows to change the character coordinate errors in the range up to 10 m. Two variants of construction of collective neural network based analysis irregularities errors. The first model - hierarchical model coordinates reconstruction, and the second approach is based on boosting techniques for the solver formation. Based on the simulation results generated two-level approximation model coordinates in the neural net.

Keywords: *Association of neural networks, neural net training, the generalization error*

Ivashina Catherine A., postgraduate of Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University. E-mail: katya_bam@mail.ru

Korlyakova Maria O., Ph. D., Assoc. Professor of Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University. mkorlyakova@yandex.ru

Prokopov Evgeny Yu., student of the Kaluga Branch of the Bauman Moscow State Technical University. E-mail: evgen-prokopov@rambler.ru.

А.Л. Лапиков, В.Н. Пашенко

АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ПРЯМОЙ ЗАДАЧИ КИНЕМАТИКИ ДЛЯ МНОГОСЕКЦИОННОГО МАНИПУЛЯТОРА ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Введение. Многосекционные манипуляторы параллельной структуры (ММПС) представляют собой соединение секций, где в качестве секции конструкции выступает манипулятор параллельной кинематики (МПК). Известными примерами подобных манипуляторов являются манипуляционный робот LX-4 компании Logabex [1], состоящий из 4-х идентичных секций (в данном механизме в роли секции выступает платформенный манипулятор Гью-Стюарта, известный также как платформа Стюарта), многосекционный манипулятор типа «хобот», разноплановое исследование которого проведено в работах [2-5]. ММПС значительно превосходят обычные манипуляторы параллельной кинематики по таким параметрам, как объем рабочей зоны, манипулятивность, число степеней подвижности и т.д. С другой стороны, построение моделей ММПС является достаточно сложной задачей, обусловленной рядом особенностей МПК [6]. Исследование ММПС требует решения ряда взаимосвязанных задач структурного синтеза, параметрического синтеза и синтеза систем автоматического управления. Эффективным подходом к получению комплексного решения вышеуказанных задач может являться система поддержки принятия решений (СППР), концепция которой заложена в статье [7]. Однако для проведения данного исследования требуется создание новых методик и подходов к изучению, базирующихся на моделях секции манипулятора.

Данная статья посвящена созданию методики решения прямой задачи кинематики (ПЗК) для многосекционного манипулятора параллельной структуры. Подразумевается, что манипулятор может состоять из произвольного числа секций. В данной работе в качестве секции будем рассматривать платформу Гью-Стюарта типа 6-3 [1]. Для решения ПЗК секции манипулятора будем использовать метод на основе вычисления аналитического уравнения плоскости подвижной платформы, основные положения которого представлены в работе [8].

Ставится следующая задача: разработать алгоритм решения ПЗК многосекционного манипулятора параллельной структуры, состоящего из N одинаковых секций.

Структура многосекционного манипулятора. Рассмотрим структуру многосекционного механизма на примере манипулятора, состоящего из 2-х секций (рис. 1). Каждая секция состоит из основания и подвижной платформы, соединенных между собой телескопическими штангами. Предполагаем, что основание и платформа представляют собой идеальные диски

радиусами R_i и r_i соответственно для i – ой секции. Штанги представляют собой невесомые нерастяжимые стержни, соединенные с основанием и платформой с помощью сферических шарниров. Для каждой секции шарниры основания лежат в плоскости основания в вершинах правильного шестиугольника с радиусом R_i . Шарниры подвижной платформы лежат в плоскости подвижной платформы в вершинах правильного треугольника с радиусом r_i . Введем неподвижную систему координат, связав ее с основанием первой секции. Подвижные системы координат свяжем с каждой из платформ, причем оси $O_i z_i$ перпендикулярны плоскости соответствующей платформы. Оси $O_i x_i$ направляются из центра каждой платформы к шарниру $B_{1,i}$. Оси $O_i y_i$ выбираются так, чтобы тройка векторов была правой.

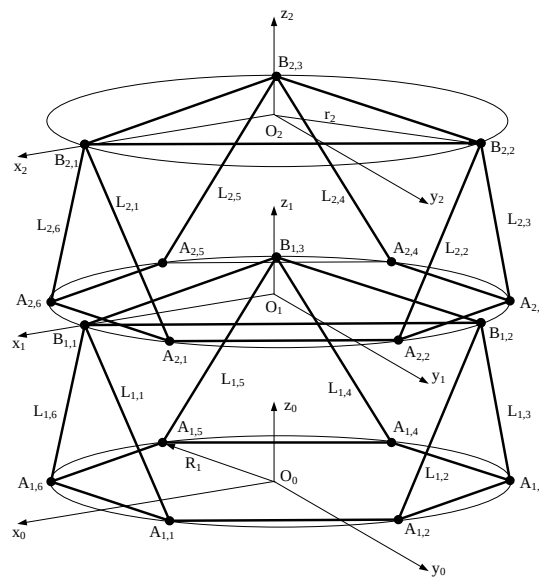


Рис. 1. Структура многосекционного манипулятора параллельной кинематики

В качестве обобщенных координат каждой секции выберем значения длин телескопических штанг. Таким образом, обобщенными координатами для всего механизма является матрица $\mathbf{L}$ размерностью 2×6 , каждая строка которой представляет собой вектор однородных координат секции.

Алгоритм решения задачи. Представим алгоритм решения данной задачи в описательной форме.

1. Задать параметры R_i и r_i для каждой секции.
2. Задать значения обобщенных координат $\mathbf{L}$ для начального положения манипулятора.
3. Задать матрицы однородного преобразования $T_i, i = \overline{1..N}$, описывающие переход между локальными системами координат для начального положения манипулятора, причем $T_0 = E$.
4. Для моделирования движения схвата манипулятора задать закон изменения длин штанг секции в дискретном времени.

5. Для i – ой секции $i = \overline{1..N}$ выполнить пункты 6 – 9.

6. Определить координаты шарниров основания i – ой секции в неподвижной системе координат, используя матрицу однородного преобразования согласно формуле

$$\mathbf{A} = \mathbf{T}_{i-1} \tilde{\mathbf{A}}$$

где $\tilde{\mathbf{A}}$ – матрица координат шарниров основания секции в подвижной системе координат, связанной с этой секцией.

7. Используя предложенный метод решения ПЗК, вычислить координаты центра платформы на заданном векторе обобщенных координат секции манипулятора

$$O_i \left(\frac{x_{B_{1,i}} + x_{B_{2,i}} + x_{B_{3,i}}}{3} \quad \frac{y_{B_{1,i}} + y_{B_{2,i}} + y_{B_{3,i}}}{3} \quad \frac{z_{B_{1,i}} + z_{B_{2,i}} + z_{B_{3,i}}}{3} \right),$$

где $x_{B_{1,i}}, y_{B_{1,i}}, z_{B_{1,i}}, x_{B_{2,i}}, y_{B_{2,i}}, z_{B_{2,i}}, x_{B_{3,i}}, y_{B_{3,i}}, z_{B_{3,i}}$ – координаты шарниров подвижной платформы i – ой секции манипулятора.

8. Используя предложенный метод решения ПЗК, вычислить на заданном векторе обобщенных координат орты подвижной системы координат секции манипулятора:

для оси $O_i z_i$:

$$\begin{aligned} \cos \alpha_{O_i z_i} &= \frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}, \\ \cos \beta_{O_i z_i} &= \frac{B}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}, \\ \cos \gamma_{O_i z_i} &= \frac{C}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}, \end{aligned}$$

где A, B, C – коэффициенты канонического уравнения плоскости подвижной платформы i – ой секции манипулятора:

для оси $O_i x_i$:

$$\begin{aligned} \cos \alpha_{O_i x_i} &= \frac{x_{B_{1,i}} - x_{O_i}}{\sqrt{(x_{B_{1,i}} - x_{O_i})^2 + (y_{B_{2,i}} - y_{O_i})^2 + (z_{B_{3,i}} - z_{O_i})^2}}, \\ \cos \beta_{O_i x_i} &= \frac{y_{B_{1,i}} - y_{O_i}}{\sqrt{(x_{B_{1,i}} - x_{O_i})^2 + (y_{B_{2,i}} - y_{O_i})^2 + (z_{B_{3,i}} - z_{O_i})^2}}, \\ \cos \gamma_{O_i x_i} &= \frac{z_{B_{1,i}} - z_{O_i}}{\sqrt{(x_{B_{1,i}} - x_{O_i})^2 + (y_{B_{2,i}} - y_{O_i})^2 + (z_{B_{3,i}} - z_{O_i})^2}}, \end{aligned}$$

для оси $O_i y_i$:

$$\cos \alpha_{O_i y_i} = \cos \beta_{O_i z_i} \cos \gamma_{O_i x_i} - \cos \gamma_{O_i z_i} \cos \beta_{O_i x_i},$$

$$\cos \beta_{O_i y_i} = \cos \gamma_{O_i z_i} \cos \alpha_{O_i x_i} - \cos \alpha_{O_i z_i} \cos \gamma_{O_i x_i},$$

$$\cos \gamma_{O_i y_i} = \cos \alpha_{O_i z_i} \cos \beta_{O_i x_i} - \cos \beta_{O_i z_i} \cos \alpha_{O_i x_i}.$$

9. Сформировать матрицу однородного преобразования, описывающую положение и ориентацию i – ой секции манипулятора:

$$\mathbf{T}_i = \begin{bmatrix} \cos \alpha_{O_i x_i} & \cos \alpha_{O_i y_i} & \cos \alpha_{O_i z_i} & x_{O_i} \\ \cos \beta_{O_i x_i} & \cos \beta_{O_i y_i} & \cos \beta_{O_i z_i} & y_{O_i} \\ \cos \gamma_{O_i x_i} & \cos \gamma_{O_i y_i} & \cos \gamma_{O_i z_i} & z_{O_i} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

10. Конец.

Результаты моделирования. Для определения координат шарниров подвижной платформы i – ой секции манипулятора необходимо решить систему нелинейных уравнений с 9 неизвестными. В данной работе для решения системы нелинейных уравнений будем использовать встроенные численные методы среды *MATLAB*. Одной из проблем, возникающих при решении прямой задачи кинематики для подобного манипулятора, является наличие нескольких решений, близких по метрике, что приводит к возможности сходимости численного метода к разным допустимым решениям, о чем подробно говорилось в работе [9]. Определим ряд необходимых параметров модели двухсекционного манипулятора. Пусть радиусы оснований и платформ манипулятора $R_i = r_i = 100, i = 1..2$. Про моделируем движение схвата манипулятора для случая, когда каждая секция совершит перемещение из начального положения на вектор $(30 \ 0 \ 0)$. В качестве начального положения будем рассматривать положение, при котором $L_{i,j} = 150, i = 1..2, j = 1..6$. Значение длин штанг для конечного положения может быть получено при решении обратной задачи кинематики для секции, как показано в [10].

Результаты моделирования приведены на рис. 2, 3.

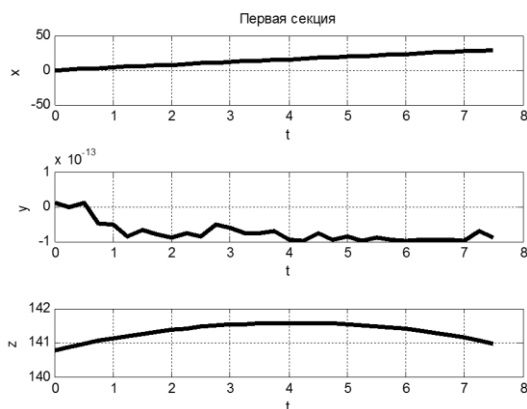


Рис. 2. Координаты центра платформы 1–ой секции манипулятора

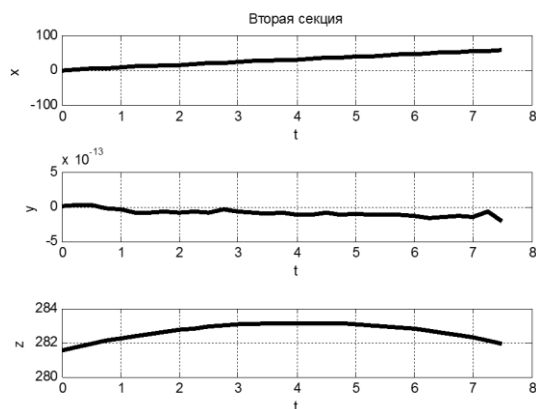


Рис. 3. Координаты центра платформы 2–ой секции манипулятора

Список литературы

[1] *Merlet J.P.* Parallel Robots. Solid mechanics and its applications – Springer., 2006.394 с.

[2] *Каганов Ю.Т., Карпенко А.П.* Математическое моделирование кинематики и динамики робота-манипулятора типа «хобот». 1. Математические модели секции манипулятора, как механизма параллельной кинематики типа «трипод» // Наука и образование: электронное научно-техническое издание, 2009, 10, URL: <http://technomag.edu.ru/doc/133262.html>.

[3] *Каганов Ю.Т., Карпенко А.П.* Математическое моделирование кинематики и динамики робота-манипулятора типа «хобот». 2. Математические модели секции манипулятора, как механизма параллельной кинематики типа «гексапод» // Наука и образование: электронное научно-техническое издание, 2009, 11, URL: <http://technomag.edu.ru/doc/133731.html>.

[4] *Волкоморов С.В., Карпенко А.П.* Геометрия многосекционного манипулятора типа «хобот» // Наука и образование: электронное научно-техническое издание, 2010, 10, URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/163391.html>.

[5] *Карпенко А.П., Шмонин А.М.* Исследование динамики многосекционного манипулятора типа "хобот"// Наука и образование: электронное научно-техническое издание, 2010, 9, URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/157912.html>.

[6] *Глазунов В.А., Колискор А.Ш., Крайнев А.Ф.* Пространственные механизмы параллельной структуры.- М.: Наука, 1991. – 94 с.

[7] *Пащенко В.Н.* Концептуальная модель автоматизированного синтеза многосекционных манипуляторов, основанных на параллельных структурах. // Инженерный журнал: наука и инновации. Электрон. журн. 2013, № 8. URL: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/robot/986.html>.

[8] *Лапиков А.Л., Пащенко В.Н.* Решение прямой задачи кинематики для платформы Гью-Стюарта с использованием аналитического уравнения плоскости // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2014. № 4, с. 124–134. DOI: 10.7463/0414.0706936.

[9] *Лапиков А.Л., Масюк В.М., Сакович О.В., Демин П.М., Пащенко В.Н.* Анализ решения прямой задачи кинематики пространственного манипулятора Гью-Стюарта типа 6-3 // Вибрационные технологии, мехатроника и управляемые машины: сб. науч. ст.: в 2 ч. Ч. 2. Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2014. с. 139–144.

[10] *Лапиков А.Л., Пащенко В.Н.* Математическая модель платформенного манипулятора Гью-Стюарта // Наукоемкие технологии в приборостроении и развитии инновационной деятельности в вузе: материалы Всероссийской научно-технической конференции, 10–12 декабря 2013 г. Т. 2. – М. : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2013. с. 144–156.

Лапиков Антон Леонидович – ассистент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: anton.lapikov@inbox.ru.

Пащенко Василий Николаевич – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: akimenko@kaluga.ru.

Н.В. Аксенов, Д.В. Филиппов, А.А. Якушев

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ СТРУКТУРНОЙ И ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Под задачей идентификации объекта управления понимается нахождение или уточнение коэффициентов передаточной функции (1) на основе экспериментальных данных о входных и выходных сигналах, при которых модель наилучшим (или достаточно точно), в определенном смысле, образом аппроксимирует оператор объекта на множестве входных сигналов на промежутке $[0, T]$.

$$W(s) = \frac{\beta_m s^m + \beta_{m-1} s^{m-1} + \dots + \beta_0}{s^n + \alpha_{n-1} s^{n-1} + \alpha_{n-2} s^{n-2} + \dots + \alpha_0}, \quad (1)$$

Для идентификации математических моделей разработан комплекс, позволяющий выполнить данную процедуру для класса линейных стационарных непрерывных объектов управления.

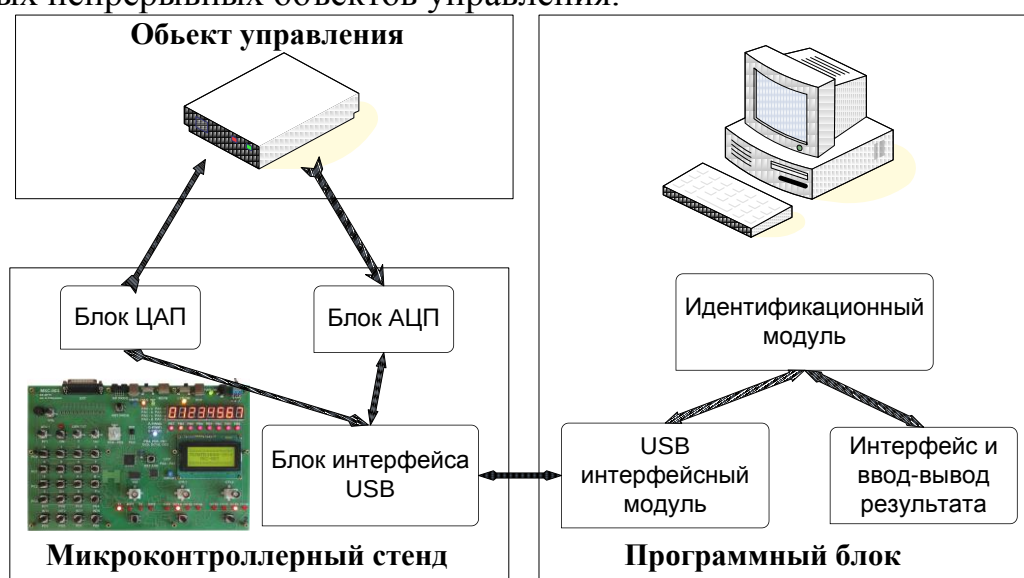


Рис. 1. Структурная схема комплекса

Структурная схема комплекса представлена на рис. 1. В настоящий момент комплекс рассчитан на идентификацию объектов, входами и выходами которых являются электрические сигналы. При тестовых испытаниях, в качестве объекта идентификации использовались RC-цепи.

Идентификация выполняется по следующей схеме. На объект управления подаются тестовые воздействия – непрерывные сигналы, формируемые стендом, выполненным на базе микроконтроллера.

Тестовые сигналы выбираются из класса полигармоник вида

$$y(t) = \sum_{i=0}^l c_i \sin(\omega_i t),$$

т.е. сигналов с широким спектром. Верхнее значение частоты ω_l должно быть больше полосы пропускания АЧХ объекта[1].

Формирование воздействий и снятие откликов производит микроконтроллерный стенд МКС-003. В состав стенда входят необходимые блоки ЦАП и АЦП, а так же USB-интерфейс для сопряжения с ЭВМ. После снятия выходных сигналов, микроконтроллер передает данные на ЭВМ.

Для обработки сигналов и построения моделей, используется среда MATLAB.

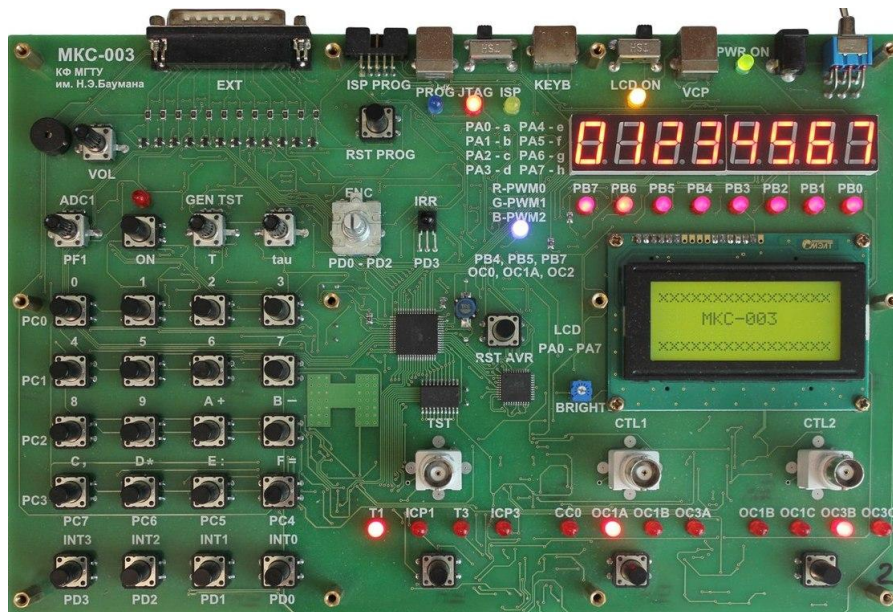


Рис. 2. Внешний вид стенда МКС-003

Данный стенд (рис. 2) построен на основе микроконтроллера AVR ATmega128, который представляет собой 8-разрядный RISC-микроконтроллер общего назначения с быстрым процессорным ядром. Архитектура и система команд микроконтроллеров AVR позволяет использовать язык высокого уровня C для написания программ, практически не уступающих по эффективности программам на языке Ассемблера. Это даёт выигрыш во времени разработки и отладки программ, размере полученного кода и производительности работы микроконтроллера.

Конструкция стенда включает ряд устройств, широко используемых в микропроцессорных системах для ввода/вывода информации: интегральный модуль инфракрасного приемника сигналов, энкодер, динамический громкоговоритель, и др.

Алгоритм идентификации объектов предполагает последовательно использовать модели в виде дискретных передаточных функций, начиная с 1-го порядка вида:

$$W^*(z) = \frac{c_0}{z + d_0} \quad (2)$$

до максимального порядка m :

$$W^*(z) = \frac{c_{m-1}z^{m-1} + c_{m-2}z^{m-2} + \dots + c_1z + c_0}{z^m + d_{m-1}z^{m-1} + d_{m-2}z^{m-2} + \dots + d_1z + d_0} \quad (3)$$

Поскольку входной и выходной сигналы заданы во временной области, алгоритм идентификации предусматривает переход от передаточной функции дискретной модели к разностному уравнению вида

$$\begin{aligned} x[n+m] + d_{m-1}x[n+m-1] + \dots + d_1x[n+1] + d_0x[n] = \\ = c_{m-1}y[n+m-1] + \dots + c_1y[n+1] + c_0y[n]. \end{aligned} \quad (4)$$

Нахождение коэффициентов математической модели осуществляется путем подстановки дискретных значений входных и выходных сигналов в уравнение (4) для $n \in [0, N-1]$, где N - длина дискретной числовой последовательности.

$$\left\{ \begin{aligned} x[m] + d_{m-1}x[m-1] + \dots + d_1x[1] + d_0x[0] &= \\ &= c_{m-1}y[m-1] + \dots + c_1y[1] + c_0y[0], \\ x[m+1] + d_{m-1}x[m] + \dots + d_1x[2] + d_0x[1] &= \\ &= c_{m-1}y[m] + \dots + c_1y[2] + c_0y[1], \\ \dots & \\ x[m+N] + d_{m-1}x[m-1+N] + \dots + d_1x[1+N] + d_0x[N] &= \\ &= c_{m-1}y[m-1+N] + c_1y[1+N] + c_0y[N]. \end{aligned} \right. \quad (5)$$

где $m = 1, 2, \dots$ - порядок передаточной функции дискретной модели.

В результате имеет место система алгебраических уравнений с $2m$ неизвестными $d_{m-1}, d_{m-2}, \dots, d_1, d_0, c_{m-1}, c_{m-2}, \dots, c_1, c_0$, подлежащими определению. Поскольку порядок математической модели идентифицируемого объекта всегда меньше, чем число дискретных значений входных и выходных сигналов, то система (5) является переопределенной. Решение переопределенной системы алгебраических уравнений выполняется с использованием метода наименьших квадратов.

Данная процедура выполняется для математических моделей с передаточными функциями от 1-го до m -го порядков включительно.

Выбор оптимальной структуры (порядка передаточной функции) осуществляется по следующему алгоритму.

Для полученной i -ой модели объекта находится выходной сигнал, соответствующий входному тестовому сигналу. Для моделей всех рассматриваемых порядков вычисляется норма отклонения реального выходного сигнала от расчетного.

$$J_i = \|x_{\text{вых.расч}} - x_{\text{вых.реал}_i}\|, \quad i = \overline{1, m}. \quad (6)$$

За оптимальную математическую модель принимаем ту, для которой величина нормы будет наименьшей

$$J_{\text{opt}(k)} = \min_{i=1, m} \{J_i\}.$$

Индекс k , удовлетворяющий данному соотношению, определяет порядок передаточной функции. Таким образом, определяется структура математической модели и ее параметры.

Приведем результаты работы комплекса для идентификации RC-цепи, представленной на рис. 3.

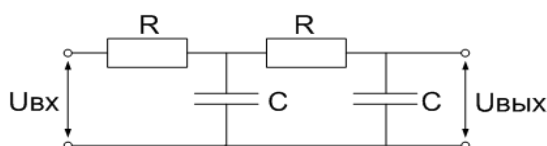


Рис. 3. Исследуемая RC-цепь

Исследуемая RC-цепь имеет передаточную функцию вида

$$W(s) = \frac{1}{0.0001s^2 + 0.02s + 1}.$$

В результате идентификации была получена математическая модель, имеющая следующую передаточную функцию:

$$W(s) = \frac{-0.003s + 0.93}{0.00006s^2 + 0.028s + 1}.$$

Графики входных и выходных сигналов представлены на рис. 4.

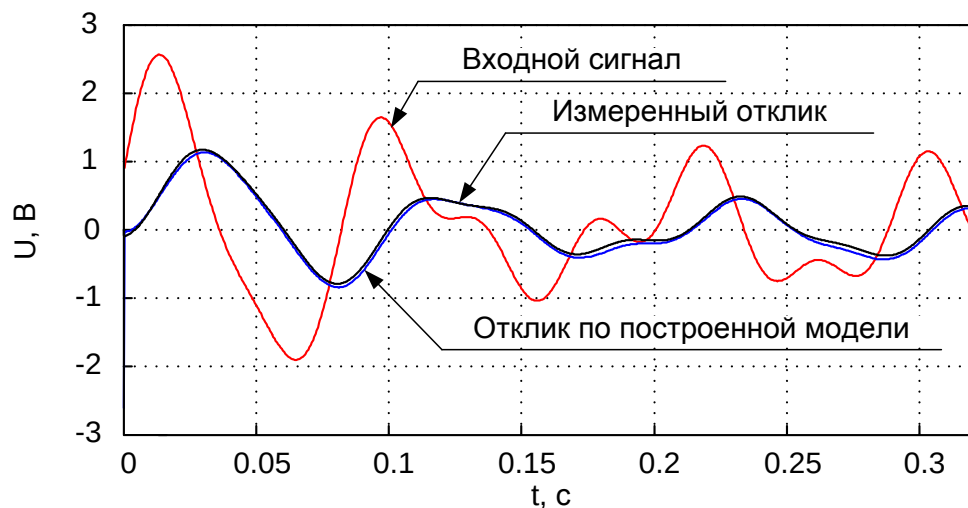


Рис. 4. Графики входных воздействий и откликов для системы второго порядка

Различия между параметрами передаточной функцией исходной цепи и параметрами рассчитанной передаточной функции объясняются не только погрешностями метода. В значительной степени учитываются изме-

няющиеся параметры элементов цепи, не поддающиеся непосредственному измерению, такие как отклонения емкостей конденсаторов, сопротивлений резисторов и соединительных проводов. Поэтому разработанный комплекс обеспечивает решение задачи идентификации с достаточно большой точностью.

Литература

1. Пупков К.А., Егупов Н.Д. Методы классической и современной теории автоматического управления: Т.1: Математические модели, динамические характеристики и анализ систем автоматического управления. Москва, Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004, 656с., ил.

Аксенов Никита Владимирович – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: n.aksenov2015@yandex.ru.

Филиппов Дмитрий Валерьевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: gnr0exе@gmail.com.

Якушев Анатолий Александрович – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: impulsepro93@gmail.com.

О.В. Сакович, А.Л. Лапиков, В.М. Масюк

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ПЛАТФОРМЫ ГЬЮ-СТЮАРТА ПРИ ЛИНЕЙНОЙ АППРОКСИМАЦИИ ЗАКОНА ИЗМЕНЕНИЯ ОБОБЩЕННЫХ КООРДИНАТ ПРИ ПЕРЕМЕЩЕНИИ ВДОЛЬ ОСЕЙ ДЕКАРТОВОЙ СИСТЕМЫ КООРДИНАТ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Введение. В настоящее время манипуляционные механизмы используются повсеместно, и, в зависимости от необходимых параметров, обусловленных конкретной решаемой задачей, применимы различные типы роботов. Если к механизму предъявляются особые требования по такому набору параметров, как масса полезной нагрузки, жесткость, прецизионность, то предпочтение по сравнению с антропоморфными манипуляторами отдается механизмам параллельной структуры.

Механизм параллельной структуры представляет собой подвижную платформу, на которой располагается рабочий орган манипулятора, соединенную несколькими телескопическими штангами с неподвижной платформой. Каждая из штанг оснащена двигателем, либо накладывает ограничения на движения выходного звена, что обуславливает недостаток таких механизмов, а именно ограничение рабочей зоны.

Несмотря на выше сказанное, манипуляторы параллельной структуры нашли широкое применение при создании различных двигательных, измерительных и испытательных устройств [1]. Таким образом, исследования рассмотренных манипуляторов имеют большое значение, и важной частью данных исследований является разработка алгоритмов управления движением механизмов. При перемещении рабочего органа манипулятора из начального положения в заданное необходимо решить комплекс задач, одной из которых является выбор аппроксимирующей функции изменения обобщенных координат.

Целью данного исследования является выявление особенностей движения манипулятора при линейной аппроксимации обобщенных координат, в случае перемещения вдоль осей декартовой глобальной системы координат.

В настоящее время существует несколько моделей манипуляторов, описание которых можно найти в работе [2]. В данной работе будут рассмотрены результаты моделирования движения манипулятора Гью-Стюарта, структура которого приведена на рис. 1.

Манипулятор состоит из двух платформ радиусами R и r , соединенных между собой телескопическими штангами. Крепление штанг к платформам осуществляется с помощью сферических шарниров. Толщины платформ и высота шарнира, как его конструктивный параметр, составляют величины h_b и h_p соответственно для базовой и подвижной платформ. Шарниры основания лежат в одной плоскости в вершинах шестиугольника

$A_1A_2A_3A_4A_5A_6$, описанного окружностью с радиусом R . Аналогично расположены шарниры подвижной платформы, в вершинах шестиугольника $B_1B_2B_3B_4B_5B_6$, радиус описанной окружности которого r (рис. 1). Неподвижная система координат связана с основанием, ее начало отсчета равноудалено от вершин шестиугольника, а плоскость XOY параллельна плоскости шестиугольника. Аналогично подвижная система координат связана с верхней платформой (рис. 1). Параметры φ_b, φ_p определяют расположение первого шарнира на основании и подвижной платформе соответственно. В качестве обобщенных координат манипулятора будем использовать длины штанг.

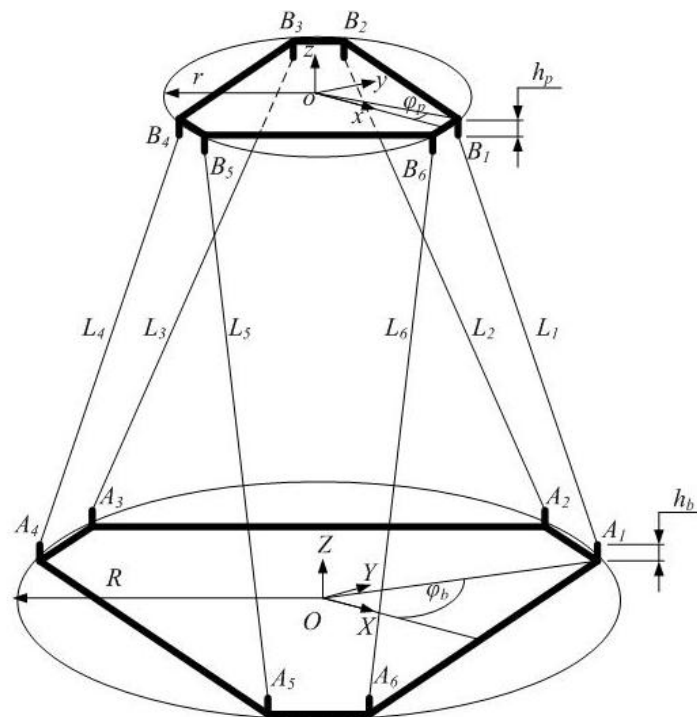


Рис. 1. Платформа Гью-Стюарта типа 6-6 с попарным расположением шарниров

Постановка задачи. Для исследования, проводимого в данной работе, будем полагать, что манипулятор находится в начальном положении в том случае, если платформы параллельны, а начало координат неподвижной системы координат является проекцией начала координат подвижной на плоскость XOY . Положение и ориентацию платформы определяет вектор $X = [x_o \ y_o \ z_o \ \alpha \ \beta \ \gamma]$ где x_o, y_o, z_o – декартовы координаты центра подвижной платформы, а α, β, γ – тройка углов, которая однозначно определяет ориентацию системы координат подвижной платформы относительно системы координат основания. В качестве тройки углов, задающих вид матрицы поворота, могут быть использованы углы Эйлера. Таким образом, начальное положение можно определить как вектор $X_0 = [0 \ 0 \ 150 \ 0 \ 0 \ 0]$, тогда значение длин штанг $L_{i0} = 156,3316$.

Алгоритм проведения экспериментов заключается в следующем:

1. Определить значение вектора обобщенных координат L_{ik} при заданном конечном положении X_k ;
2. Разбить диапазон $[L_{i0}; L_{ik}]$ для каждой штанги на $N = 30$ положений;
3. Найти вектор X_i для каждого из 30, полученных на шаге 2, положений манипулятора, зная значения обобщенных координат;
4. Провести анализ полученных данных, на наличие нескольких возможных решений, а также анализ переходных процессов для составляющих вектора X .

Первый пункт приведенного алгоритма является, по своей сути, обратной задачей кинематики, решение которой, для модели, представленной на рис. 1, предлагается в статье [3]. Данный метод решения основан на нахождении длин штанг L_i из системы шести уравнений, каждое из которых выражает длину штанги как геометрическое расстояние между соответствующими парами шарниров. Также необходимо отметить полноту описания модели платформы Гью-Стюарта типа 6-6 с парным расположением шарниров в работе [3].

На третьем шаге алгоритм предполагает итеративное решение прямой задачи кинематики для 30 различных положений манипулятора. В отличие от традиционных антропоморфных механизмов, ПЗК для механизмов параллельной кинематики является гораздо более сложной задачей. Среди методов решения, предлагаемых в различных научных работах, был выбран метод, основанный на описанном в статье [4]. В нашем исследовании используется модификация описанного выше метода решения ПЗК, разработанная для исследований модели платформы, представленной на рис. 1.

Результаты моделирования. Как было сказано выше, в работе проводятся три эксперимента, моделирующие перемещение платформы вдоль каждой из осей глобальной декартовой системы координат. Закон изменения обобщенных координат, согласно алгоритму,

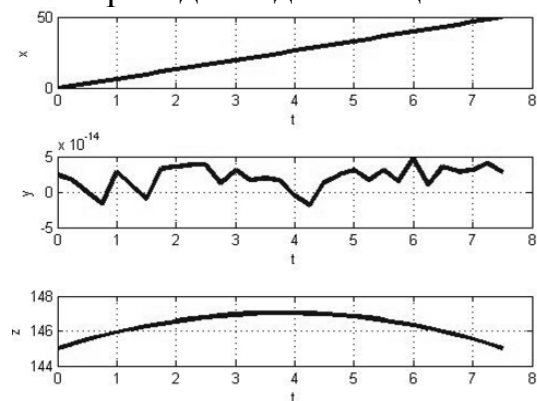
$$L_{ij} = L_{i(j-1)} + \frac{L_{ik} - L_{i0}}{30},$$

где: $i = 1..6$ индекс обобщенной координаты; $j = 1..30$ шаг дискретизации отрезка $[L_{i0}; L_{ik}]$; $L_{i0} = 156,3316$ начальное значение i обобщенной координаты; L_{ik} конечное значение i обобщенной координаты.

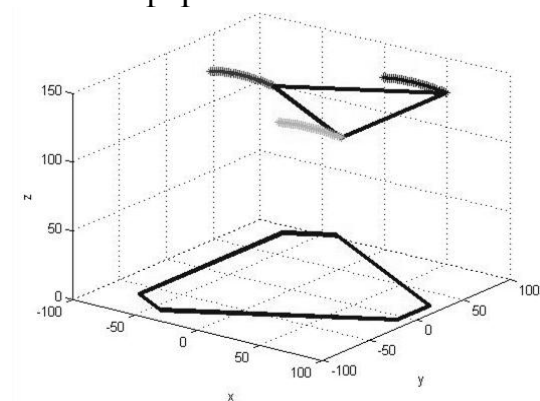
Зададим параметры модели манипулятора (рис 1). Пусть радиусы основания R и подвижной платформы r будут равны 100 и 50 соответственно, а значения углов расположения первых шарниров $\varphi_b = \varphi_p = \frac{\pi}{18}$, и толщины платформ $h_b = h_p = 5$.

Результаты экспериментов представлены на рисунках 2, 3, 4 для случаев перемещения манипулятора вдоль осей X, Y, Z соответственно, без изменения ориентации подвижной платформы. Исследования проводились с использованием программного обеспечения MATLAB, в котором были написаны программы решения обратной, прямой задач кинематики, и программа

моделирования описанного эксперимента, с выводом графиков изменения составляющих вектора X (Рисунки 2а, 3а, 4а), а так же выводом трехмерного изображения, демонстрирующего движение подвижной платформы относительно основания манипулятора (Рисунки 2б, 3б, 4б). Все три эксперимента проводятся для смещения подвижной платформы на 50.

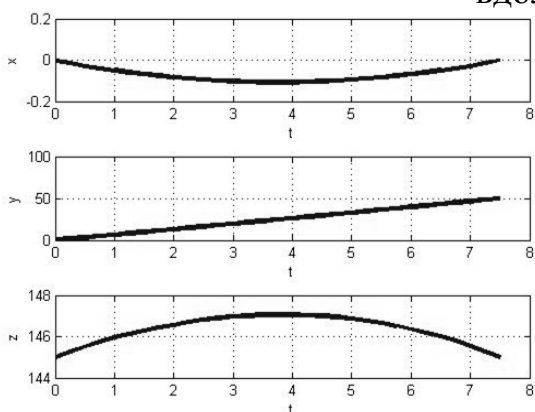


а

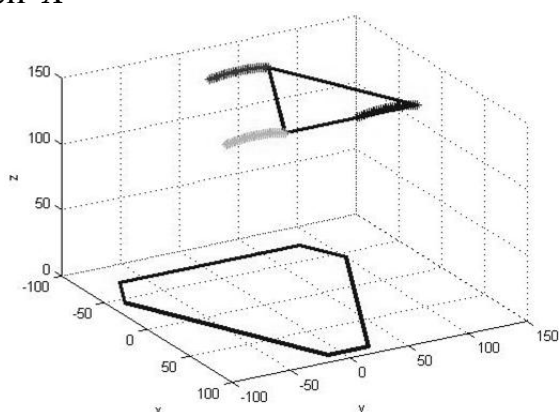


б

Рис. 2. Изменения координат подвижной платформы при перемещении вдоль оси X

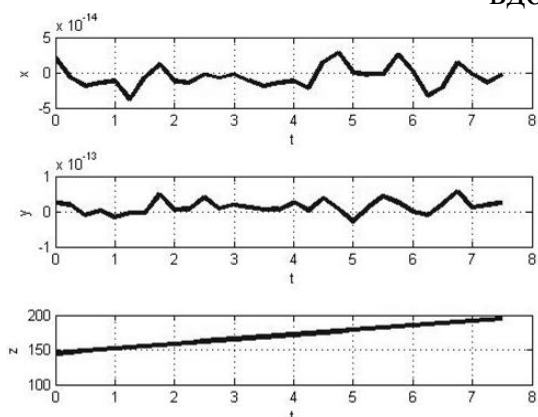


а

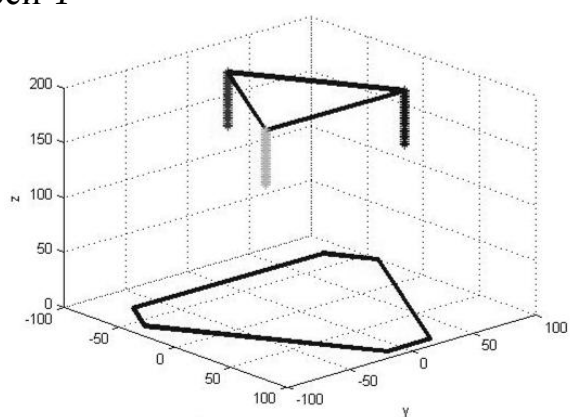


б

Рис. 3. Изменение координат подвижной платформы при перемещении вдоль оси Y



а



б

Рис. 4. Изменение координат подвижной платформы при перемещении вдоль оси Z

Вывод. Полученные результаты показывают хорошую сходимость численного метода решения систем уравнений, применяемого в решении прямой задачи кинематики, для рассматриваемой модели манипулятора Гью-Стюарта (рис. 1). Как видно из изображений (рис. 2, 3, 4), подвижная платформа движется в конечное положение по траектории, близкой к линейной, однако имеются малые отклонения (не более 1%) по осям, вдоль которых не осуществляется движение. Стоит отметить, что в случае изменения координаты X на 50 (рис. 2) имеются дополнительные перемещения платформы вдоль оси Z , достигающие 2. Вероятно, это вызвано особенностью линейной аппроксимации обобщенных координат, а именно различной скоростью их приращения при подобных перемещениях.

Список литературы

[1] Артеменко Ю.Н. Синтез механизмов ориентации космического телескопа «Миллиметрон». 1. Возможности механизмов параллельной структуры для ориентации космического телескопа «Миллиметрон». *Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн.*, 2013, № 1 DOI: 10.7463/0113.0534292

[2] Merlet J.P. Parallel Robots. Solid mechanics and its applications. Kluwer Academic Publishers, 2000, V. 74, 394 p.

[3] Лапиков А.Л. Математическая модель платформенного манипулятора гью-стюарта. *Научные технологии в приборостроении и развитии инновационной деятельности в вузе: материалы Региональной научно-технической конференции, 22–25 апреля 2013 г. Т. 2.* Москва, Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013, с. 144 – 155.

[4] Лапиков А.Л. Исследование применимости метода решения прямой задачи кинематики для манипулятора Гью-Стюарта типа 6-6. *Научные технологии в приборостроении и развитии инновационной деятельности в вузе: материалы Региональной научно-технической конференции, 22–25 апреля 2014 г. Т. 1.* Москва, Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014, с. 218 – 227.

Сакович Олег Валерьевич – ассистент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: osakovich@gmail.com.

Лапиков Антон Леонидович – ассистент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: anton.lapikov@inbox.ru.

Масюк Владимир Михайлович – канд. физ.-мат. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: masyuk77@gmail.com.

С.С. Ратанов, М.Н. Чернецова, В.А. Белова

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ ДАТЧИКОВ ЦВЕТНОСТИ ДЛЯ ПРОТОТИПА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО СКЛАДА-СОРТИРОВЩИКА

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Современные системы складского учета требуют либо априорного знания свойств учитываемых объектов (например, записанную в виде штрих-кодовой информации и содержащую данные о типе, виде и назначении, а также о месте транспортировки и хранения), либо, в общем случае, должны самостоятельно идентифицировать характеристики объекта [1,2]. Необходимость такой идентификации возникает в самых разных областях, как складских систем, так и от военного дела и систем безопасности до оцифровки аналоговых сигналов.

Проблема распознавания образов приобрела выдающееся значение в условиях информационных перегрузок, когда человек не справляется с линейно-последовательным пониманием поступающих к нему сообщений и производительность человека в таких системах явно недостаточна. Неслучайно проблема распознавания образов и создание технических систем распознавания образов выходит на важнейший план при конструировании различных технических систем.

Целью данной работы является исследование и техническая реализация части роботизированной складской промышленной ячейки [4], отвечающей за идентификацию цветовой информации, а также, на основе данной информации, разработка алгоритмов управления интеллектуальной роботизированной складской промышленной ячейкой (рис.1).

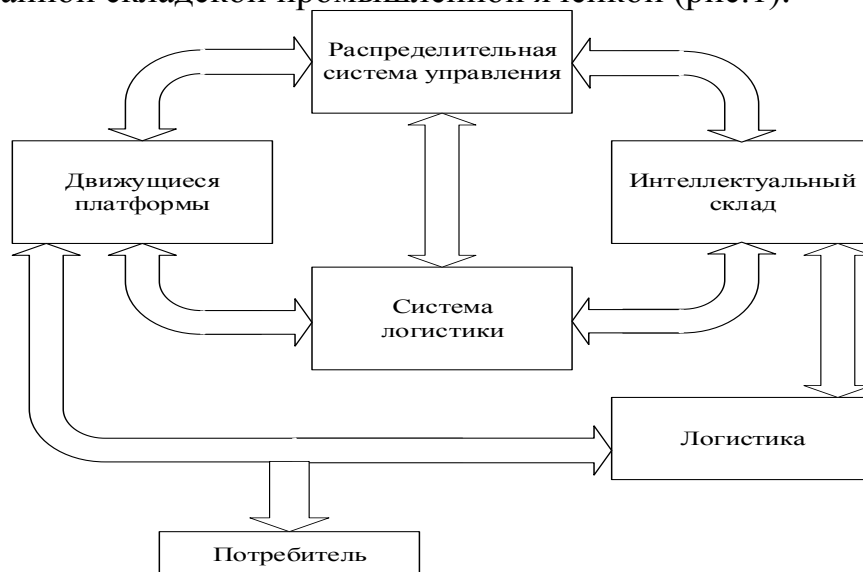


Рис. 1. Место системы распознавания цветности в общей структуре интеллектуального склада.

Были поставлены следующие задачи: провести сравнительную оценку камеры (raspberry pi camera board) и датчика цветности; исследование работы датчика цветности; калибровка датчика; исследование и теоретическая оценка возможного количества ошибок по полученным спектральным характеристикам датчика при различных неблагоприятных внешних условиях; уточнение информации с датчика; разработка и оценка статистики цветности поступающих объектов.

Сравнительная оценка камеры (Raspberry Pi camera board) и датчика цветности. С помощью камеры Raspberry Pi board существует возможность определить цвет объекта, форму объекта, расстояние до объекта, вывести изображение с камеры на монитор. Из недостатков – высокая цена, сложность в использовании, необходимость дополнительного модуля управления камерой и явная избыточность для поставленной задачи.

Датчики цветности предназначены исключительно для распознавания цвета поверхности, имеется встроенная система подсветки, датчик определяется простотой конструкции, и достаточно простым алгоритмом съема информации. В качестве выявленных недостатков можно отметить большую разницу между декларируемым количеством распознаваемых цветов и реальным, требовательности к дополнительному освещению рабочей поверхности и неоднозначности результатов.

В постановку задачи входили следующие требования к системе: распознавание 10-12 цветов шариков от красного до синего цвета на расстоянии 2-10мм (по техническим характеристикам датчика TCS230 (рис.2) он позволяет распознать цвета объекта, расположенного перед ним на расстоянии до 10 мм), скорость съема информации – до 10 Гц, точность распознавания цвета датчика в различных условиях (для 10 кратного перепада яркости внешнего освещения) не хуже 99%.

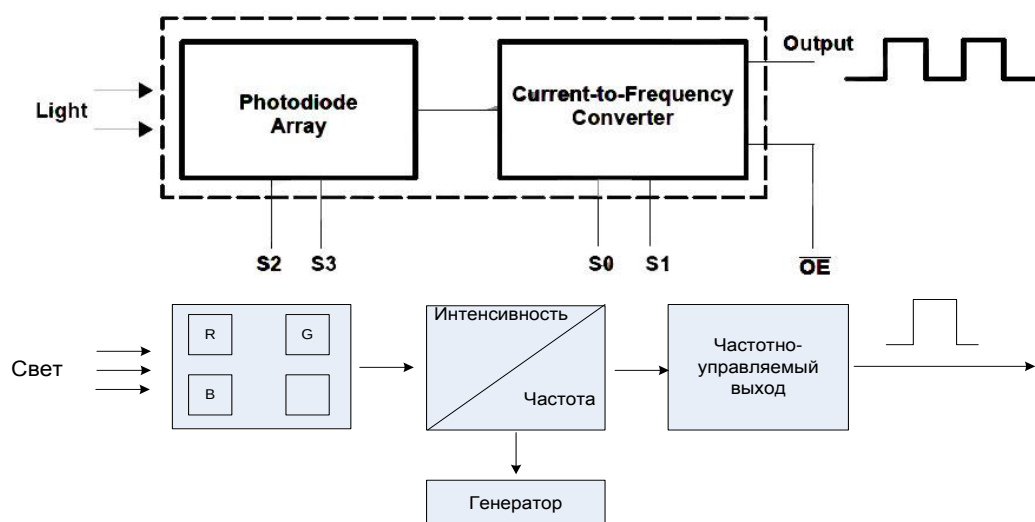


Рис. 2. Функциональная схема датчика цветности.

Для подсветки объектов на плате расположены 4 белых светодиода. Сам TCS230 состоит из массива фотоэлементов с фильтром на красный, зелёный, синий и «бесцветный» цвета. Это позволяет определять цвета всего видимого спектра. Элементы распределены равномерно, что защищает от погрешностей, связанных с их положением. Датчик содержит преобразователь интенсивность- частота, частота сигнала которого пропорциональна интенсивности выбранного цвета. На выходе получен сигнал прямоугольной формы.

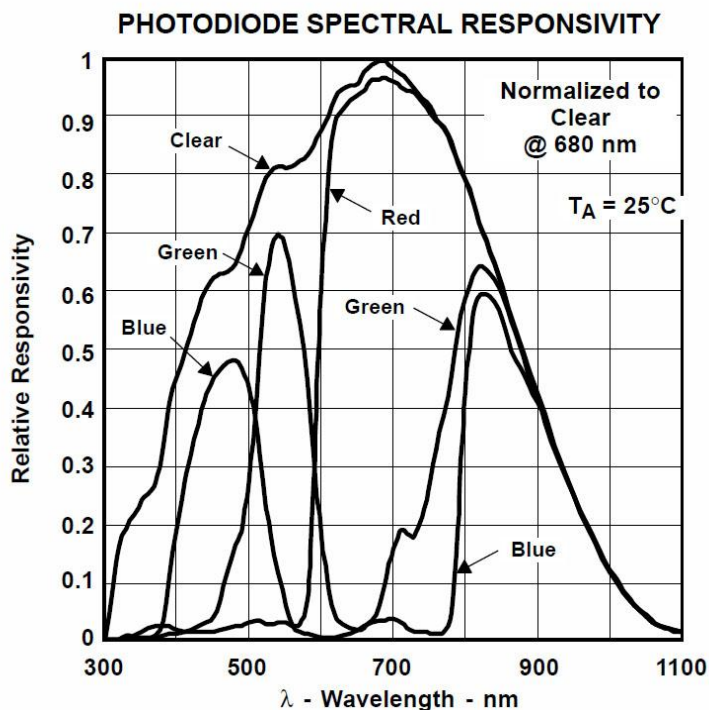


Рис. 3. Спектральные характеристики датчика цветности.

Датчик излучает смешанные три цвета (красный, синий, зеленый), рассчитывает хроматичность и насыщенность отраженного луча и сравнивает полученные результаты с ранее заданными значениями цветовых координат. Если результаты сравнительного анализа находятся в пределах допустимых отклонений, то генерируется выходной электрический сигнал. Из анализа спектральных характеристик (рис. 3) [3] становится понятно, что необходим дополнительный фильтр на длину волны 700nm, поскольку без него происходит как смешивание характеристик, так и неоднозначное толкование распознаваемого цвета. Серия экспериментов без фильтра подтвердила данные рассуждения.

Постановка эксперимента. Для удобства реализации обработки данных с датчика была использована платформа Arduino Uno. Общий смысл программы состоит в преобразовании частотного сигнала с датчика цвета в сигнал с определенной интенсивностью. Для решения этой задачи воспользуемся методом частотного заполнения и реализуем его на микроконтроллере. Основная процедура расчета заключается в вызове прерывания с

таймера-счетчика и подсчете тактовых импульсов микроконтроллеров за период изменения частоты с датчика.

Подсчет количества импульсов в прерывании описывается блок - схемой, изображенной на рисунке 4.

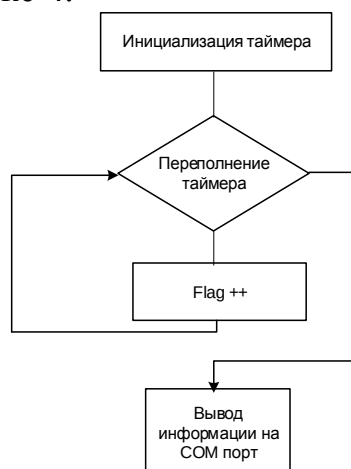


Рис.4. Блок - схема подсчета количества импульсов.

В качестве источников распознаваемого цвета использовались специально покрашенные в 6 цветов шарики $\varnothing 40$ мм. Исследования показали, что вероятность распознавания сильно зависит от цвета поверхности, от внешнего освещения. Самый большой вклад в погрешность датчика вносит отсутствие спектрального фильтра и перекрытие областей спектральной характеристики. Так, в результате экспериментов (50 измерений с автоматической фиксацией, время распознавания $\sim 0,1$ с) оказалось, что точность распознавания цветов:

- красный $\sim 90\%$; зеленый $<70\%$; синий $<70\%$;
- оранжевый $\sim 50\%$, определяется большей частью как красный;
- фиолетовый $\sim 50\%$, часто определяется как синий;
- голубой $\sim 40\%$, определяется как красный и синий.

Результаты, в принципе, хорошо согласуются как с заводской спектральной характеристикой датчика, так и с полученной в результате эксперимента. Без применения специальных средств, как технических (дополнительный фильтр на 70 нм), так и аппаратно-программных (проведение нескольких десятков замеров за время оценки каждого цвета и последующим усреднением результатов) сложно получить повторяющиеся результаты для числа цветов больше 3-4. В настоящий момент разрабатывается серия экспериментов по уточненным данным с фильтром, дорабатывается ПО, проектируется независимая аппаратная часть на МК и ЖК дисплее для независимой фиксации результатов, разрабатывается ПО для ПК для статистического анализа полученной информации.

Список литературы

[1] Мошкин В.И., Петров А.А., Титов В.С., Якушенков Ю.Г., *Техническое зрение роботов. Под общей ред. Якушенкова Ю.Г.* М.: Машиностроение, 1990.- 262с.:ил.

[2] Хорн Б.К.П. *Зрение роботов.* М: Мир, 1989.-487с. ил.

[3] Страница производителя. Сенсор оттенка цвета, выполненный на базе датчика TCS230. [http://www.dfrobot.com/wiki/index.php?title=TCS230_Color_Sensor_\(SKU:SEN0101\)](http://www.dfrobot.com/wiki/index.php?title=TCS230_Color_Sensor_(SKU:SEN0101)).

[4] Зенкевич С.Л., Ющенко А.С. *Управление роботами. Основы управления манипуляционными роботами. Учебник для вузов.* – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000.–400 с., ил.

Ратанов Станислав Сергеевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: xy_lig_an91@mail.ru.

Чернецова Мария Николаевна – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: mashulia_chernecova@mail.ru.

Белова Валентина Алексеевна – ст. преп. КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: belmax06@yandex.ru.

Т.В. Ларина

КЛАССИФИКАЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ВКЛЮЧАЮЩИХ СОДЕРЖАТЕЛЬНУЮ ИНФОРМАЦИЮ, НА ОСНОВЕ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Введение. В настоящее время компьютеризация в нашем обществе развивается очень быстрыми темпами и играет огромную роль в жизни человека. При помощи компьютерных технологий автоматизируется широкий круг процессов, которые в недалеком прошлом возлагались на человека. Одним из таких процессов является обработка информации. Множество практических задач решается на основе информации об измеряемом объекте. При наличии полной информации процесс обработки, хранения и восстановления экспериментальных данных уже хорошо изучен. Иная ситуация может возникнуть, когда информация об изучаемом объекте представлена неполно. В качестве изучаемого объекта, выступают буквы, встречающиеся на номерных знаках, в предположении, что для измеряемого объекта существует ограниченное число образцов (классов), к одному из которых он может принадлежать. В работе к рассмотрению предлагается метод обработки исследуемого объекта, основанный на вейвлет-преобразовании.

Постановка задачи и методы решения. Предположим, что исходный объект может принадлежать к одному из классов $K_1, K_2, \dots, K_n$, образующих разбиение множества объектов и имеются теоретические значения соответствующих функций $f^k(x_i, y_j), k = 1, \dots, n$ в точках (x_i, y_j) эталонных образцов каждого класса K_k . Пусть $g(x_i, y_j)$ - измеренные значения экспериментального двумерного изображения в тех же самых точках. На основе значений $g(x_i, y_j)$ требуется определить, к какому классу принадлежит измеряемый объект.

Для принятия такого решения необходимо предварительно преобразовать дискретно-значные функции $f^k(x_i, y_j)$ и $g(x_i, y_j)$ с последующим сравнением полученных характеристик.

Преобразование основано на вейвлет-преобразовании соответствующих функций с использованием вейвлета Добеши 2-го порядка и сравнением получающихся коэффициентов.

Основную модель вейвлет-преобразования можно описать следующим образом. Сначала выбирается подходящий анализирующий (т.н. отцовский) вейвлет $\varphi(x)$. Затем на его основе строится масштабирующий (материнский вейвлет) $\psi(x)$. Из функций $\varphi(x)$ и $\psi(x)$ путём сдвига и растяжения, получаем копии, называемые вейвлетными функциями.[1]

В результате разложения двумерного объекта по базисным функциям, полученным из вейвлета Добеши, получаем наборы коэффициентов, соответствующих различным уровням детализации.

Соответствующие коэффициенты принято называть следующим образом:

Аппроксимирующие коэффициенты cA_j получаются как коэффициенты разложения по вейвлет-базису $\varphi_{j,n}(x) \varphi_{j,m}(y)$.

Горизонтальные детализирующие коэффициенты cH_j получаются как коэффициенты разложения по вейвлет-базису $\varphi_{j,n}(x) \psi_{j,m}(y)$.

Вертикальные детализирующие коэффициенты cV_j получаются как коэффициенты разложения по вейвлет-базису $\psi_{j,n}(x) \varphi_{j,m}(y)$.

Диагональные детализирующие коэффициенты cD_j получаются как коэффициенты разложения по вейвлет-базису $\psi_{j,n}(x) \psi_{j,m}(y)$. [2]

Практически выходной сигнал задается матрицей S . При разложении этого сигнала получают указанные выше четыре типа коэффициентов. Схему разложения можно изобразить в виде $S \rightarrow (cA_1, cH_1, cV_1, cD_1) \rightarrow (cA_2, cH_2, cV_2, cD_2, cH_1, cV_1, cD_1) \rightarrow \dots$

Поскольку массив начальных коэффициентов двумерный, то более естественно схему разложения сигнала S (Рис.1) изобразить в виде

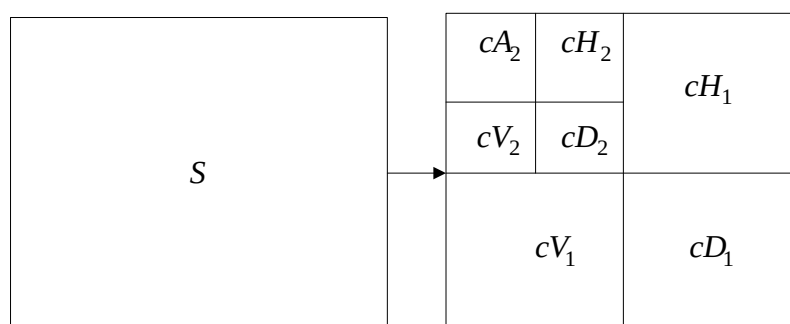


Рис. 1

В данной работе рассматриваются два вида классификации.

Первый представляет собой нахождение минимального расстояния между множествами, состоящими из вейвлет-коэффициентов соответствующих образцов. В данном случае необходимо использовать аппроксимирующие коэффициенты вейвлет разложения, так как они содержат информацию об объекте.

Для нахождения расстояния между образцами выберем l_2 -норму:

$$\|f^k(x, y) - g(x, y)\| = \sqrt{\sum \left((cA_j(f^k) - cA_j(g))^2 \right)}, \text{ где } cA_j(f^k) - \text{соответствующие коэффициенты базисного разложения функции } f^k \text{ по вейвлет-базису, аналогичные обозначения и для функции } g. [3]$$

140

В случае, когда g относится к f , эта норма будет иметь наименьшее значение по сравнению с аналогичными нормами при использовании других эталонных функций.

В качестве второго вида применяем классификацию основанную на методе «один против всех». Пусть исследуемые объекты

$\bar{x}(x_1, x_2, \dots, x_n), x_i$ – вейвлет-коэффициенты. Базис из букв $\bar{e}^{(j)}(e_1^{(1)}, e_2^{(1)}, \dots, e_n^{(1)}), e_i$ – вейвлет-коэффициенты эталонных образцов.

Необходимо определить к какому классу относится исследуемый объект. Для решения данной задачи необходимо сравнить исследуемый объект с

выбранным $\bar{e}^{(j)}$ и с объектом $\bar{f} = \frac{\bar{e}^{(1)} + \dots + \bar{e}^{(j-1)} + \bar{e}^{(j+1)} + \dots + \bar{e}^{(n)}}{n-1}$ – усред-

ненное значение остальных эталонных образцов. Для сравнения воспользуемся логистической регрессией, для нахождения вероятности принадлежности к каждому классу. Классификатор с самым высоким значением вероятности присваивает новый объект к определенному классу.

Результаты моделирования данного классификатора будут приведены в устном докладе.

Результаты. В качестве примера работы алгоритма были рассмотрены изображения букв кириллического алфавита, встречающихся на государственных регистрационных знаках автомобиля.

В качестве объекта $g(x, y)$ было взято изображение буквы У при наличие неполной информации (Рис. 2). На (Рис. 3) представлено разложение на аппроксимирующие коэффициенты.



Рис. 2

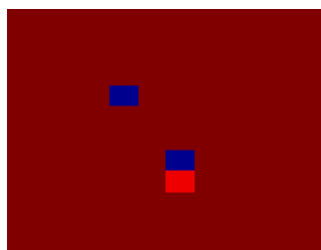


Рис.3

В качестве классов принадлежности взяты буквы А, В, Е, К, М, Н, О, Р, С, Т, У, Х.

В эксперименте исследуемыми сигналами были все буквы, встречаемые на государственных регистрационных знаках, но представлены наиболее различные и схожие буквы.

Таблица 1 –Сравнительный анализ распознавания экспериментального сигнала

Буква	l_2 -норма
А	5650
В	6364
Е	6209
К	5999
М	6227
Н	5866
О	6711
Р	5509
С	6288
Т	4586
<u>У</u>	<u>3899</u>
Х	5348

Обсуждение. В данной работе предлагается метод классификации изображений. Можно сделать вывод, что во многих случаях независимо от помех в измерениях, по коэффициентам вейвлет-разложения можно определить, к какому классу (какой букве) он относится. Данный методы могут быть применен при обработке видеосигналов, полученных с регистрирующих устройств в условиях недостаточной видимости или при низком разрешении видеокамеры. Описанный выше метод обработки информации не требует проведения сложных вычислений, и может применяться при решении практических задач.

Список литературы

- [1] *Смоленцев Н.К.* Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB. — М.: ДМК Пресс, 2005. — 304 с.
- [2] *Сергиенко А.Б.* Цифровая обработка сигналов. — СПб.: Питер, 2006. — 751 с.
- [3] *Паклин Н.Б., Орешков В.И.* Бизнес-аналитика: от данных к знаниям. — СПб.: Питер, 2013 —706 с.

Ларина Татьяна Вячеславовна – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: Larinatv1991@gmail.ru.

Тун Тун Чжо, Тин Эй Чжо, А.М. Макаренков

КОМПЕНСАЦИЯ ВЛИЯНИЯ ФАКТОРА СЛУЧАЙНОСТИ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ СИНТЕЗА ПРОГРАММНЫХ УПРАВЛЕНИЙ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

В работе рассматривается проблема поиска программных управлений для объектов со случайными параметрами, описываемых линейными дифференциальными уравнениями n -го порядка с коэффициентами в виде случайных величин (класс стохастических систем).

Задача поиска программных управлений рассматривается в следующей постановке. Предположим, что математическая модель стохастической системы задана. Требуется найти управляющее воздействие $y(t)$, которое при заданных начальных условиях вырабатывает на выходе системы сигнал $x(t)$ такой, что пара $(m_x^*(t), m_x(t))$ доставляет наименьшее значение функционалу

$$J(m_x^*(t), m_x(t)) = \int_{t_0}^{t_f} [m_x^*(t) - m_x(t)]^2 dt, \quad (1)$$

где $m_x(t)$ – математическое ожидание выходного сигнала стохастической системы; $m_x^*(t)$ – желаемое математическое ожидание выходного сигнала.

Минимизация функционала (1) выполняется одним из численных методов с использованием проекционной модели [1, 2] для вычисления $m_x(t)$. При этом аналог функционала (1) выглядит следующим образом:

$$J(c_1^y, c_2^y, c_3^y, \dots, c_p^y) = \left[\sum_{i=1}^P \left[c_i^\Delta(c_1^y, c_2^y, c_3^y, \dots, c_p^y) \right]^2 \right]^{1/2}, \quad (2)$$

где $c_i^\Delta(c_1^y, c_2^y, c_3^y, \dots, c_p^y)$ – элементы вектора

$$C^\Delta(c_1^y, c_2^y, c_3^y, \dots, c_p^y) = C^{m^*} - C^{m^x}(c_1^y, c_2^y, c_3^y, \dots, c_p^y),$$

зависящего от элементов вектора проекционной характеристики синтезируемого управления C^y , выступающих в качестве оптимизируемых параметров; p – число удерживаемых членов разложения по ортогональному базису. На практике можно ограничиться относительно небольшим числом искомых первых элементов вектора C^y (оптимизируемых параметров), заменив оставшиеся нулями.

В качестве объекта управления рассматривается электрогидравлический следящий привод (ЭГСП), некоторые физические параметры которо-

го являются случайными величинами. Математическая модель ЭГСП имеет вид

$$x^{(8)} + a_7x^{(7)} + a_6x^{(6)} + a_5x^{(5)} + a_4x^{(4)} + a_3x''' + a_2x'' + a_1x' + a_0x = b_0y. \quad (3)$$

В качестве параметров функционала (2) используем первые пять коэффициентов разложения функции $y(t)$ по базису функции Уолша.

Рассмотрим пример синтеза программного управления ЭГСП при случайном коэффициенте передачи цепи электрической обратной связи k_{oc} со следующим математическим ожиданием и дисперсией:

$$m_{k_{oc}} = 0,1; \quad D_{k_{oc}} = 5 \cdot 10^{-4}.$$

Результаты представлены на рис. 1-5. На рис. 1 приводятся графики выходного сигнала и его математического ожидания для стохастической и детерминированной модели ЭГСП. Здесь: (а) – реакция стохастической системы на программное управление до компенсации фактора случайности; (б) – реакция детерминированной системы на программное управление; (с) – желаемый сигнал. На рис. 2: (а) – реакция стохастической системы после компенсации фактора случайности; (б) – до компенсации. На рис. 3 представлены графики программного управления после компенсации фактора случайности (а) и до компенсации – (б). На рис. 4 показан график разности между выходным сигналом детерминированной системы и его математическим ожиданием в случае, когда ЭГСП рассматривается как стохастическая система и компенсация фактора случайности параметров отсутствует.

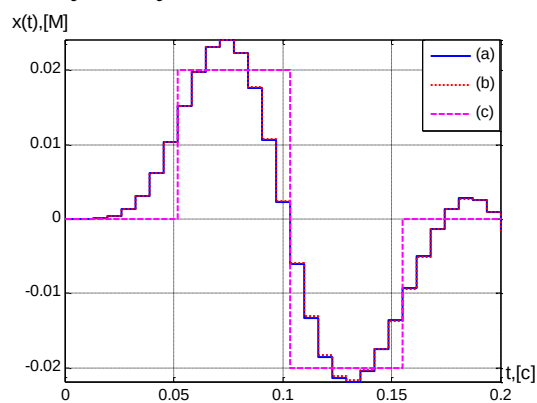


Рис. 1

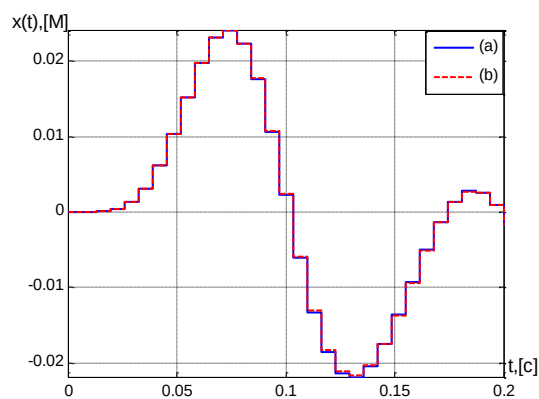


Рис. 2

На рис. 5 показан график разности между выходным сигналом детерминированной системы и его математическим ожиданием в случае, когда ЭГСП рассматривается как стохастическая система но управление синтезировано с компенсацией фактора случайности параметров.

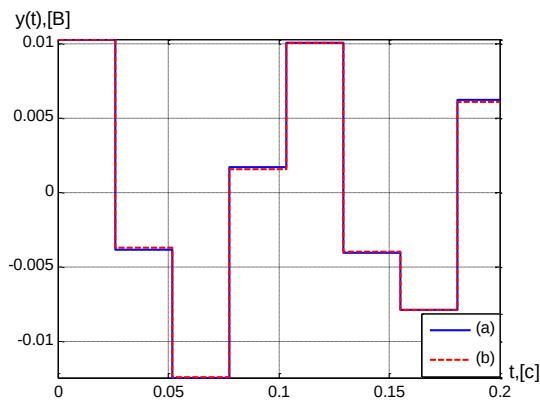


Рис. 3

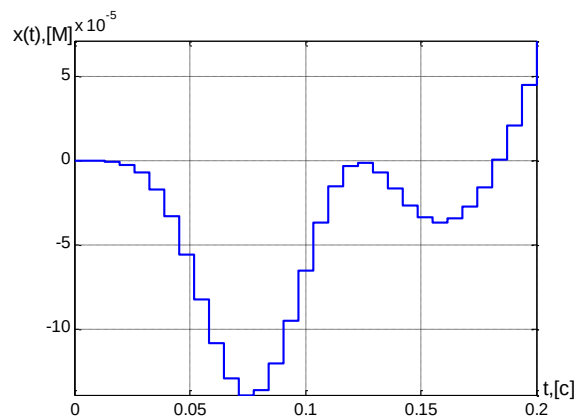


Рис. 4

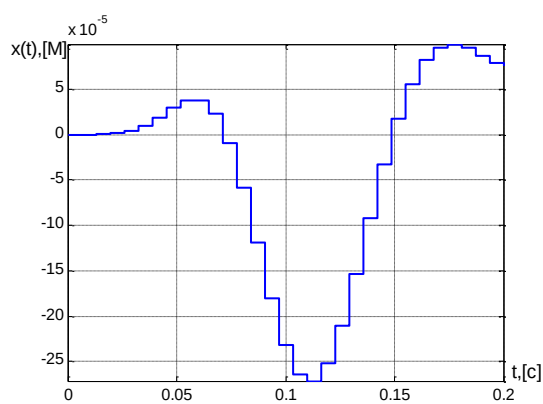


Рис. 5

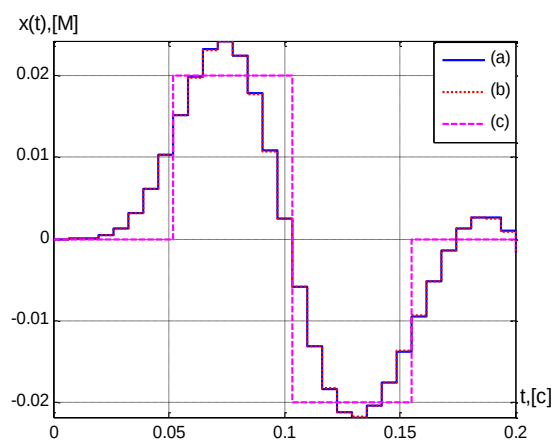


Рис. 6

Рассмотрим также пример синтеза программного управления ЭГСП при случайном коэффициенте передачи усилителя сигнала ошибки k_{yc} со следующим математическим ожиданием и дисперсией: $m_{k_{yc}} = 50$; $D_{k_{yc}} = 44,4$. Результаты представлены на рис. 6-10, смысл которых и принятые обозначения те же, что и в предыдущем примере.

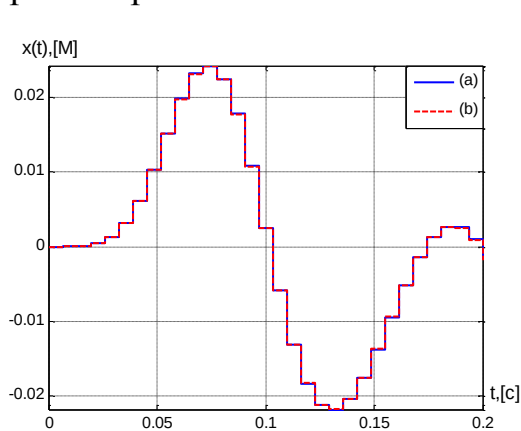


Рис. 7

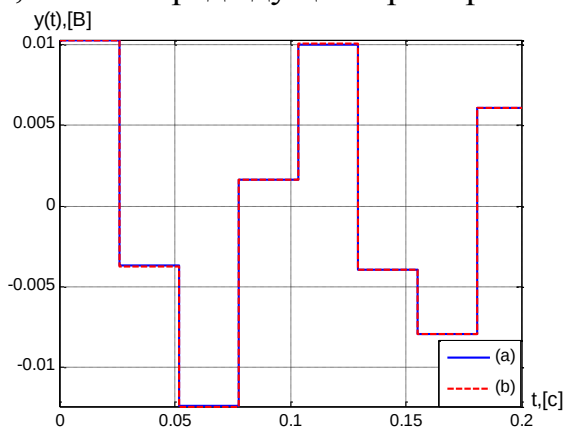


Рис. 8

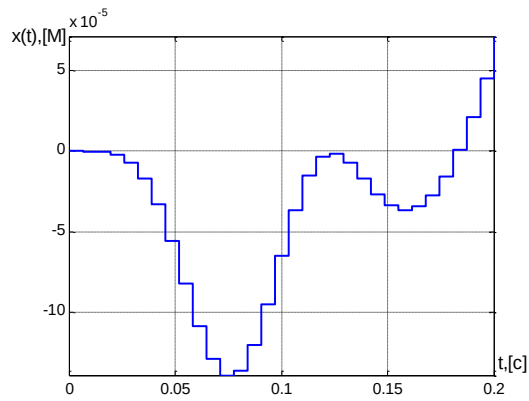


Рис. 9

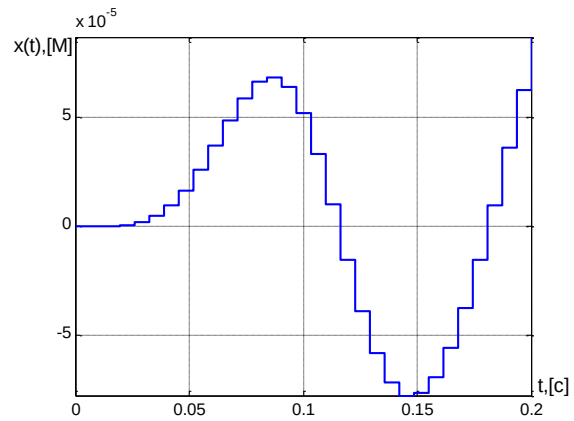


Рис. 10

Далее рассмотрим пример синтеза программного управления ЭГСП при случайном коэффициенте вязкого трения на золотнике h_3 со следующим математическим ожиданием и дисперсией: $m_{h_3} = 0,25$; $D_{h_3} = 0,001$. Результаты представлены на рис. 11-15, смысл которых и принятые обозначения те же.

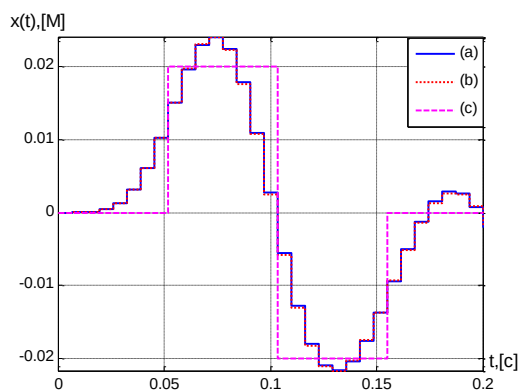


Рис. 11

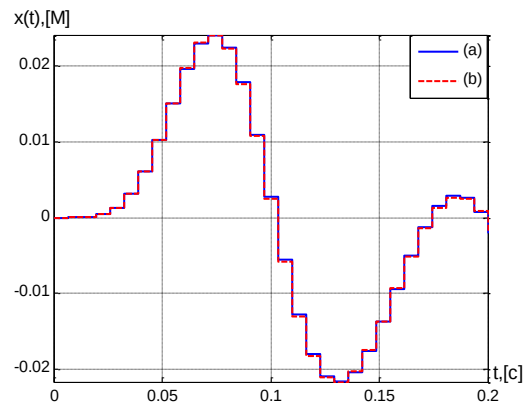


Рис. 12

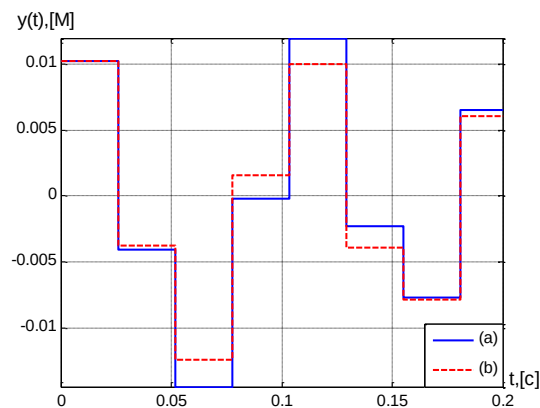


Рис. 13

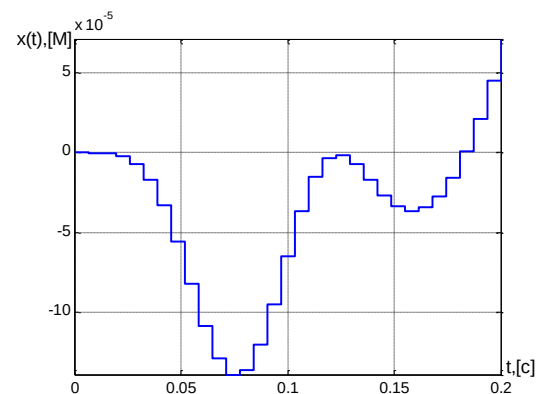


Рис. 14

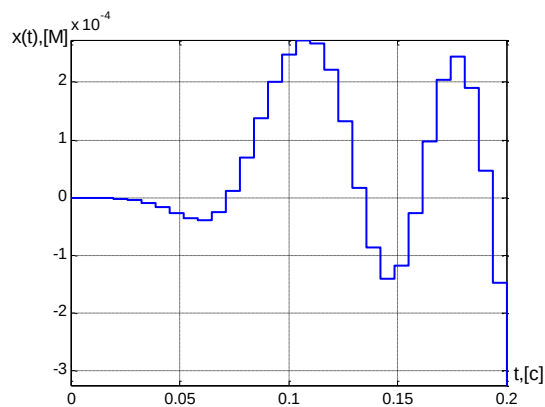


Рис. 15

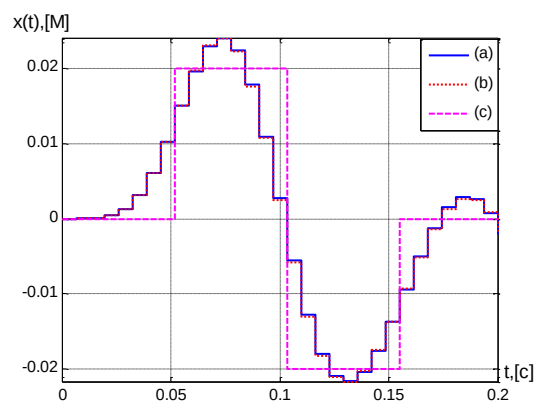


Рис. 16

В заключение рассмотрим пример синтеза программного управления ЭГСП при случайном коэффициенте вязкого трения на якоре электромеханического преобразователя $h_{\text{я}}$ со следующим математическим ожиданием и дисперсией: $m_{h_{\text{я}}} = 7 \cdot 10^{-5}$; $D_{h_{\text{я}}} = 8,7111 \cdot 10^{-11}$. Результаты представлены на рис. 16-20, смысл которых и принятые обозначения те же, что и в предыдущих примерах.

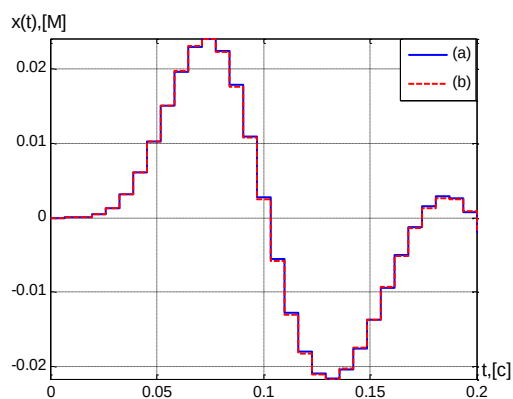


Рис. 17

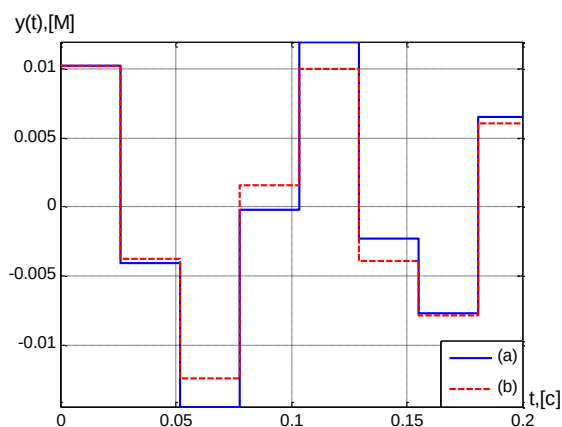


Рис. 18

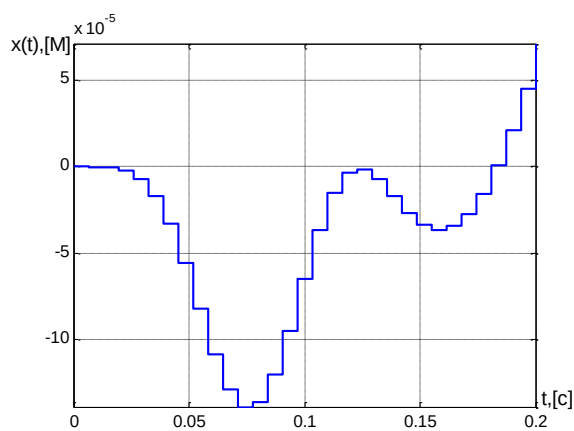


Рис. 19

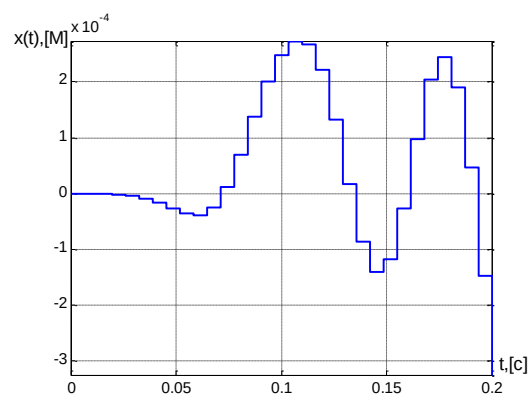


Рис. 20

Таким образом, в работе рассмотрен алгоритм поиска программных управлений для систем со случайными параметрами, основанный на ис-

пользовании аппарата проекционных аппроксимаций и методов математического программирования. Приведен ряд численных примеров, демонстрирующих возможность практического применения данного алгоритма для расчетов элементов систем автоматического управления.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Калужской области (гранты № 14-41-03071 и № 14-48-03013).

Список литературы

1. Пупков К.А., Егунов Н.Д., Макаренков А.М. и др. Теория и компьютерные методы исследования стохастических систем. — М.: Физматлит, 2003. — 400 с.

2. Макаренков А.М. Учет влияния случайных параметров в проекционных моделях систем автоматического управления // Известия ТулГУ. Серия Вычислительная техника, информационные технологии, системы управления. Вып.3. Системы управления. Том.2. — Тула: Изд-во ТулГУ, 2006. — С.30-38.

Тун Тун Чжо – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: htaminnyaw@gmail.com.

Тин Эй Чжо – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: tinayekyaw87@gmail.com.

Макаренков А.М. – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: amm2005@rambler.ru.

П.А. Васин, А.А. Похвалитова, В.П. Панов

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СЖАТИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

В современных цифровых измерительных системах используются самые разнообразные методы сжатия информации. Выбор метода сжатия в первую очередь зависит от типа информации подлежащей сжатию. Для измерительной информации, изменение которой можно представить в виде непрерывной функции без разрывов (например скорость движения автомобиля или температура в плавильной печи), можно применять метод сжатия основанный на алгоритмах с однопараметрической адаптацией по длине интервала представления (степени полинома). Эти алгоритмы обеспечивают автоматическое разбиение всего времени измерения на последовательные интервалы, длина каждого из которых определяется на основе анализа текущего сообщения, исходя из условия представления сообщения на этом интервале полиномом заданной степени с заданной допустимой погрешностью. Левая граница каждого очередного интервала фиксируется на правой границе предыдущего, а правая граница продвигается по мере поступления выборок сообщения до тех пор, пока обеспечивается допустимая погрешность приближения[1].

В данной статье рассмотрен вопрос разработки модели передающей части устройства сжатия измерительной информации основанный на экстраполяционных однопараметрических алгоритмах сжатия второго порядка. Моделирование производится с применением программного продукта Matlab + Simulink[1,2].

Экстраполирующий полином второго порядка имеет вид:

$\lambda(t) = a + b \cdot t + c \cdot t^2$, а его коэффициенты вычисляются по трём выборкам $(\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2)$, по формулам:

$$\begin{cases} a = \lambda_0 \\ b = -\frac{3}{2}\lambda_0 + 2 \cdot \lambda_1 - \frac{1}{2}\lambda_2, (1) \\ c = \frac{1}{2}\lambda_0 - \lambda_1 + \frac{1}{2}\lambda_2 \end{cases}$$

Передающее устройство должно выполнять следующий алгоритм функционирования:

1. Ретранслировать первые три выборки измерительной информации $(\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2)$ и одновременно запомнить их.

ния, импульс управляющий модулем Switch для трансляции выборок в канал связи, импульса в подсистему вычисления значений полинома. На вход этой подсистемы поступает импульс сброса из подсистемы сравнения.

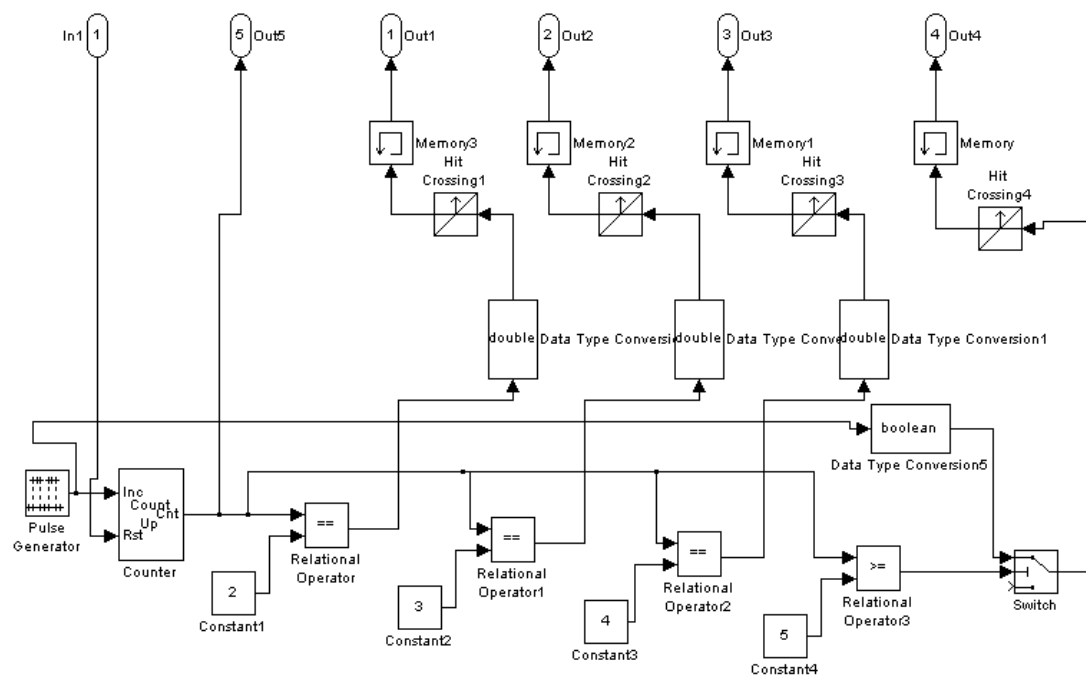


Рис.2 Подсистема синхронизации.

Подсистема вычисления значений полинома представлена на Рис.3.

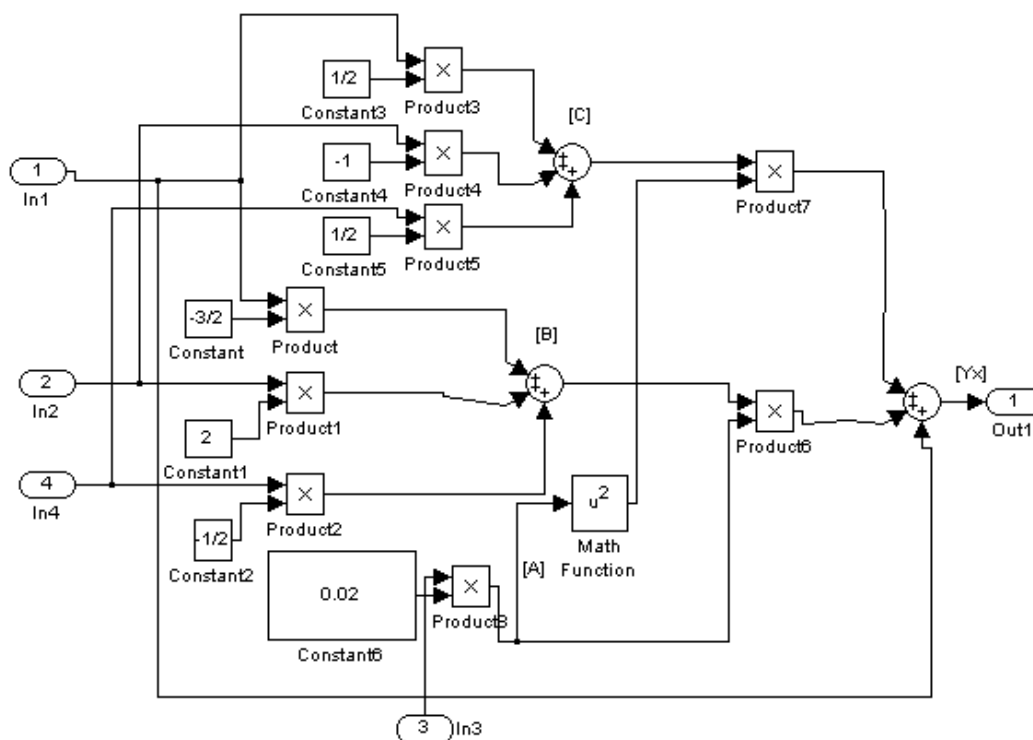


Рис.3 Подсистема вычисления значений полинома.

Подсистема построена с использованием следующих модулей библиотеки Simulink: - Product, Sum, Math Function, Constant. На входы 1, 2, 4 подаются значения выборок $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2$, на вход 3 – импульс из подсистемы синхронизации для начала подсчета, а на выходе 1 появляется результат вычисления значения полинома.

Результат работы модели приведен на Рис.4.

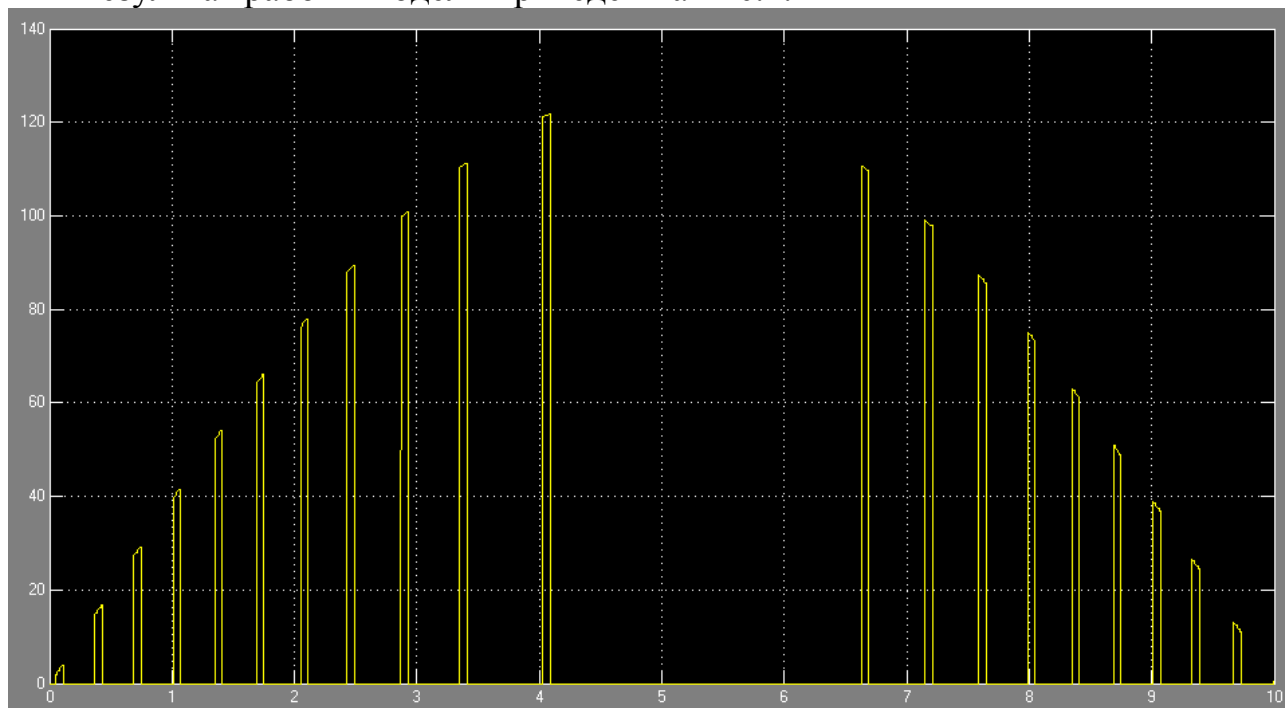


Рис.4 Осциллограмма выходного сигнала устройства сжатия информации.

Осциллограмма соответствует следующим условиям запуска: - Порог ошибки – 10В; Интервал между выборками – 0,02сек; Амплитуда входного сигнала – 127В; Частота входного сигнала 0,05Гц.

Из рисунка хорошо видно, как устройство реагирует на изменение амплитуды входного сигнала, по картинке можно примерно оценить коэффициент сжатия информации - $K_{сж} \sim 8$.

Список литературы

- [1] Новоселов О.Н. Основы теории и расчета информационно-измерительных систем / О. Н. Новоселов, А. Ф. Фомин – М., 1980. – 280с.
- [2] Дядюнов А.Н. Адаптивные системы сбора и передачи аналоговой информации. Основы теории / А. Н. Дядюнов, Ю. А. Онищенко, А. И. Сенин – М., 1988. – 288 с.

Васин Павел Александрович – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: gdrnac@gmail.com.

Похвалитова Анна Александровна – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: pokhvalitova@inbox.ru.

Панов Василий Павлович – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: vasilii.panov2014@yandex.ru.

А.М. Макаренков, Мьо Паинг Сат

О ВОЗМОЖНОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО АЛГОРИТМА АНАЛИЗА ОДНОГО КЛАССА СИСТЕМ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ СЛУЧАЙНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Рассматривается задача определения статистических характеристик выходного сигнала одного класса стохастических систем с распределенными параметрами, описываемых дифференциальными уравнениями в частных производных с коэффициентами в виде случайных величин или случайных функций. Решение данной задачи может быть выполнено методом усреднения проекционных моделей [1], что дает возможность построения эффективного параллельного вычислительного алгоритма за счет представления решения в виде матричного ряда с независимо вычисляемыми членами.

Исходная модель системы описывается уравнением вида

$$\frac{\partial^2 z(t, x)}{\partial t \partial x} + a(t, x) \frac{\partial z(t, x)}{\partial t} + b(t, x) \frac{\partial z(t, x)}{\partial x} + c(t, x) z(t, x) = y(t, x) \quad (1)$$

на прямоугольной области $S = [t_0, t_f] \times [x_0, x_f]$, которое удовлетворяет дополнительным условиям

$$z(t_0, x) = \alpha(x) \text{ и } z(t, x_0) = \varphi(t), \quad (2)$$

при этом $\alpha(x_0) = \varphi(t_0) = k$. Коэффициенты $a(t, x)$, $b(t, x)$ и $c(t, x)$, а также входное воздействие $y(t, x)$, краевые условия (2) и выходной сигнал $z(t, x)$ считаются нестационарными случайными процессами. При этом коэффициенты, краевые условия и входное воздействие считаются статистически независимыми и имеющими нормальный закон распределения. Постановка краевой задачи считается корректной для каждой реализации случайного процесса $y(t, x)$.

Требуется определить математическое ожидание $m_z(t, x)$ и корреляционную функцию $R_{zz}(t_1, x_1; t_2, x_2)$ выходного сигнала системы по заданным статистическим характеристикам $m_y(t, x)$ и $R_{yy}(t_1, x_1; t_2, x_2)$ входного воздействия и соответствующим статистическим характеристикам случайных коэффициентов $m_a(t, x)$, $R_{aa}(t_1, x_1; t_2, x_2)$; $m_b(t, x)$, $R_{bb}(t_1, x_1; t_2, x_2)$; $m_c(t, x)$, $R_{cc}(t_1, x_1; t_2, x_2)$.

Особенностью рассматриваемой модели является возможность перехода от дифференциального уравнения (1) к интегральному уравнению 2-го рода путем двукратного интегрирования (1) в пределах от t_0 до t и от x_0 до x . Используя матричные операторы интегрирования по переменной t и по переменной x , а также матричные операторы умножения, возможен переход от интегрального уравнения к матрично-операторному уравнению вида

$$\begin{aligned} \mathbf{C}^z - \mathbf{C}^0 + \mathbf{P}^x [\mathbf{U}^a - \mathbf{U}^\alpha] \mathbf{C}^z - \mathbf{P}^t \mathbf{P}^x \mathbf{U}^{a_t} \mathbf{C}^z + \mathbf{P}^t [\mathbf{U}^b - \mathbf{U}^\varphi] \mathbf{C}^z - \\ - \mathbf{P}^t \mathbf{P}^x \mathbf{U}^{b_x} \mathbf{C}^z + \mathbf{P}^t \mathbf{P}^x \mathbf{U}^c \mathbf{C}^z = \mathbf{P}^t \mathbf{P}^x \mathbf{C}^y, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\mathbf{C}^z$ и $\mathbf{C}^y$ – проекционные характеристики выходного сигнала и входного воздействия; $\mathbf{P}^t$ и $\mathbf{P}^x$ – матричные операторы интегрирования по переменным t и x ; $\mathbf{U}$ – матричный оператор умножения на функцию двух переменных, указанную индексом, при этом индексы a_t и b_x обозначают частные производные функций $a(t, x)$ и $b(t, x)$; $\mathbf{C}^0$ – матрица, учитывающая краевые условия (2). Матрицы $\mathbf{C}^z$, $\mathbf{C}^y$, $\mathbf{C}^0$ имеют размер pp и представляют собой растянутые в столбцы квадратные матрицы размера $p \times p$, то есть вектор-столбцы, составленные из последовательности строк этих квадратных матриц; p – число базисных функций. Матрицы $\mathbf{P}^t$, $\mathbf{P}^x$, $\mathbf{U}$ имеют размер $pp \times pp$.

Матрично-операторное уравнение (3) является результатом проекционной аппроксимации математической модели системы с распределенными параметрами. Перепишем уравнение (3) в виде

$$(\mathbf{I} + \mathbf{A}^z) \mathbf{C}^z = \mathbf{P}^t \mathbf{P}^x \mathbf{C}^y + \mathbf{C}^0. \quad (4)$$

Основываясь на факте обратимости матрицы $(\mathbf{I} + \mathbf{A}^z)$ при достаточно больших p , решение уравнения (4) можно записать в виде

$$\mathbf{C}^z = (\mathbf{I} + \mathbf{A}^z)^{-1} (\mathbf{P}^t \mathbf{P}^x \mathbf{C}^y + \mathbf{C}^0). \quad (5)$$

Решение, представленное в форме (5), позволяет записать следующие выражения для проекционных характеристик математического ожидания и корреляционной функции выходного сигнала системы:

$$\mathbf{C}^{m_z} = \mathbf{M}[\mathbf{C}^z]; \quad \mathbf{C}^{R_{zz}} = \mathbf{M}[\mathbf{C}^z (\mathbf{C}^z)^T] - \mathbf{C}^{m_z} (\mathbf{C}^{m_z})^T. \quad (6)$$

Поскольку коэффициенты исходного уравнения (1) являются случайными функциями, матрица $(\mathbf{I} + \mathbf{A}^z)^{-1}$ в (5) также является случайной и должна осредняться. Проблему осреднения этой обратной матрицы можно решить, если воспользоваться приемом ее разложения в матричный ряд [1]. Представляя матрицу $\mathbf{A}^z$ в виде суммы детерминированной матрицы $\bar{\mathbf{A}}^z$ и случайной матрицы $\tilde{\mathbf{A}}^z$, что соответствует представлению случайных коэффициентов исходного уравнения в виде суммы детерминированной и случайной составляющих, запишем выражение для разложения обратной матрицы в ряд

$$(\mathbf{I} + \bar{\mathbf{A}}^z + \tilde{\mathbf{A}}^z)^{-1} = \mathbf{A} \sum_{i=1}^{\infty} (-1)^i (\tilde{\mathbf{A}}^z \mathbf{A})^i, \quad (7)$$

где $\mathbf{A} = (\mathbf{I} + \bar{\mathbf{A}}^z)^{-1}$ – детерминированная обратная матрица.

Представление обратной матрицы в выражении для решения (5) в виде матричного ряда (7) позволяет выполнить операцию осреднения этого решения в соответствии с выражениями (6). При этом математические ожидания переменных или постоянных случайных коэффициентов войдут в выражение для вычисления детерминированной матрицы $\bar{A}^z$ в виде соответственно операционных матриц умножения на функции математических ожиданий или постоянных значений математических ожиданий.

Процедуру осреднения решения (5) можно упростить, если использовать представление переменных случайных коэффициентов в виде канонических разложений по двумерным базисам неслучайных координатных функций.

Искомые статистические характеристики выходного сигнала восстанавливаются по своим проекционным характеристикам, определяемым выражениями (6).

Рассмотренный метод позволяет построить эффективный вычислительный алгоритм статистического анализа для данного класса систем с распределенными параметрами, опирающийся на использование матричных операций и допускающий распараллеливание вычислений выражений (6) за счет возможности независимого вычисления членов ряда (7). Данный алгоритм хорошо подходит для реализации на вычислительной платформе Grid [2], поскольку допускает группирование независимо вычисляемых членов ряда и их параллельное вычисление на отдельных процессорах, то есть распараллеливание относительно крупных частей алгоритма и оформление их в виде подзадач, решаемых на отдельных компьютерах сети.

Реализацию описанного алгоритма предполагается выполнить на локальной сети персональных компьютеров с использованием возможностей параллельных вычислений, предоставляемых пакетом MATLAB (MathWorks, Inc.). При этом могут быть использованы пакеты расширений Distributed Computing Toolbox и Distributed Computing Engine [3].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Калужской области (гранты № 14-41-03071 и № 14-48-03013).

Список литературы

1. Пупков К.А., Егупов Н.Д., Макаренков А.М. и др. Теория и компьютерные методы исследования стохастических систем. — М.: Физматлит, 2003. — 400 с.
2. Воеводин В.В., Воеводин Вл.В. Параллельные вычисления. — СПб.: «БХВ-Петербург», 2002. — 608 с.
3. Оленёв Н.Н., Печёнкин Р.В., Чернецов А.М. Параллельное программирование в MATLAB и его приложения. — М.: Вычислительный центр им. А.А. Дородницына РАН, 2007. — 121 с.

Макаренков А.М. — канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: amm2005@rambler.ru.

Мью Паинг Сат — аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: myopaingsatt85@gmail.com.

Тин Эй Чжо, Тун Тун Чжо, А.М. Макаренков

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ PID-РЕГУЛЯТОРОВ С УЧЕТОМ СЛУЧАЙНОСТИ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Разработка методов и алгоритмов автоматизированного проектирования сложных технических систем является одним из актуальных направлений развития современных средств информационной поддержки конструкторской деятельности. В работе предлагается методика компенсации влияния фактора случайности параметров объекта в замкнутом контуре системы управления с последовательно включенным PID-регулятором. Обычно при расчете PID-регуляторов такую возможную случайность не учитывают, то есть пренебрегают одним из факторов, влияющих на качество разработки систем автоматического управления. Но если к точности системы управления предъявляются повышенные требования, влияние указанного фактора случайности должно быть учтено, поскольку случайность параметров элементов системы управления порождает дополнительную регулярную составляющую в математическом ожидании ее выходного сигнала.

Задача оптимизации параметров регулятора формулируется следующим образом. Требуется определить оптимальные параметры PID-регулятора, обеспечивающие заданные динамические характеристики системы управления при условии, что параметры объекта управления могут изменяться случайным образом относительно своих номинальных значений вследствие влияния таких факторов, как, например, изменение температуры, износ, технологический разброс. Необходимость учета возможности случайных изменений параметров проектируемой системы управления ведет к принципиальному усложнению ее математической модели и переходу в класс стохастических систем. Одним из подходов к построению подобных моделей является использование проекционных (спектральных) методов, основанных на конечномерной аппроксимации математической модели системы [1].

В [1] показано, что если требуется обеспечить заданное качество переходного процесса системы по математическому ожиданию выходного сигнала при ограничении на его дисперсию, то задача оптимизации параметров регулятора может быть сведена к минимизации функционала следующего вида

$$J(\mathbf{K}) = \sum_{i=1}^p [c_i^{m_{x\varnothing}} - c_i^{m_{xP}}(\mathbf{K})]^2, \quad (1)$$

где элементы $c_i^{m_{xP}}(\mathbf{K})$ вектора проекционной характеристики математического ожидания выходного сигнала $\mathbf{C}^{m_{xP}}(\mathbf{K})$ вычисляются с помощью компьютерной модели, описывающей объект и корректирующее устройство как систему со случайными параметрами; $\mathbf{K}$ – вектор оптимизируемых параметров регулятора, который для PID-регулятора состоит из трех компонентов – k_P, k_I, k_D . Элементы $c_i^{m_{x\varnothing}}$ являются элементами вектора $\mathbf{C}^{m_{x\varnothing}}$ проекционной характеристики математического ожидания эталонного переходного процесса.

Минимизация функционала (1) выполняется при ограничении

$$\max_{0 \leq t \leq T} D_X(t, \mathbf{K}) \leq D_{\max},$$

обеспечивающем допустимый уровень дисперсии выходного сигнала. Дисперсия $D_X(t, \mathbf{K})$ также вычисляется с помощью компьютерной модели стохастической системы.

В качестве примера применения данного подхода рассмотрим задачу оптимизации параметров PID-регулятора в составе контура управления электрогидравлического следящего привода (ЭГСП). Данная система описываемой математической моделью следующего вида:

$$y^{(9)}(t) + a_8 y^{(8)}(t) + a_7 y^{(7)}(t) + a_6 y^{(6)}(t) + a_5 y^{(5)}(t) + a_4 y^{(4)}(t) + a_3 y^{(3)}(t) + a_2 y''(t) + a_1 y'(t) + a_0 y(t) = b_2 u''(t) + b_1 u'(t) + b_0 u(t), \quad (2)$$

которой соответствует структурная схема, представленная на рис. 1.

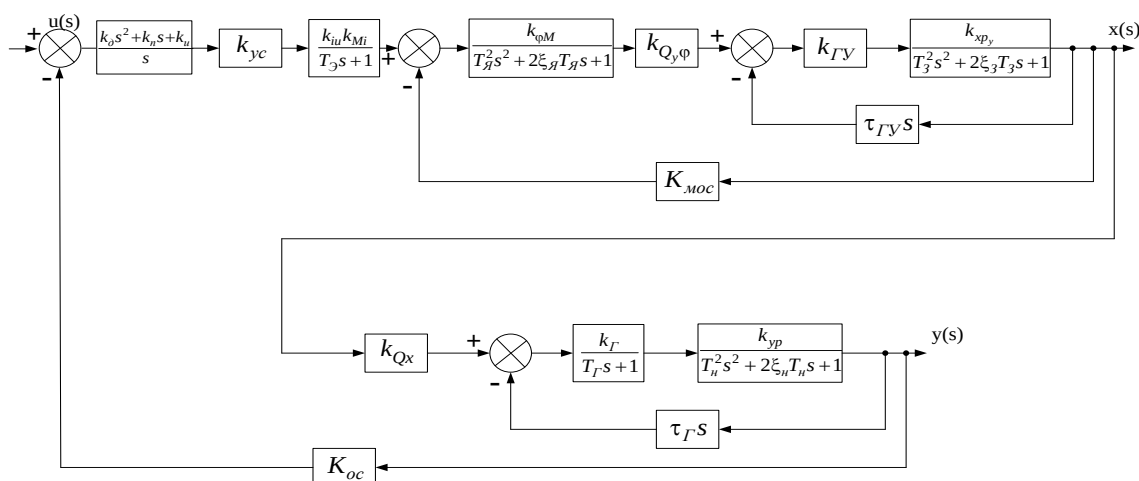


Рис. 1

Требуемые динамические характеристики системы управления заданы функцией эталонного (желаемого) переходного процесса

$y_{\mathcal{D}}(t) = 4 \cdot 10^{-3} (1 - e^{-20t})$, который должен иметь место при подаче на вход системы ступенчатого сигнала $u(t) = 5 \cdot 1(t)$.

Оптимизацию параметров $k_{\Pi}, k_{И}, k_{Д}$ будем выполнять в следующем порядке. На первом этапе найдем значения данных параметров, обеспечивающие наилучшее приближение выходного сигнала системы к эталонному переходному процессу $y_{\mathcal{D}}(t)$ при условии, что объект управления не имеет случайных параметров. Принимая за начальные значения $k_{\Pi} = 1., k_{И} = 0., k_{Д} = 0.$, т.е. $\mathbf{K} = [1., 0., 0.]$, находим методом Нелдера-Мида значения $k_{\Pi} = 1.2932, k_{И} = 1.2608, k_{Д} = 0.0386$.

В качестве случайного параметра сначала рассмотрим коэффициент вязкого трения на золотнике. Чтобы учесть влияние данного случайного параметра положим, что он является нормально распределенной случайной величиной, для которой определены математическое ожидание $m_{h_3} = 0,25$ и дисперсия $D_{h_3} = 0,001$. Решая задачу анализа модели ЭГСП (2) методом усреднения проекционных моделей [1] с учетом случайности коэффициента h_3 для найденных на предыдущем этапе значений параметров PID-регулятора ($k_{\Pi} = 1.2932, k_{И} = 1.2608, k_{Д} = 0.0386$), найдем математическое ожидание выходного сигнала ЭГСП, представленное на рис. 2 пунктирной линией.

Далее выполним второй этап, на котором попытаемся минимизировать влияние фактора случайности параметра h_3 . Для этого еще раз минимизируем функционал (1), приняв за начальные значения вектора $\mathbf{K}$ значения, найденные на первом этапе, когда мы полагали, что параметр h_3 не является случайным, т.е. примем $\mathbf{K} = [1.2932, 1.2608, 0.0386]$. В результате находим следующие скорректированные, т.е. оптимальные в смысле минимизации отклонения выходного сигнала ЭГСП от желаемого значения параметры PID-регулятора: $k_{\Pi} = 1.2952, k_{И} = 1.2453, k_{Д} = 0.0382$. График математического ожидания выходного сигнала ЭГСП при данных значениях параметров PID-регулятора представлен на рис. 2 непрерывной линией.

Видно, что скорректированные значения параметров PID-регулятора отличаются от найденных ранее, за счет чего обеспечивается компенсация влияния фактора случайности параметра h_3 .

На рис. 3 пунктирной линией изображен график разности $y(t) - m_y^*(t)$, где $y(t)$ – выходной сигнал ЭГСП без случайного параметра для найденных на первом этапе параметров PID-регулятора; $m_y^*(t)$ – математическое ожидание выходного сигнала ЭГСП с учетом фактора случайности параметра h_3 . На этом же рисунке непрерывной линией показан график этой

же разности, где $m_y^*(t)$ – математическое ожидание выходного сигнала ЭГСП после описанной выше коррекции значений параметров PID-регулятора.

На рис. 4 и рис. 5 представлены те же графики, что и на рис. 3, но в качестве случайного параметра здесь рассматривается коэффициент передачи цепи электрической обратной связи k_{oc} , для которого заданы $m_{k_{oc}} = 0,01$, $D_{k_{oc}} = 5 \cdot 10^{-4}$ (рис. 4) и коэффициент передачи усилителя сигнала ошибки k_{yc} , для которого заданы $m_{k_{yc}} = 50$, $D_{k_{yc}} = 44$ (рис. 5). При этом значения скорректированных параметров PID-регулятора следующие: $k_{II} = 1.3055$, $k_{II} = 1.2626$, $k_D = 0.0384$ (при случайном k_{oc}) и $k_{II} = 1.3623$, $k_{II} = 1.3372$, (при случайном k_{yc}).

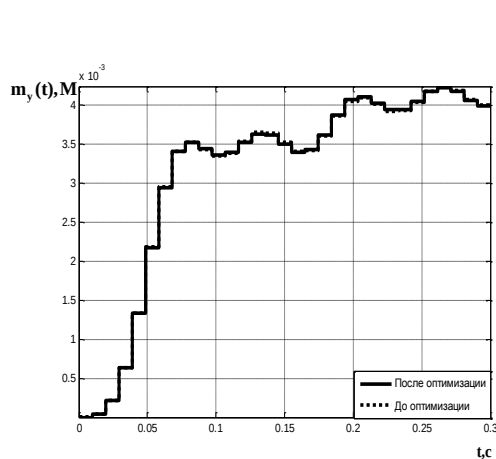


Рис. 2

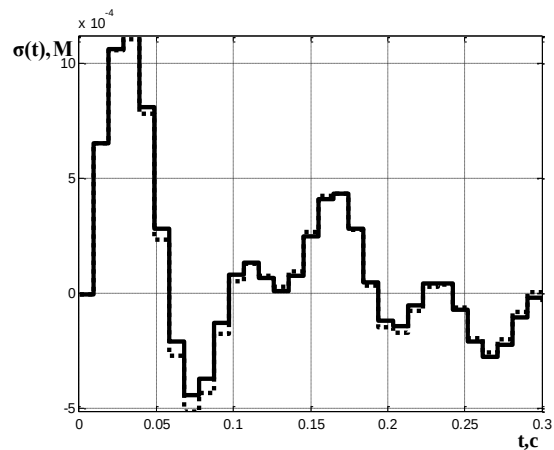


Рис. 3.

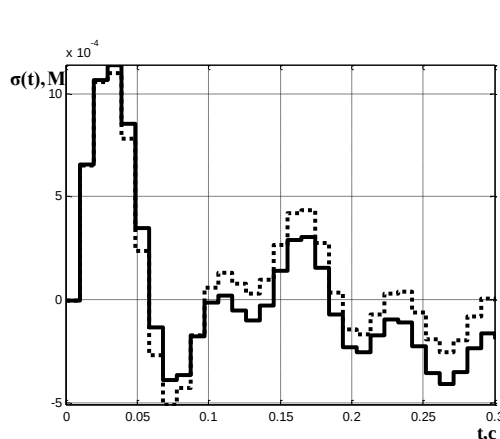


Рис.4.

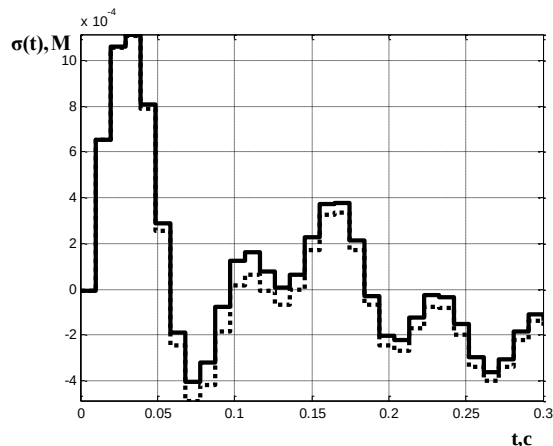


Рис.5.

Таким образом, предлагается метод оптимизации параметров элементов систем автоматического управления, позволяющий учесть влияние случайности параметров объекта управления. По сравнению с традиционным подходом к синтезу последовательных корректирующих устройств,

предлагаемый метод обеспечивает лучшее качество регулирования и, как следствие, более высокую точность работы системы управления в целом.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Калужской области (гранты № 14-41-03071 и № 14-48-03013).

Список литературы

1. *Пупков К.А., Егупов Н.Д., Макаренков А.М. и др. Теория и компьютерные методы исследования стохастических систем.* — М.: Физматлит, 2003. — 400 с.

Тин Эй Чжо – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: tinayekyaw87@gmail.com.

Тун Тун Чжо – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: htaminncyaw@gmail.com.

Макаренков А.М. – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: amm2005@rambler.ru.

А.А. Брынза, М.О. Корлякова

ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ СИСТЕМ ПОИСКА И РАСПОЗНАВАНИЯ ДОРОЖНЫХ ЗНАКОВ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Современные системы безопасности на дороге для автомобилей все чаще функционируют самостоятельно. Системы экстренного торможения, курсовой устойчивости и т.п. стали рядовым явлением. Другой аспект безопасного перемещения автомобилей в уличной среде связан с анализом дорожной обстановки [1]. Причем, если системы предотвращения столкновений могут работать за счет пространственных методов анализа среды на основе детектирования препятствий, то системы анализа сигналов (светофоры, знаки, другие автомобили) может работать только на основе визуального анализа среды [2]. Таким образом, необходимо обеспечивать своевременный и качественный анализ визуальных сигналов в среде бортовой вычислительной системы. Рассмотрим особенности задачи анализа дорожных знаков.

Дорожная среда наблюдается через видеокамеру, установленную на борту движущегося автомобиля. Разрешение таких систем составляет около 1000x1000 пикселей. Автомобиль движется в естественной среде, т.е. существуют помехи в форме перекрытия другими объектами, снега, грязи и т.п. Скорость автомобиля не превышает 120 км./ч. Необходимо обеспечить распознавание на скорости за время, позволяющее обеспечить необходимый маневр.

Будем проводить поиск всех запрещающих знаков, поскольку они представляют наибольшую опасность. Представим схему процедуры распознавания в следующем виде:

1. Получение кадра с видеокамеры
2. Предобработка
3. Поиск объектов потенциальных знаков (по форме панели знака)
4. Обработка и формирование описание объектов кандидатов.
5. Анализ кандидатов (решение задачи классификации)

Рассмотрим подходы к реализации всех представленных этапов работы системы анализа дорожных знаков.

Основная задача для систем распознавания образов заключается в выборе и проведении наиболее подходящих для данной задачи процессов сегментации и распознавания. Рассмотрим основные подходы к решению задачи поиска объектов известной формы, типа изображения и размера.

Наибольшую известность, в качестве метода поиска известных объектов в системах навигации, слежения, промышленных роботов, приобрели корреляционные методы анализа изображений [4]. Основными их достоин-

ствами является возможность эффективной аппаратной реализации. Однако они демонстрируют чувствительность к изменчивости ориентации объектов и их ракурсу. Кроме того, необходимо обеспечивать предобработку для исключения шумов и инверсий интенсивности кадра.

Наиболее помехоустойчивы при действии, как случайных помех, так и локальных помех являются алгоритмы, основанные на методе частных корреляций [4]. При этом частные коэффициенты корреляций, полученные для отдельных фрагментов эталона в сигнальном пространстве могут рассматриваться как признаки (в общем случае разно шкальные). Обработка таких признаков, т.е. их свертка, зависит от типа изображений, помеховой обстановки (например, степени заслонения полезного изображения, наличия ложных изображений в поле зрения) и может быть осуществлена методами проверки статистических гипотез. Рассмотрим структуру алгоритма ориентированного на решение задачи поиска эталона в рамках модели частных корреляций.

Первый этап – получение видеокadra с установленного на борту автомобиля устройства

Второй этап – предобработка, заключается в повышении качества изображения и исключению мелких шумов. Можно использовать следующие методы (медианное сглаживание, преобразование Фурье и т.д).

Третий этап – поиск областей потенциального размещения знака. Необходимо помнить, что знак имеет стандартные размеры и форму, но может быть расположен под различными ракурсами и в широком диапазоне мест размещения. Это подразумевает создание эталонов в широком спектре положений и ракурсов. Таким образом, необходимо определить все множество эталонов с учетом требований к быстродействию системы (нужно уменьшать число эталонов) и к качеству анализа (нужно увеличивать число эталонов). При полностью заданном множестве эталонов многошаговая корреляция путем сканирования входного поля зрения является, по сути, полным перебором в пространстве сигналов. Поэтому эту процедуру можно считать базовой, потенциально наиболее помехоустойчивой, хотя и самой трудоемкой.

Четвертый этап – обработка областей кандидатов. Выделив потенциально похожие на знаки объекты среды, необходимо описать их в форме пригодной для решения задачи классификации. Это подразумевает процедуры нормализации изображений и выделения признаков. В качестве системы признаков следует выбирать инвариантные к ракурсу методы. Например, меры некруглости или признаки формы Фурье.

Пятый этап - мы получаем некоторые классы эталонных дорожных знаков, например (не знак, знак 1, знак N). Процедура классификации может быть реализована на основе идей метода ближайшего соседа за счет сравнения векторов описаний объектов

Представленный подход к решению задачи распознавания дорожных знаков может быть настроен на любое разумное (10-20) число эталонов. Современные бортовые вычислители обеспечивают высокую производительность, что гарантирует возможность эффективного решения поставленной задачи.

Список литературы

1) S. Ozbay and E. Ercelebi, Automatic Vehicle Identification by Plate Recognition A Neural Network// World Academy of Science, Engineering and Technology, vol. 9, (2005), pp.222-225

2) Девятериков Е.А., Михайлов Б.Б. : Управление движением мобильного робота с использованием данных визуального одометра // Робототехника и техническая кибернетика, №1,2013 стр.22-26.

3) Ивашина Е.А, Корлякова М.О., Пилипенко А.Ю., Филимонков А.А. Нейросетевой подход к формированию систем технического зрения мобильных объектов \ Труды ФГУП "НПЦАП". Системы и приборы управления. 2013. № 3. С. 43-53

4) Сырямкин В.И., Шидловский В.С. Корреляционно – экстремальные радионавигационные системы. – Томск: Изд-во Том. Ун-та, 2010. – 316 с.

Брынза Андрей Андреевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: wolf_93_21@mail.ru.

Корлякова Мария Олеговна – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: mkorlyakova@yandex.ru.

Аунг Чжо Со, Макаренков А.М., Широкова З.Г.

ПРИМЕНЕНИЕ УСРЕДНЕННЫХ ПРОЕКЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПЕРЕМЕННЫХ СЛУЧАЙНЫХ ПАРАМЕТРОВ СТОХАСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Построение математических моделей высокоточных систем автоматического управления требует учета ряда факторов случайного характера, действующих в реальных условиях эксплуатации. Это приводит к необходимости рассмотрения системы управления в классе стохастических систем и делает актуальной задачу идентификации случайных параметров ее математической модели, которая используется на этапе разработки новых систем автоматического управления в качестве основы всех расчетных процедур.

Одним из современных подходов к построению математических моделей и решению задач теории управления является использование проекционных методов и аппарата матричных операторов [1]. Данные методы отличает возможность построения эффективных вычислительных алгоритмов. В настоящей работе рассматривается решение задачи идентификации неизвестных параметров корреляционных функций переменных случайных коэффициентов следующего дифференциального уравнения, рассматриваемого в качестве математической модели стохастической системы:

$$x^{(n)}(t) + \sum_{i=0}^{n-1} a_i(t) x^{(i)}(t) = \sum_{j=0}^m b_j(t) y^{(j)}(t), \quad (1)$$

где все коэффициенты $a_i(t)$, $b_j(t)$ в (1) являются случайными функциями времени, и начальные условия также полагаются случайным. При этом вид корреляционных функций случайных коэффициентов уравнения (1) полагается известным, например,

$$R_{a_i a_i}(t_1, t_2) = D e^{-b|t_1 - t_2|}, \quad (2)$$

где неизвестными параметрами считаются D и b .

Предлагается подход, основанный на проекционной аппроксимации модели (1) с последующим применением процедуры аналитического усреднения, что позволяет свести задачу идентификации в указанной постановке к минимизации функционала вида

$$J(\mathbf{K}) = \left[\sum_{i=1}^p \left[c_i^{EM}(\mathbf{K}) \right]^2 \right]^{1/2} + \left[\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^p \left[c_{ij}^E(\mathbf{K}) \right]^2 \right]^{1/2}, \quad (3)$$

где $c_i^{EM}(\mathbf{K})$ и $c_{ij}^E(\mathbf{K})$ – элементы матриц проекционных характеристик $\mathbf{C}^{EM}(\mathbf{K})$ и $\mathbf{C}^E(\mathbf{K})$ соответственно, вычисляемых как

$$\mathbf{C}^{EM}(\mathbf{K}) = \mathbf{C}^{m_x^u} - \mathbf{C}^{m_x^p}(\mathbf{K}), \quad \mathbf{C}^E(\mathbf{K}) = \mathbf{C}^{R_{xx}^u} - \mathbf{C}^{R_{xx}^p}(\mathbf{K}),$$

где $\mathbf{C}^{m_x^u}$ и $\mathbf{C}^{m_x^p}$ – проекционные характеристики функции математического ожидания измеренного и расчетного выходного сигнала системы, $\mathbf{C}^{R_{xx}^u}$ и $\mathbf{C}^{R_{xx}^p}$ – проекционные характеристики измеренной и расчетной корреляционной функции ее выходного сигнала; $\mathbf{K}$ – искомые параметры корреляционной функции одного из случайных коэффициентов уравнения (1), например, D и b в (2). Проекционные характеристики $\mathbf{C}^{m_x^p}$ и $\mathbf{C}^{R_{xx}^p}$ вычисляются с помощью усредненной проекционной модели стохастической системы (1).

Минимизация функционала (3) методом Нелдера-Мида относительно значений элементов вектора $\mathbf{K}$ с возможным наложением некоторых необходимых ограничений позволяет решить поставленную задачу идентификации.

Для вычисления проекционных характеристик $\mathbf{C}^{m_x^p}$ и $\mathbf{C}^{R_{xx}^p}$, входящих в функционал (3), используется так называемая усредненная проекционная модель системы (1), описанная в [2], в которой переменные случайные коэффициенты в виде случайных процессов представлены их каноническими разложениями, то есть в виде линейной комбинации некоррелированных случайных величин a_{is} и b_{js} , являющихся коэффициентами канонических разложений этих случайных процессов по системам неслучайных координатных функций $\Psi_{is}^a(t)$ и $\Psi_{js}^b(t)$:

$$a_i^{cl}(t) = \sum_{s=1}^r a_{is} \Psi_{is}^a(t), \quad i = \overline{0, n-1}; \quad b_j^{cl}(t) = \sum_{s=1}^r b_{js} \Psi_{js}^b(t), \quad j = \overline{0, k-1}, \quad (4)$$

где случайные коэффициенты a_{is} и b_{js} имеют нулевые математические ожидания и дисперсии, равные единице. Алгоритм вычисления проекционных характеристик координатных функций канонических разложений (4) с использованием алгоритма Холецкого можно найти в [2].

Для оценки точности описанного метода идентификации был выполнен вычислительный эксперимент, в котором параметры корреляционных функций случайных коэффициентов модели (1) считались известными. Это является искусственным условием, поскольку измерение выходного сигнала реальной стохастической системы заменяется его вычислением по математической модели. При этом заданные параметры корреляционных функций выступают в качестве эталонного значения, позволяющего оценить точность решения задачи идентификации.

В ходе упомянутого вычислительного эксперимента сначала решалась задача статистического анализа методом статистических испытаний для заданных значений параметров корреляционной функции одного из коэффициентов уравнения (1), который считался случайным, в результате чего находились значения матриц $C^{m_x^u}$ и $C^{R_{xx}^u}$. Остальные коэффициенты (1) считались неслучайными константами, равными указанным ниже математическим ожиданиям. При этом вид данной корреляционной функции полагался известным и в данном эксперименте соответствовал (2). Затем решалась задача идентификации путем минимизации функционала (3) методом Нелдера-Мида, в результате чего находились параметры, составляющие вектор K . Сравнение заданных значений параметров D и b корреляционной функции (2) и найденных в результате минимизации функционала (3) позволяет сделать некоторые выводы о точности предлагаемого алгоритма идентификации. В частности, ошибка идентификации во всех выполненных экспериментах не превышала 5%.

Все вычислительные эксперименты выполнялись на персональном компьютере со следующими техническими характеристиками: CPU Intel® Core™ i7 870 @ 2.93GHz, RAM 3.5 GB. При этом время решения задачи идентификации для всех рассматриваемых ниже примеров не превышало 10 секунд.

Результаты идентификации для модели (1) при $n = 2$, $m = 0$ представлены в табл. 1.1-1.3, в которых показана зависимость точности решения задачи идентификации от учитываемого числа реализаций N случайного процесса $y(t)$ (выходной сигнал модели) на интервале исследования $T = 20$ с. Параметры корреляционной функции (2), для которых вычислялись реализации случайного процесса $x(t)$ в ходе статистических испытаний, имели значения $D = 0.05$ и $b = 1$. Математические ожидания случайных параметров были приняты следующими: $m_{a_2} = 0.5$, $m_{a_1} = 0.5$, $m_{a_0} = 4$.

$m_{a_2} = 0.5$ Таблица 1.1

N	$D, \quad b$
2000	0.0523, 1.0883
1000	0.0442, 0.9296
500	0.0530, 1.0314
250	0.0402, 0.9412

$m_{a_1} = 0.5$ Таблица 1.2

N	$D, \quad b$
2000	0.0503, 1.0117
1000	0.0493, 1.0017
500	0.0513, 0.9117
250	0.0473, 0.9011

$m_{a_0} = 4$ Таблица 1.3

N	$D, \quad b$
2000	0.0503, 1.0805
1000	0.0553, 0.9223
500	0.0450, 1.0506
250	0.0492, 1.0805

На рис.1 и 2 представлены графики математического ожидания и корреляционной функции выходного сигнала модели со случайным параметром m_{a_2} .

$R_{xx}(t)$

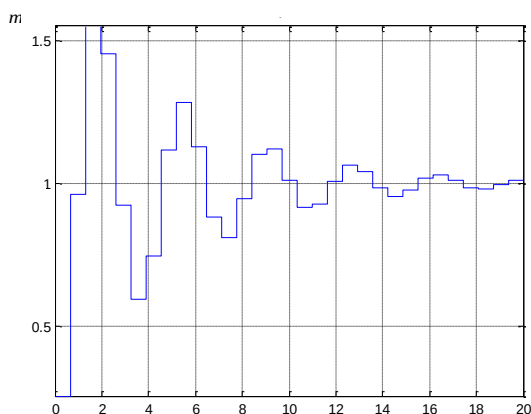


Рис. 1

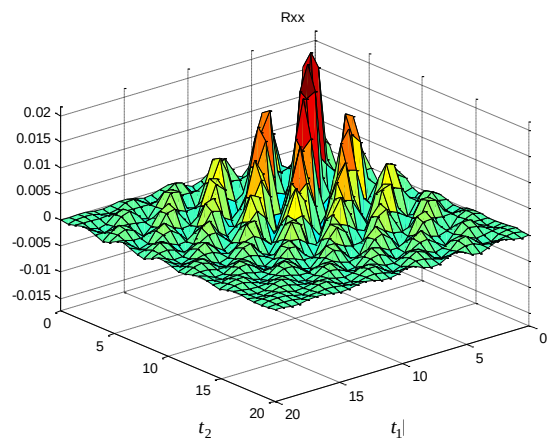


Рис. 2

На рис.3 и 4 представлены графики математического ожидания и корреляционной функции выходного сигнала модели со случайным параметром m_{a_1} .

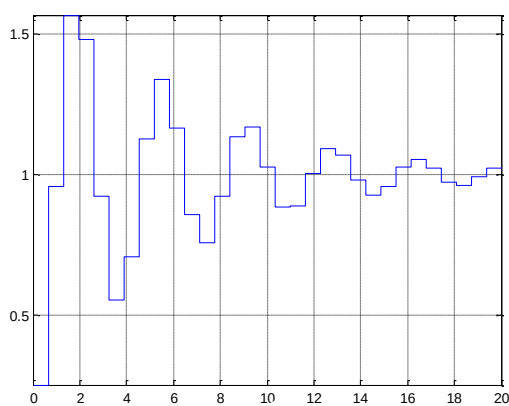


Рис. 3

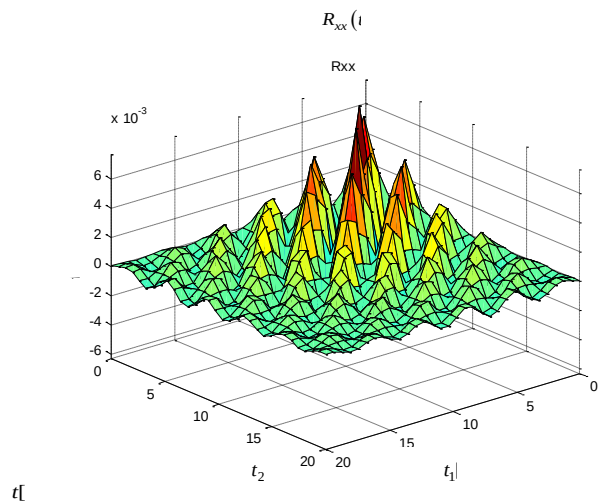


Рис. 4

На рис.5 и 6 представлены графики математического ожидания и корреляционной функции выходного сигнала модели со случайным параметром m .

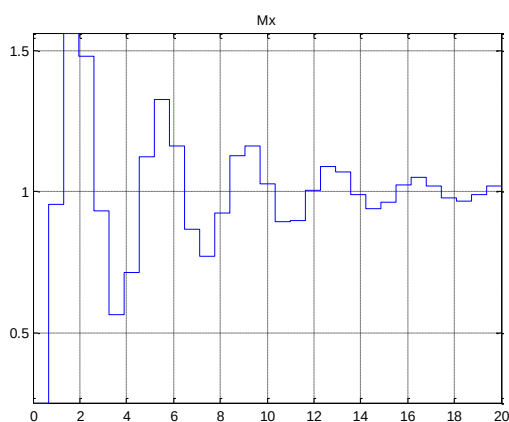


Рис. 5

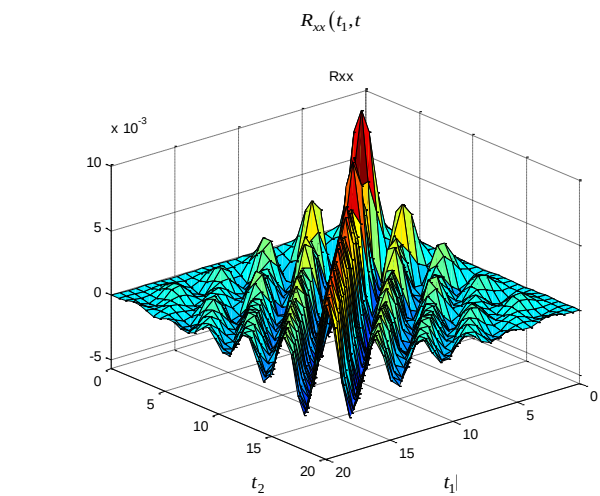


Рис. 6

Таким образом, в работе предложен вычислительный алгоритм решения задачи идентификации параметров корреляционных функций случайных переменных коэффициентов дифференциальных уравнений математических моделей одного класса стохастических систем, а также приведены примеры, демонстрирующие его точность.

Список литературы

1. Пупков К.А., Езупов Н.Д., Макаренков А.М. и др. Теория и компьютерные методы исследования стохастических систем. — М.: Физматлит, 2003. — 400 с.

2. Макаренков А.М. Учет влияния случайных параметров в проекционных моделях систем автоматического управления // Известия ТулГУ. Серия Вычислительная техника, информационные технологии, системы управления. Вып.3. Системы управления. Том.2. — Тула: Изд-во ТулГУ, 2006. — С.30-38.

Аунг Чжо Со – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: aungkyawsoe48@gmail.com.

Макаренков А.М. – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: amm2005@rambler.ru.

Широкова З.Г. – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: sh0001@rambler.ru.

Д.В. Кузнецов, О.П. Пчелкин

РАЗРАБОТКА АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВЫНУЖДЕННЫМИ КОЛЕБАНИЯМИ МОТОР-МАЯТНИКА

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Введение. Мотор-маятник представляет собой лабораторную установку, структурную схему которой можно представить следующим образом (Рис.1):

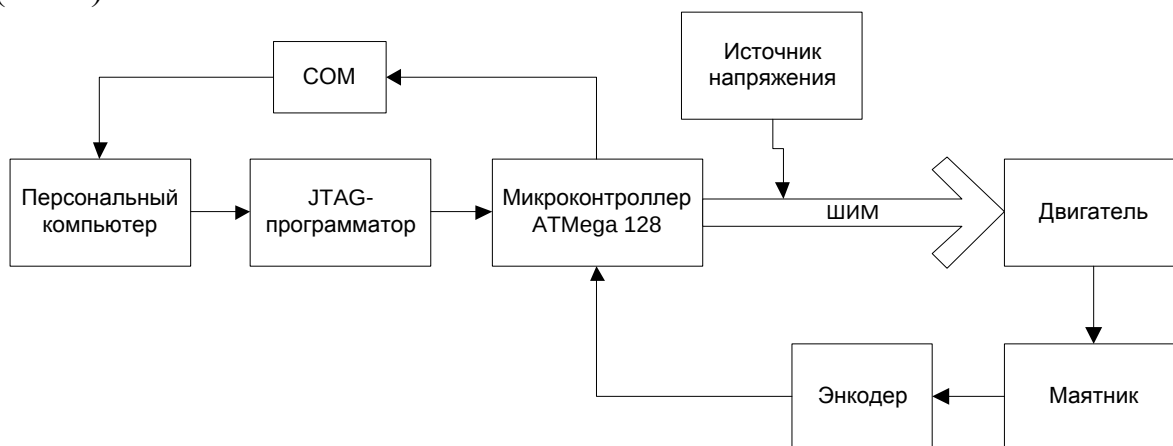


Рис.1

Маятник отклоняется на соответствующий угол при подаче на двигатель напряжения. Напряжение подается от источника напряжения и регулируется ШИМ-сигналом, реализованным посредством электронной платы с микроконтроллером ATmega 128 фирмы AVR. Данная плата посредством программатора JTAG соединена с персональным компьютером (ПК). Для считывания информации о положении маятника используется энкодер, генерирующий за один полный оборот маятника 500 импульсов. Данные от энкодера передаются по COM-порту на терминал компьютера.

Постановка задачи. Рассматривается физический объект – мотор-маятник (ММ), с неизвестными параметрами (известны масса и длина элементов маятника, но не известно положение груза). Необходимо разработать адаптивную систему управления, способную определять основные параметры ММ – период и демпфированную частоту собственных колебаний, а также коэффициент затухания, и на основе полученных данных строить математическую модель объекта. Адаптивная система должна синтезировать закон управления вынужденными колебаниями ММ с заданной амплитудой и частотой.

Математическая модель. Ранее [1] практическим путем были получены такие основные параметры системы, как период и частота собственных колебаний и коэффициент затухания системы. Для этого маятник вручную отводился на угол 90° , после чего отпускался и совершал свободные колебания. Всего было проведено 15 экспериментов (Рис.2). На основании по-

лученных графических результатов, были найдены следующие усредненные значения основных параметров системы:

- Период колебаний $T = 0.5079$ с;
- Демпфированная частота собственных колебаний $\omega_d = 12.3735$ рад/с;
- Коэффициент затухания системы $\alpha = 2.1$;

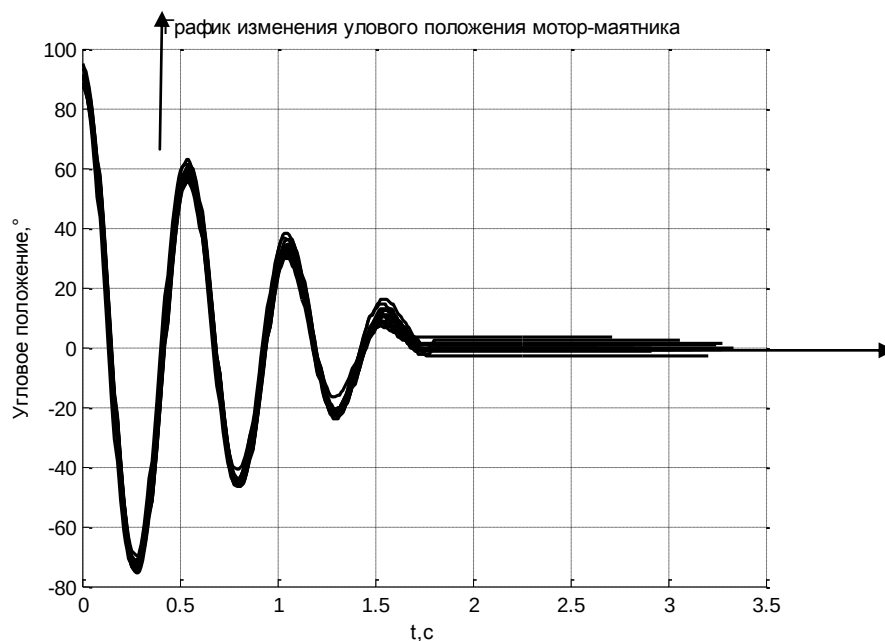


Рис.2

На основании полученных параметров была построена и уточнена [5] математическая модель системы, уравнение которой может быть представлено в следующем виде:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -179,96x_1 - 4,2x_2 + 15,2u \end{cases} \quad (1)$$

Данный метод определения параметров системы не универсален, поскольку для управления вынужденными колебаниями ММ груз маятника должен быть фиксированным и находиться в определенной точке. В противном случае изменятся параметры системы, что повлечет за собой изменение математической модели. Также данный способ не достаточно точен, поскольку в системе управления присутствует человеческий фактор (для определения параметров системы маятник отводится вручную). В связи с этим был разработан универсальный адаптивный алгоритм, позволяющий в режиме реального времени рассчитывать параметры системы. Принцип работы алгоритма: на маятник подается постоянное ШИМ-напряжение (ступенька), например 8 В, вследствие чего маятник отклоняется на некоторый угол, после чего совершает свободные колебания. Данные об отклонении маятника от положения равновесия регистрируются энкодером в

режиме реального времени, после чего передаются на компьютер с частотой 28.8 кГц посредством таймера, реализованного в микроконтроллере. Для перевода импульсов в радианы используется формула:

$$i_{рад} = \frac{i \cdot 2\pi}{500}, \quad (2)$$

где i - целочисленное значение импульса. На основании полученных численных данных изменения амплитуды колебаний определяется период колебаний. Для этого пропускается первый максимум, и вычисляем разницу во времени между вторым и третьим максимальными значениями амплитуды. Далее на основании полученного значения периода колебаний и длительности колебаний, определяются демпфированная частота собственных колебаний и коэффициент затухания системы. На основании полученных данных определяются параметры математической модели системы. Данный эксперимент выполняется трижды (трех экспериментов достаточно, поскольку в алгоритме отсутствует человеческий фактор и все вычисления выполняются программно), после чего вычисленные параметры математической модели усредняются. В таблице 1 приведены результаты работы данного адаптивного алгоритма расчета параметров математической модели ММ:

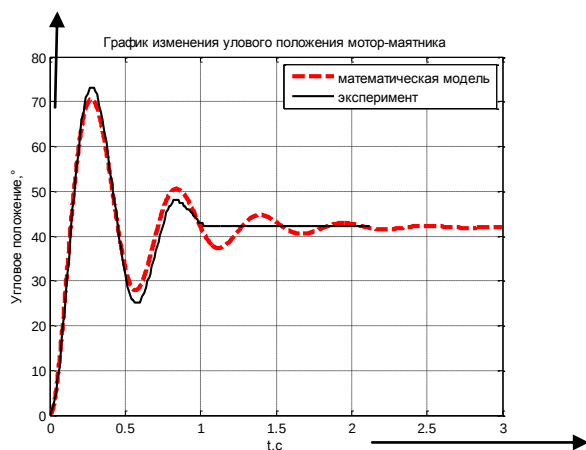
Таблица 1 – Результаты работы адаптивного алгоритма расчета параметров математической модели ММ

№ эксперимента	Демпф. частота собств. колебаний (сек ⁻¹)	Коэффициент затухания	Период колебаний (сек)	Параметр мат. модели a_{21}	Параметр мат. модели a_{22}
1	12.3875	1.9156	0.5067	-179.85	-4.1896
2	12.3912	1.9201	0.5054	-180.03	-4.2018
3	12.3898	1.9123	0.4998	-179.99	-4.1995

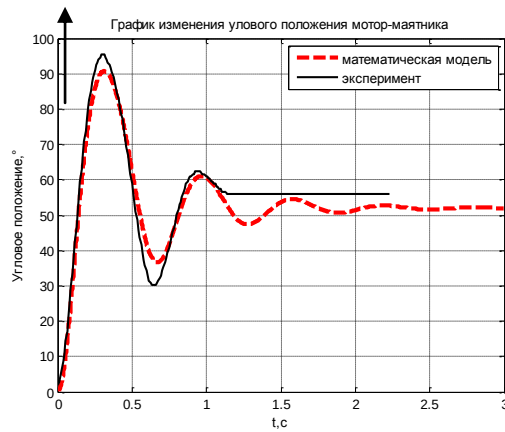
На основании полученных параметров строится математическая модель системы, полученная универсальным адаптивным алгоритмом, уравнение которой может быть представлено в следующем виде:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -180.01x_1 - 4,199x_2 + 15,2u \end{cases}. \quad (3)$$

Полученная математическая модель была проверена экспериментально (Рис.3). Приведены графические результаты изменения углового положения маятника при подаваемом на маятник ступенчатым ШИМ-напряжении 8 В (Рис. 3а) и 9 В (Рис. 3б).



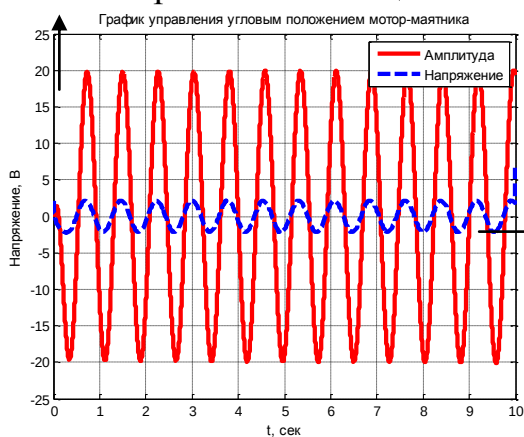
а)



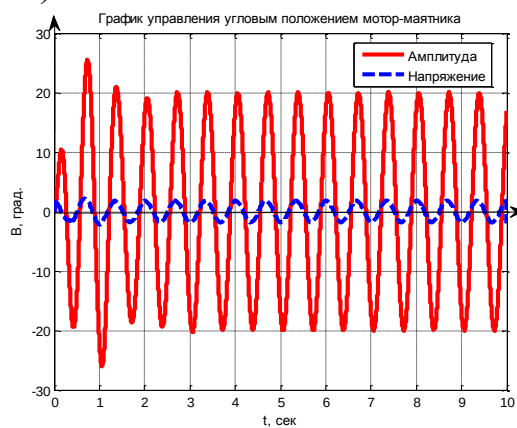
б)

Рис.3

К математической модели мотор-маятника, полученной адаптивным алгоритмом, был применен алгоритм управления [6]. Результаты работы алгоритма представлены ниже. Модель управления мотор-маятником при заданной частоте 1.3Гц и амплитуде 20^0 (Рис.4а) и при заданной частоте 1.5Гц и амплитуде 20^0 (Рис.4б). Алгоритм обратной связи, используемый в математической модели, был реализован программно на микроконтроллере. Ниже (Рис.5а) приведены результаты управления колебаниями мотор-маятника при частоте 1 Гц и 1.8 Гц (Рис.5б)

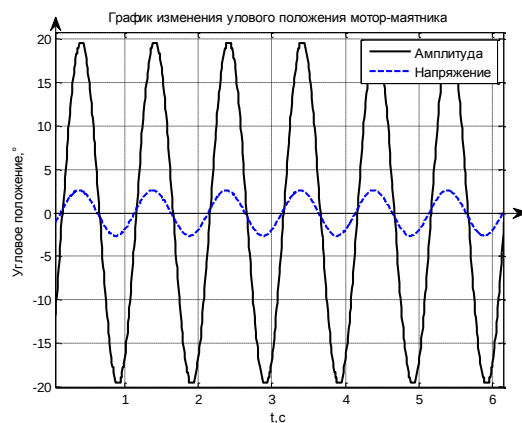


а)

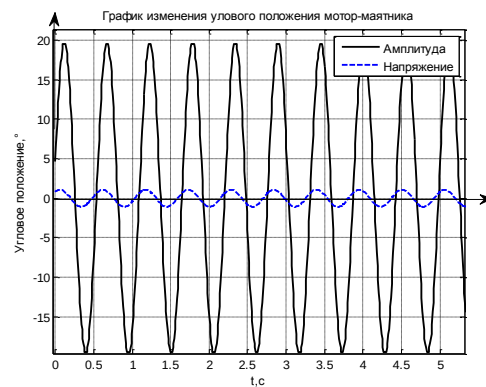


б)

Рис.4



а)



б)

Рис.5

Заключение. В данной статье был синтезирован адаптивный алгоритм управления вынужденными колебаниями мотор-маятника. Данный алгоритм универсален, точен и позволяет рассчитывать параметры математической модели в режиме реального времени. Погрешность результатов моделирования достаточно мала, однако на некоторых частотах системе требуется большее время для переходного процесса. В дальнейшем следует исследовать систему на предмет возникновения неравномерности колебаний.

Список литературы

[1] *Краснощеченко В.И., Пчелкин О.П., Кузнецов Д.В.*, Идентификация параметров лабораторного стенда «Мотор-маятник», НТК «Студенческая научная весна 2013» — МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. — 2 с.

[2] *Краснощеченко В.И.*, Методические указания по выполнению курсового проекта «Методы теории оптимального управления» — КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. — 8 - 18с.

[3] *Пупков К.А., Егунов Н.Д.*, Методы классической и современной теории автоматического управления. — МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. — Т.3, 421 с.

[4] *Шнак Ю.А.*, Программирование на языке С для AVR и PIC микроконтроллеров. — Киев: МК-Пресс, 2006. — 36 с.

[5] *Краснощеченко В.И., Пчелкин О.П., Кузнецов Д.В.*, Синтез микропроцессорной системы управления вынужденными колебаниями мотор-маятника, НТК «Студенческая научная осень 2013» — МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. — 3 с.

[6] *Краснощеченко В.И., Пчелкин О.П., Кузнецов Д.В.*, Синтез регулятора для микропроцессорной системы управления вынужденными колебаниями мотор-маятника, «Региональная НТК 2014» — МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. — 5 с.

Кузнецов Дмитрий Васильевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: kuzdim91@gmail.com.

Пчелкин Олег Павлович – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: franticbee666@gmail.com.

В.М. Масюк, А.В. Севостьянов, К.И. Солдатов

РАЗРАБОТКА ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ДИНАМИКИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Особенностью квадрокоптера является вращение моторов диагонально, в противоположных направлениях [3,4]. Таким образом, компенсируется реактивный момент. *Достоинства:* простая конструкция без поворотных механизмов. *Недостатки:* при отказе одного двигателя – неизбежное падение. В полете квадрокоптеры более устойчивы и способны летать чуть дольше — либо за счет более емкой батареи, либо за счет более экономичного режима работы моторов, не на пике оборотов. Для начала создания данной модели нужно построить математическую модель летательного аппарата. Например, оценить по полученной математической модели (рис.1) необходимую полётную схему, расписать действующие в системе силы и моменты, применить методы теории автоматического управления к построению регулятора. Исходя из этого было принято решение о создании лабораторного стенда, который позволит упростить построение моделей, процессы стабилизации и управления, а также позволит безопасно промоделировать все возникающие ситуации.

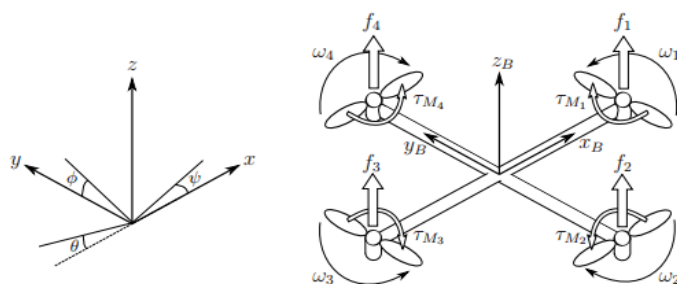


Рис.1. Схематическая модель квадрокоптера.

Для выбранного нам стенда были поставлены следующие задачи:

- обзор, исследование и разработка кинематической модели;
 - исследование и разработка функциональной схемы;
 - разработка 3D модели, оценка массо-габаритных показателей;
 - разработка оригинального программного обеспечения для микроконтроллерной части и системы сопряжения с ПК;
 - построение и анализ математической модели.
- Состав представляемого проекта будет иметь следующий вид:
- принципиальные схемы и расчетные части для подсистемы питания и микроконтроллерного управления,

- математические модели и результаты моделирования для различных систем построения летательного аппарата.

На основе выбранного стенда построена 3D-модель(рис.2,3).

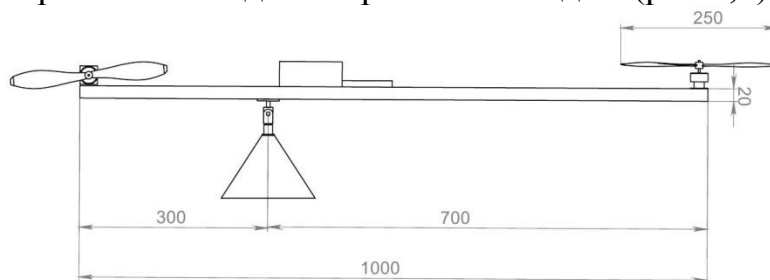


Рис.2.Фронтальный вид 3D-модели.

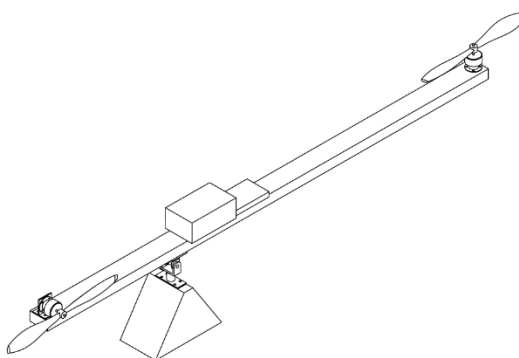


Рис. 3.Изометрия 3D-модели

Для создания лабораторного стенда нам понадобились комплектующие: полетный контроллер с тактовой частотой 16 МГц на основе микроконтроллера Atmega, бесколлекторный двигатель с количеством об/вольт: **1534 об/мин**, регулятор скорости (с ШИМ управлением) на 25А , аккумулятор на 2200mAh и пропеллеры 10x4.

Перейдем к построению математической модели стенда [1](рис.3-6).

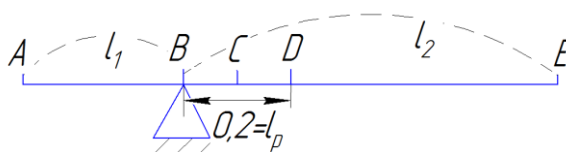


Рис. 4.Схематичный вариант стенда.

В – ось вращения; А; Е – центры тяжести двигателей; D – центр тяжести рейки, С – центр тяжести контроллера; m_g – масса двигателя; m_p – масса рейки; m_c – масса контроллера; $F_{под}$ – подъемная сила винта точки Е.

В точке А винт не играет роли на подъем механизма, учитываем только массу двигателя [1,2]

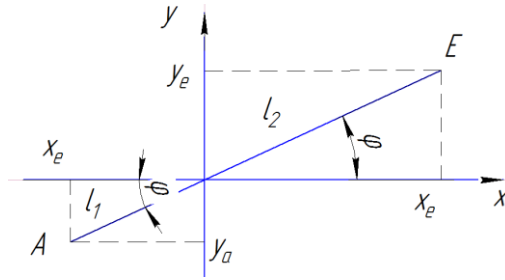


Рис. 5. Направления сил.

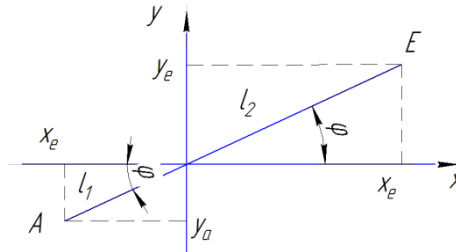


Рис. 6. Отклонение системы на угол φ.

Одна степень свободы. φ- обобщенная координата для точки E

$$x = l_2 \cos \varphi, \quad (1)$$

$$y = l_2 \sin \varphi,$$

$$V_x = \dot{x} = (l_2 \cos \varphi)' = -l_2 \dot{\varphi} \sin \varphi, \quad (2)$$

$$V_y = \dot{y} = (l_2 \sin \varphi)' = l_2 \dot{\varphi} \cos \varphi,$$

Условие равновесия

$$\sum M_B = 0, x_e = l_2, y_e = 0, \quad (3)$$

$$m_g g l_1 + N \cdot 0 - m_c g l_c - m_p g l_p - m_g g l_2 + F_{nod} l_2 = 0, \quad (4)$$

Применим закон сохранения энергии

$$A_{F_{nod}} = -m_g g h_a + m_c g h_c + m_p g h_p + m_g g h_b, \text{ где } h = l \sin \varphi, \quad (5)$$

$$A_{F_{nod}} = -m_g g l_1 \sin \varphi + m_c g l_c \sin \varphi + m_p g l_p \sin \varphi + m_g g l_b \sin \varphi \quad (6)$$

Работы сил сопротивления воздуха и трения в шарнире малы, поэтому ими можно пренебречь

$$A_{F_{nod}} = F_{nod} \cdot S, \quad (7)$$

Где S – длина дуги, описываемой точкой E при вращении $S = \frac{\pi l_2 \phi}{180^\circ}$

Уравнение Лагранжа второго рода:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\phi}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \phi} = a_i, \quad (8)$$

$$Q_i = F_{nod} \cdot \frac{\partial r_k}{\partial \phi}, \quad (9)$$

где $\vec{r}_k$ - радиус вектор

$$T = -m_g g \cdot l_1 \sin \phi + m_c g \cdot l_c \sin \phi + m_p g \cdot l_p \sin \phi + m_g g \cdot l_e \sin \phi, \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\phi}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \phi} = F_{\text{под}} \cdot \frac{\partial r_k}{\partial \phi}, \quad (11)$$

где $\frac{\partial T}{\partial \phi} = -m_g g \cdot l_1 \dot{\phi} \sin \phi + m_c g \cdot l_c \dot{\phi} \sin \phi + m_p g \cdot l_p \dot{\phi} \sin \phi + m_g g \cdot l_e \dot{\phi} \sin \phi$

Результаты:

- проведен обзор квадрокоптеров, выявлены сложные части проекта, разработан стенд для исследования задач стабилизации и управления тягой;
- анализируя данный лабораторный стенд, была разработана его 3D модели;
- исследуя возможные варианты стенда, были выбраны необходимые комплектующие по принципу необходимой мощности, количеству оборотов и т.п.;
- на основе 3D-модели построена математическая модель, описывающая все силы, действующие на систему, математические закономерности преобразованы к форме Лагранжа для дальнейшего анализа системы.

Список литературы:

1. Литвин-Седой М.З. *Введение в механику управляемого полета*. М.: Высшая школа, 1963. – 212с.
2. Пыркин А.А., Мальцева Т.А., Лабадин Д.В., Суров М.О., Бобцов А.А. *Синтез системы управления квадрокоптером с использованием упрощенной математической модели*. Известия Высших учебных заведений. Приборостроение. №9, Т.57, 2014.
3. Обзор квадрокоптеров <http://quad-copter.ru/forum/thread63-1.html#103> (дата обращения 15.07.2014)
4. Википедия свободная энциклопедия, https://ru.wikipedia.org/wiki/Полётный_контроллер (дата обращения 22.07.2014)

Масюк Владимир Михайлович – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: masyuk77@gmail.com.

Севостьянов Александр Владимирович – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: evostyanov.alexandr@mail.ru.

Солдатов Кирилл Игоревич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: spawn13131@rambler.ru.

А.И. Быков, А.Л. Лапиков

РЕШЕНИЕ ПРЯМОЙ ПОЗИЦИОННОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННОГО РОБОТА БРИГ–10Б

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Введение. В условиях современных темпов развития промышленности, задачи автоматизации весьма актуальны. Автоматизация производится по разным направлениям, среди которых можно отметить производство в условиях опасных для человека, выпуск продукции, требующей высокую точность и скорость сборки и т.д. Автоматизация производства позволяет значительно увеличить производительность и снизить себестоимость продукции.

Как показано в работе [1] автоматизация отечественного производства производится двумя путями: закупка робототехнических комплексов иностранных компаний или модернизация отечественных роботов первого поколения путём переработки системы управления. При интеграции этих способов автоматизации необходимо провести стандартизацию управления.

Адаптации систем управления отечественных роботов к стандартам управления зарубежных робототехнических комплексов можно добиться использованием микроконтроллеров, позволяющих создавать простые логические алгоритмы управления. Использование именно микроконтроллеров, а не логических элементов необходимо для того чтобы алгоритмы управления получились гибкими, функциональными и перестраиваемыми.

Одна из первоначальных задач, которые необходимо решить для создания системы управления это построение математической модели. Ключевыми этапами при построении математической модели являются исследование кинематики и динамики объекта, направленные на установление закономерностей, описывающих поведение объекта.

В статье будут отражены кинематические исследования, позволяющие установить зависимость положения и ориентации схвата манипулятора от значения обобщенных координат манипулятора.

Объектом исследования является промышленный робот первого поколения БРИГ–10Б, внешний вид и 3D-модель которого приведены на рисунках 1,2. Исследуемый механизм обладает 5 степенями подвижности: две вращательные и три поступательные. Перемещения в степенях подвижности обеспечиваются пневматической системой, структура и характеристики которой приведены в [2].

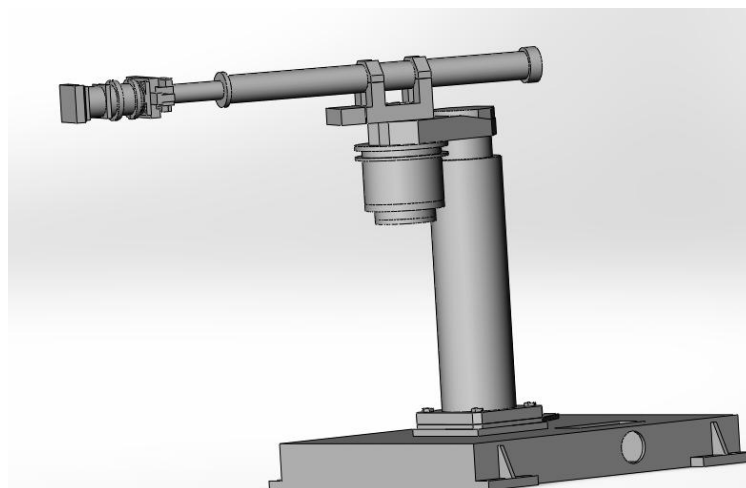


Рисунок 1–3D модель робота

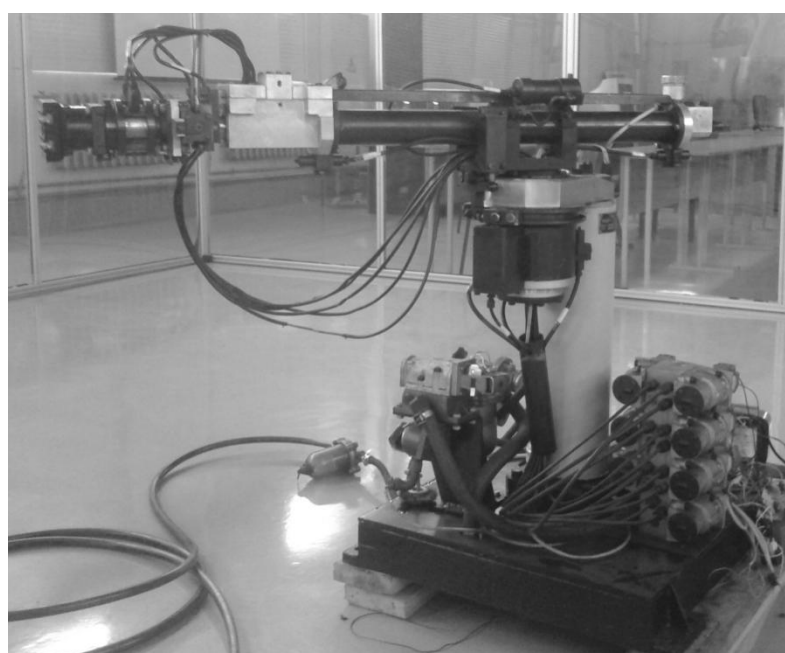


Рисунок 2–БРИГ–10Б

Методы решения задачи

Для создания алгоритма управления рабочим органом манипулятора необходимо знать его позиционирование и ориентацию в пространстве, т.е. определить зависимость положения схвата от обобщённых координат. Это возможно достичь, решив прямую задачу кинематики (ПЗК). Для решения ПЗК необходимо по заданному вектору обобщённых координат $\mathbf{q} = (q_1, q_2, \dots, q_n)^T$ найти положение и ориентацию схвата $\mathbf{X} = f(\mathbf{q})$. Положение и ориентацию схвата определяет вектор $\mathbf{X} = [x_o \ y_o \ z_o \ \alpha \ \beta \ \gamma]$, где x_o, y_o, z_o – декартовы координаты схвата, а α, β, γ – тройка углов, которая однозначно определяет ориентацию системы координат схвата относительно системы координат основания, например углы Эйлера. Для реше-

ния ПЗК будем применять аппарат однородных преобразований. Общий вид матрицы однородного преобразования для нашей задачи:

$$T(X) = \begin{bmatrix} R(\alpha, \beta, \gamma) & p(x_0, y_0, z_0) \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

где $R(\alpha, \beta, \gamma)$ – матрицы поворота, которая однозначно определяет ориентацию системы координат схвата относительно системы координат основания (матрица поворота функционально зависит от углов Эйлера), $p(x_0, y_0, z_0)$ – вектор переноса, который задает координаты начала отсчета подвижной системы координат, $\mathbf{0}$ – нулевой вектор размерностью 1×3 .

Матрицы однородных преобразований применяются в методе взаимосвязанного представления Денавита – Хартенберга, суть которого состоит в следующем. Манипулятор представляет собой, цепь последовательно соединенных звеньев, каждое из которых совершает либо вращательное, либо поступательное движение, т.е. относительное движение соседних звеньев определяется одним изменяющимся параметром. С каждым из подвижных звеньев связывают систему координат, причем базовую (неподвижную) связывают обычно с основанием манипулятора. Далее составляются так называемые матрицы перехода между соседними системами координат. Последовательно перемножая полученные матрицы, можно получить матрицу связывающую 0-ую и i -ую систему координат.

В методе Денавита – Хартенберга матрица A_i представляет собой матрицу вида:

$$A_i = \begin{pmatrix} \cos(q_i) & -\cos(\alpha_i)\sin(q_i) & \sin(\alpha_i)\sin(q_i) & a_i \cos(q_i) \\ \sin(q_i) & \cos(\alpha_i)\cos(q_i) & -\sin(\alpha_i)\cos(q_i) & a_i \sin(q_i) \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

где a_i расстояние от точки пересечения осей Z_{i-1} и X_i до начала i -ой системы координат, измеренное в направлении оси X_i , d_i расстояние от начала $(i-1)$ -й системы координат до точки пересечения осей Z_{i-1} и X_i , измеренное в направлении оси Z_{i-1} .

Результаты. Сопоставление локальных систем координат с каждым звеном промышленного Робота БРИГ-10Б было описано в работе [3]. Тогда матрицы перехода между соседними локальными системами координат могут быть описаны как:

$$A_{01} = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -181.62 \\ 0 & 0 & 1 & q_1 + 594.4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где: q_1 обобщённая координата, $q_1 \in [0;100]$.

$$\mathbf{A}_{12} = \begin{pmatrix} \cos(q_2 - \frac{5\pi}{6}) & 0 & \sin(q_2 - \frac{5\pi}{6}) & 0 \\ \sin(q_2 - \frac{5\pi}{6}) & 0 & -\cos(q_2 - \frac{5\pi}{6}) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 35 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где: q_2 обобщённая координата, $q_2 \in [0; \frac{2\pi}{3}]$.

$$\mathbf{A}_{23} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & -60 \\ 0 & -1 & 0 & q_3 + 462.74 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где: q_3 обобщённая координата, $q_3 \in [0;674]$.

$$\mathbf{A}_{34} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & q_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (5)$$

где: q_4 обобщённая координата, $q_4 \in [0;66]$.

$$\mathbf{A}_{45} = \begin{pmatrix} \cos q_5 & -\sin q_5 & 0 & 0 \\ \sin q_5 & \cos q_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 209 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (6)$$

где: q_5 обобщённая координата, $q_5 \in [0; \pi]$.

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} -s_1 s_2 & -s_1 c_2 & c_1 & 209c_1 + (q_3 + 462.74)c_1 - q_4 s_1 \\ c_1 s_2 & c_1 c_2 & s_1 & 209s_1 + (q_3 + 462.74)s_1 + q_4 c_1 - 181.62 \\ -c_2 & s_2 & 0 & q_1 + 689.4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (7)$$

где: $s_1 = \sin(q_2 - \frac{5\pi}{6})$, $c_1 = \cos(q_2 - \frac{5\pi}{6})$, $s_2 = \sin(q_5 + \pi)$, $c_2 = \cos(q_5 + \pi)$.

Из формулы (8) положение схвата определяется по формулам:

$$x_0 = 209 \cdot c_1 + (q_3 + 462.74) \cdot c_1 - q_4 s_1, \quad (8)$$

$$y_0 = 209 \cdot s_1 + (q_3 + 462.74) \cdot s_1 + q_4 c_1 - 181.62, \quad (9)$$

$$z_0 = q_1 + 689.4. \quad (10)$$

Ориентацию схвата можно представить в виде следующих направляющих векторов:

$$e_1 = (-s_1 s_2 \quad c_1 s_2 \quad -c_2)^T,$$

$$e_2 = (-s_1 c_2 \quad c_1 c_2 \quad s_2)^T,$$

$$e_3 = (c_1 \quad s_1 \quad 0)^T.$$

Был проведён численный эксперимент, при котором законы изменения координат были заданы формулами (8), (9) и (10), а обобщённые координаты изменялись линейно в своём диапазоне. График изменения положения схвата приведён на рисунке 3.

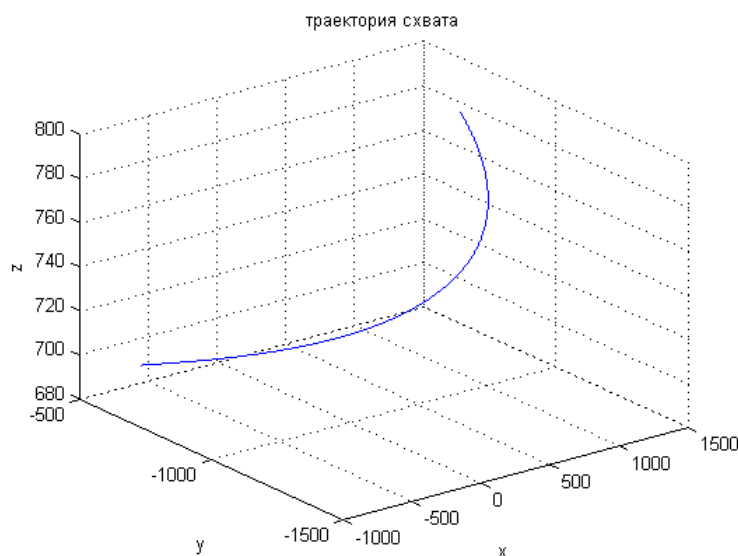


Рисунок 3—Траектория схвата

Список литературы

[1] Рудаков Г.В. Анализ робототехники в России URL: http://www.3e-club.ru/view_full.php?id=27&name=robotics_in_russia (дата обращения 30.06.2014).

[2] Сайфутдинов С.Р., Савельев А.А. *Наладка промышленного робота «БРИГ–10Б»: учебное пособие*. Челябинск, ЮУрГУ, 1997, 13с.

[3] Быков А.И., Лапиков А.Л. Применение метода Денавита–Хартенберга для промышленного робота БРИГ–10Б. *Евразийский Союз Учёных*, 2014, № 4, с. 22–25.

[4] Зенкевич С.Л., Ющенко А.С. *Управление роботами. Основы управления манипуляционными роботами: учеб. для вузов*. Москва, МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2000, 400 с.

Быков Артём Иванович – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: bykov200@yandex.ru.

Лапиков Антон Леонидович – ассистент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: anton.lapikov@inbox.ru.

СЕКЦИЯ 6.

ЭКОЛОГИЯ И БЕЗОПАСНОСТЬ

Е.В.Власенкова, С.Н. Никулина, А.Ю. Логинова

АНАЛИЗ СОДЕРЖАНИЯ ФОСФАТОВ В РЕКАХ КАЛУЖСКОЙ ОБЛАСТИ.

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Источниками поступления соединений фосфора в бытовые сточные воды является фекальный сток (30–50 %) и фосфатные компоненты синтетических моющих средств (50–70 %). Средняя концентрация общего фосфора в бытовых сточных водах составляет 15–20 мг/л.

Соединения фосфора относятся к биогенным элементам, т. е. веществам, входящим в состав организмов и имеющим определенное биологическое значение. Фосфор – так называемое макробиогенное вещество наряду с азотом, железом, серой в значительном количестве накапливающееся в биомассе активного ила (до 2 % в сухой массе ила)[1].

В стиральных порошках, фосфаты применяются для эмульгирования жиров. Содержание фосфатов в синтетических моющих средствах (СМС) используемых в России достигает 70%, и на многих упаковках даже не указано их содержание, в расчете на экологическую безграмотность российского потребителя.

В процессе стирки стиральным порошком, все его компоненты, в том числе и фосфаты, попадают в ткань, выполняют своё предназначение и подлежат удалению.

Однако известно, что поступление большого количества фосфора в водные объекты приводит к их эвтрофированию. Согласно полуэмпирической теории Дж. Валлентайна в лимитировании процесса эвтрофирования водоемов главенствующая роль принадлежит фосфору. Поэтому в целях торможения процесса необходимо в первую очередь удалять соединения фосфора. Процесс эвтрофирования характеризуется активным ростом водорослей и высшей водной растительности. В результате эвтрофирования в водоемах происходит нарушение процессов саморегуляции в биоценозах, в них начинают доминировать виды, наиболее приспособленные к изменившимся условиям (хлорококковые водоросли и цианобактерии), вызывая цветение воды. Наиболее интенсивно процессы эвтрофирования развиваются в замкнутых, зарегулированных и малопроточных водных объектах[2].

При эвтрофировании водная экосистема последовательно проходит несколько стадий. Сначала происходит накопление минеральных солей азота и/или фосфора в воде. Эта стадия, как правило, непродолжительна, т.к. поступающий лимитирующий элемент немедленно вовлекается в кругооборот и наступает стадия интенсивного развития водорослей в эпилимнионе. Нарастает биомасса фитопланктона, увеличивается мутность воды, повышается концентрация кислорода в верхних слоях воды[3].

Затем наступает стадия отмирания водорослей, происходят аэробная деградация детрита, образование хемоклина. Интенсивно отлагаются донные илы с повышенным содержанием органики.

Наконец, наступает полное исчезновение кислорода в глубинных слоях и начинается анаэробное брожение. Характерно образование сероводорода, сероорганических соединений и аммиака. Это приводит к гибели ценных рыб и растений, вода становится непригодной не только для питья, но и для купания. Эвтрофицированный водоем утрачивает свое биогеоценотическое значение[4].

В табл. 1 приведены основные ПДК для фосфатов, в табл. 2 рекомендованные ПДК для фосфат - ионов (в мг/л).

Таблица 1. Предельно допустимые концентрации для фосфатов

	ПДК _{ПИТ.} , мг/л	ПДК _{ХОЗ.-БЫТ.} , мг/л	ПДК _{РЫБХОЗ.} , мг/л
PO_4^{3-}	3,5	3,5	0,2

Таблица 2. Рекомендованные ПДК для фосфат - ионов

Вода	$\text{C}_\text{H} \text{PO}_4^{3-}$, мг/л	Вода	$\text{C}_\text{H} \text{PO}_4^{3-}$, мг/л
Озера, водохранилища	0,05	Водопроводная	0,4
Для холодиль. установок	4,0	Питьевая	3,5
Сточная для удобрения	6,0	Водные объекты	0,1

Профилактические методы, используемые для предотвращения эвтрофирования:

- контроль сброса биогенных веществ;
- удаление биогенных веществ из сточных вод;
- использование предварительных отстойников;
- стратегическая перестройка управления водопользованием в бассейне.

До последнего времени в качестве основных методов борьбы с цветением водоемов применялись: насыщение воды кислородом, обработка воды альгицидными химическими препаратами; извлечение водорослевой массы насосами с последующей ее подачей на сельскохозяйственные поля или в лесополосы; сбор с помощью нефтесборных механизмов и т. д.[5]

В сточных водах фосфор присутствует в разных состояниях: в растворенном, коллоидном и взвешенном. В нерастворенном состоянии фосфор находится на взвешенных частицах в виде труднорастворимых фосфатов (например, многообразные соединения кальция и фосфора, как правило, малорастворимые) и белковых органических веществ. Нерастворимый фосфор, прочно связанный с другими соединениями, присутствующими в сточных водах, абсолютно инертен для биологического процесса очистки и, поступая в водоем в виде устойчивых минералов, подобных ортофосфату кальция, не обогащает его фосфором, а накапливается в донных осадках.

Проблема усугубляется тем, что ежегодно без очистки в водные объекты России сбрасывается около 20 % от общего объема образующихся сточных вод[6].

Практически все реки Калужской области относятся к категории загрязненных и умеренно загрязненных; по большинству показателей вода в них не соответствует требованиям рыбохозяйственных нужд и по многим показателям – требованиям хозяйственно – питьевого водопользования. Од-

ним из крупнотоннажных и широко распространенных загрязнителей водных объектов являются фосфаты содержащие в бытовых сточных водах[7].

Анализ результатов показал, что содержание фосфат – ионов в исследуемых реках превышает ПДК. Кроме того можно утверждать, что максимальная концентрация фосфат – ионов наблюдается в реках с наибольшей заселенностью береговой линии, то есть численность населения оказывает влияние на загрязнение рек. Это неудовлетворительно, если учесть, что десятки тысяч жителей городов и населенных пунктов используют фосфат-содержащие СМС. Согласно данным количество фосфатов проходится на одного горожанина составляет не менее 1,5 г/сут. В составе воды, поступают в р.Оку только с калужских ГОС (по данным ГП «Калужский водоканал» фосфатов содержится не менее 66 т/год. По методике ПНД Ф 14.1;2.112-97 были проведены анализы рек Калужской области.

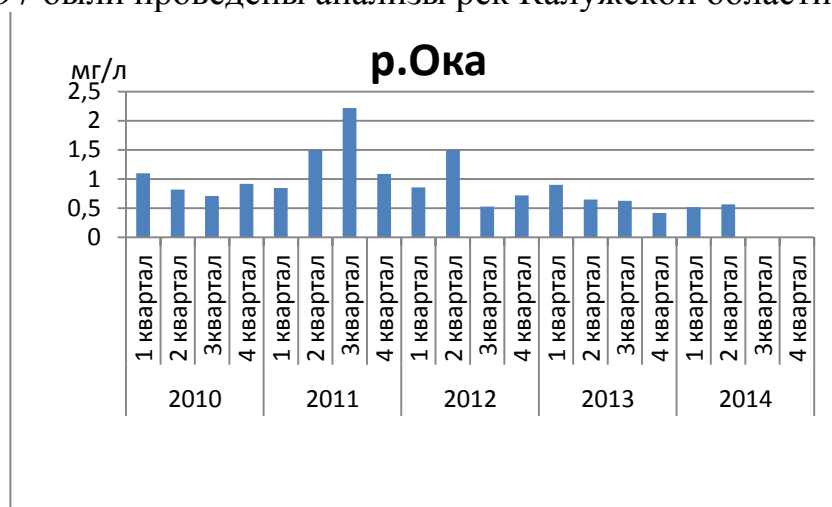


Рис.1 – Концентрации фосфат - ионов в р.Оке поквартальное.

Проводилась инвентаризация источника загрязнения. Выяснино, что в водоеме превышены предельно допустимые показатели (ПДК) по цинку, меди, никелю, фосфату и ряду других элементов. А концентрация фосфатов в несколько раз превышает ПДК, что является хорошей базой для произрастания сине-зеленых водорослей и ряски. Было отмечено что, из-за притока большого количества биогенных веществ, в частности фосфатов, водоем загрязнен избытком водорослей и цветет[8].



Рис.2 - Концентрации фосфат - ионов в р.Ракитня поквартальное.

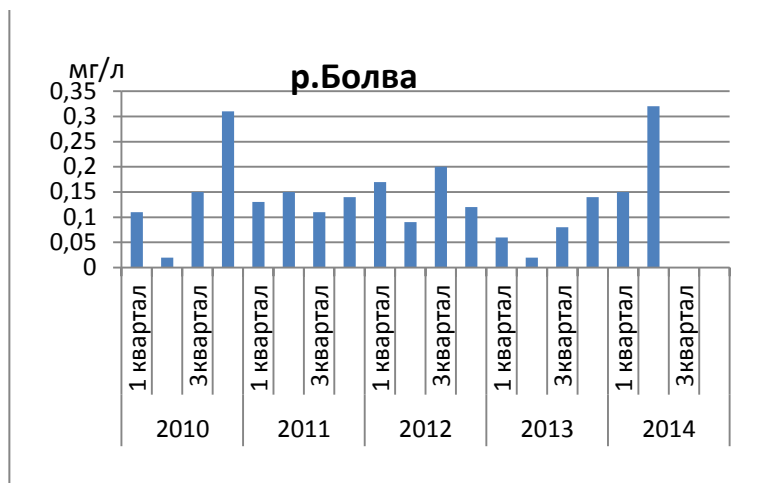


Рис.4 - Концентрации фосфат-ионов в р.Болва поквартальное.

В результате обследования, проводимого на реке Болва, выявлен 21 вид высшей водной растительности. Общий объём её "продукции" составляет 2,6 тысячи тонн ежегодно. Кроме того, резко увеличилось количество зелёных и сине-зелёных водорослей, которые доминируют на протяжении всего вегетационного периода. Их общая биомасса в перерасчёте на объём всей водной массы составляет 12 тысяч тонн[9].

Вся она ежегодно оседает вдоль берегов реки, превращаясь в органику. Попадая в водоём, органические вещества частично растворяются в воде, частично опускаются на дно водоема, где из них формируется органическая биомасса донного ила, подвергаясь непрерывному разложению гнилостными бактериями и грибами. При разложении органические вещества интенсивно забирают из воды жизненно необходимый кислород, а это приводит к образованию заморных сероводородных зон, в результате резко уменьшаются рыбные запасы водоёма.

Загрязнение водоёма в первую очередь отрицательно воздействует на ключевой элемент биологического равновесия и самоочищения водоёма - состав полезной микрофлоры водоёма (биоценоз). Число полезных микроорганизмов в 1 мл загрязненной воды резко сокращается, обедняется и изменяется их видовой состав, в то же время в грязной воде активно развиваются потенциально опасные микроорганизмы. Всё это сильно ухудшает качество исходной воды, которая поступает на водозабор для питьевых целей[5].

Для того, чтобы муниципальные службы корректно выполняли очистку воды перед подачей её в водопровод, разработаны нормативные таблицы, в которых указана верхняя граница норма содержания каждого из тех элементов, что могут обнаружиться в воде, взятой из природных источников.

В настоящее время Калуге работает достаточно много очистных сооружений, но в основном, они построены в 70–80-х годах прошлого столетия, поэтому устарели и нуждаются в модернизации. Проблемой загрязнения воды всегда будет антропогенный фактор: любая, даже минимальная деятельность человека. Но если избыточное количество фосфора поступают в водоемы постоянно, растворить их становится все труднее. (Сбрасывать загрязненные воды в реки запрещено законодательно.). И стоит задуматься и переоборудовать наш водозабор ввести новое современное обо-

рудование которое значительно увеличит эффективность очистки. Так же стоит ввести дополнительную стадию очистки от фосфатов. На сегодня известны эффективные физические, физико-химические, биологические и комбинированные методы удаления фосфора из сточной жидкости.

Каждый житель Калужской области проявив экологическую грамотность и отказавшись от использования фосфат содержащих СМС внесет свой вклад в сохранение природных водных экосистемы. Это позволит значительно снизить один из основных потоков фосфатов в наши реки. И так же, как в странах Европы необходимо «Министерству экологии» России подготовить проект о полном запрете фосфатов в бытовой химии. Эти меры позволили значительно уменьшить один из потоков фосфатов в наши реки. И этим самым чистая вода залог нашего здоровья.

Список литература:

1. Паронян В.Х., Гринь В.Т «Теология синтетических моющих средств».- М., Химия, 1984г.-224с.
2. Петровская ТК., Михалевская В.С. Проблема питьевой воды г. Калуга Сб Вопросы географии и геоэкологии., Калуга, 1999, Вып. 2.-С.44-58
3. Семёнов В.А., «Ресурсы поверхностных вод бассейна р. Оки и оценка изменения их количества на территории Калужской области», Вопросы географии и геоэкологии, Выпуск 1, Калуга, 1997г, - с. 5 -19 .
4. Силин И.И. Экология и экономика природных ресурсов бассейна реки Протвы (Калужская и Московская области), Калуга, ВИЭМС, 2003г. -324 с
5. Продан Е. А., Продан Л. И., Ермоленко Н. Ф., Триполифосфаты и их применение, Минск, 1969;
6. Стрельцов А.Б., Логинов А.А., Лыков И.Н., Коротких Н.В..Очерк экологии города Калуги: Справочное – учебное пособие.- Калуга,2000.- 400с.
7. Кто выведет Калужское море на чистую воду? URL: <http://www.vest-news.ru/article.php?id=8273> (дата обращения 10.10.2014).
8. Реке Болва нужна генеральная уборка URL: <http://www.ludinovskiy.ru/index.php?page=1&w=2&id=1996> (дата обращения 10.10.2014).

Власенкова Елена Валерьевна – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: vlaselen2009@yandex.ru.

Никулина С.Н. – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: vlaselen2009@yandex.ru.

Логинова А.Ю. – канд. хим. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: vlaselen2009@yandex.ru.

МЕХАНИЗМ ВОЗДЕЙСТВИЯ КОГЕРЕНТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА РАЗЛИЧНЫЕ ЗАГРЯЗНИТЕЛИ ВОДНЫХ СРЕД

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

В настоящее время, с ростом антропогенной деятельности человека и техногенной нагрузки на окружающую среду особо актуальной стала проблема загрязнения водных объектов. Существует огромное количество методов по их очистке от различных загрязнителей, но многие из них недостаточно эффективны и вносят дополнительные загрязнения. В данной статье изучены механизмы воздействия лазерного излучения на различные загрязнители водных сред: химические и биологические. Также рассматриваются преимущества лазерного метода очистки относительно других. Принцип очистки лазером основан на фотомеханической реакции, происходящей при взаимодействии между пучком света и загрязняющим слоем. Метод очистки водных объектов когерентным излучением можно использовать как альтернативу другим, так как он является более выгодным и экономически целесообразным.

Ключевые слова: когерентное излучение, сточные воды, загрязнители воды, лазерные методы очистки воды.

В настоящее время, в связи с увеличением техногенной нагрузки на окружающую среду все больше внимания уделяется проблеме загрязнения водных объектов.

Дефицит чистой пресной воды уже сейчас становится мировой проблемой. Все более возрастающие потребности промышленности и сельского хозяйства в воде заставляют все страны и ученых всего мира искать разнообразные средства для решения этой проблемы.

Поверхностные воды в наибольшей степени подвергаются воздействию загрязнителей, в особенности воды крупных рек и их притоков, которые используются для забора воды с целью водоснабжения населения и различных отраслей экономики, так и для сброса в них сточных вод.

Особое место в водоснабжении занимают пресные подземные воды. Эта вода также реализуется на хозяйственно питьевые цели, технические и прочие нужды. В источники подземных вод не сбрасываются, разумеется,

сточные воды, но и в эти водные объекты попадают загрязняющие вещества через загрязнённые почву и атмосферу.

Таким образом, водные ресурсы из возобновляемых превращаются в невозобновляемые. К сожалению, современные методы водоочистки и водоподготовки не отвечают требованиям безопасности при её использовании населением.

В настоящее время питьевую воду из разных водоёмов и источников как традиционных (реки, пресные озёра, подземные источники), так и нетрадиционных (шахтные и карьерные воды) получают с применением обеззараживания и окислительно-восстановительных реакций.

Т. е. для подготовки и очистки воды применяют методы разделения (коагуляции, осаждения, фильтрации), деструкции (сильными окислителями, различными излучениями) и биологической трансформации (аэробными и анаэробными микроорганизмами) загрязняющих веществ, а также обеззараживания от патогенных микроорганизмов (как правило, с использованием тех же окислителей и излучений).

Данные экологических мониторингов, проводимых в России, свидетельствуют о том, что в районах с развитой производственной и социально-бытовой деятельностью природные воды продолжают загрязняться биологически стойкими веществами техногенного происхождения, причём это относится как к поверхностным, так и к подземным водам.

Загрязнения водных сред подразделяют на физическое, химическое, биологическое и тепловое.

Физическое загрязнение воды возникает вследствие увеличения в воде нерастворимых примесей - песка, глины, ила, пыли, переносимой ветром в сухую погоду и т.п. Твердые частицы снижают прозрачность воды, подавляют развитие водных растений, ухудшают вкусовые качества воды, а в большинстве случаев делают ее вообще непригодной для потребления.

Химическое загрязнение воды происходит за счет поступления в водоемы со сточными водами различных вредных примесей неорганического (кислоты, щелочи, минеральные соли) и органического происхождения (нефть и нефтепродукты, моющие средства, пестициды и т.п.).

Биологическое загрязнение воды заключается в поступлении в них со встречными водами различных микроорганизмов (бактерий, вирусов), спор грибов, яиц червей и т.д., многие из которых являются болезнетворными для людей.

Тепловым загрязнением воды вызывается спуск в водоемы подогретых вод от ТЭС, АЭС и других энергетических установок. Теплая вода изменяет биологический и термический режимы работы водоемов. Если температура воды составляет 26-30°C, то это оказывает подавляющее действие на рыб и других обитателей водоемов, а если температура воды поднимается до 36°C, вся рыба погибает.

В современных условиях воду можно очищать следующими методами: механическими, химическими, физико-химическими и биологическими.

Механические методы очистки являются наиболее дешевыми и применяются для выделения взвесей. Это предварительные этапы очистки воды: процеживание, фильтрование и отстаивание. Химические методы очистки воды используются для нейтрализации неорганических примесей. Сточные воды при обработке реагентами проходят нейтрализацию растворенных соединений, обесцвечивание и обеззараживание. Физико-химические методы используются для фильтрации грубо- и мелкодисперсных частиц и для нейтрализации коллоидных примесей и растворенных соединений. Биологические методы используются для нейтрализации растворенных органических соединений. Метод основывается на способности микроорганизмов разлагать растворенные органические соединения.

Все перечисленные методы устарели и приносят в очищаемые воды дополнительные загрязнения, что не удовлетворяет в полном объеме современным требованиям степени очистки воды. Одной из новейших разработок в этой области является применение когерентного (лазерного) излучения. Энергетические источники лазерного излучения более выгодны и экономически целесообразны по сравнению с остальными.

Когерентное излучение обладает такими достоинствами, как:

- 1) высокая эффективность против широкого спектра патогенных микроорганизмов в воде;
- 2) отсутствие в использовании дополнительных химических веществ (безреагентный процесс);
- 3) короткое время обработки сред;
- 4) отсутствие влияния на вкус и запах чистой воды;
- 5) минимум побочных продуктов, включая токсичные вещества.

Обработку лазерными лучами невозможно отнести ни к одной из известных категорий, так как в ней не используется ни газ, ни жидкость, ни механический импульс, а применяется сила импульсов света. Это совершенно особый метод, который входит в категорию методов ударной обработки, поскольку здесь используется ионная бомбардировка.

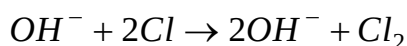
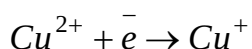
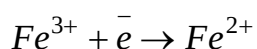
Очистка лазером основана на фотомеханической реакции, происходящей при взаимодействии между пучком света, исходящим из лазера в коротких импульсах высокой интенсивности и загрязняющим слоем. Импульсы света, передаваемые лазером, поглощаются внешним слоем обрабатываемой поверхности. Мощная поглощенная энергия создает плазму (ионизированный несбалансированный газ), сильно сжатую, она разжимается, создавая ударную волну. Эта ударная волна расщепляет и удаляет тонкие частицы слоя загрязняющего вещества, которые подхватываются системой всасывания. Световой импульс достаточно короток для того, чтобы избежать возникновения термических явлений, которые могли бы повредить поверхность.

Когерентное излучение лазера при правильно выбранных длинах волн (λ) и дозах даёт возможность мягко и избирательно действовать на загрязнители водных объектов.

Для очистки воды от физических и тепловых загрязнений использовать лазерное излучение воды не эффективно. В первом случае в воде содержатся крупные примеси, которые не удаляются лазерным излучением. Для этого используются сооружения механической очистки, такие как отстойники, решетки, песколовки, фильтры, центрифуги и т.д. Во втором случае очистка лазером невозможна, т.к. механизм его действия лежит в другой плоскости и протекает по другим физическим законам.

И, наоборот, для очистки воды от химических и биологических загрязнений применение лазерного излучения эффективно.

Для сокращения содержания в воде ионов тяжелых металлов используют лазерное излучение и лазерно-магнитное воздействие. При прохождении пучка электронов через очищаемую воду, содержащую например, железо или медь в качестве загрязнителей, образующиеся гидроксильные радикалы и электроны в сольватной оболочке активно воздействуют на примеси в ней, где возможно прохождение, как реакции восстановления, так и реакции окисления:



Таким образом, происходит восстановление металлов, которые при этом выпадают в осадок, а газообразные соединения покидают воду.

Удаление лазером загрязнения органического происхождения показательно можно увидеть на примере уничтожения нефтяной пленки, т.к. нефть и нефтепродукты наносят особый вред водоемам. Они образуют на поверхности пленку, препятствующую газообмену между водой и атмосферой, и снижает содержание кислорода в воде. Оседая на дно, сгустки мазута убивают донные микроорганизмы, участвующие в самоочищении воды.

Необходимым условием интенсивного горения пленки нефти или нефтепродукта является условие плотности мощности лазерного излучения не меньше некоторой пороговой величины, составляющей 500-700 Вт/см² в зависимости от сорта нефтепродукта.

Когерентное (лазерное) излучение успешно применяется для удаления из воды различных микроорганизмов и болезнетворных бактерий (паразитов). В зависимости от дозы облучения действие лазера вызывает у микроорганизмов изменения морфологических и биохимических свойств, вплоть до утраты жизнеспособности.

При воздействии лазера длиной волны около 700 нм с энергией 200 Дж происходит повреждение нуклеиновых кислот, денатурация белка и

биологических мембран. Находящиеся в мембранах витамины, антиоксиданты и другие биологически активные вещества также окисляются и теряют свою активность. У бактерий воздействие лазерного излучения вызывает изменение темпа деления клеток и их гибель.

В результате облучения лазером улучшаются показатели по коли-индексу и коли-титру, а также по общему микробному числу, что позволяет отказаться от хлорирования.

Но, к сожалению, некоторые особо токсичные сточные воды большинства предприятий вообще не поддаются очистке никакими современными методами, поэтому их приходится захоранивать, закачивая в подземные хранилища. Таким образом, создаются небезопасные объекты, поскольку всегда существует угроза попадания таких ядовитых вод в подземные водонесные горизонты. Иногда такие воды подвергают испарению в отстойниках, чтобы уменьшить массу и объем отходов, нуждающихся в захоронении. Необходимо всесторонне проанализировать эту проблему и возможность использования когерентного излучения для очистки таких вод.

Развитие промышленных лазерных излучателей позволяет на современном этапе рассматривать процессы лазерной очистки как реальную экономически целесообразную альтернативу классическим методам очистки.

Лазерные методы очистки — наиболее экологически чистый процесс очистки, обеспечивающий дополнительно возможность высокой степени автоматизации процесса.

Основным преимуществом является возможность контроля в реальном времени и в натуральных условиях.

Современный уровень мощности волоконных излучателей способен обеспечить промышленные уровни высокопроизводительной очистки до десятков квадратных метров в час при низкой стоимости процесса.

Список литературы

1. Коржавый А.П., Капустин В.И., Козьмин Г.В. Методы экспериментальной физики в избранных технологиях защиты природы и человека / Под ред. А.П. Коржавого. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2012. 352 с.
2. Никулина С.Н. Роль безреагентной очистки пресных вод при производственной деятельности промышленных предприятий в сохранении здоровья работников.: Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Калуга, 2005.
3. Яковлева О.В. Техничко-технологические основы совершенствования водоподготовки во вспомогательных цехах радиоэлектронного производства.: Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, М., 2008.
4. Доможир В.В., Жукова Ю.М., Никулина С.Н., Николаева Т.С. Новые методы обработки и диагностики пресной воды после ее промышленного использования // Научно-технические технологии. 2014. Т. 15. №10. С.36-40.

5. Коржавый А.П., Яковлева О.В. Технология доочистки сточных вод и пути использования осадка городских очистных сооружений // Научные технологии. 2004. Т. 6. №3-4. С. 60-65.

6. Яковлева О.В., Никулина С.Н. Воздействие лазерного излучения на процесс обеззараживания воды и очистку сточных вод после гальваники // Научные технологии. 2012. Т.13. №2. С. 79-83.

Никулина Светлана Николаевна – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: voinsveta579@mail.ru.

Дыхно Яна Николаевна – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: yasya36@rambler.ru.

Куликова Ирина Игоревна – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: queenirinka@mail.ru.

Санютина Яна Александровна – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: sanutinami160891@mail.ru.

S.N. Nikulina, Y.N. Dykhno, I.I. Kulikova, Y.A. Sanutina

MECHANISM OF ACTION OF COHERENT RADIATION FOR VARIOUS AQUATIC POLLUTANTS

Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch, Kaluga, 248000, Russia

Nowadays with escalation of anthropogenic human activity and technogenic influence on natural environment, the problem of water pollution became especially popular. There's a huge variety of methods of water objects purification from different sources of pollution, but most of them are not effective enough, and can even cause some additional pollution. In this article there is a research about mechanisms of larger influence on different water pollution sources: chemical and biological. It also discusses the advantages of laser cleaning method relative to the other. The principle of cleaning with the laser is based on the photomechanical reaction happening at interaction between a beam of light and the polluting layer. Water purification method of coherent ray can be used as alternative, because of much more economic and useful.

Keywords: coherent radiation , waste water, water pollutants , laser methods of water purification.

List of references

1. Korzhavy A.P., Kapustin V.I., Kozmin G.V. Methods of experimental physics in selected technologies to protect nature and man / Ed. A.P. Korzhavogo. M.: of MSTU named after N.E. Bauman. 2012. 352 p.
2. Nikulina S.N. The role of nonchemical treatment of fresh water during the production of industrial enterprises in the preservation of the health of workers.: thesis for the degree of candidate of technical sciences, Kaluga, 2005.
3. Yakovleva O.V. Technical and technological basis for improvement of water treatment in the production of electronic auxiliary shops.: thesis for the scientific degree of Candidate of Technical Sciences, Moscow, 2008.
4. Domozhir V.V., Zhukov Y.M., Nikulin S.N., Nikolaeva T.S. New methods of treatment and diagnosis of fresh water after its industrial use // High Tech. 2014 T. 15. №10. P. 36-40.
5. Korzhavy A.P., Yakovleva O.V. Tertiary sewage treatment technology and ways of using sludge municipal wastewater treatment plants // High Tech. 2004. T. 6. №3-4. p. 60-65.
6. Yakovleva O.V., Nikulina S.N. Laser irradiation on the process of disinfecting water and wastewater treatment after electroplating // High Tech. 2012. T. 13. №2. P. 79-83.

Nikulina Svetlana Nicolaevna, Ph. D., Assoc. Professor of Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University. E-mail: voinsveta579@mail.ru.

Dykhno Yana Nicolaevna – student of the Kaluga Branch of the Bauman Moscow State Technical University. E-mail: yasya36@rambler.ru.

Kulikova Irina Igorevna – student of the Kaluga Branch of the Bauman Moscow State Technical University. E-mail: queenirinka@mail.ru.

Sanutina Yana Alexandrovna – student of the Kaluga Branch of the Bauman Moscow State Technical University. E-mail: sanutinami160891@mail.ru.

В.В. Максимов, А.А. Матеров, Э.Э. Мирзоев.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫХОДА МЕДИ И СОСТАВА ОСАДКА ПРИ КАТАЛИТИЧЕСКОМ ВОССТАНОВЛЕНИИ СУЛЬФАТНО-ХЛОРИДНЫХ РАСТВОРОВ МЕДИ(II)

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Приводятся результаты исследования процесса восстановления меди(II) до меди(I) в хлоридно-сульфатных растворах под действием оксида углерода(II) при атмосферном давлении в присутствии катализатора - хлорида палладия(II). Этот процесс описывается общим уравнением (1): $2\text{Cu}^{2+} + 2\text{SO}_4^{2-} + 2\text{Cl}^- + \text{CO} + \text{H}_2\text{O} \xrightarrow{\text{Pd(II)}} 2\text{CuCl} + \text{CO}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{SO}_4^{2-}$ (1) Показано наличие смеси продуктов в осадке, полученном гидрокарбонильным способом.

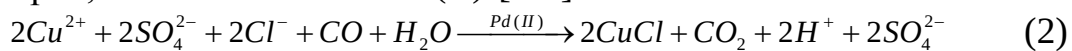
Таким образом, процесс восстановления $\text{Cu(II)} \rightarrow \text{Cu(I)}$ действием CO катализируется в начальной стадии Pd(II), а затем развивается в автокаталитическом режиме с дальнейшим редоксораспадом интермедиатов.

Ключевые слова: медь, медь(II), медь(I), CO каталитическое восстановление, механизм, карбонилхлорид меди(I), гидрокарбонильный способ.

Одним из методов получения металлов в дисперсном состоянии является химическое восстановление их соединений при использовании в качестве восстановителя монооксида углерода.

На первом этапе был получен и определялся состав осадка при каталитическом восстановлении $\text{Cu(II)} \rightarrow \text{Cu(I)}$ гидрокарбонильным способом.

Реакция восстановления Cu(II) до Cu(I) , при атмосферном давлении и комнатной температуре, под действием CO протекает лишь в присутствии катализаторов, в частности солей Pd(II) [1-4]:



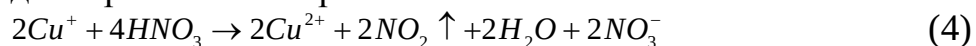
При взаимодействии CuCl и CO были выделены бесцветные пластинчатые кристаллы $\text{CuCOCl} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ [5-7].

При $t = 25^\circ\text{C}$ по реакции (2) нами был получен и выделен белый, перламутрового оттенка, пластинчатый осадок. По результатам дальнейшего исследования осадка, гравиметрически было определено содержание Cl^- ионов, с избытком нитратом серебра в растворе азотной кислоты:



Полученное по расчетам значение $n_{\text{Cl}^-} \sim 0,003 \text{ моль}$

Далее вторая часть осадка была переведена в раствор по средством окисления ионов Cu^+ до Cu^{2+} концентрированной азотной кислотой и дальнейшим йодометрическим титрованием:

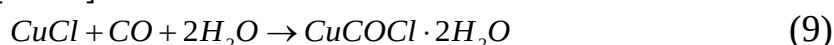




Полученное по расчетам значение $n_{\text{Cu}^{2+}} \sim 0,003 \text{ моль}$.

После пересчета результатов аналитического исследования на одинаковое по массе количество взятого карбонилхлорида меди(I) была получена его брутто-формула Cu_3COCl_3 (содержание CO считалось по разности массы осадка за вычетом массы ионов Cu^+ и Cl^- , где $n_{\text{Cu}^+} = n_{\text{Cu}^{2+}}$).

По данным анализа молярные соотношения $\text{Cu}:\text{CO} = 1:1$, что вероятно указывает на смесь $\text{CuCOCl} + 2\text{CuCl}$ (возможно $\text{CuCOCl} + [\text{CuCl}_2]^-$):



или образование кластерного соединения состава $\text{Cu}_x(\text{CO})_y\text{Cl}_x$, где $y < x$:



что наглядно доказывает ИК спектр (рис. 1).

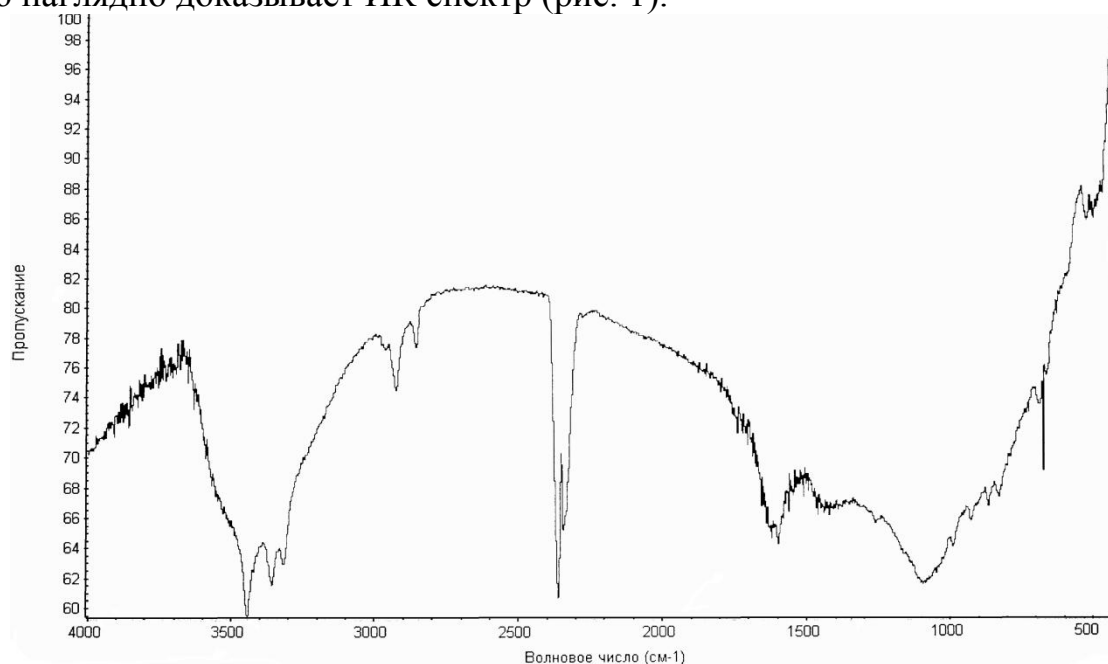


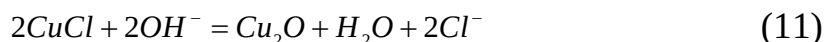
Рис.1 ИК спектр полученного осадка гидрокарбонильным способом

На спектре (рис. 1) прослеживаются характеристические частоты карбонильных групп, координированных с атомами металла, при этом 2320 отвечает однокоординированной карбонильной группе, а 2360 - мостиковой. Это подтверждает образование кластеров $\text{Cu}-\text{CO}-\text{Cu}$, содержащих мостиковые CO группы.

Полосы 1380, 1460, 1600 соответствуют валентным колебаниям связей $\text{Cu}-\text{Cl}$, а 2850, 2900, 2950 - обертонам колебаниям связей $\text{Cu}-\text{Cl}$. Интенсивный наплыв 3300-3600 соответствует колебаниям молекул кристаллизационной воды, что вполне может соответствовать смеси продуктов $\text{CuCOCl} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ и CuCl (или $[\text{CuCl}_2]^-$) [7].

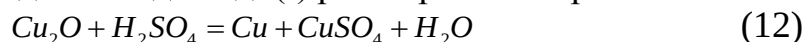
Анализ полученных экспериментальных результатов позволяет предположить, что при гидрокарбонильном каталитическом восстановлении $Cu^{II} \rightarrow Cu^I$ происходит образование осадка, состоящего из смеси продуктов реакции - хлорида меди(I), карбонилхлорида меди $CuCOCl \cdot 2H_2O$. При протекании реакции (2) образующаяся $Cu(I)$ может находиться в разных формах в зависимости от концентрации хлорид-ионов и температуры [8].

На втором этапе определялся выход чистой меди. Хлорид меди(I) подвергался гидролитическому разложению в щелочной среде. Переработка $CuCl$ на Cu_2O проходила при постоянном помешивании и температуре близкой к кипению - 70-90°C:



При щелочном гидролизе хлорида меди(I) образовывался кристаллический осадок оксид меди(I) красно-коричневого цвета, который отфильтровывался и шел на дальнейшую переработку. Остаточное содержание хлорид-ионов в оксиде меди(I) составило 0,085% [3].

Далее полученный осадок оксида меди(I) растворялся в серной кислоте:



Процесс (12) протекает быстро и приводит к дополнительной очистке меди.

Выход меди по технологической схеме:



составил приблизительно 70-80%.

Также можно отметить, что процесс практически безотходный, т.к. оставшийся после гидрокарбонилирования раствор можно использовать повторно, тем самым свести потери меди и отходы к минимуму.

Анализ полученных результатов позволяет судить об экономической выгоды и экологической чистоте данного процесса (раствор $CuSO_4$ может быть переработан повторным гидрокарбонилированием или электролизом с нерастворимым анодом, что на половину снизит расход электроэнергии на общую массу получаемой меди и повысит чистоту катодной меди) [3].

Литература

1. Спицын В.И., Федосеев И.В., Пономарев А.А., Елесин А.И. Кинетика и механизм каталитического восстановления $Cu(II)$ окисью углерода в присутствии хлорида $Pd(II)$. // Журн. неорг. химии, 1978, т. XXIII, вып. 2, с. 454-456.
2. Федосеев И.В. Гидрокарбонильный процесс обезмеживания растворов. // Цветные металлы, 2005, № 8, с. 22-25.
3. Федосеев И.В., Максимов В.В. Селективное выделение меди при гидрокарбонилировании сульфатно-хлоридных растворов цветных металлов. // Цветные металлы, 2010, №12, стр. 39-40.
4. Федосеев И.В., Максимов В.В. Использование гидрокарбонильного процесса в совершенствовании технологии производства меди. // Цветные металлы, 2012, №9, стр. 21-24.
5. Souma Y., Sano H. // Nippon Kagaku Zasshi, 1970, v. 91, №7, p. 625-630.
6. Sano H. // Nippon Kagaku Zasshi, 1970, v. 91, №7, p. 630-636.

7. Hieber W., Fack E. // Z. anorg Chem., 1938, b. 236, s. 83-106.

8. Федосеев И.В., Максимов В.В., Логинова А.Ю. Механизм гидрокарбонильного процесса каталитического восстановления $Cu(II) \rightarrow Cu(I)$. // Сборник научных трудов Sworld, 2012, т. 32, №3, с. 56-61.

Максимов Владимир Владимирович – ст. преп. КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: maksimov_W@mail.ru.

Матеров Андрей Александрович – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: materov.andrey@mail.ru.

Мирзоев Эльмар Эльдарович – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: elmar6@mail.ru.

V.V. Maksimov, A.A. Materov, E.E. Mirzoev

DETERMINATION OF AN OUTPUT OF COPPER AND COMPOSITION OF SEDIMENT IN THE CATALYTIC REDUCTION OF SULFATE-CHLORIDE SOLUTIONS OF COPPER (II)

Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch, Kaluga, 248000, Russia

The results of the study of $Cu(II)$ to $Cu(I)$ reduction process in chloride-sulfate solutions under the action of carbon monoxide at atmospheric pressure in the presence of palladium chloride(II) acting as catalyst are reported. This process is described by general equation (1):
$$2Cu^{2+} + 2SO_4^{2-} + 2Cl^- + CO + H_2O \xrightarrow{Pd(II)} 2CuCl + CO_2 + 2H^+ + 2SO_4^{2-} \quad (1)$$

It has been shown product mix in the sediment obtained hydrocarbonyl process.

Thus, the recovery process $Cu(II) \rightarrow Cu(I)$ with the action of CO is catalyzed by $Pd(II)$ in the initial stage, and then develops in an autocatalytic mode with the subsequent redox decomposition intermediate.

Key words: copper(II), copper(I), CO catalytic reduction, mechanism, carbonylchloride copper(I), hydrocarbonyl process.

Maksimov Vladimir Vladimirovich, Senior lecturer of Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University. E-mail: maksimov_W@mail.ru.

Materov Andrey Aleksandrovich, student of the Kaluga Branch of the Bauman Moscow State Technical University. E-mail: materov.andrey@mail.ru.

Mirzoev Elmar Eldarovich, student of the Kaluga Branch of the Bauman Moscow State Technical University. E-mail: elmar6@mail.ru.

А.Ю. Логинова, Е.А. Мишина, Н.А. Силаева,
Е.В. Власенкова

РОЛЬ АКТИВНЫХ ФОРМ КИСЛОРОДА В ПРОЦЕССАХ САМООЧИЩЕНИЯ ПРИРОДНЫХ ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Природную воду можно рассматривать как окислительно-восстановительную систему открытого типа, которая включает валентно-насыщенные микрообъекты (молекулы, ионы), так и широкий спектр валентно-ненасыщенных свободных радикалов и ион-радикалов. Активные формы кислорода (АФК) обладают выраженной окислительной активностью и инициируют реакции перекисного окисления в биологических и природных водных системах.

Целью данной работы явилось изучение влияния АФК на процессы самоочищения, протекающие в природных водных экосистемах.

В соответствии с целью были поставлены основные исследовательские задачи:

- рассмотреть роль АФК в биологических и природных водных системах;
- разработать новый чувствительный и достаточно простой метод анализа содержания АФК в природных водных системах.

На основании исследований можно сделать следующие выводы:

- убедительно доказано, что эффективность процесса самоочищения определяется способностью «живых» природных водных экосистем генерировать АФК, участвующие в процессах перекисного окисления;
- предложен новый аналитический метод, позволяющий с достаточным приближением оценить стационарную концентрацию АФК;
- метод проверен в натуральных условиях на примере некоторых водных объектов Калужской области.

Ключевые слова: «живая» природная вода, активные формы кислорода (АФК), метод определения стационарной концентрации АФК.

Природная вода – «живая система» – процессы в которой аналогичны процессам, протекающим в живых организмах, в том числе и в организме человека. Очистка под действием вырабатываемых активных форм кислорода (АФК) является обязательной формой нормального экологического состояния.

Фундаментальным для жизнедеятельности водных экосистем является цикл кислорода. Окислительно-восстановительные процессы с участием растворенного кислорода протекают с образованием промежуточных активных форм. Однако до настоящего времени механизмы этих процессов в природных водах практически не изучены. Стационарная концентрация АФК в значительной степени зависит от совокупности факторов антропогенного воздействия на водные экосистемы [1].

Данная работа представляет собой разработку чувствительного метода оценки состояния природных водных экосистем на основе их способности генерировать АФК.

Важнейшим окислительным компонентом в природных водах считается растворенный молекулярный кислород. Однако в силу триплетности основного состояния при нормальных условиях O_2 – кинетически инертная молекула. Высокая реакционная способность кислорода определяется в основном не молекулярной формой, а промежуточными активными продуктами его биогеохимического цикла.

Прямые измерения содержания в природных водах продуктов активации кислорода были сделаны американскими исследователями и советскими учёными в начале 80-х годов 20 века. В соответствии с этими данными стационарная концентрация пероксида водорода составляет $10^{-5} - 10^{-6}$ моль/л и стационарная концентрация синглетного кислорода в поверхностных водах варьирует в пределах $10^{-14} - 10^{-12}$ моль/л, гидроксильных радикалов ($OH^\bullet$) – $10^{-18} - 10^{-15}$ моль/л, супероксидных ($O_2^{\bullet-}$) – $10^{-17} - 10^{-9}$ и перекисных (RO_2) радикалов – $10^{-11} - 10^{-8}$ моль/л [2]. С учетом чрезвычайно высокой реакционной способности этих компонентов абиотической составляющей приведенные значения их стационарных концентраций позволяют оценить вклад свободно-радикальных процессов в самоочищение природной водной среды.

Сам пероксид водорода может быть окислителем, однако его окислительная способность невелика. Под действием УФ-излучения пероксид водорода распадается с образованием АФК. Схема реакций разложения пероксида водорода и дальнейших взаимодействий активных частиц, образующихся при его распаде под действием УФ-излучения, представлена в таблице 1. При составлении таблицы использовались данные работ [2].

Таблица 1

Реакции распада пероксида водорода под действием УФ-лучей в водной среде

№	Реакции в жидкости	k_i , л/(моль·с)
1	$2H_2O_2 + 2h\nu \rightarrow 2OH^\bullet + H_2O_2$	
2	$OH^\bullet + OH^\bullet \rightarrow H_2O_2$	$5,5 \cdot 10^9$
3	$OH^\bullet + HO_2^\bullet \rightarrow O_2 + H_2O$	$1,4 \cdot 10^{10}$
4	$OH^\bullet + H_2O_2 \rightarrow HO_2^\bullet + H_2O$	$2,7 \cdot 10^7$
5	$HO_2^\bullet + H_2O_2 \rightarrow OH^\bullet + H_2O + O_2$	3,7
6	$HO_2^\bullet + HO_2^\bullet \rightarrow H_2O + O_2$	$8,3 \cdot 10^5$

Получаемые в результате этих реакций свободные радикалы (обозначаются точкой) и активные формы кислорода очень опасны, так как являются очень сильными окислителями (оксидантами). Молекулы каждого из этих видов представляют собой опасность для живых клеток вследствие повреждений, которые они способны причинить всем видам биомолекул,

особенно белкам и липидам. Другими словами токсичность кислорода обусловлена токсичностью активных соединений, которые могут из него образовываться. По сути, под свободным радикалом принято понимать молекулу, или ее часть, имеющую неспаренный электрон на молекулярной или на внешней (валентной) атомной орбите, то-есть у молекулы или у атома появляется свободная валентность. Это и обуславливает высокую химическую активность свободных радикалов. Свободные радикалы не стабильны, так как они обладают большой реакционной способностью. В биологических системах свободные радикалы образуются либо в качестве нормальных продуктов обмена веществ, либо возникают при измененных условиях жизнедеятельности (при действии на клетку ионизирующего излучения, токсических веществ, многих заболеваний). Много свободных радикалов образуется и при окислительно-восстановительных реакциях, в том числе и при работе дыхательной цепочки, то-есть в организме человека постоянно происходят процессы свободно-радикального окисления, интенсивность которых наиболее велика в липидах (особенно в фосфолипидах). Считается, что свободные радикалы составляют до $\frac{1}{4}$ от общего числа активных частиц нормально функционирующих тканей.

В организме образуются весьма активные молекулярные соединения: перекись водорода, гипохлорит и гидроперекиси липидов. Такие молекулы, наряду с радикалами, получили в англоязычной литературе название “reactive species”, что в русской литературе чаще всего переводится как “активные формы”. К активным формам кислорода относятся супероксид, радикал гидроксила, пероксид водорода и синглетный кислород.

Для свободных радикалов характерны цепные реакции, то-есть процессы, в которых участвуют свободные радикалы, вызывают цепь превращений молекул вещества, порождая новые активные свободные радикалы, легко реагирующие с другими молекулами. Поскольку промежуточным продуктом разветвленных цепных реакций являются перекиси и скорость данных реакций зависит от их концентраций, весь этот процесс называют перекисным окислением [3].

По оценке [4] от 10 до 50% H_2O_2 распадается в природной воде с образованием свободных $OH^\bullet$ -радикалов и других АФК.

В последние годы появилось множество работ по определению содержания пероксида водорода в различных водных объектах – в морях и океанах, реках и озерах, в дожде и снеге и даже в ископаемых льдах Гренландии и Антарктиды. Вывод единодушен: пероксид водорода – неотъемлемый компонент природной водной среды. Можно даже утверждать, что до вмешательства человека эволюция аэробной жизни на Земле происходила не только на фоне присутствия кислорода и воды, но и пероксида водорода.

Имеется четыре главных источника происхождения пероксида водорода в водной среде: 1) поступление из атмосферы, 2) образование в результате каталитических процессов окисления, протекающих с участием кислорода, 3) образование в результате фотохимических реакций под действием солнечного света и 4) образование в результате биологической эмиссии [3].

Оба процесса – образование и разложение H_2O_2 в организме человека как и в природной воде – сопровождаются эффективной генерацией реакционноспособных частиц, участвующих в самоочищении «живой»

водной среды – радикалов $\text{OH}^\bullet$ и $\text{O}_2^\bullet$, комплексов металлов и аномально высоких состояниях окисления [4].

Основные этапы круговорота биогенных элементов в водной среде – разложение и синтез органического вещества сопровождаются сдвигом углекислотного равновесия, что приводит к изменению pH среды. Исходя из этого обобщенным показателем динамики неравновесных процессов в воде в проведенных исследованиях выбрано изменение значений водородного показателя. Измерения pH осуществлялись при помощи иономера И-130М при комнатной температуре. Основные опыты были проведены на пробах воды из следующих рек: Ока (г.Калуга), Яченское водохранилище (г.Калуга), Шаня (г.Кондрово), Угра (Дзержинский р-он, д.Матово), Угра (Перемышльский р-он), Болва (Людиновский р-он), Протва (таблица 2).

Таблица 2

Зависимость показателя pH во времени								
Наименование	Показатели							
р.Шаня	дни	0	10	20	30	40	50	60
	pH	8,03	7,6	7,65	7,97	8,2	8,22	8,22
р.Ока	дни	0	10	20	30	40	50	60
	pH	7,28	6,62	6,77	6,92	7,2	7,39	7,39
р.Угра (Перемышльский р-он)	дни	0	10	20	30	40	50	60
	pH	7,58	7,01	7,18	7,45	7,68	7,73	7,73
р.Болва (Людиновский р-он)	дни	0	10	20	30	40	50	60
	pH	7,34	6,82	6,89	7,2	7,47	7,51	7,51
р.Угра (Дзержинский р-он)	дни	0	10	20	30	40	50	60
	pH	8,32	7,93	7,98	8,4	8,56	8,62	8,62
Яченское водохранилище	дни	0	10	20	30	40	50	60
	pH	8,63	8,21	8,36	8,6	8,7	8,73	8,73
р.Болва+ H_2O_2		0	10	20	30	40	50	60
	pH	7,4	7,85	8,25	8,35	8,37	8,37	7,4

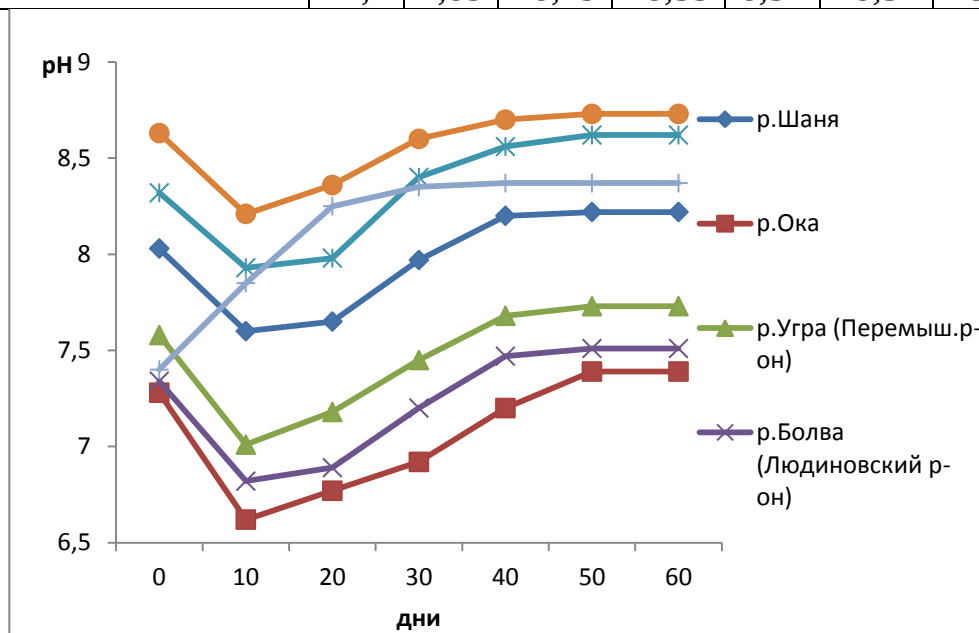


Рисунок 1 – Зависимость показателя pH во времени

В ходе проводившихся экспериментов установлено, что в любой отдельно взятой пробе природной воды наблюдается естественное увеличение водородного показателя во времени в анаэробных темновых условиях. Уменьшение pH на кривых в первые 10 дней проведения опыта объясняется постепенным растворением углекислоты, образующейся в результате окисления АФК органической составляющей пробы. В дальнейшем через 40 – 50 дней во всех пробах наблюдалась тенденция увеличения и стабилизация водородного показателя.

Добавление пероксида водорода (0,1 моль/л) в пробы природной воды увеличивает эффект возрастания pH. Источником подщелачивания являются окислительно-восстановительные реакции с участием пероксида водорода. Разложение пероксида водорода в водных растворах происходит непрерывно под влиянием разнообразных физико-химических воздействий: тепла, света, кавитации и т.п. восстановление пероксида водорода может происходить либо через диссоциацию с образованием гидроксил-иона и гидроксильного радикала, либо через протонирование и распад на воду и гидроксильный радикал (см. табл.1).

Гидроксильный радикал является самым реакционноспособным окислителем в природной среде и способен реагировать практически со всеми растворенными в воде органическими и неорганическими веществами. Основные пути превращения гидроксильных радикалов в водных растворах – это отрыв водорода от органических соединений с образованием воды и органического радикала, гидроксилирование ненасыщенных органических соединений и реакции одноэлектронного переноса с анионами. В результате подобных радикальных перегруппировок образуются более стабильные и долгоживущие радикалы. Рекомбинация углеродсодержащих радикалов приводит в конечном итоге к появлению органических соединений, и это служило причиной образования осадка в проводившихся опытах. Образование подобного осадка рыжевато-коричневого цвета имело место как в чистых растворах гидрокарбонатов, так и водопроводной воде при длительном отстаивании.

В речной воде образующийся осадок, как правило, более темный, что связано с включением в процессы радикальных превращений фрагментов гумусовых соединений, присутствующих в значительных количествах в природных водах.

Если в водных растворах происходит накопление карбонат-ионов, то восстановление гидроксильных радикалов наиболее вероятно по следующей схеме (1):



Лимитирующим фактором реакции (1) является активность гидроксильных радикалов, концентрация которых в природных водах составляет $10^{-15} - 10^{-17}$ моль/л. В случае добавления перекиси водорода концентрация гидроксил-ионов должна увеличиваться, и эффект подщелачивания в результате реакции (1) станет более заметным. Факторы, ускоряющие про-

цесс разложения пероксида водорода, в том числе солнечный свет, должны усиливать подщелачивание. Именно такое поведение растворов и наблюдалось в проводившихся опытах [6].

Для определения стационарной концентрации АФК в природных водах мы использовали в качестве генерирующего агента Fe^{2+} по известной реакции Фентона. Модель процесса в кислой среде включает реакции 2 – 16, приведенные в таблице 3.

Таблица 3

Кинетическая модель процесса реакции Фентона

№	Реакция	Константа скорости, л/(моль·с)
2	$\text{Fe}^{2+} + \text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow \text{Fe}^{3+} + \text{OH}^\bullet + \text{OH}^-$	$k=56$
3	$\text{OH}^\bullet + \text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow \text{HO}_2^\bullet + \text{H}_2\text{O}$	$k=3 \cdot 10^7$
4	$\text{Fe}^{2+} + \text{OH}^\bullet \rightarrow \text{Fe}^{3+} + \text{OH}^-$	$k=8,3 \cdot 10^5$
5	$\text{HO}_2^\bullet + \text{HO}_2^\bullet \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2 + \text{O}_2$	$k=3 \cdot 10^8$
6	$\text{OH}^\bullet + \text{OH}^\bullet \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \frac{1}{2}\text{O}_2$	$k=5,5 \cdot 10^9$
7	$\text{OH}^\bullet + \text{HO}_2^\bullet \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$	$k=7,1 \cdot 10^9$
8	$\text{HO}_2^\bullet \rightarrow \text{H}^+ + \text{O}_2^{\bullet -}$	$k=7,5 \cdot 10^6$
9	$\text{H}^+ + \text{O}_2^{\bullet -} \rightarrow \text{HO}_2^\bullet$	$k=1,2 \cdot 10^2$
10	$\text{HO}_2^\bullet + \text{O}_2^{\bullet -} \rightarrow \text{HO}_2^- + \text{O}_2$	$k=9,7 \cdot 10^7$
11	$\text{HO}_2^\bullet + \text{OH}^- \rightarrow \text{O}_2^{\bullet -} + \text{H}_2\text{O}$	$k=1010$
12	$\text{O}_2^{\bullet -} + \text{Fe}^{3+} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + \text{O}_2$	$k=1,9 \cdot 10^9$
13	$\text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow \text{HO}_2^- + \text{H}^+$	$k=2 \cdot 10^{-2}$
14	$\text{HO}_2^- + \text{H}^+ \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2$	$k=1010$
15	$\text{OH}^\bullet + \text{HO}_2^- \rightarrow \text{HO}_2^\bullet + \text{OH}^-$	$k=7,5 \cdot 10^9$
16	$\text{O}_2^{\bullet -} + \text{OH}^\bullet + \text{H}^+ \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2(\text{s})$	$k=1010$

В работе [1] было убедительно доказано, что для случая $[\text{Fe}^{2+}] > [\text{H}_2\text{O}_2]$ при $[\text{H}_2\text{O}_2] = 10^{-3} - 10^{-5}$ моль/л величина предельной концентрации образующегося $[\text{Fe}^{3+}]$ определяется тем, что одна молекула H_2O_2 распадается на два гидроксильных радикала, каждый из которых окисляет одну молекулу двухвалентного железа.

При концентрациях $[H_2O_2]=10^{-3} - 10^{-5}$ моль/л за 60 секунд. Успевают произойти число актов окисления, равное количеству образующихся при распаде пероксида водорода гидроксильных радикалов.

Влияние реакции (12) было бы существенным только для системы в которой $[Fe^{2+}] > [H_2O_2]$. В наших исследованиях природных вод таких концентраций не обнаружено.

Анализ кинетической модели реакции Фентона в задаваемых условиях показала, что основной активной частью в исследуемых водных системах является гидроксильный радикал. Спектрофотометрический метод реакции Фентона основан на образовании интенсивно окрашенных комплексов железа (III) с тиоцианат-ионами. Для получения воспроизводимых и точных результатов концентрация тиоцианат-ионов во всех растворах поддерживалась постоянно.

Раствор $[Fe^{2+}]=0,1$ моль/л готовили непосредственно перед экспериментом. Регистрация оптической плотности проводилась на фотоколориметре КФК-2. Максимум спектра поглощения в исследуемых системах ионов $[Fe^{3+}]$ находится при длине волны 440 нм. Регистрация оптической плотности начиналась через 60 секунд после введения в исходные пробы природной воды $[Fe^{2+}]$. Измерения проводились в кислой среде ($pH=2,5$) в связи с тем, что в ней исходное $[Fe^{2+}]$ стабильно, а образующийся $[Fe^{3+}]$ не выпадает в осадок [1]. Полученные значения оптической плотности для исследуемых рек приведены в таблице 4.

Таблица 4

Показатели оптической плотности в исследуемых реках

Наименование	Оптическая плотность
р.Шаня (г.Кондрово, Дзержинский р-он)	0,24
р.Ока (г.Калуга)	0,13
р.Угра (Перемышльский р-он)	0,18
р.Болва (Людиновский р-он)	0,59
р.Угра (Дзержинский р-он)	0,35
р.Протва	0,15
Яченское водохранилище (г.Калуга)	0,3

Анализ результатов показывает большую разницу в окислительной способности природных водных речных систем. Максимальное значение оптической плотности и следовательно АФК обнаружено в р.Болва (Людиновский р-он), а минимальное в р.Ока (г.Калуга), р.Протва, р.Угра. Следовательно, по результатам анализа эти реки теряют способность к самоочищению, что уже приводит к их эвтрофированию. Безусловно способность вырабатывать АФК может изменяться в природной водной среде от многих

факторов, но тем не менее, если эти показатели останутся минимальными, независимо от времени года, можно будет сделать более серьёзные выводы.

Безусловно, способность вырабатывать АФК имеет сезонные, и даже суточные колебания в соответствии с изменением солнечной активности, температуры, загрязнённости рек. Однако, устойчивое отношение результатов анализа позволит сделать соответствующие выводы о состоянии природных водных экосистем.

Убедительно доказано, что АФК играют важную роль в формировании химического состояния природной водной среды и ее способности к самоочищению. В данной работе предложен чувствительный метод по определению стационарной конструкции АФК в природных водных экосистемах, позволяющий сделать выводы об их экологическом состоянии.

Список литературы

1. Гурикова Ю.В., Бондаренко Н.Ф. Природная вода как окислительная среда. Журнал физ. Хим., 2001, Т.75, №7, с.640.
2. Аристова Н.А., Иванова И.П., Трофимова С.В., Князев Д.И., Пискарев И.М. Люминол зависимое свечение, сопровождающее реакцию Фентона. Электронный научный журнал «Исследовано в России», 2011, с.77 – 86.
3. Роль свободных радикалов. Курсовой проект. ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, 2010, с.10.
4. Скурлатов Ю.И. Определяющая роль окислительно-восстановительных процессов в формировании качества природной водной среды. Выпуск 3. Успехи химии, 1991, с.575 – 580.
5. Штамм Е.В. Экологическая химия водной среды. М: Центр Международных проектов ГКНТ, 1988, с.278.
6. Аристова Н.А., Иванова И.П., Трофимова С.В., Князев Д.И., Пискарев И.М. Люминол зависимое свечение, сопровождающее реакцию Фентона. Электронный научный журнал «Исследовано в России», 2011, с.77 – 86.

Логинова Алла Юрьевна – канд. хим. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: kf_mgtu_fiz@mail.ru.

Мишина Екатерина Алексеевна – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: mishinacaterina@yandex.ru.

Силаева Наталья Альбертовна – ст.преп. КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: silaeva1968@list.ru.

Власенкова Елена Валерьевна – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: vlaselen2009@yandex.ru.

A.Y. Loginova, E.A. Mishina, N.A. Silaeva, E.V. Vlasenkova

PART OF REACTIVE OXYGEN SPECIES IN THE PROCESS OF SELF-PURIFICATION OF NATURAL AQUATIC ECOSYSTEMS

Natural water can be regarded as a redox system open type, which includes a valence-saturated microobjects (molecules and ions), and a wide range of valence-unsaturated free radicals and radical ions. Reactive oxygen species (ROS) have severe oxidative activity and initiate peroxidation reaction in biological and natural water systems. The aim of this work was to study the effect of ROS on the self-purification processes occurring in natural aquatic ecosystems.

In accordance with the purpose of been supplied basic research tasks:

- Consider the role of ROS in biological and natural water systems;*
- Develop a new sensitive and relatively simple method of analyzing the content of ROS in natural aquatic systems.*

Based on the research, the following conclusions:

- It is conclusively proven that the efficiency of the process depends on the ability of self-purification "living" natural aquatic ecosystems generate ROS involved in the processes of peroxidation;*
- Propose a new analytical method that allows a good approximation to estimate the stationary concentration of ROS;*
- Method tested under natural conditions on the example of some water bodies of the Kaluga region.*

Key words: *"living" natural water, reactive oxygen species (ROS), the method of determining the steady-state concentration of ROS.*

Loginova Alla Yuryevna, Ph. D., Assoc. Professor of Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University. E-mail: voinsveta579@mail.ru.

Mishina Ekaterina Alexeevna, student of the Kaluga Branch of the Bauman Moscow State Technical University. E-mail: queenirinka@mail.ru.

Silaeva Natalia Albertovna, Senior lecturer of Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University. E-mail: maksimov_W@mail.ru.

Vlasenkova Elena Valer'evna, student of the Kaluga Branch of the Bauman Moscow State Technical University. E-mail: queenirinka@mail.ru.

В.В. Гришакова, А.А. Матеров

АНАЛИЗ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ЗА СОСТОЯНИЕ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА В ГОРОДАХ И НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТАХ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Мониторинг – система наблюдения, оценки и прогноза изменений состояния окружающей среды под влиянием антропогенного воздействия.

В соответствии с типами загрязнений мониторинг бывает глобальный, региональный, импактный, базовый; по способам наблюдения – авиационный, космический, дистанционный; по задачам - прогностический.

Основные цели мониторинга состоят в обеспечении своевременной и достоверной информацией, позволяющей оценить показатели состояния экосистем и среды обитания человека; выявить причины изменения этих показателей и оценить последствия таких изменений; а также определить корректирующие меры в тех случаях, когда целевые показатели экологических условий не достигаются; создать предпосылки для определения мер по исправлению возникающих негативных ситуаций до того, как будет нанесен ущерб.

Мониторинг атмосферного воздуха - это система наблюдений за состоянием атмосферного воздуха и источниками его загрязнения, а также оценка и прогноз основных тенденций изменения качества атмосферного воздуха в целях своевременного выявления негативных воздействий природных и антропогенных факторов.

Организация наблюдений за уровнем загрязнения атмосферы в городах и населенных пунктах осуществляется в соответствии с ГОСТ 17.2.3.01 — 86 «Охрана природы. Атмосфера. Правила контроля качества воздуха населенных пунктов». Наблюдения за уровнем загрязнения атмосферы производятся на посту, представляющем собой заранее выбранное для этой цели место (точку местности), на котором размещается павильон или автомобиль, оборудованный соответствующими приборами.

На сегодняшний день мониторинг атмосферного воздуха в городах и населенных пунктах проводится за счет постов наблюдения. Посты наблюдения подразделяются на три категории: стационарные, маршрутные и передвижные (подфакельные).

Стационарный пост наблюдений представляет собой специально оборудованный павильон, в котором размещена аппаратура, необходимая для регистрации концентраций загрязняющих веществ и метеорологических параметров по установленной программе. Из числа стационарных постов необходимо выделить опорные стационарные посты, которые предназначены для выявления долговременных изменений содержания основных

или наиболее распространенных загрязняющих веществ. При этом заранее определяется круг задач, к которым относятся оценка среднемесячной, сезонной, годовой и максимальной разовой концентраций, вероятности возникновения концентраций, превышающих ПДК, и др.

Перед установкой поста следует проанализировать: расчетные поля концентраций по всем ингредиентам от совокупности выбросов всех стационарных и передвижных источников; особенности застройки и рельефа местности; перспективы развития жилой застройки и расширения предприятий промышленности, энергетики, коммунального хозяйства, транспорта и других отраслей городского хозяйства; функциональные особенности выбранной зоны; плотность населения; метеорологические условия данной местности и др. Пост должен находиться вне аэродинамической тени зданий и зоны зеленых насаждений, его территория должна хорошо проветриваться, не подвергаться влиянию близкорасположенных низких источников загрязнения (стоянок автомашин, мелких предприятий с низкими выбросами и т.п.). Количество стационарных постов в каком-либо городе (населенном пункте) определяется численностью населения, рельефом местности, особенностями промышленности, функциональной структурой (жилая, промышленная, зеленая зона и т.д.), пространственной и временной изменчивостью полей концентраций вредных веществ.

Маршрутный пост наблюдений — это место на определенном маршруте в городе. Он предназначен для регулярного отбора проб воздуха в фиксированной точке местности при наблюдениях, которые проводятся с помощью передвижной аппаратуры. Маршрутные наблюдения осуществляются на маршрутных постах с помощью автолабораторий, серийно выпускаемых промышленностью. Такая передвижная лаборатория имеет производительность около 5000 отборов проб в год, при этом в день на такой машине может производиться 8... 10 отборов проб воздуха. Порядок объезда маршрутных постов ежемесячно меняется таким образом, чтобы отбор проб воздуха на каждом пункте проводился в разное время суток. Например, в первый месяц машина объезжает посты в порядке возрастания номеров, во второй — в порядке их убывания, а в третий — с середины маршрута к концу и от начала к середине и т. д.

Передвижной (подфакельный) пост предназначен для отбора проб под дымовым (газовым) факелом с целью выявления зоны влияния данного источника. Наблюдения осуществляются за специфическими загрязняющими веществами, характерными для выбросов данного предприятия, по специально разрабатываемым программам и маршрутам. Места отбора проб при подфакельных наблюдениях выбирают на разных расстояниях от источника загрязнения с учетом закономерностей распространения загрязняющих веществ в атмосфере. Отбор проб воздуха производится по направлению ветра, последовательно, на расстояниях 0,2...0,5; 1; 2; 3; 4; 6; 8; 10; 15 и 20 км от стационарного источника выброса, а также с наветренной стороны

источника. Под факелом проводятся наблюдения за типичными для данного предприятия ингредиентами с учетом объема выбросов и их токсичности. В зоне максимального загрязнения (по данным расчетов и экспериментальных замеров) отбирается не менее 60 проб воздуха, а в других зонах — не менее 25. Отбор проб воздуха при проведении подфакельных наблюдений производится на высоте 1,5 м от поверхности земли в течение 20...30 мин, не менее чем в трех точках одновременно.

Исходя из изученного материала, можно сделать вывод, об эффективности данных методов и сравнить их.

Стационарные пост наблюдения удобные.

Плюсы:

1. Позволяет производить точные и быстрые замеры атмосферного воздуха.
2. Замеры можно производить в любое время.

Минусы:

1. Достаточно большие финансовые затраты на постройку и обслуживания поста.
2. Трудности с выбором места расположения поста

Метод эффективный, но очень затратный.

Маршрутные посты наблюдения наименее затратные.

Плюсы:

1. Не требует больших финансовых затрат.
2. Большая мобильность.

Минусы:

1. Замеры производятся в строго отведенное время.

Метод позволяет охватить большие территории и не затратный.

Передвижные посты наблюдения привязаны к конкретным объектам.

Плюсы:

1. Позволяет контролировать уровень загрязнения атмосферного воздуха непосредственно в его источнике.
2. Прогнозирование последствий

Минусы:

1. Привязан только к одному месту.

Метод позволяет сделать точные замеры, но не на больших территориях.

Проанализировав различные методики мониторинга атмосферного воздуха, можно сделать вывод о том, что маршрутный метод наиболее эффективный и практичный.

ГришакOVA Вера Васильевна – ст.преп. КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: j.strify2012@yandex.ru.

Матеров Андрей Александрович – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: materov.andrey@mail.ru.

М.И. Христофорова, В.В. Гришакова, С.Н. Никулина

ВОДОПОДГОТОВКА НА СЕВЕРНОМ ВОДОЗАБОРЕ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Вода оказывает огромное влияние на здоровье человека. Чтобы хорошо себя чувствовать, человеку нужно употреблять только чистую качественную питьевую воду.

В последнее время проблема качества питьевой воды становится все более актуальной. В городе Калуга это связано с быстрым ростом населения, с увеличением объемов водопотребления для бытовых и промышленных нужд.

Перед тем, как попасть в дома калужан, вода проходит особую очистку, которая контролируется не одним десятком показателей. От химического состава природной воды напрямую зависит способ подготовки питьевой воды.[1]

В Калуге основные источники водопользования - река Ока и скважины.

На данный момент существует шесть водозаборов подземных вод, объединяющих 68 артезианских скважин и два каптажа ключей, а также комплекс отдельно-стоящих артскважин в количестве 16 штук. Одним из них является Северный водозабор.[2]

Водозаборы предназначены для забора из источника расчетного расхода воды и подачи её потребителю, а также для защиты системы водоснабжения от попадания в нее с водой сора, водорослей, наносов, льда и т.п. По способу забора они подразделяются на сооружения для забора поверхностных и подземных вод.[3]

Станция водоподготовки Северного водозабора относится к сооружениям для забора подземных вод. Подземные источники водоснабжения отличаются более стабильными характеристиками качества воды и относительной защищенностью от загрязнения с поверхности.

Подземные источники водоснабжения окружают зонами санитарной охраны. В такую зону входит территория, на которой расположен водозабор, и все головные водопроводные сооружения (скважины и каптажи, насосные станции, установки для обработки воды, резервуары).[3]

В Северном водозаборе применяется вертикальные водозабор (скважины). В конструкцию скважины входят: ствол скважины, верхняя часть - устье, кондуктор; нижняя - фильтр. Фильтр скважины состоит из трех частей: надфильтровая часть, собственно фильтровая или рабочая часть фильтра, отстойная часть.

Водозаборные скважины сгруппированы в шесть водозаборных узлов и четыре одиночные скважины и расположены вдоль реки Яченка по обоим её берегам. Глубина артскважин колеблется от 47 до 116 м. Скважи-

ны Северного водозабора работают в автоматическом режиме постоянно. Все скважины имеют наземные кирпичные павильоны, а также имеют краны для отбора проб для контроля.

Все скважины Северного водозабора относятся к 3 классу по мутности и содержанию железа и ко 2 классу по цветности, окисляемости, содержанию сероводорода и марганца, характеризуются низким содержанием органических загрязнений. Общий класс водоисточника – 3. В скважинах Северного водозабора содержание железа превышает установленный ПДК (0,3 мг/л). Поэтому вода здесь проходит обязательный процесс безреагентного обезжелезивания.

В состав сооружений водоподготовки Северного водозабора входят: здание станции обезжелезивания - брызгальные установки в количестве двух штук закрытого типа, два контактных резервуара по 550 м³ каждый и 6 скорых фильтров; хлораторная (в 2003 году переведена на гипохлорит натрия); два резервуара чистой воды по 5000 м³ каждый; насосная станция II-го подъема; резервуар-отстойник промывных вод 1400 м³, разделенный на две секции, а между секциями расположена насосная станция; шламовые карты.

Вода артезианских скважин двумя сборными водоводами подается на станцию обезжелезивания в брызгальные установки, откуда сливается в контактные резервуары. Из контактных резервуаров вода собирается по общему коллектору и далее распределяется по фильтрам. Для обезжелезивания воды на Северном водозаборе используются самотечные скорые фильтры. Промывку фильтров производят 2 раза в сутки.

Фильтрованная вода поступает в общий водовод, куда, начиная с 2001 года, вводится сульфат аммония и раствор гипохлорита натрия для обеззараживания перед резервуарами чистой воды.

Очищенная вода собирается в резервуары чистой воды. Они выполняют функции регулирующей и запасной емкости.

Из резервуаров вода забирается насосами насосной станции II-го подъема и тремя водоводами подается в разводящую сеть города. В Северном водозаборе используется полузаглубленная станция II-го подъема.

Промывные воды после резервуара-отстойника подаются опять на брызгальные установки, а шлам периодически откачивается на шламовые карты.

На Северном водозаборе отбор проб осуществляется: с кратностью 1 раз в квартал: органолептические; обобщенные показатели; микробиологические показатели; с кратностью 1 раз в год: азотная кислота, азотистая кислота, хлориды, марганец, сероводород, литий, α -активность, β -активность, радон.

На выходе с насосной станции II-го подъема контроль осуществляется с кратностью и по показателям: с кратностью 1 раз в час: остаточный хлор; с кратностью 3 раза в неделю: органолептические; в связи с проведением обезжелезивания - железо и микробиологические; с кратностью 1 раз в квартал: водородный показатель, жесткость, окисляемость перманганатная; с

кратностью 1 раз в год: азотная кислота, азотистая кислота, аммиак, хлориды, марганец, сероводород, литий, α - активность, β - активность, радон.

Вода из скважин водозабора содержит значительное количество железа, превышающего значение ПДК. Но на выходе из насосной станции II-го подъема, исходя из лабораторных данных, питьевая вода соответствует всем нормам, установленным СанПиН 2.1.4.1074-01 «Питьевая вода».[2]

Северный водозабор обслуживает микрорайоны Терепец, Кубяка и Северный. Несмотря на все загрязнения, вода в этих районах является одной из наиболее чистых в городе Калуга. Процесс водоподготовки на Северном водозаборе - прост и экономичен, но очень эффективен.

Необходимо также проанализировать обстановку и на других водозаборах, выявить основные проблемы и решить задачу так же качественно, как на Северном водозаборе.

Литература

[1] АкваЭксперт.Ру. URL:

<http://www.aquaexpert.ru/news/2012/01/25/kaluga/>

[2] Рабочая программа производственного контроля качества питьевой воды на 2013-2017 годы по водопроводу г.Калуга. ГП «Калугаоблводоканал».

[3] В.С.Попов. Водозаборные сооружения: Учебное пособие. Хабаровск, Изд-во Тихоокеанского гос. университета, 2005, 94 с.

Христофорова Мария Игоревна – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: maskaApril@Yandex.ru.

ГришакOVA Вера Васильевна – ст.преп. КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: j.strify2012@yandex.ru.

Никулина Светлана Николаевна – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: voinsveta579@mail.ru.

С.А. Кусачева, А.И. Лисенко, М.И. Морозенко

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АНТРОПОГЕННОЙ НАГРУЗКИ НА СОСТОЯНИЕ ЭКОСИСТЕМЫ ЛЕСА

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

В настоящее время проблема негативного влияния антропогенной нагрузки на природные сообщества и экосистемы является весьма актуальной. Последствия этого влияния проявляются, в первую очередь, в сокращении биологического разнообразия и снижении продуктивности экосистем, замене зональных растений сорняками, а также в ухудшении состояния флоры и фауны.

Существует ряд методов оценки состояния природных экосистем, однако именно биологические методы позволяют получить полную картину их состояния.

Целью данного исследования явилась оценка влияния антропогенной нагрузки на состояние экосистемы калужского бора по следующим критериям (таблица 1):

Таблица 1

Критерии оценки состояния природной экосистемы

Стадии деградации	Характеристика состояния лесной экосистемы	Состояние ярусов					
		древостоя	Подлеска и крупного подростка	Подростка младших возрастов	травостоя	Мохово-лишайникового покрова	Процент сохранности кроны, %
Нулевая	Ненарушенные насаждения	Сомкнутость древостоя	Полная сохранность				100
1	Слабо нарушенные насаждения	Полная сохранность		Заметное повреждение	Слабо затронут	Разреженный	Более 90
2	Средняя степень нарушения сообщества	Практически полностью сохраняется; наблюдается выпадение отдельных деревьев	Заметные повреждения		Угнетенное	Полное исчезновение или незначительные пятна	80-90
3	Значительно нарушенные насаждения (критическое)	С нарушением сомкнутости	Единичные уцелевшие экземпляры	Преобладание заносных видов	Полное исчезновение		50-80

	состояние)						
4	Полностью разрушенное лесное сообщество	Низкая полнота древостоя вплоть до значительного его распада	Нет	Нет	Господство сорных и луговых видов	Нет	10-50
5	Отсутствие сомкнутой растительности (полный кризис)	Отдельные деревья в угнетенном состоянии	Нет	Нет	Пятна сорной растительности в угнетенном состоянии	Нет	Менее 10

Исследования проведены в четырех районах городского бора:

1. Участок № 1 - Аненки (200м от дороги). Всего 7 деревьев: 3 березы, 4 сосны

2. Участок № 2 - Напротив лагеря «Сокол» (около дороги). 11 деревьев: 1 береза, 10 сосен.

3. Участок № 3 - Около остановки напротив ДЮСШ Анненки. Всего 9 деревьев (сосны).

4. Участок № 4 - Сероводородные источники (200 м от дороги) 8 деревьев: 1 дуб, 6 берез.

Для исследования выбраны репрезентативные участки 10x10 м.

Согласно полученным результатам, максимальное антропогенное воздействие оказывается на участок № 4: там отсутствует подрост, степень сомкнутости кроны составляет не более 50%, стадия деградации экосистемы – 4 (полностью разрушенное лесное сообщество).

Состояние остальных участков несколько лучше и соответствует 3 стадии деградации - значительно нарушенные насаждения (критическое состояние)

Таким образом, было установлено, что антропогенная нагрузка оказывает негативное влияние на состояние экосистемы городского бора по рассматриваемым показателям. Полученные данные могут иметь большое практическое значение при разработке природоохранных мероприятий для рассматриваемых территорий.

Кусачева Светлана Александровна – канд. биол. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: safronova2@mail.ru.

Лисенко Алена Игоревна – учащийся ГБОУ "Средняя школа № 13 г. Калуги". E-mail: alen.lisenko2010@yandex.ru.

Морозенко Мария Ивановна – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: mororzenro_mi@mail.ru.

Я.Н. Дыхно, И.И. Куликова, Я.А. Санютина, С.Н. Никулина

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ОЧИСТКИ ПОДЗЕМНЫХ ПРИРОДНЫХ ВОД Г. КАЛУГИ ОТ БИОЛОГИЧЕСКОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ И НЕФТЕПРОДУКТОВ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

В настоящее время рост городов, стремительное развитие различных областей промышленности, интенсификация сельского хозяйства, значительное расширение площадей орошаемых земель, улучшение культурно-бытовых условий, а также ряд других факторов все более усложняют проблему обеспечения водой.

На XXXV сессии Генеральной Ассамблеи ООН было объявлено, что более миллиарда людей планеты страдает от недостатка доброкачественной воды, нужной для питья и хозяйственных нужд. Только для поддержания жизни человеку ежедневно нужно около 2 л воды, а житель современного благоустроенного города в сутки расходует от 100 до 1000 л. Еще больше расход пресной воды в промышленности: для производства одной тонны стали расходуется 150–200 м³ воды, меди — 500 м³, бумаги 450–1000 м³, искусственного волокна 2000–6000 м³. Острота этой проблемы возрастает в связи с глобальным загрязнением крупных поверхностных источников воды. Поэтому необходимо использование альтернативных источников водоснабжения, таких как подземные природные воды. Но при этом, в условиях роста техногенной нагрузки на окружающую среду подземные воды также подвергаются загрязнению и истощению.

Сохранение подземных природных вод является одним из приоритетных направлений охраны окружающей среды.

В природных водах проходят естественные биологические процессы, в ходе которых происходит биологическое загрязнение, но также, в них присутствуют и загрязнение антропогенного происхождения, часто не только ухудшающие органолептические свойства воды, но и сообщающие ей токсичность. Техногенные компоненты обнаруживаются уже не только в верхних, слабо защищенных, водоносных горизонтах, но и в глубоких артезианских резервуарах.

В Калуге имеется 34 родника. На основе исследований «Испытательной лаборатории по качеству пищевых продуктов, продовольственного сырья и экологии» был проведен качественный анализ природных вод на антропогенную загрязненность.

Исследование подземных природных вод включает в себя определение pH, кальция, магния, хлоридов железа, фосфатов, гидрокарбонатов, сульфатов, нитратов, нитритов, азота аммонийного, перманганатной окисляемости, жесткости, минерализации, нефтепродуктов, калия и натрия. Микробиологическое исследование воды предусматривает выделение ме-

зофильных аэробных факультативных анаэробных микроорганизмов (МАФАМ) и бактерий группы кишечной палочки (БГКП).

Главными загрязняющими веществами являются нефтепродукты, биогенные вещества, фенолы, ядохимикаты, соли тяжелых металлов, радионуклиды. Однако особое внимание уделяется биологическим загрязнениям и нефтепродуктам.

В Калуге 47,1% подземных водных источников страдают хроническим общим микробным загрязнением воды и присутствием кишечных палочек, превышающих допустимые значения. В некоторых природных водах, особенно находящихся на склонах оврагов, количество кишечных палочек в воде приближается к значениям сточной воды.

Биологическое загрязнение подземных вод вызывается микроорганизмами, поступающими при инфильтрации фекальных и коммунально-бытовых сточных вод из выгребных ям, канализационной сети, скотных дворов и полей фильтрации. Различные органические вещества, поступающие в подземные воды с коммунально-бытовыми сточными водами и отходами, а кроме того из отходов пищевой промышленности, стимулируют интенсивный рост и активность микроорганизмов в водоносном горизонте, что в свою очередь приводит к дополнительному ухудшению качества воды.

Под воздействием радиации и химического загрязнения среды микроорганизмы постоянно мутируют, приобретают новые, неизвестные человеку обличья. Могут вызывать самые разные заразные заболевания.

Также особую тревогу вызывает увеличение содержания нефтепродуктов в подземных природных водах. В воде 76% природных источников обнаружены нефтепродукты, в 41% случаев концентрация нефтепродуктов приблизилась к предельно допустимой. Прогноз указывает на возможное дальнейшее увеличение концентрации нефтепродуктов.

Это связано со значительным увеличением автотранспорта на улицах города, увеличением количества автозаправочных станций, авторемонтных мастерских, организованных и стихийных автостоянок, гаражных кооперативов. Уничтожение газонного покрова на улицах города и во дворах, разрушение дворовой инфраструктуры неупорядоченным движением автотранспорта, ведет к ухудшению экологической обстановки города, снижению процессов самоочищения почвы, а, следовательно, ухудшению качества природной воды.

Получение воды питьевого качества из подземных природных источников происходит с применением обеззараживания и окислительно-восстановительных реакций.

Однако, сейчас одной из новейших и альтернативных решений данной проблемы является применение когерентного (лазерного) излучения. Энергетические источники лазерного излучения более выгодны и экономически целесообразны по сравнению с остальными.

Когерентное (лазерное) излучение успешно применяется для удаления из воды различных микроорганизмов и болезнетворных бактерий (паразитов).

В зависимости от дозы облучения действие лазера вызывает у микроорганизмов изменения морфологических и биохимических свойств, вплоть

до утраты жизнеспособности. У бактерий воздействие лазерного излучения вызывает изменение темпа деления клеток и их гибель.

В результате облучения лазером улучшаются показатели по коли-индексу и коли-титру, а также по общему микробному числу, что позволяет отказаться от хлорирования.

Применение лазера эффективно и для удаления нефтепродуктов из природных источников. В зависимости от сорта нефтепродукта устанавливается плотность мощности лазерного излучения не меньше некоторой пороговой величины, составляющей $500\text{--}700\text{ Вт/см}^2$, необходимого для интенсивного горения пленки нефти или нефтепродукта.

Таким образом, развитие лазерных излучателей позволяет на современном этапе рассматривать процессы лазерной очистки как реальную экономически целесообразную альтернативу классическим методам очистки.

Основным преимуществом является возможность контроля в реальном времени и в натуральных условиях.

Лазерные методы очистки — наиболее экологически чистый процесс очистки, обеспечивающий дополнительно возможность высокой степени автоматизации процесса.

Современный уровень мощности волоконных излучателей способен обеспечить промышленные уровни высокопроизводительной очистки до десятков квадратных метров в час при низкой стоимости процесса.

Список литературы

1. Состояние и охрана окружающей среды в Калуге. Информационный обзор. –К., 2013. – №246. – С.10-14.
2. Состояние и охрана окружающей среды в Калуге. Информационный обзор. –К., 2013. – №246. – С.15-17.
3. Яковлева О.В., Никулина С.Н. Воздействие лазерного излучения на процесс обеззараживания воды и очистку сточных вод после гальваники.// Наукоемкие технологии. 2012.Т.13.№2. С. 79-83.
4. Вестник МГОУ (2010). Рецензированный научный журнал. Москва. Web: <http://vestnik-mgou.ru/Articles/Doc/7>
5. СанПиН 2.1.4.1175-02 Гигиенические требования к качеству воды нецентрализованного водоснабжения. Санитарная охрана источников. М.: Минздрав России, 2003. – 16 с.

Никулина Светлана Николаевна – канд. техн. наук, заместитель заведующего кафедрой по научной работе КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: voinsveta579@mail.ru.

Дыхно Яна Николаевна – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: yasya36@rambler.ru.

Куликова Ирина Игоревна – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: queenirinka@mail.ru.

Санютина Яна Александровна – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: sanutinami160891@mail.ru.

Ю.В. Корабельникова, В.В. Гришакowa

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МУНИЦИПАЛЬНОМ УНИТАРНОМ ПРЕДПРИЯТИИ «ПОЛИГОН ТБО»

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

В Калуге захоронением и обезвреживанием ТБО занимается Муниципальное унитарное предприятие МУП «Полигон ТБО». Предприятие функционирует с 1992 года и имеет большой опыт в организации приема и технологии захоронения отходов. Предприятие располагает высоко квалифицированными кадрами, техникой, зданиями и специализированными сооружениями.

Полигон по приему и захоронению твердых бытовых и малотоксичных промышленных отходов 3, 4 классов опасности работает по технологии высоконагружаемого полигона. Эксплуатация полигона обеспечивает оптимальную защиту окружающей среды.[1] Текущая эксплуатация полигона сопровождается проведением программы всестороннего контроля, в которую входит:

1. Прием и регистрация отходов;
2. Мониторинг окружающей среды;
3. Уход за оборудованием полигона и др.

Полигон ТБО располагается на территории 17,2 га. Под телом полигона протекает ручей Полигонный, заключенный в железобетонную трубу. Расположение ручья под телом полигона создает постоянную угрозу его загрязнения фильтратом полигона и является наиболее критичным в экологическом отношении местом.

Вокруг тела полигона располагается дренажная нагорная канава для сбора фильтрата.

МУП «Полигон ТБО» г. Калуги осуществляет:

1. захоронение и обезвреживание твердых бытовых отходов, обеспечивая санитарную надежность в охране окружающей среды и эпидемиологическую безопасность население;
2. отлов бродячих животных, ветеринарное обслуживание непродуктивных животных (кошек и собак).

На полигон ТБО принимаются отходы, согласно договору, заключенному между заказчиком и предприятием; разрешением на захоронение отходов, в котором указывается вид отходов и их объемы. Разрешение согласовывается с Центром Госсанэпиднадзора, Городским Комитетом по экологии. Расчет объемов отходов производится согласно установленных норм накопления. Учет принимаемых ТБО ведется в неуплотненном состоянии.

Прием отходов на полигон:

1. Предприятие, оформившее разрешение на вывоз отходов и заключившее договор на захоронение отходов на полигоне, получают талоны со штампом – МУП «Полигон ТБО».

2. Талон заполняется предприятием:

- а) становится объем вывозимых отходов;
- б) становится номер машины;
- в) ставится штамп предприятия.

3. Машина с заполненным талоном следует на полигон (д.Ждамирово).

4. Дежурный имеет право не принимать отходы в следующих случаях:

а) нет талона на право захоронения отходов (за исключением случаев, специально разрешенных приказом или постановлением вышестоящих организаций, согласно действующих правил приемки и сдачи отходов для последующей ликвидации);

б) отходы, загруженные в машину, не входят в перечень отходов 3-4 классов опасности, принимаемых на полигон.

5. Категорически запрещается:

а) принимать транспортные средства с горящими и тлеющими отходами;

б) принимать транспортные средства с крупногабаритными отходами, не подлежащими 4-х кратному уплотнению.

6. В случаях возврата транспортного средства с отходами необходимо:

а) сделать запись в журнале возврата отходов, где отразить: номер записи, дату, принадлежность транспортного средства, причину возврата и отказа в приемке, подпись лица, доставившего отходы.

На полигоне организуется бесперебойная разгрузка мусоровозов в течение всего рабочего времени. Площадка разгрузки перед рабочей картой разбивается на 2 участка.

На одной участке разгружаются мусоровозы, на другом работают бульдозеры, освобождая его от ТБО, нагруженных ранее. На освобожденную часть направляются мусоровозы. Сменная схема разгрузки мусоровозов обеспечивает широкий фронт работы бульдозерам по сдвиганию ТБО на рабочую карту.

Выгруженные из машины ТБО складироваться только на рабочей карте, отведенной на данные сутки (в зимнее время года - на 3 суток).

Необходимо 2 раза в год на полигоне осуществлять контрольное определение степени уплотнения ТБО.

Увлажнение ТБО летом необходимо осуществлять в пожароопасные периоды, а также при снижении ТБО к уплотнению.

Промежуточная и окончательная изоляция уплотненного слоя ТБО высотой 2 м осуществляется грунтом или другими инертными материалами.

Ветеринарная деятельность включает в себя лечебно- профилактическую деятельность, временное содержание бездомных собак в вольерах (в среднем в месяц производится отлов 200-220 голов), эвтаназию больных собак и кошек, прием от ветклиник патматериала с последующим захоронением его в биотермической яме. Биотермическая яма введена в эксплуатацию в 1999 году и соответствует всем требованиям строительных норм и санитарных правил. Биотермическая яма г. Калуги предназначена для биотермического обезвреживания трупов кошек и собак, где при разложении субстрата под действием термофильных бактерий создается температура среды порядка 85-70 градусов, что обеспечивает гибель патогенных микроорганизмов. Биотермическая яма представляет собой заглубленное сооружение прямоугольной формы, состоящее из двух отделений с размером 4 на 4.8 м и глубиной 9.1 м. [2]

Полигон ТБО является потенциально опасным объектом в отношении окружающей природной среды. Поэтому, начиная с 1992 года, на Ждяминском полигоне регулярно анализируется:

1. атмосферный воздух на территории полигона и в санитарно-защитной зоне;
2. почвы в санитарно-защитной зоне на бактериальное загрязнение;
3. поверхностные и подземные воды в четырех водоносных горизонтах;
4. содержание и миграция тяжелых металлов в горизонтальных и вертикальных слоях почвы и почво-материнских породах;
5. содержание подвижных и валовых форм тяжелых металлов в донных отложениях.

Литература

[1] Дарулис П. В. *Отходы областного города. Сбор и утилизация*, Смоленск, Изд-во «Смядынь», 2000, с. 520.

[2] Гринин А.С. *Промышленные и бытовые отходы : хранение, утилизация, переработка*, Москва, Изд-во «ФАИР-ПРЕСС», 2002, с. 332.

Корабельникова Юлия Викторовна – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: j.strify2012@yandex.ru.

ГришакOVA Вера Васильевна – ст.преп. КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: j.strify2012@yandex.ru.

М.А. Смельцов, Н.П. Маркелова, А.В. Челенко

ОДИН ИЗ АСПЕКТОВ ПОВЫШЕНИЯ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ ЦЕХОВ ПРЕДПРИЯТИЯ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

После распада СССР в экономике современной России количество предприятий радиоэлектронного профиля сократилось более чем на порядки. Особенно пострадала отрасль промышленности по производству электронной компонентной базы (ЭКБ). До недавнего времени до 90% комплектующих для производства отечественных изделий радиоэлектроники закупалось за рубежом. В настоящее время доля импорта ЭКБ существенно снизилась в связи с известной финансово-экономической ситуацией.

Роль предприятий по производству ЭКБ возросла, поскольку теперь они должны обеспечивать комплектующими современные российские радиоэлектронные изделия и системы на их основе. Причем цены на отечественную ЭКБ не должны резко отличаться от стоимости импортной комплектации.

Следовательно, перед отечественными учеными и специалистами в сфере разработки и производства ЭКБ сложная научно-техническая проблема [1].

Без модернизации и совершенствования производства ЭКБ, без разработки и внедрения новых технико-экономических подходов в управлении предприятиями радиоэлектронного профиля поставленная перед российской экономикой задача практически не реализуема. Это связано прежде всего с тем, что производительность труда в промышленности России более чем в 2 раза ниже средней стран с высокоразвитой экономикой, а энергоемкость валового внутреннего продукта более чем в 2 раза выше аналогичного показателя Китая и почти в 3 раза, чем у стран Европы и США. Более того, по данным Росстата, степень износа основных производственных фондов отечественных предприятий достигает 70%, причем доля полностью изношенного оборудования превышает четверть [2].

Тем не менее, предприятия радиоэлектронного профиля Калужского региона в последние годы сумели, хотя и частично, модернизировать цеха основных и вспомогательных производств. На одном из крупных предприятий по производству ЭКБ внедрена и новая структура управления: персоналу вспомогательных цехов (энергообеспечение, жидкие и твердые отходы основного производства, очистные сооружения и транспорт) в финансовом плане выгодно снижать издержки и повышать эффективность функционирования.

Одним из путей снижения затрат на деятельность вспомогательного производства является создание и внедрение новых технологий переработки отходов производства основных цехов предприятия для их повторного использования во вспомогательных цехах.

В качестве примера приведем выполненную нами разработку по использованию отработанных в цехах полупроводникового производства

химических веществ в качестве моторного топлива для автомобилей транспортного цеха предприятия. В основу этой разработки положены фундаментальные исследования [3] и опыт использования органических веществ в качестве добавок (до 20%) к бензинам [4].

Органические растворители, такие как ацетон, бутанол, этанол и др. используются в производстве ЭКБ в качестве растворителей для обезжиривания и очистки полупроводниковых изделий довольно в значительных количествах, а с ростом объемов ее выпуска они резко возрастут.

Бутанол традиционно получают путем бактериального брожения по схеме АБЭ (Ацетон-Бутанол-Этанол) [4]. В настоящее время созданы технологии, в которых используется не древесина [4], но и сахара, крахмал, остатки биомассы, зерновые культуры, травы и тростник. Стоимость биобутанола, полученного таким образом, весьма низкая. Этот продукт более безопасен при использовании в качестве моторного топлива, т.к. он в 6 раз меньше испаряется, чем обычный этанол и в 13 раз менее летуч, чем бензин. Кроме того, добавка органических веществ растительного происхождения к бензину приведет к снижению объема парниковых газов в выхлопах автомобилей транспортного цеха.

Объект исследования: легковоспламеняющиеся жидкости (ЛВЖ) с операции “отмывка корпусов” полупроводникового цеха предприятия радиоэлектронного производства.

Характеристика ЛВЖ: изопропиловый спирт, этиловый спирт, ацетон, спирто-ацетоновая смесь (50:50), диметилформамид.

Показания к использованию: в стандарте на автомобильные бензины (в транспортном цехе используют бензин марки “Регуляр-92”), действующем в России (ГОСТ 51866-2002, в ред. 2011 года) в автомобильном топливе допускается наличие оксигенатов, в том числе изопропанола, до 10% объемных, без добавления стабилизирующих присадок.

Известно также, что смесь 90% бензина и 10% изопропанола устойчива к расслоению в интервале температур +24...+45°C. Кроме того, отходы изопропанола от полупроводникового производства содержат в своем составе влаги не более 0,5%, т.к. изопропанол ограниченно растворяется в воде и не ограниченно – в бензине. Это и способствует связыванию влаги, находящейся в топливной системе, предохраняя ее тем самым от коррозии.

Техника эксперимента: сбор отходов ЛВЖ на месте их образования, отдельно, в специальные емкости вместимостью 0,5...1,0л и очистка их от механических примесей фильтрованием; добавление ЛВЖ в бензин и получение 20,0...40,0л топливной смеси “бензин-ЛВЖ”. Заправка автомобилей транспортного цеха данной топливной смесью и опытная эксплуатация (емкости по 20 и 40 л хранятся на специальном складе транспортного цеха). Испытания проведены в весенне-летний период года.

Результаты исследований. Технические результаты, полученные на автомобилях транспортного цеха, таковы: была замечена на автомобилях с предложенной топливной смесью ровная работа не прогретого двигателя на холостом ходу и в режиме малых нагрузок, а также более быстрый его прогрев и хорошие пусковые качества смеси. Отмечено сокращение расхо-

да топлива до 5% объемных. Эффективным оказалась 10%-ная добавка отходов ЛВЖ к бензину (состав добавки 80% объемных изопропилового спирта и 20% объемных ацетона). Это означает, что для обработки 50л бензина необходимо 2,5...3,0л ЛВЖ-добавки. Поскольку в цехе полупроводникового производства ежемесячно образуется 100л отходов ЛВЖ, то транспортный цех получает 1000л топлива нового состава.

Экологический эффект: в результате испытаний топливной смеси "90% бензина и 10% отходы ЛВЖ" в автомобилях ВАЗ-21053, ВАЗ-2115, Volkswagen В3 установлена улучшенная полнота сгорания топливно-воздушной смеси в цилиндрах двигателей. Это подтверждено измерениями содержания СО и СН в отработанных (выхлопных) газах с применением газоанализатора ГИАМ-29 по стандартной методике ГОСТ 52033-2003. Содержание парниковых газов снижено на 15%.

Экономическая эффективность топливной смеси во вспомогательных цехах предприятия по производству ЭКБ: отсутствие финансовых затрат стороннему предприятию за работы по утилизации отходов ЛВЖ; снижение финансовых затрат на покупку бензина на 10% ежегодно; увеличение срока службы двигателей в автомобилях транспортного цеха и, тем самым, экономия финансовых средств на ремонте.

Таким образом, вспомогательные цеха могут внести существенный вклад в повышение технико-экономической эффективности предприятия радиоэлектронного профиля.

Список литературы

1. *Прасицкий В.В.* Научно-технологические аспекты производства композиционных материалов для теплоотводящих и конструкционных элементов полупроводниковой и вакуумной техники. Научные технологии. Научные технологии, 2014, Т.15, №10, с. 16-19.

2. *Слуцкий В.А., Теренин Д.Е., Константинова Ф.С. и др.* Техническое перевооружение как наиболее эффективный путь инвестиционной деятельности. Безопасность труда в промышленности, 2013, №6, с.60-66.

3. *Смельцов М.А.* Применение воды в качестве оксигената в топливных смесях. Научные технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в ВУЗе: Материалы Всероссийской научно-технической конференции. М., 2010, т.1, с. 278-280.

4. *Воробьева И.В.* Опилки на заправку. Прямые инвестиции, 2008, №11(79), с. 54-56.

Смельцов Михаил Андреевич – заместитель главного технолога ОАО "Восход-КРЛЗ". E-mail: fn2kf@list.ru.

Маркелова Надежда Петровна – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: fn2kf@list.ru.

Челенко Александра Викторовна – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: fn2kf@list.ru.

ОДНО ИЗ НАПРАВЛЕНИЙ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНИКИ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Радиоэлектронное производство является одним из основных потребителей пресной воды, а, следовательно, и источником сброса загрязненной воды в техпроцессах [1]. На крупных предприятиях радиоэлектроники функционируют эффективные очистные сооружения, где внедрены процессы отстаивания, центробежное осаждение примесей, фильтрование сточных вод, а также методы коагуляции, флокуляции, флотации и мембранные процессы. Используются такие химические процессы, как нейтрализация кислых и щелочных сточных вод, внедрены окислительно-восстановительные процессы загрязнителей воды, в т.ч. озонирование, хлорирование, ультрафиолетовая обработка и т.п.

Это позволяет в настоящее время промышленным предприятиям сбрасывать в поверхностные воды для городских очистных сооружений промышленные воды, близкие по содержанию загрязнителей в пределах требований предельно-допустимых сбросов (ПДС).

Это подтверждают показатели качества сбрасываемых сточных вод предприятия по серийному производству изделий электронной компонентной базы Калужского региона (см. табл. 1).

Таблица 1

Показатели качества сточных вод за август 2014г. крупного предприятия радиоэлектронного профиля

Тип производства, объемы сброса воды	Гальваника, 616м ³		Полупроводниковое производство, 1437м ³	
	Фактическая конц-я, мг/л	ПДС, мг/л	Фактическая конц-я, мг/л	ПДС, мг/л
РН	7,6	6,5-8,5	7,3	6,5-8,5
Хлориды	51,048	205,8	30,487	205,8
Фосфаты по Р	0,435	1,74	0,286	1,74
Сульфаты	44,12	22,2	32,66	22,2
Азот аммонийный	10,763	8,5	5,543	8,5
Железо	2,135	1,98	2,037	1,98
Медь	0,012	0,0026	0,038	0,0026
Фториды	0,464	0,75	0,784	0,75
Никель	0,011	0,012	0,022	0,012
Хром +6	-	-	-	-
Хром +3	-	0,029	-	0,029
Цинк	0,021	0,0036	0,038	0,0036

Из нее видно, что по основным загрязнителям, сточные воды от гальванического производства и обработки полупроводников предприятия радиоэлектронного профиля, хотя, в ряде случаев и превышают нормы ПДС, но, по крайней мере, не в разы.

Картина может измениться довольно резко с ростом объемов производства отечественной радиоэлектроники уже в ближайшее время. Это, прежде всего, отразится на увеличении объемов сбрасываемых сточных вод и примененных для их очистки больших количеств химических реагентных материалов и веществ.

Безреагентные методы, опробованные в последние годы [2,3] до настоящего времени не нашли промышленного применения. Это, в основном, связано с тем, что для их реализации пока не достает данных о структуре воды, подвергнутой различной технологической обработке. Полученные в [4] экспериментальные данные позволяют надеяться на то, что с применением универсальной методики и лазерного анализатора “Ласка-1К” решение проблемы промышленного применения безреагентных методов очистки воды ускорится [5].

Так, в модельном растворе сточной воды (дистиллированная вода, содержащая определенную долю $\text{Cu}(\text{OH})_2$) концентрацию загрязнителя и характер его распределения удалось определить, исходя из размеров частиц по кривым и доле данных частиц в растворе (определяется по оси Y на графике кинетической записи эксперимента) или по отдельной подпрограмме “Расчет распределения частиц по объему”.

Пример окна записи эксперимента программы Lasca_32.exe представлен на рис. 1 [5].

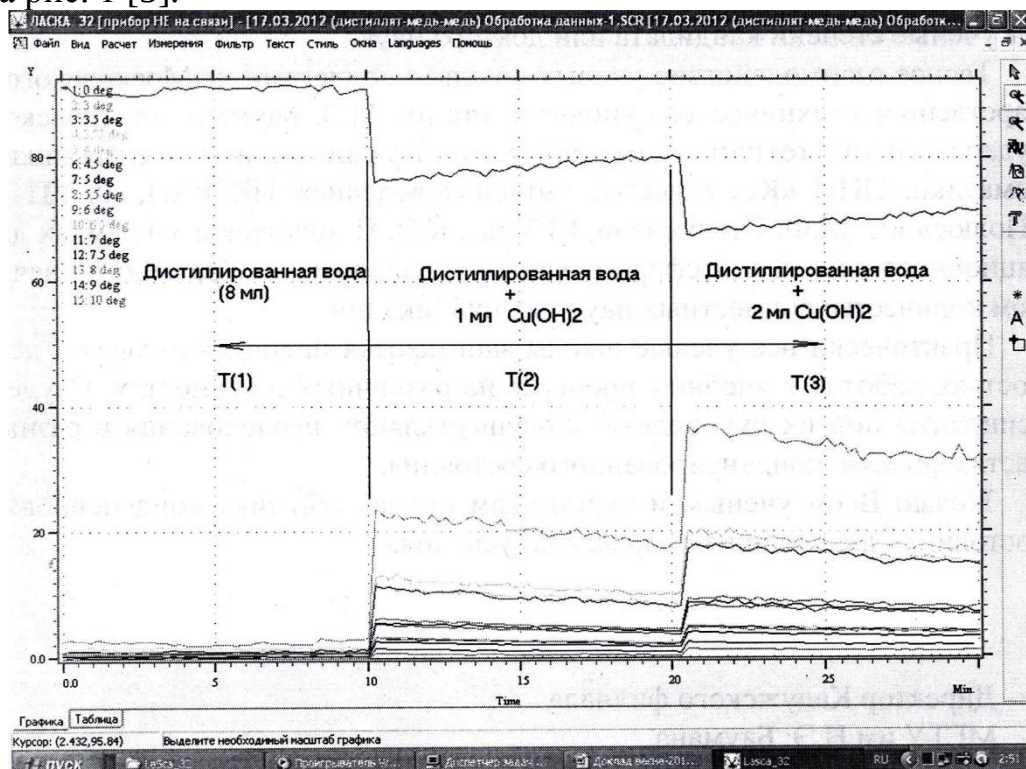


Рис.1

Пример окна эксперимента расчета данных подпрограммы “Гранулометрия (Int)” представлен на рис. 2. В данном окне также можно проверить точность совпадения расчетных результатов с экспериментальными (окно “Индикатриса” рис.3).

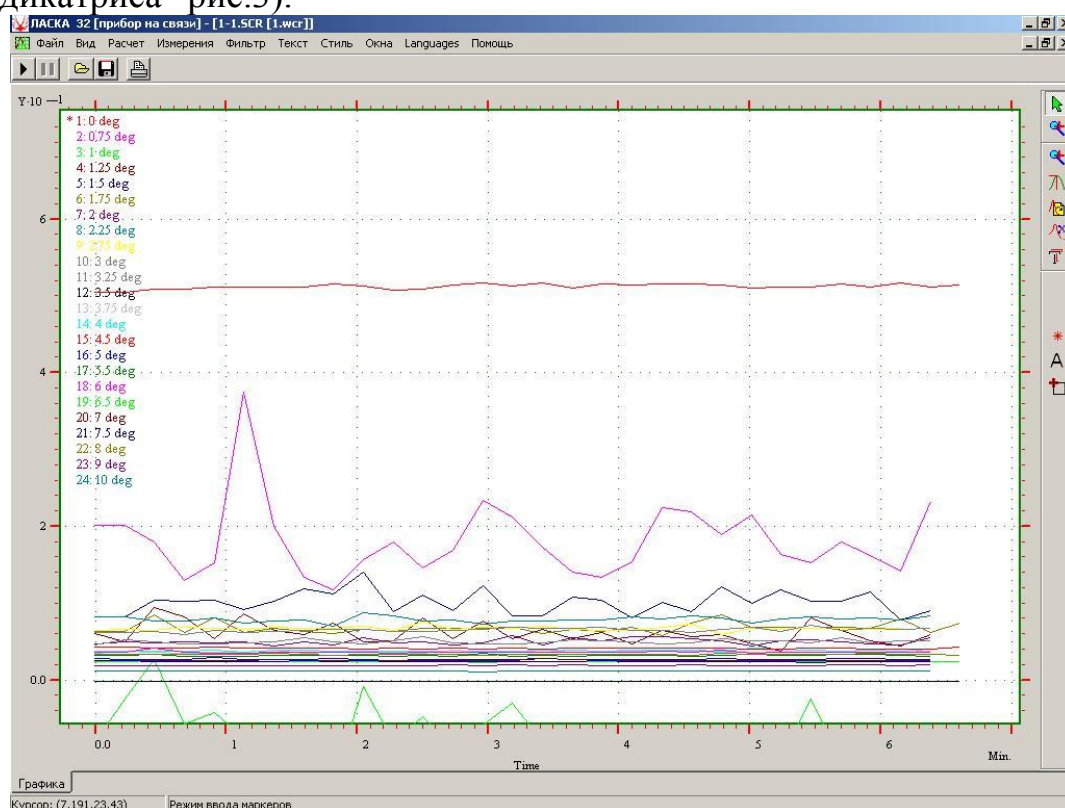


Рис.2

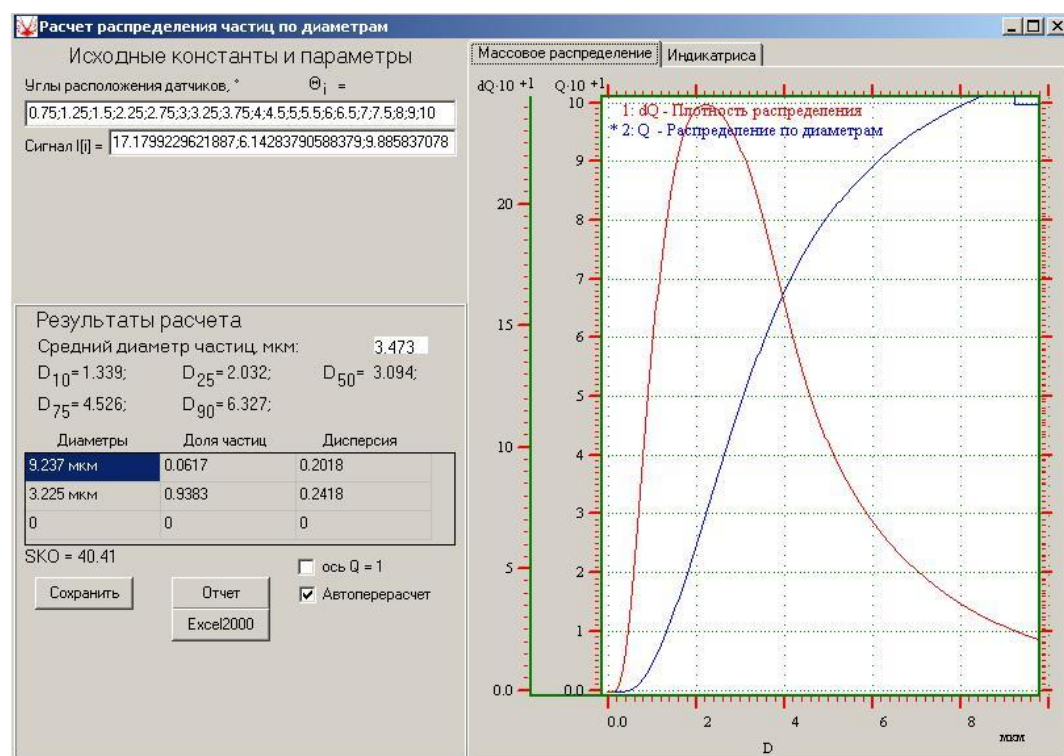


Рис.3

Рис. 2 и Рис. 3. приведены для сточной воды от гальванического производства отобранной и подвергнутой контролю (жидкостная хроматография) в соответствии с данными табл.1.



Рис.4

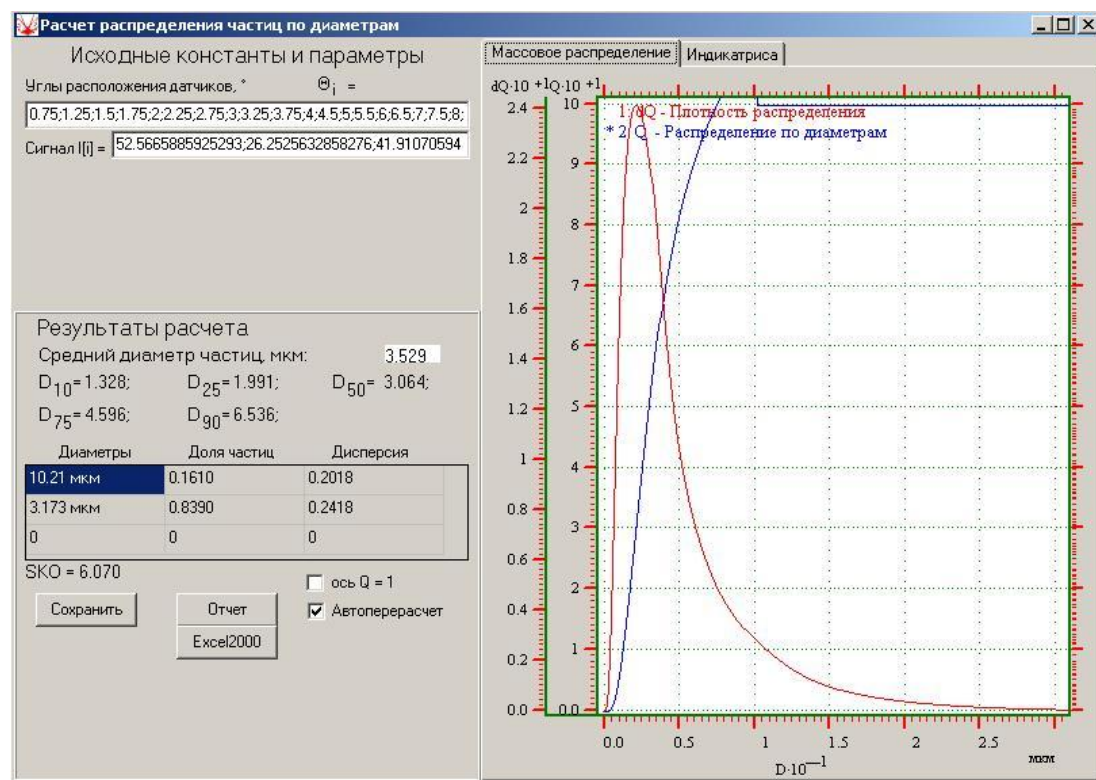


Рис.5

На рис.4.и рис.5 приведены аналогичные данные для сточных вод от полупроводникового производства, подвергнутых аналогичному контролю (см. табл. 1).

Анализируя данные рис. 2,3 и рис. 4,5, можно заметить, что с помощью лазерного анализатора установлено существенное различие в гранулометрическом составе примесей, содержащихся в сточных водах гальванического и полупроводникового производств предприятия радиоэлектронного профиля.

Предложенный метод анализа загрязненных вод позволяет четко контролировать гранулометрический состав примесей, а вместе с методом хроматографии – и количественный состав загрязнителей. Более того, следующим этапом настоящих исследований является изучение структуры воды, подвергнутой различной обработке в процессе ее технологического применения.

Список литературы

1. Доможир В.В., Жукова Ю.М., Никулина С.Н., Николаева Т.С. Новые методы обработки и диагностики пресной воды после ее промышленного использования // Научные технологии. 2014. Т.5. №10. С. 36-41.
2. Козьмин Г.В., Зейналов А.А., Коржавый А.П. и др. Применение ионизирующих и неионизирующих излучений в агробиотехнологиях / Под общ. Ред. Г.В. Козьмина. Обнинск: ВНИИСХРАЭ. 2013. 191с.
3. Коржавый А.П., Капустин В.И., Козьмин Г.В. Методы экспериментальной физики в избранных технологиях защиты природы и человека / Под ред. А.П. Коржавого. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2012. 352с.
4. Smeltsov M.A., Nikolaeva T.S. Water can become an important element of improvement of quality, environmental friendliness and depreciation of automobile fuel // Science Intensive Technologies. 2013. V. 14. №10. P. 52-58.
5. Коржавый А.П., Смельцов М.А. Лазерный анализатор в методах исследования свойств многокомпонентных жидких сред // Научные технологии. 2013. Т.14. №7. С. 43-54.

Николаева Татьяна Сергеевна – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: TatianaN111@rambler.ru.

И.Г. Шемель

ОСНОВЫ RGB –МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ В ЗОЛЯХ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Недостаточное развитие методов структурных исследований, которые позволили бы на стадии проектирования объективно судить о поведении и свойствах материала в технологических процессах, существенно снижают эффективность разработки материалов с различными свойствами (каталитическими, оптическими и т.д.).

Традиционные методы изучения макроструктуры высокооднородных материалов, получаемых золь-гель методом, требуют дорогостоящего оборудования. В настоящее время инструментарий для экспрессного изучения золь-гелей создан далеко не в полной мере. Большие трудности вызывает изучение структурных модификаций на стадии золь-гель перехода, хотя даже небольшие изменения структуры координационных соединений значительно влияют на конечные свойства материала.

Продвижение в этом направлении требует разработки новых подходов. Необходимы методы исследования с новыми возможностями описания структуры и характеристик материалов в зависимости от состава, имеющие достаточно наглядную физическую и математическую интерпретацию. В этом плане наиболее перспективным представляется построение информационной модели цветового портрета образцов, согласованной с задачей исследования.

В данной работе использовался метод колориметрии, основанный на определении координат цвета в выбранной системе [1].

В литературе имеются примеры использования RGB-модели цифрового изображения, основанного на неоднородности цветовой окраски, для оценки свойств объекта, технологических режимов приготовления материала [2-4].

В данной работе рассматривается задача описания монохроматического изображения однородных окрашенных коллоидных растворов (золь-гелей), различающихся строением координационного окружения легирующего металла каталитического материала.

Объектами исследования явились золи каталитических систем на основе ортосиликата цинка, легированного ионами кобальта. С целью изучения условий изоморфного замещения легирующего агента в структуре материала и сохранения координационной ориентации была приготовлена серия составов общей формулой $Zn_{1-x}Co_xSiO_4$, где $x=1,5,10,20$ мол.% (1 серия). Параллельно была приготовлена серия, технологическое воздействие при синтезе которых сводилось к исследованию возможности протекания реакции окисления кобальта(II) в кобальт(III) в прекурсорах (серия 2). Восстановление компонентов среды в золе осуществляли с помощью «зеленого» реагента – аскорбиновой кислоты (2,5 г) в отсутствие какого-либо дополнительного стабилизатора.

Различие в цветовой гамме полученных серий очевидно: 1 серия имеет желто-оранжевую окраску, 2 серия – розового цвета. Оттенки цвета и их характеристики достаточно субъективны для исследователей и зависят от пола, возраста исследователей и условий наблюдения. При этом с повыше-

нием концентрации кобальта в соединении до 20%, цветовые различия не различимы для глаза человека. Это диктует необходимость количественной оценки цветовых характеристик образцов, на основании этих показателей создания информационных моделей объектов, установления взаимозависимости «состав-свойство».

Золи помещали в стеклянные кюветы (стекло оптическое К8 для фотокolorиметрирования) объемом $V=50$ мл. В качестве подсветки использовали фотолампу перекальную (цветовая температура $T_{\text{цв}}=3200$ К).

При цифровой фотосъемке изображение объекта проецировалось на матрицу аппарата, элементы которой регистрировали интенсивность светового потока в определенной области спектра. Получение фотографий осуществлялось в одинаковых условиях внешнего освещения при использовании зеркального фотоаппарата марки Canon 400D (объектив Tamron AF1750, диафрагма 1:2,8, максимальное разрешение 3888x2592, матрица 24x18 мм, 10,5 млн пикселей, режим RAW). Фотоаппарат располагали на расстоянии 50 см от анализируемого объекта.

Затем изображение переносили на компьютер Lenovo B560 и считывали в программе Adobe Photoshop CS4, где каждый элементарный участок – пиксель цифрового изображения – кодируется колориметрическими параметрами.

Для описания цветовых параметров была выбрана RGB-модель цветового пространства, поскольку она в большей степени соответствует цветовой характеристике жидкокристаллического монитора. Эта модель известна как «цветовой куб», по ребрам которого отложены шкалы уровней основных цветов: R (красный), G (зеленый) и B (синий) – в числовом измерении от 0 до 255. Каждый оттенок цвета идентифицируется своим набором цветовых координат.

Цифровое изображение кюветы разбивали на 6 ячеек равной площади и определяли цветовые характеристики изображений (R,G,B) в точке пересечения диагоналей в каждой ячейке, определяли координаты цветности как среднее значение по каждому параметру. Полученные результаты представлены на рис.1.

При практически полной идентичности значений параметров R и G по составам 1 и 2 серий было обнаружено различие по параметру B (синий цвет), что обуславливает цветовое различие по сериям (оранжевое-розовое).

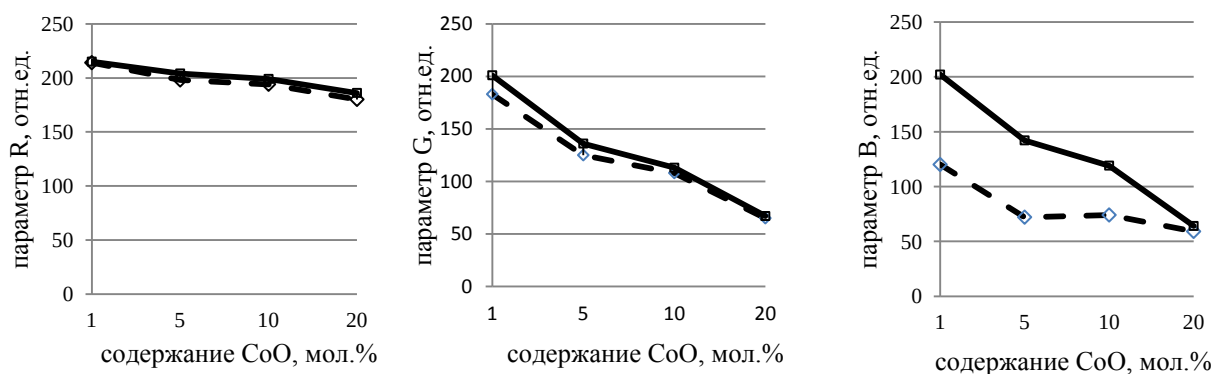


Рисунок 1– RGB-параметрические характеристики образцов золь-гелей в зависимости от состава и условий приготовления:

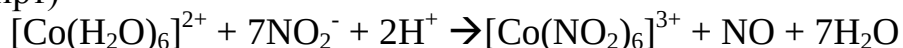
— золь-гель синтез;

– золь-гель синтез в присутствии аскорбиновой кислоты

Химически этот факт можно объяснить существованием различных координационных комплексов в золях:

– для основной серии – шестиводный октаэдрический Co(II) – $[\text{Co}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$, он сохраняется в гомогенной области золя, приготовленного из исходного нитрата ($\text{Co}(\text{NO}_3) \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), имеет розовую окраску;

– для дополнительной серии – за счет протекания процесса восстановления азотной кислоты в восстановительной среде золя (аскорбиновая кислота, спирт)



происходит формирование октаэдрического комплекса Co(III) – $[\text{Co}(\text{NO}_2)_6]^{3+}$, соединение имеет желтую окраску.

Поскольку для всех составов количество добавки аскорбиновой кислоты одинаковое (2,5 г), это значительно снижает вероятность протекания окисления кобальта по данному механизму для составов с высоким содержанием легирующего компонента (20 мол. %).

Коэффициент вариативности показателей яркости (R+G+B) и тональности (R, G, B) рассчитывали по формуле:

$$K = \frac{1}{\bar{C}} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_i^n (C_i - \bar{C})^2}, \quad (1)$$

где C_i – значение тональности по R(G,B) параметру или яркости в каждой исследуемой точке изображения;

$\bar{C}$ – среднее значение тональности по R(G,B) параметру или яркости по всем исследуемым точкам изображения;

n – число исследуемых точек.

Оценку колористических параметров изображения проводили в расстройной графике без увеличения масштаба, величина K имеет широкий разброс в яркости и тональности для выбранных точек (0,011-0,048), достоверность результатов низка.

В этой связи необходимо разработать систему пиксельной оценки RGB-характеристик с высокой степенью идентичности по каждому показателю для образцов.

Трехканальные гистограммы изображений, построенные по колориметрическим параметрам, показывают, что яркостные свойства изображения зависят от абсолютного значения интенсивностей RGB-составляющих, а вариабельность цветовых оттенков – от величины интервалов между уровнями их интенсивности. В каждой точке полноцветного изображения может доминировать по интенсивности либо один из основных цветов, либо два, либо их интенсивности оказываются равными. Следовательно, возможна определенная комбинация вариантов взаимоотношений между RGB-составляющими. Суммарное представление группировки оттенков изображения идентифицирует цветовую характеристику образца с определенными особенностями координационной сферы легирующего металла с высокой степенью достоверности.

Применение принципа группировки оттенков аддитивного цвета в RGB-модели приведено на результатах колориметрического анализа образца с 5 мол.% содержанием кобальта в присутствии аскорбиновой кислоты. Поскольку золи являются гомогенными структурами, цветовая характеристика их однородна, выборка элемента изображения для каждого образца может быть случайной. Анализ был проведен при большом масштабировании, позволяющем получить пиксельное изображение (рис.2).

Геометрическая калибровка изображения кюветы дала следующие параметры: длина (L) стороны пиксела – 0,03мкм, площадь (A) пиксела – 0,0009 мкм².

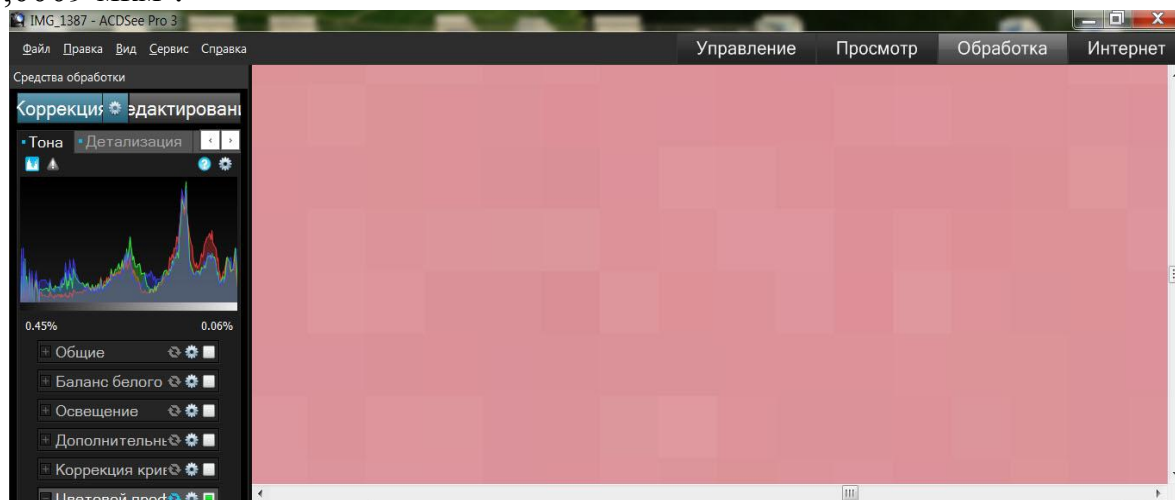


Рисунок 2 – Элемент изображения образца $Zn_{0,8}Co_{0,2}SiO_4$ (2 серия) при максимальном масштабировании

В ходе колориметрического анализа установлено, что изображение состоит из 96 пикселей, которые могут быть сгруппированы в 9 цветовых тональностей (R1-R9) по принципу $I_R > I_B > I_G$ (шаг – 2ед. по параметру)

Соотношение площадей (в процентном выражении) тональностей к общей площади изображения образца представлены на рис.3. Результаты расчета этого параметра составляют основание математического описания объекта с целью построения его информационной модели.

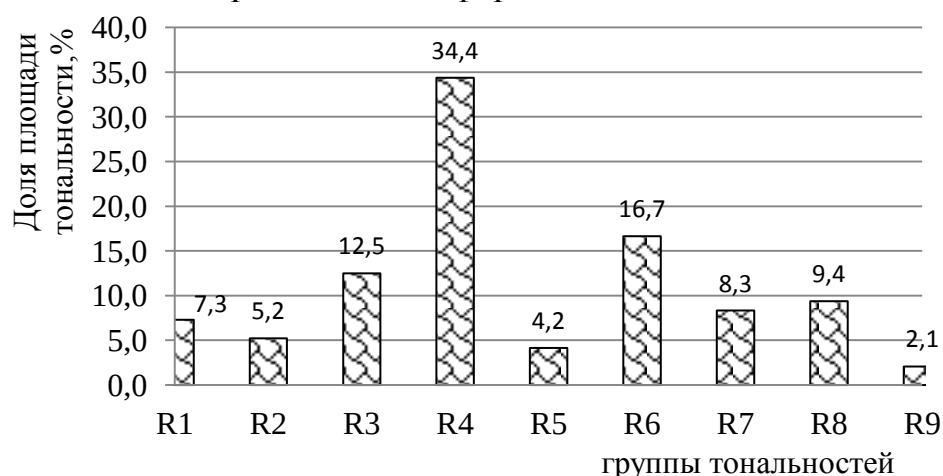


Рисунок 3– Доли цветовых тональностей в общей площади изображения

Применение принципа группировки оттенков аддитивного цифрового цвета в RGB-модели не вызвало потери информации и позволило охарактеризовать изображение монохроматического окрашивания образца золя, оценив доли каждой из зон одинаково окрашенных пикселей в общей площади изображения, в зависимости от координации легирующего металла и его концентрации.

Для описания других моделей необходимо установить соответствующие соотношения между интенсивностями RGB-параметров изображений.

Такой подход устанавливает однозначную зависимость «цвет – состав координационной сферы металла», что достаточно для построения будущего цветового портрета объекта.

Принцип оценки оттенков аддитивного цвета в RGB-модели расширяет прикладные возможности компьютерной колориметрии цифровых изображений и может служить основой для разработки системы математического описания объекта по полноцветным изображениям серий с целью построения его информационной модели.

Автоматизированный комплекс, созданный на базе метода, может быть использован в качестве инструмента для оценки вероятности фазообразования и структурных модификаций во внутренней координационной сфере металлов при изменении внешних условий приготовления золь, апробации эффективности предлагаемых приемов.

1. М.Н.Петров, В.П.Молочков Компьютерная графика: Учебник для вузов.2-е изд.(+CD). СПб, Питер, 2006. 811с.

2. Способ определения качества смеси сыпучих материалов: Патент 2343457 РФ / А.Г. Ткачев, А.А. Баранов, Р.Н. Меметов и др. Заявл.20.04.2007; опубл.10.01.2009. Бюлл.№1.

3. Способ определения времени смешивания сыпучих материалов: Патент 2267117 РФ / Т.А. Хабас, О.В. Неввонен, В.И. Верещагин. Заявл. 21.06.2004; опубл. 27.12.2005. Бюлл. № 36. – 6 с.

4. Щудло М.М., Ступина Т.А., Щудло Н.А. Количественный анализ метакромазии суставного хряща в телепатологии. //Известия Челябинского научного центра (УрО РАН).2004. Специальный выпуск (25). С. 17-22.

Шемель Ирина Геннадьевна – ст.преп. КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: fn2kf@ya.ru.

А.Н.Останин, И.Г. Шемель

ОСОБЕННОСТИ АНАЛИТИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ НИКЕЛЯ В ПРИСУТСТВИИ ЖЕЛЕЗА

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Для сточных вод химического производства характерны наличие многокомпонентных растворов, так что определение содержания индивидуальных ионов металлов затруднено. Для контроля технологических процессов необходимо иметь представление о взаимном влиянии ионов, возможности совместного определения или на фоне друг друга, что влияет на конечный результат и снижает достоверность исследований.

В данной работе определяли содержание ионов никеля в присутствии ионов железа в очищенных сточных водах процесса гальванического никелирования. Для решения поставленной задачи были изучены различные литературные источники с вариантами фотометрирования, гравиметрии, ионного обмена.

Немногочисленные прямые методы титрования никеля, основанные на реакциях нейтрализации, как правило, применяются для определения довольно высоких его концентраций в чистых растворах [1]. При этом получают сравнительно мало точные результаты.

Наиболее распространенные методы определения никеля основаны на реакциях комплексообразования и осаждения [2]. Комплексоны, особенно этилендиаминтетрауксусная кислота и ее динатриевая соль, часто применяются для определения никеля. В случае прямого титрования раствором ЭДТА для установления точки эквивалентности используют внутренние индикаторы (мурексид, арсенazo и другие). При титровании солей никеля раствором ЭДТА следует учитывать несколько особенностей. Во-первых, визуальное титрование мешает зеленовато-голубая окраска комплексона никеля, поэтому всегда титруют разбавленные растворы. Во-вторых, ионы никеля взаимодействуют с комплексоном при обычной температуре медленно, поэтому в большинстве случаев титруют при нагревании до 80 °С. В обоих случаях возможна систематическая ошибка как связанная с субъективными оценками исследователем цветовых переходов, так и с невозможностью поддержания постоянства температуры.

Большинство гравиметрических методов определения никеля основано на его способности образовывать соединения с α -диоксимами, которые реагируют с ионами металлов как одноосновные кислоты. При определении никеля в присутствии железа(III) рекомендуется примесь либо маскировать винной или лимонной кислотой, либо восстанавливать до железа(II) (тиосульфатом, гидразином и другими восстановителями)[3].

Метод определения никеля осаждением основан на образовании коричневатого-красного комплексного соединения иона никеля с диметилглиоксимом в присутствии окислителя (персульфат аммония или калия) в щелочной среде. Определению никеля мешают большие количества органических веществ, ионы железа и хрома. Влияние органических веществ устраняют обработкой смесью азотной и серной кислоты, влияние ионов железа добавлением сегнетовой соли, которая связывает их в растворимые бесцветные соединения. Однако концентрации ионов непостоянны, и во многих случаях связывание примесных ионов происходит не до конца.

Нами были проделаны аналитические определения содержания никеля в очищенных растворах при добавлении по методике [4] 5 мл 20% раствора сегнетовой соли, которые показали значительную вариативность показаний.

Исключить влияние ионов железа в конечном результате позволяет проведение фотометрирования в особых условиях. Как известно, оптическая плотность раствора, содержащего несколько окрашенных веществ, обладает свойством аддитивности, которое описывают законом аддитивности светопоглощения. В соответствии с этим законом поглощение света, каким-либо веществом не зависит от присутствия в растворе других веществ, так как каждое из окрашенных веществ будет вносить свою величину в экспериментально определяемую оптическую плотность.

Задача состоит в исключении значения поглощения примесных ионов.

Условия получения спектра поглощения диктуют для исследуемого компонента выбор максимального значения молярного коэффициента поглощения — $\varepsilon_{\max}$, т.е. максимальной чувствительности. Согласно методике [5] растворы солей никеля и тиоцианатного комплекса железа имеют различную окраску, что позволяет выделить область, где светопоглощение тиоцианата железа достаточно велико, а светопоглощение соли никеля в присутствии тиоцианат-ионов незначительно. В ходе эксперимента была обнаружена оптимальная область (рис. 1) с длиной волны $\lambda = 500$ нм.

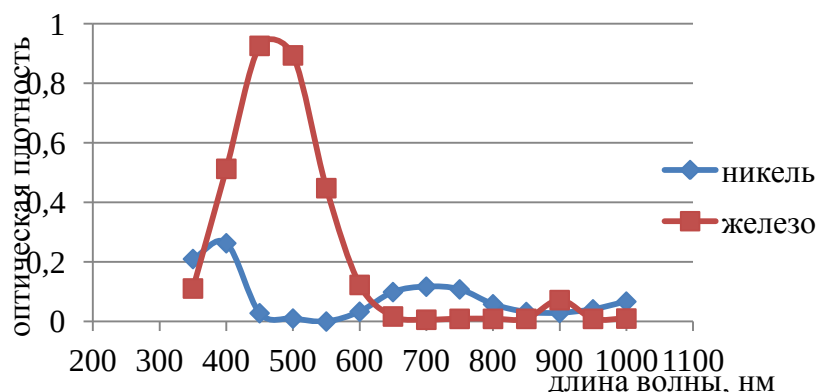


Рисунок 1 – Определение параметров светопоглощения

Выбрав светофильтр и фотометрируя анализируемый раствор дважды при длине кюветы $l=1$ см — без добавления тиоцианат-ионов и после их добавления, получали соответственно два значения оптической плотности.

Первое (A_0) соответствовало светопоглощению соли никеля, второе (A) суммарному светопоглощению соли никеля и тиоцианата железа. Разность $\Delta A = A - A_0$ пропорциональна концентрации железа в растворе. Дальнейшая обработка результатов сводилась к определению концентрации ионов. Для расчетов были выбраны: метод градуировочного графика – для железа и метод сравнения со стандартным раствором – для никеля. Результаты контроля содержания никеля и железа приведены на рисунке 2.

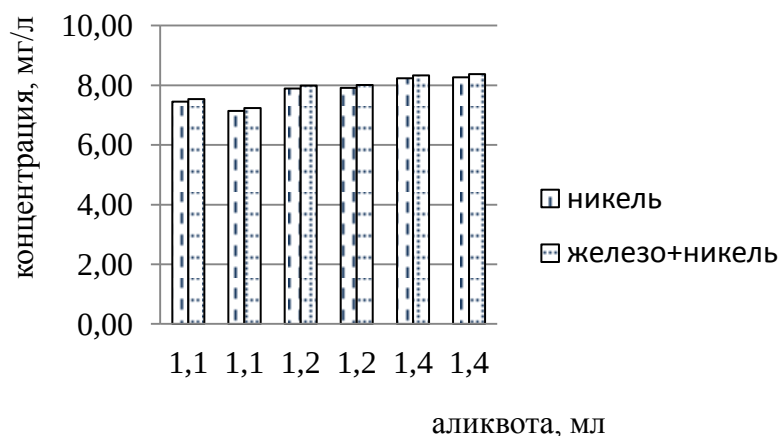


Рисунок 2 – Концентрации веществ в анализируемом растворе

Анализ полученных результатов показал, что концентрация железа не превышает 0,1 мг/л. При использовании технологии очистки с достижением концентрации никеля в очищенной воде в пределах 7-9 мг/л, делать поправку на содержание железа не имеет смысла. Однако, при усовершенствовании технологии извлечения никеля из СВ и достижении концентраций, близких к нормативным, эту поправку необходимо учитывать.

Список литературы

1. Бок Р. Методы разложения в аналитической химии. Москва, Химия, 1984. 432с.
2. Пешкова В.М., Савостина В.М. Никель. Москва, Наука, 1966. 204с.
3. Хазель М.Ю., Селеменев В.Ф., Слепцова О.В., Н. В. Соцкая Н.В. Процессы комплексообразования в фазе полиамфолитов при сорбции ионов никеля из сложных многокомпонентных растворов. Воронеж, Изд-во ВГУ .2008, № 1 с 55-63
4. Мешалкин А.В., Дмитриева Т.В., Стрижко Л.С. Экохимический практикум. Москва, ИЗД-во САЙНС-ПРЕСС, 2002. 243с.
5. Васильев В.П., Васильев Р.П., Морозова Л.А., Практикум по аналитической химии. Москва, Химия, 2000. 328 с.

Останин Алексей Николаевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: Xlaktmus@yandex.ru.

Шемель Ирина Геннадьевна – ст.преп. КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: fn2kf@ya.ru.

Я.В. Котосова, В.В. Гришакова

ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД ПРЕДПРИЯТИЯ ООО «ПСМА РУС»

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Одна из глобальных проблем человечество на Земле, которая требует немедленного решения— это загрязнение воды. Одним из главных загрязнителей воды является промышленность. В промышленных сточных водах содержатся такие вещества как железо, никель, медь, цинк, марганец, азот аммония, хлориды, фосфаты, взвешенные вещества и тд. Из-за попадания этих веществ в водоемы, качество питьевой воды снижается или становится не пригодным для употребления. [1]

В нашем городе Калуга проблема с нехваткой чистой питьевой воды может стать актуальна в ближайшее время. Это связано с тем, что на протяжении многих лет, в нашей области открылось много предприятий и заводов. В процессе их деятельности загрязняющие вещества поступают как в почву и воздух, так и в воду. Конечно, на этих предприятиях есть очистные сооружения, но они не дают 100% в результате очистки от вредных веществ. Так на примере предприятия ООО «ПСМА Рус» (п. Росва) проанализируем качество процесса очистки сточных вод.

Предприятия ООО «ПСМА Рус» является одним из многих машиностроительных заводов расположенных в нашей области. Начало истории «ПСМА Рус» в Калужской области датируется апрелем 2008 года, когда в индустриальном парке Росва был заложен первый камень будущего завода. [2]

В процессе производственной деятельности завода, в сточных водах содержатся: железо, никель, медь, цинк, марганец, азот аммония, хлориды, фосфаты, сульфаты, фториды, гидрокарбонаты, взвешенные вещества, нефтепродукты, СПАВ, фенол и тд. Так же в сточных водах превышено значение водородного показателя, общей щелочности, ХПК и БПК.

Водоочистные сооружения используются для обработки концентрированных стоков с производства и очистки их до прописанных в договоре норм сброса, прежде всего от таких загрязнений как тяжелые металлы и взвешенные частицы.

Принцип очистки сточных вод на заводе.

Маслосодержащие стоки собираются в один отстойник. Из отстойника сточные воды подаются в реактор для отделения эмульсий с помощью серной кислоты. Сточные воды, загрязненные маслом подаются на насосную станцию системы Enviochem и далее в реактор коагуляции. Масло отделяется в интегрированном отсеке маслоуловителя. Оттуда масло перекачивается в передвижной отстойник для дальнейшей утилизации сторонней организацией.

Промывочная вода с производства собираются в три отстойника. Из трех отстойников сточные воды подаются в реактор с помощью насоса. Очистка сточной воды состоит из трех ступеней:

- Первая ступень очистки - это коагуляция. Время выдержки для коагуляции составляет 30 минут. При коагуляции используются такие реагенты, как соляная кислота и хлорид железа (III).

- Вторая ступень очистки - это нейтрализация. Время выдержки составляет около 30 минут. В процессе нейтрализации применяется известковое молоко.

- Третьей ступенью очистки является флокуляция. Время удержания флокуляции составляет 15 мин. В качестве флокулянта используется электролит.

Осветленная вода отводится с помощью водослива. Ил собирается в 6 конусов каждого тонкослойного сепаратора и автоматически перекачивается с помощью контролируемого таймера через реактор восстановления ила в илонакопительный бак.

Осветленная вода из тонкослойных сепараторов самотеком поступает в резервуар. Из резервуара 3 насоса подают воду на два песчаных фильтра. Фильтры работают параллельно.

В резервуаре заключительного контроля уровень pH после осаждения и фильтрации может быть равным нейтральному значению. На выходе из резервуара, лотка автоматический пробоотборник берет пробы. В лотке контролируются и записываются мутность, электропроводность и температура. При превышении допустимых пределов вода поступает в резервуар.

При соответствии нормам pH и мутности очищенная сточная вода сбрасывается в муниципальную сеть хозяйственно-бытовых сточных вод.

Из конусов тонкослойных сепараторов осадок перекачивается в резервуар обезвоживания. После обезвоживания осадок самотеком поступает в иловый сгуститель. Образовавшаяся вода возвращается на стадию флокуляции. [3]

После процесса очистки в воде все же содержатся загрязняющие вещества, превышающие ПДК. К таким веществам относятся: сульфаты, железо, медь, фториды, никель, СПАВ, цинк, фенол и нефтепродукты, так же превышает водородный показатель. В связи, с чем предприятие ООО «ПСМА Рус» ежегодно выплачивает штраф предприятию водопроводно-канализационного хозяйства (ВКХ) Калужской области в размере одного миллиона.

Предприятию ООО «ПСМА Рус» необходимо пересмотреть систему водоочистки и ввести в схему новые, более эффективные методы очистки сточных вод.

Литература

[1] Канализация дома.Ру URL: <http://kanalizaciya doma.ru/stochnye-vody-eto>.

[2] Предприятие ООО «ПСМА Рус» URL: <http://smotra.ru>

[3] ПСМА Инструкция по эксплуатации.

Котосова Яна Владимировна – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: kotosowa.ya@yandex.ru.

Гришакowa Вера Васильевна – ст.преп. КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: j.strify2012@yandex.ru.

Ю.М. Жукова, А.П. Коржавый, С.Н. Никулина

ПРОБЛЕМЫ РЕАЛИЗАЦИИ В ПРАКТИКУ БЕЗРЕАГЕНТНЫХ СПОСОБОВ ОЧИСТКИ ЗАГРЯЗНЕННЫХ ВОД

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Сооружения предприятий радиоэлектроники для очистки сточных вод от производственных цехов применяют технологии с использованием химических веществ. При использовании этих технологий обработанная вода полностью не очищается от загрязнителей. В ней, кроме того появляются и продукты взаимодействия химических веществ с загрязнителями воды, такие как бром-ионы, опасные для человека соединения.

Приведены обобщающие данные о причинах, по которым безреагентные методы не находят промышленного применения при очистке загрязненных вод.

Ключевые слова: реагентные и безреагентные методы очистки воды, электромагнитные поля, предельно-допустимые концентрации

На данном этапе модернизации отечественной радиоэлектроники возрастают требования к водоподготовке, технологическая вода для этой отрасли промышленности должна отвечать особым требованиям. С целью обеспечения конкурентоспособности своих изделий на рынке предприятия радиоэлектронного профиля в первую очередь технически и технологически решили все проблемы с качеством и количеством потребляемой и пресной воды. С меньшим успехом решалась и решаются задачи по очистке загрязненной в процессе производства (сточной) воды. Частично внедрены технологии повторного использования сточных вод (СВ), но процент такой воды в обороте незначителен. Основная часть СВ радиоэлектронного производства, после очистки, сбрасывается в городской коллектор [1].

В подавляющем большинстве для очистки СВ на этих предприятиях используется реагентный (с использованием химических веществ) метод, основанный на прохождении реакции нейтрализации и окисления-восстановления [2]. При этом, например ионы тяжелых металлов, осаждаются в виде гидроксидов или основных карбонатов – малорастворимых соединений. Недостатками реагентного метода является то, что в ходе химических реакций образуются токсичные соединения (броморганические и др.), а сама очистка не обеспечивает достижения приемлемых значений по достижению строго заданных для загрязнителей предельно-допустимых концентраций (ПДК) воды [3].

Предложенный позднее гальванокоагуляционный метод обработки СВ, основанный на их очистке в поле гальваноэлемента [2], отнесенный его авторами к безреагентным, позволяет в одном агрегате снижать как концентрацию тяжелых металлов и органических примесей, так и общее содержание различных солей. В этом плане и ультрафиолетовую обработку и озонирование так же можно отнести к безреагентным способам очистки [3]. Хотя при озонировании химически активный озон проникает через клеточные мембраны органических веществ и их окисляет, а при действии ультрафиолета, в результате протекания фотохимических реакций, клетки микроорганизмов и бактерий погибают.

И все же термин «безреагентные» методы очистки воды от загрязнителей более всего характеризует способы кипячения, отстаивания, применения активированного угля, использование активного серебра, мембранных технологий и замораживания воды. По-видимому все методы очистки СВ с использованием электромагнитных полей можно отнести к безреагентным [4-6].

Одним из ряда причин отсутствия в настоящее время промышленных технологий лазерно-магнитной, микроволновой и др. очистки СВ являются недостаточно детальная проработка специалистами режимов облучения, передвижных и стационарных промышленных установок и научно-обоснованных технических решений по безопасному для персонала их использованию. Возможно, последняя причина является самой существенной.

Известно, что электромагнитные излучения всех видов в зависимости от длины волны и дозы опасны для окружающей среды и человека [5,7]. В некоторых отраслях промышленности, где на протяжении всей смены работы персонала воздействуют электромагнитные поля, уже разрабатывают защитные технологии [8], ведется производственный контроль на соответствие условий труда установленным нормам и правилам [9]. По данным [8], воздействие электромагнитных полей связано с повышенным риском возникновения заболеваний крои и головного мозга. Кроме того эксперты констатируют и такие факты что, например, воздействие электромагнитных полей связано с риском возникновения других заболеваний: глиома, менингиома и лейкоз.

В связи с этим предлагается [8] для оценки воздействия электромагнитных полей на персонал ввести показатели дозы как электрического, так и магнитного полей и создать эффективные методы и средства его защиты, такие как устройства контроля и сигнализации, датчики и приборы индивидуального учета дозы воздействия электромагнитных полей. И в случае освоения технологий с применением ионизирующих и неионизирующих излучений для очистки жидких сред разумеется, финансовоёмкая проблема. Но без ее решения сложно реализовать в промышленность технологии

безреагентной очистки СВ, основанные на электромагнитных излучениях [4-6].

При разработке целевой программы по внедрению в отечественную практику безреагентных методов очистки загрязнений вод, безопасные для персонала установки и технологии могут быть созданные уже в процессе её реализации (5-7 лет). Основанием для такого заключения служит, например, технические решения по созданию внедрению в быт сверхвысоко-частотных (СВЧ) полей, безопасных и удобных для пользователей, поскольку микроволновая печь стоит на кухонном столе практически в каждой семье или офисе. Поэтому промышленное освоение микроволновой технологии очистки СВ и ее осадков может быть реализована уже в ближайшие годы, при заинтересованном разрешении всех вышеприведенных проблем.

Список литературы

1. Доможир В.В., Жукова Ю.М., Никулина С.Н., Николаева Т.С. Новые методы обработки и диагностики пресной воды поле ее промышленного использования. // Научные технологии, 2014, т. 15, с. 36-40
2. Чантурия В.А., Соложенкин П.М. Гальванохимические методы очистки технологических вод: Теория и практика. М.: ИКЦ «Академкнига», 2005, 204 с.
3. Коржавый А.П., Ершов А.В. Исследования экологических проблем обработки природных вод с целью исключения хлора из технологии водоподготовки. Труды регионального конкурса научных проектов в области гуманитарных наук. Вып. 5. Калуга: Полиграф-Информ, 2004, 386 с.
4. Алакин В.М., Ершов А.В., Жукова Ю.М. и др. Особенности применения отпаянных излучателей для обеззараживания различных сред. Научные технологии, 2005. т.6, № 3-4, с. 39.
5. Кузьмин Г.В., Зейналова А.А., Коржавый А.П. и др. Применение ионизирующих и неионизирующих излучений в агробиотехнологиях / Под общ. ред. Г.В. Козьмина. Обнинск: ВНИИСХРАЭ. 2011. 191 с.
6. Коржавый А.П., Капустин В.И., Козьмин Г.В. Методы экспериментальной физики в избранных технологиях защиты природы и человека / Под ред. А.П. Коржавого. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2012. 352 с.
7. Горбачев В.В., Марков Г.П. Основы электромагнитной экологии / Под ред. А.П. Коржавого. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2010. 224 с.
8. Белинский С.О. Снижение вредного воздействия электромагнитных полей на персонал электрифицированного транспорта // Безопасность труда в промышленности. 2014. № 7. С.49.
9. СанПиН 2.2.4.1191-03 Электромагнитные поля в производственных условиях. М.: Федеральный центр Госсанэпиднадзора Минздрава России, 2011. 38 с.

Жукова Юлия Михайловна – канд. техн. наук, заместитель заведующего кафедрой по научной работе КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: zjuliam@hotmail.com.

Коржавый Алексей Панетелевич – д-р техн. наук, заведующий кафедрой "Промышленная экология и химия" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: fn2kf@list.ru.

Никулина Светлана Николаевна – канд. техн. наук, заместитель заведующего кафедрой по научной работе КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: voinsveta579@mail.ru.

Yu.M. Zhukova, A.P. Korzhavyi, S.N. Nikulina.

PROBLEMS OF PRACTICAL IMPLEMENTATION OF CHEMICAL FREE PURIFICATION METHODS OF CONTAMINATED WATER.

Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch, Kaluga, 248000, Russia

Water purification station at production plants of radionics employ sewage treatment methods that involve chemical reagents. The water obtained after such treatments is not completely pure of contaminants. Besides, it also contains the reaction products between the chemicals and the contaminants of water (for instance, bromine-ions), which are harmful for human health. Here we present generalized data about the factors preventing industrial implementation of chemical free methods of sewage water treatment.

Key word: *chemical and chemical- free methods of water purification, electromagnetic field, maximum allowed concentration.*

Zhukova Yu.M., Ph.D., Assoc. Professor of the Kaluga Branch of the Bauman Moscow State Technical University. E-mail: zjuliam@hotmail.com.

Korzhavyi A.P., Dr. Sci. (Eng.), Head of the Department of the Kaluga Branch of the Bauman Moscow State Technical University. E-mail: fn2kf@list.ru.

Nikulina Svetlana Nicolaevna, Ph. D., Assoc. Professor of Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University. E-mail: voinsveta579@mail.ru.

С.А. Кусачева, А.А. Матеров, Э.Э. Мирзоев

РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОЙ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ УТИЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ ОРГАНИЧЕСКОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ ДЛЯ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО СЕКТОРА

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

В настоящее время проблема поиска альтернативных направлений утилизации твердых бытовых отходов, а также оптимизация существующих технологий является весьма актуальной.

Известен ряд методов биологической утилизации отходов, содержащих органику с получением различных продуктов, обладающих возможностью повторного использования. Однако все эти методы имеют свои преимущества и недостатки. Последние часто являются препятствием к применению технологий биоутилизации в промышленности и в быту.

К основным направлениям оптимизации существующих технологий можно отнести поиск максимально эффективных параметров технологического процесса, в том числе, подбор определенных микроорганизмов или их ассоциаций, а также технологического оборудования.

Процесс микробиологической утилизации происходит в биореакторах разных конструкций и объемов. Спектр наименований применяемых микроорганизмов также достаточно широк.

В четыре стеклянные ёмкости-биореактора объёмом 500 мл, оснащенные системами для отвода и сбора газа, поместили образцы отходов растительного происхождения объёмом 100 мл в каждую, довели водой до уровня 250 мл и добавили 25 мл (10% по объёму) активного ила. Для данного опыта были выбраны образцы капусты и моркови.

При взаимодействии активного ила с образцами капусты и моркови в водной среде выделяется биогаз.

Для оценки интенсивности процесса газообразования и изучения динамики его объёма были использованы шарики, которые были герметично закреплены над пробками.

Для определения оптимальных параметров технологического процесса биореакторы с образцами были помещены в различные условия. Опыт с образцом №1 проводился при комнатной температуре, остальные образцы были помещены в термостат с температурой 37°C.

Образцы наблюдались в течение 21 дня.

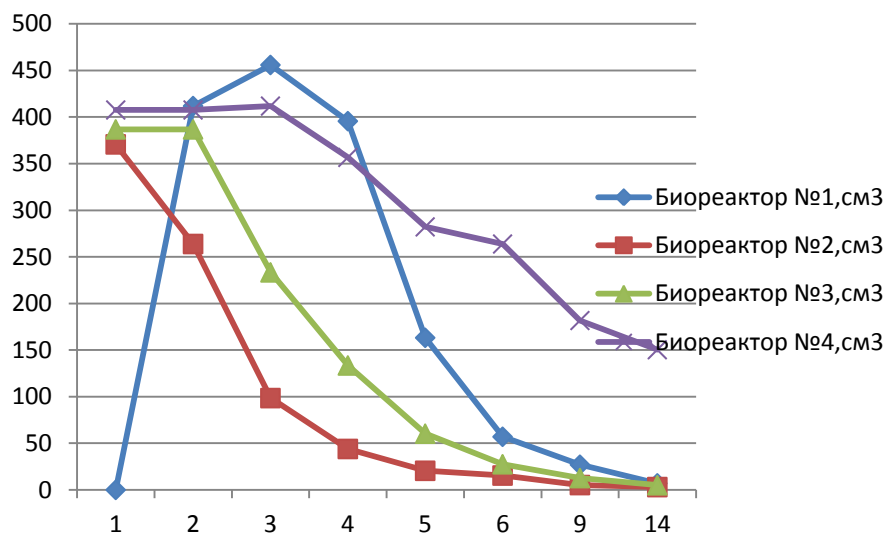


Рисунок 1 Динамика объема биогаза

Таблица 1

Динамика объема раствора

Номер биореактора с образцом	Объем раствора, мл							
	1 день	2 день	3 день	4 день	5 день	6 день	9 день	14 день
1	275	280	250	260	270	280	275	260
2	280	300	280	280	280	280	280	265
3	280	300	250	275	280	275	275	260
4	275	300	250	275	280	275	275	255

Таким образом, было установлено, что при комнатной температуре процесс взаимодействия активного ила с растительными отходами происходит медленнее, чем при температуре в 37°C. Также было установлено, что бактериями активного ила быстрее и эффективнее перерабатывается капуста, чем морковь, предположительно это связано с различием химического состава и физических свойств этих овощей. Редукция сухого остатка составила для капусты – более 55%, для моркови – около 30. Процесс разложения твердой фазы (капусты) начался на 2-е сутки эксперимента и продолжался до его окончания. Процесс разложения моркови начался много позже – на 7-10-е сутки и происходил менее интенсивно. Было установлено, что бактерии ила потребляют выделенный в ходе опыта газ, т.к. объем газа в ходе эксперимента уменьшался.

В повторном эксперименте подтверждали полученные данные, а также выявляли зависимость эффективности процесса биоутилизации от концентрации активного ила. Для этого в четыре стеклянных биореактора, применяемых в предыдущем эксперименте, образцы капусты по 100 мл в каждую, довели водой до уровня 250 мл. В реактор №1 активный ил не добавляли и проводили опыт с ним при комнатной температуре (контроль). В реактор №2 внесли 25 мл активного ила, процесс осуществлялся при ком-

натной температуре. В реактор №3 внесли 50 мл активного ила (20% по объему) и термостатировали при температуре 37°C. В ёмкость №4 внесли 25 мл активного ила и термостатировали при температуре 37°C.

Для определения объёма выделившегося газа и скорости его образования использовались шарики, которые были герметично закреплены над пробками.

Эксперимент, как и в первом случае, проводился в течение 21 дня.

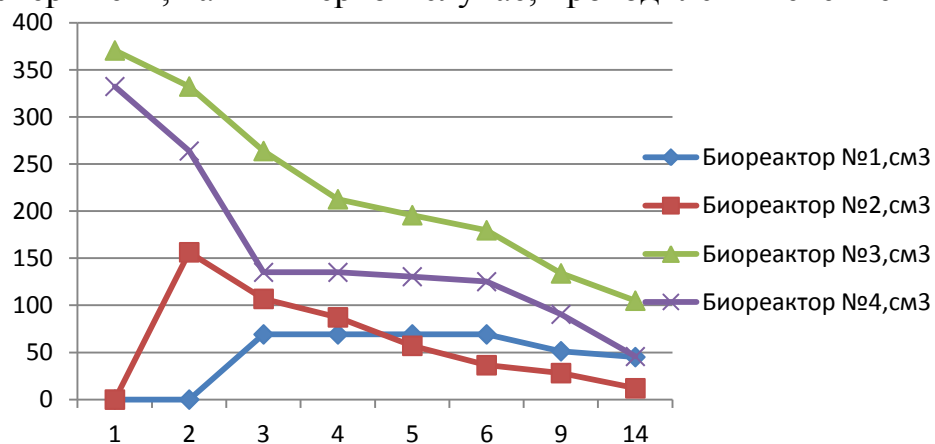


Рисунок 2 Динамика объема газа

В результате эксперимента получены данные, аналогичные данным первого эксперимента. Также было установлено, что при увеличении концентрации активного ила процесс протекает несколько быстрее и объем полученного газа выше.

Данные полученные в ходе исследования позволили создать технологическую схему процесса биоутилизации (рисунок 3).

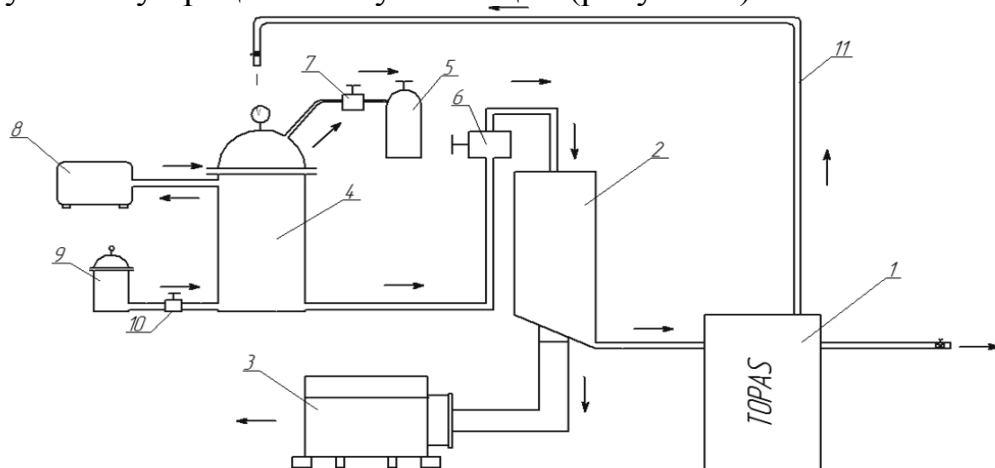


Рисунок 3 Схема комплексной технологии биоутилизации пищевых отходов

Элементы технологической схемы:

1. Переносная канализация Фирмы TOPAS.
2. Фильтр вертикальный барабанного типа для разделения жидкой и твердой фаз.
3. Сушилка.
4. Биореактор.

5. Баллон для сбора метана.
- 6,7,10. Насосы периодического действия
8. Газгольдер для временного сбора CO_2 .
9. Анаэроостат.
11. Трубопровод.

Принцип работы:

В биореактор засыпают отходы органического происхождения, заливают воду и активный ил и герметично закрывают его. По истечению определенного количества времени, когда бактерии активного ила полностью выработают CO_2 , через трубопровод из анаэроостата подаются метанобразующие бактерии. Получившейся метан собирается в газгольдер. Оставшаяся после переработки фракция отравляется через трубопровод в фильтр. В фильтре фракция разделяется на жидкую и твердую фазу. Твердая фаза отправляется в сушилку. Получившиеся удобрения могут быть проданы. Водная фаза отправляется на доочистку в переносную канализацию TOPAS и возвращается обратно в биореактор для повторного использования.

Экономическая выгода для индивидуального предпринимателя в сфере сельского хозяйства.

1. Стоимость оборудования. Затраты на покупку необходимого оборудования. Они составляют 300000 рублей.

2. Годовые расходы. Затраты в процессе хозяйственной деятельности; приводящие к уменьшению средств предприятия или увеличению его долговых обязательств в течение одного года. Они составили 57672 рублей.

3. Годовой доход. Средства в денежной или натуральной форме, получаемые экономическими субъектами в результате их экономической деятельности в течение одного года. Он составил 127700.

4. Срок окупаемости инвестиций. Показывает период времени, в течение которого поступления от реализации покроют затраты на инвестиции. По расчетным данным, срок окупаемости составляет 5 лет.

Заключение. Таким образом, расчетными методами определена экономическая выгода и возможность практического использования предлагаемой ресурсосберегающей технологии утилизации органических отходов для агропромышленного сектора с получением биоудобрений, биогаза и технической воды.

Применение данного метода в сельском хозяйстве позволит получить значительный эколого-экономический эффект, снизить количество пищевых отходов и будет способствовать к снижению числа несанкционированных свалок.

Кусачева Светлана Александровна – канд. биол. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: safronova2@mail.ru.

Матеров Андрей Александрович – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: materov.andrey@mail.ru.

Мирзоев Эльмар Эльдарович – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: elmar6@mail.ru.

М.С. Горбачёва, Е.И. Семёнова, Н.А.Бычков

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ НАУКА КАЛУЖСКОГО ФИЛИАЛА МГТУ ИМ. Н.Э. БАУМАНА ЧЕРЕЗ ПРИЗМУ РЕФОРМ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ И НАУЧНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В РФ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Введение

На протяжении последних двух с лишним десятилетий наблюдается процесс демодернизации и деинтеллектуализации России.

Состояние российской науки и образования, начиная с 1990-х годов, и до сегодняшнего дня продолжает оставаться кризисным. В результате «шоковой терапии» перестали существовать большинство отраслевых институтов, которые были главным связующим звеном между наукой и производством и основным элементом инновационного процесса в стране. Прикладная наука была уничтожена, когда исчезли отраслевые министерства. За два десятилетия (с 1992 по 2011 гг.) количество научно-исследовательских организаций в России сократилось почти на 20%. Уменьшилось (на 18%) и количество промышленных организаций, имеющих научно-исследовательские и проектно-конструкторские подразделения.

Одним из важнейших процессов, который способствовал интенсификации «падения» Российской науки, стал отток научных кадров из различных научно-производственных и научных учреждений.

Наука должна быть выгодна тем, кто ее создает...

Еще в XVII веке английский философ Томас Гоббс писал, что людьми двигает выгода. Через 200 лет Карл Маркс, развивая эту мысль, утверждал, что история есть не что иное, как деятельность людей, преследующих свои цели. Если та или иная деятельность не выгодна (в данном случае речь идет о науке, об ученых, разработчиках современных технологий), то нечего ожидать, что в науку пойдут наиболее талантливые, первоклассно подготовленные молодые ученые, которые почти даром и при отсутствии подготавливающей инфраструктуры будут двигать ее вперед. Пока интеллектуальная собственность не будет принадлежать тому, кто ее создает, пока ученые не начнут получать от нее прямую выгоду, на прогресс науки и технологии, на развитие научно-технологического потенциала, а, следовательно, и на подъем экономики в нашей стране надеяться бессмысленно. Если положение не изменится, государство может остаться без современных технологий, а значит, и без конкурентоспособной продукции. Так что в условиях рыночной экономики выгода - не позор, а важнейший стимул общественного и экономического развития.

В связи с оттоком кадров (отъезд за рубеж, рассасывание в различные области человеческой деятельности), отсутствием пополнения молодыми высококвалифицированными кадрами, происходило постепенное «старе-

ние» научных кадров. Причин для этого, конечно не мало, перечислим лишь некоторые. Во-первых, по окончании вузов далеко не все студенты и студентки рвутся в аспирантуру (хотя в последние год, два тенденция меняется в лучшую сторону), многие идут туда, чтобы избежать армии или три года пожить вольготно. Во-вторых, защитившиеся кандидаты и доктора наук, как правило, могут найти достойную их звания зарплату не в государственных НИИ, конструкторских бюро и вузах, а в коммерческих структурах. И они уходят туда, оставляя своим титулованным научным руководителям возможность спокойно стареть. В результате перечисленных процессов, в настоящее время создан вакуум в научной среде, нарушена преемственность поколений ученых. Имеются и проблемы с качеством образования. Нынешние студенты даже на самых передовых факультетах получают подготовку на уровне 70-80-х годов прошлого века, хотя в жизнь они вступают в XXI веке. Понятно, что для возрождения научного потенциала России хотя бы до уровня потенциала СССР на ближайшую перспективу нет.

Кафедра «Промышленная экология и химия» в кризисное для науки и образования время

Вполне понятно, что критические проблемы, возникшие в Российской науке и образовании за последние десятилетия, не обошли стороной как Калужский филиал МГТУ имени Н.Э. Баумана, так и коллектив кафедры «Промышленная экология и химия». Все, что происходит со страной, происходит в микро модельном представлении и с кафедрой. Тем не менее, не смотря на объективные трудности, на кафедре осуществляется работа в двух научных направлениях. Таких как, «Экология» (курируют ведущие ученые: д.т.н., профессор Коржавый Алексей Пантелеевич, к.т.н., доцент Дмитриева Тамара Васильевна, к.б.н., доцент Кусачева Светлана Александровна) и «Неорганическая химия» (возглавлял д.т.н., профессор Федосеев Игорь Владимирович). Учеными кафедры за последние шесть лет проведено более 10 научно-исследовательских работ в различных областях экологического направления. Проведено фундаментальных исследований за этот – же период на сумму более 1,5 млн. руб., прикладных – на сумму более 500 тыс. руб. Опубликовано более 210 статей ученых кафедры срезультатами научных исследований (в том числе в 47 рецензируемых журналах из перечня ВАК и зарубежных изданиях). Учеными кафедры получено 4 Авторских свидетельства на изобретения. За достигнутые успехи в научной и научно-педагогической деятельности, научно-педагогические работники кафедры неоднократно отмечались различными наградами Правительства Калужской области, руководства МГТУ им. Н.Э. Баумана и Филиала.

На кафедре преподают и ведут научную деятельность пять докторов наук. Руководит кафедрой Лауреат Государственной премии СССР и Государственной премии РФ в области науки и техники, Заслуженный деятель науки РФ, академик Российской Академии естественных наук (РАЕН), специалист в области физики композиционных материалов, доктор технических наук, профессор - Алексей Пантелеевич Коржавый. Им орга-

низован и возглавляется единственный в Калужском филиале Диссертационный совет по защите диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук. Результатом научно-производственной деятельности Коржавого А.П., к примеру, стала разработка многокомпонентных материалов, обладающих особой радиационной стойкостью, формируемых из высокодисперсионных частиц, тонких нитей, пленок и фольги тугоплавких, благородных, цветных металлов и их соединений с кислородом, азотом и углеродом, в качестве источников электронов с высокой плотностью токоотбора для ионных, атомарных и молекулярных лазеров, лазерных пушек, высокоинтенсивных источников света – основы отечественных навигационных, радиолокационных и осветительных систем. В 2009 году Указом Президента РФ ему было присвоено почетное звание «Заслуженный деятель науки Российской Федерации». За всю свою научную и научно-производственную деятельность им опубликовано более 300 научных работ и получено 80 авторских свидетельств и патентов на изобретения в области экспериментальной физики. В числе его учеников 4 доктора наук, 12 кандидатов наук и более 1000 высококвалифицированных инженеров.

С 2003 года на кафедре преподает Черняев Сергей Иванович – доктор технических наук, кандидат биологических наук, профессор. Областями его научного интереса являются физика конденсированного состояния, экология человека, промышленная экология, промышленная безопасность и другие. Им опубликовано около 100 научных работ, в т.ч. 5 монографий, 2 учебника, 1 учебно-энциклопедическое пособие. Профессор Черняев С.И. принимал непосредственное участие в разработке и реализации ряда целевых программ: «Развитие индустрии детского питания», «Диабет», «Дети Чернобыля», «Техническое переоснащение предприятий пищевой и перерабатывающей отраслей АПК», «Развитие производства и использования в оздоровительных целях лечебно-профилактических и диетических продуктов питания и препаратов в Калужской области». Он отмечен медалями: им. М.В. Ломоносова, Международной Академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности, и другими наградами. Имеет Почетную грамоту Министерства здравоохранения Российской Федерации.

Большой вклад в развитие научных школ кафедры внес Акулов Алексей Алексеевич - доктор сельскохозяйственных наук, профессор. Областями его научных интересов являются экология, диетология, природное сообщество, энергосберегающие технологии, жизнедеятельность человека, агрономия. Им написано большое количество научных трудов на различную тематику. В их числе применение нетрадиционных удобрений при возделывании топинамбура, эффективность реализации инновационных программ, применение минеральных удобрений и т.д.

С первых лет открытия филиала в Калуге вел преподавательскую деятельность Федосеев Игорь Владимирович – доктор технических наук, профессор, действительный член Академии инженерных наук. Областями его научных интересов являются: химия карбонильных комплексов, синтез

алмазов в "мягких" условиях, технология утилизации многокомпонентных отходов. Автор более ста научных публикаций, в том числе двух монографий и 20 авторских свидетельств и патентов на изобретения, а также учебных пособий. Под его руководством многие годы в филиале развивалась кафедра химии.

В 2014 году коллектив кафедры «Промышленная экология и химия» усилен новым профессором. Шубин Николай Евгеньевич – доктор химических наук, кандидат технических наук, профессор. Имеет более семидесяти опубликованных научных и учебно-методических работ, удостоен звания «Изобретатель СССР». В 1994 г. Он удостоен звания лауреата Брюссельской выставки за инновационную деятельность в области разработки многослойных контактов, а в 1995 году - награды "За достижения в науке и экономике" имени Петра Первого Международной Академии наук.

За последние годы под руководством ученых и преподавателей кафедры, таких как Бычков Николай Александрович, Акулов Алексей Алексеевич, Доможир Владимир Викторович, Дмитриева Тамара Васильевна, Жукова Юлия Михайловна, Морозенко Мария Ивановна, Кусачева Светлана Александровна, Яковлева Ольга Владимировна, Шемель Ирина Геннадиевна, Бесклетко Татьяна Сергеевна, Сорокина Ирина Владимировна совместно со студентами и аспирантами кафедры проводились научно-исследовательские работы по различным темам экологической направленности: по влиянию экологических факторов на состояние растения в условиях антропо-экосистемы; по временной динамике продолжительности жизни людей под влиянием антропогенных факторов; составе и свойствах различных препаратов. Исследования проводились и в направлении основных и альтернативных видов топлива, определялся безопасный и эффективный метод получения плакированной ленты для глубокой вытяжки изделий приборостроения. При этом, изучались: особенности организации производства эмитирующих наноструктур для лазеров с минимальной нагрузкой на биосферу, проблемы водоснабжения, водопотребления и водоотведения в калужской области, историю технологий утилизации отходов города и ливневых стоков, процессы биоутилизации органических отходов с применением активного ила, санитарно-гигиенические показатели учебных учреждений. В своих научных изысканиях студенты производили расчеты геометрических параметров и акустической эффективности шумозащитного экрана для снижения уровня шума в жилой застройке. Студенты Бессер Н., Дыхно Я., Куликова И., Санютина Я. под руководством опытных преподавателей доцента Никулиной С.Н., и профессора Лыкова И.Н. изучали современные проблемы антропогенного загрязнения подземных вод г. Калуги, и исследовали состояние родников Калуги и Калужской области. Можно еще долго перечислять научные разработки преподавателей, учебно-вспомогательного персонала, аспирантов и студентов кафедры «Промышленная экология и химия» и их награды, но нельзя забывать в каких сложных условиях проводились эти работы. Как отмечалось выше, все

кризисное состояние Российской науки и образования в полной мере спроецировано на жизнь и деятельность нашей кафедры. Финансирование кафедры, как и многих учебно-научных заведений страны, в том числе и КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, далеко не достаточно.

Лабораторное и научно-исследовательское оборудование, по большей части, является устаревшим и изношенным, оно позволяет проводить научные исследования не на самом высоком, современном уровне.

Все это неизменно сказывается на масштабах и уровне исследований. Но, тем не менее, экспериментальные данные, полученные учеными кафедры «Промышленная экология и химия» и их научно-технические разработки социально значимы как для региона, так и для страны в целом. Поэтому, работа сотрудников кафедры, студентов и аспирантов вносит, пусть и не великий, но, все же заметный вклад в возрождение Российской науки и техники.

Заключение

В заключение можно отметить, что Россия переходит на форму организации науки, которая давно зарекомендовала себя в странах, являющихся в мире научными лидерами, и, прежде всего, в США. Там наука делается в вузах. Постепенно и вузы России становятся центрами знаний, т.е., не только образовательными, но и научными центрами. Наука и образование начинают развиваться новыми темпами, на основе совершенно иного отношения государства к этим жизненно важным сферам деятельности. Правда, пока, в масштабах Филиала и на уровне кафедры «Промышленная экология и химия» эти изменения мало ощутимы, особенно это касается оснащения учебно-научных лабораторий. Судя по динамике развития событий, дойдет очередь и до нас...Быстрее бы....

Список литературы

- [1] Региональная научно-техническая конференция - 2014 , том 2.
- [2] Региональная научно-техническая конференция - 2006 том 3 .
- [3] *Кафедра «Промышленная экология и химия» (ФН2-КФ)*, <http://bmstu-kaluga.ru/uchebnyj-protsess/fakultety-i-kafedry/fundamentalnye-nauki-fnk/fn2-kf> (дата обращения 18.10.2014)
- [4] *Кафедра «Промышленная экология и химия»* <http://cafedrafn2kf.ucoz.ru/> (дата обращения 15.10.2014)

Бычков Николай Александрович – д-р техн. наук, заместитель заведующего кафедрой по научной работе КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: abhima@list.ru.

Семёнова Екатерина Ивановна – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: vip.ka95@bk.ru.

Горбачева Марина Сергеевна – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: marina_gorbachev@list.ru.

СЕКЦИЯ 7.

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАЗЕМНЫХ ТРАНСПОРТНО – ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ И КОМПЛЕКСАХ

А.И. Пономарев, Б.П. Садковский, Е.А. Шинкоренко

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ПОДВЕСОК АВТОМОБИЛЕЙ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Пневматическая подвеска – это разновидность подвески, которая позволяет регулировать клиренс (то есть высоту кузова относительно дорожного полотна) за счет пневматических упругих элементов. Первым по-настоящему массовым автомобилем с пневматической подвеской стал знаменитый Citroen DS-19, появившийся на рынке в 1955 году. Несмотря на то, что патенты на пневматические подвески появились еще в начале XX века, первые попытки создать удачную конструкцию и массово внедрить ее в производство успехом не увенчались. Что же до автомобиля Citroen, то на всех его колесах были установлены регулируемые поршневые пневморессоры. В 1957 году в США появилась новая модель Cadillac Eldorado, также оснащенная пневморессорами, но уже на основе резиново-кордных оболочек (в отличие от Citroen, применявшего телескопические поршневые рессоры). Подвеска такого же типа, как у Cadillac, была установлена и на Mercedes-Benz 300 SE, продажи которого начались в 1961 году. И именно эта модель оказалась последней из легковых автомобилей, на которые устанавливалась пневмоподвеска данного типа. Интерес к резиново-карданным оболочкам в конструкции подвесок легковых автомобилей возродился относительно недавно, когда появились возможности для сочетания ее с электронными системами управления. В качестве основного ресурса, необходимого для работы такого типа подвески, используется воздух, находящийся внутри регулируемого элемента – пневморессоры (или пневматического упругого элемента, как ее еще называют). Упругость этой конструкции достигается за счет изменения уровня давления и количества воздуха внутри нее. Нужный уровень контролируется с помощью системы управления, специальной электроники, датчиков, системы клапанов и модуля подачи воздуха – компрессора, который за счет электросети автомобиля нагнетает воздух внутрь упругих элементов пневмоподвески. Кроме того, помимо модуля подачи воздуха, на пневмоподвеску часто устанавливают ресивер – специальный резервуар для хранения запасов воздуха, который используется на небольшой скорости, чтобы не приходилось лишний раз гонять воздух с помощью компрессора. Пневморессора состоит из корпуса с направляющей, манжеты и поршня. Пневматический упругий элемент может изготавливаться как со встроенным амортизатором, так и устанавливаться отдельно. Манжета изготавливается из прочного многослойного эластомера, или, проще говоря, из усиленной резины. Иногда на дорогих автомобилях для поддержания давления в случае утечки воздуха в упругом элементе монтируют клапаны остаточного давления. По сути, пневмо-

подвеска не является отдельным видом подвески автомобиля. Связано это с тем, что она чаще всего интегрирована в уже имеющуюся стандартную конструкцию, будь то подвеска МакФерсон, многорычажная или рессорная конструкция.



Рис. 1

Все современные пневмоподвески можно разделить на три основных типа: одно-, двух- и четырехконтурные. Одноконтурная пневматическая подвеска – это удел, в первую очередь, грузовиков и седельных тягачей. Она устанавливается на одну ось (чаще – заднюю) и регулирует ее жесткость в зависимости от массы груза на авто. Двухконтурная может устанавливаться как на одну ось, так и на две. Если она установлена на одной оси, она отвечает за независимое регулирование обоих колес, если же на двух, то действует как две одноконтурные системы. Четырехконтурная (самая сложная) разновидность пневматической подвески осуществляет регулировку каждого колеса по отдельности. Чаще всего в четырехконтурных системах присутствует электронный блок управления, который с помощью датчиков регулирует давление в пневмоэлементах. Как правило, современные системы управления одновременно реализуют три алгоритма работы пневматической подвески. Во-первых, принудительное изменение уровня кузова: в этом случае клиренс и жесткость подвески автомобиля регулируется водителем вручную с помощью специальных регулирующих устройств. На автомобилях с низкой посадкой устанавливается подвеска как раз с таким типом алгоритма, который, зачастую, исключает все остальные указанные ниже варианты ее работы. Во-вторых, автоматическое поддержание уровня кузова. В данном случае речь идет о полностью автоматической регулировке клиренса или жесткости подвески автомобиля с помощью электроники, поддерживающей заданный уровень кузова автомобиля независимо от его загрузки. Наконец, в-третьих, автоматическое изменение уровня кузова в зависимости от скорости автомобиля, что обеспечивает устойчивость авто в движении. При наборе скорости, программа управления автоматически уменьшает клиренс. При торможении, кузов автомобиля возвращается в исходное заданное положение. Сегодня управляемые пневматические подвески применяют многие ведущие автопроизводители из США, Европы и Японии, среди них такие известные марки, как Audi, BMW, Volkswagen, Mercedes-Benz, Ford, GM, Land

Rover, Lexus, Subaru и SsangYong. Основное преимущество использования пневмоподвески заключается в том, что автомобиль сохраняет великолепную плавность хода, при этом не наклоняется вперед при торможении, не кренится в крутых поворотах, на большой скорости становится устойчивее и лучше держит дорогу. Из недостатков можно выделить лишь сильный износ резиновых оболочек-манжет (особенно при эксплуатации в России) и их высокую стоимость. Кроме того, пневматическая подвеска очень чувствительна к условиям эксплуатации: ее ресурс могут резко сократить низкие температуры или чересчур агрессивные дорожные реагенты. В настоящее время нами ведутся исследования в области применения инновационных материалов в конструкции пневматических подвесок.

Список использованных источников:

1. Садковская Н. Е., Садковский Б. П. Пути повышения уровня экологической безопасности технических средств и технологий: монография. — Калуга: Манускрипт, 2011. — 156 с. ISBN 978-5-94627-071-7
2. Пневматическая подвеска. Web: <http://autoustroistvo.ru/hodovaya-chast/pnevmaticheskaya-podveska/>
3. Пневмоподвеска. Web: <http://velodom.ru/masterskaya/pnevmoподveski/>

Пономарев Алексей Иванович – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: aron2005@yandex.ru.

Садковский Борис Петрович – д-р техн. наук, профессор КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: 1012sbp@rambler.ru.

Шинкоренко Евгений Александрович – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: shinkorenko.evgeniy@mail.ru.

В.М. Алакин, А.И. Пономарев, Б.П. Садковский, В.А. Зубина

ОБЗОР КОНСТРУКЦИЙ И ПРИМЕНЕНИЯ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ПОДВЕСОК НА ГРУЗОВЫХ АВТОМОБИЛЯХ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Многие эксплуатационные качества малотоннажного грузового автомобиля, такие как устойчивость в движении, плавность хода, долговечность узлов и отдельных деталей машины во многом зависят от характеристик подвески. Важность этих характеристик особенно возрастает в сельских и пригородных дорожных условиях, а также в зимнее время. Именно адаптивная подвеска, управляющая дорожным просветом, определяет среднюю скорость малотоннажного грузовика на неровной дороге, а не мощность двигателя.

На основании опыта эксплуатации малотоннажных грузовиков собрана некоторая статистика относительно влияния неровности дорожного покрытия на производительность автомобиля. Так снижается скорость движения на 35-40%; увеличивается расход топлива на 50-70%; ускоряется износ ходовой части на 40%; общая производительность грузового автомобиля падает на 33-36%; стоимость транспортировки грузов в среднем возрастает на 60%.

Среди косвенных потерь отмечается увеличение вредных выбросов в атмосферу из-за перерасхода топлива, износ шин, отпуск ресурсов и трудозатрат на техническое обслуживание автомобиля. Адаптивная подвеска может показаться нерентабельной при массовом производстве малотоннажных грузовых автомобилей, поэтому установка такой подвески может вполне рассматриваться как экономически обоснованная дополнительная опция для условий сельских, пригородных и зимних дорог.

Усовершенствование подвески путем адаптивного исполнения также важно и для ровных дорог, поскольку в последнее время возрастает средняя скорость малотоннажных грузовых автомобилей и как следствие снижается устойчивость при заводской установке более значительного дорожного просвета. Анализ конструкций автомобилей показывает, что весовой коэффициент использования автомобиля, определяемый отношением полезной нагрузки к собственному весу, непрерывно увеличивается. Стремление к минимальному собственному весу, увеличение весового коэффициента использования автомобиля и максимальной комфортности приводит к тому, что подвески с установленным номинальным дорожным просветом не всегда обеспечивают поперечную устойчивость автомобиля. Во многих случаях подвеска может обеспечивать: максимальную плавность хода и устойчивость груженого автомобиля от опрокидывания путем уменьшения дорожного просвета в условиях скоростных и ровных дорог. Поэтому смещение поддрессоренных и неподдрессоренных частей автомобиля, минимальный просвет между кузовом (шасси) и поверхностью дороги может изменяться путем установки дополнительного пневматического устройства для изменения дорожного просвета и обеспечения адаптивности подвески.

При линейных характеристиках традиционных упругих элементов не удается добиться приемлемой частоты собственных колебаний, равной 90-120 мин⁻¹, что вынуждает конструкторов обращаться к упругим элементам

с нелинейной, прогрессивной характеристикой: пневматическим или гидропневматическим, обладающим целым рядом достоинств. Во-первых, эти упругие элементы имеют большую энергоемкость в основном рабочем диапазоне и при больших прогибах, а значит, обеспечивают снижение амплитуды колебаний, уменьшение количества энергии, поглощаемой амортизаторами, упрощают регулировку. При этом в подвесках со стальными упругими элементами прогрессивная характеристика достигается только за счет сильного усложнения конструкции. Второе достоинство — легкость автоматического регулирования жесткости и динамичного хода подвески в соответствии с условиями нагружения, что позволяет получить большую плавность хода. Третье достоинство - при одинаковых размерах упругого элемента подвеска позволяет иметь высокую степень унификации для автомобилей разной грузоподъемности со значительной разницей в величине поддрессоренных масс. В-четвертых, пневмоэлементы способны снижать центр тяжести автомобиля и следовательно повышать его устойчивость. Они имеют высокую долговечность, недостижимую для стальных упругих элементов. При этом снижается центр тяжести автомобиля и, следовательно, повышается его устойчивость. Пятое достоинство - при любой нагрузке обеспечивается надлежащее положение фар, что повышает безопасность движения в ночное время. В настоящее время пневмоподвески широко применяются на городских и междугородних автобусах, причем спереди пневмоэлементы являются составной частью как зависимых, так и независимых по кинематике подвесок.

Таким образом, благодаря совокупности положительных характеристик, пневмоподвески улучшают эксплуатационные качества автомобиля в целом. Среди них и устойчивость, и понижение центра тяжести, стабильность положения по горизонтальной оси, увеличение срока эксплуатации транспортного средства и прочее. Установка пневмоподвески как дополнительной опции минимально увеличит стоимость автомобиля, а, учитывая технический и экономический эффект, пневматическая опция – будет востребована.

Список использованных источников

1. *Калашиников Б.А.* Системы амортизации объектов с дискретной коммутацией упругих элементов. Омск: Изд-во Ом ГТУ, 2008, 344с.
2. *Садковская Н.Е., Садковский Б.П.* Пути повышения уровня экологической безопасности технических средств и технологий: монография. — Калуга: Манускрипт, 2011. — 156 с. ISBN 978-5-94627-071-7
3. *Цыбин В.С., Галашин В.А.* Легковые автомобили. М.: Просвещение, 1996, 239с.

Алакин Виктор Михайлович – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: alakin@bmstu-aluga.ru.

Пономарев Алексей Иванович – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: apon2005@yandex.ru.

Садковский Борис Петрович – д-р техн. наук, профессор КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: 1012sbp@rambler.ru.

Зубина Валерия Александровна – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: lera_zubina@mail.ru.

В.М. Алакин, С.А. Плахов, Г.С. Никитин

ОБОСНОВАНИЕ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ РАБОЧИХ ОРГАНОВ РОТОРНОГО КАРТОФЕЛЕКОПАТЕЛЯ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Картофель возделывают в России практически во всех почвенно-климатических зонах, в которых ведется агропромышленное производство, за исключением северных, а общая площадь посадок превышает 2 093 тыс. га. Картофель был и остается одной из самых востребованных сельскохозяйственных культур и включен в перечень продуктов, обеспечивающих продовольственную безопасность страны.

Из общих трудозатрат на возделывание картофеля уборка составляет 45...60 %, что связано с необходимостью выделить клубни из большого количества подкапываемой в рядке картофелесодержащей почвы. Для получения 4...6 кг клубней при механизированной уборке необходимо просеять до 200 кг почвы, а уровень механических повреждений не должен превышать 3% клубней по весу (при выкапывании не менее 95% клубней).

Существует два основных типа картофелеуборочных машин – это комбайны и картофелекопатели [3].

Картофелеуборочный комбайн выкапывает клубни, отделяет их от почвы и ботвы, собирает в бункер и выгружает в транспорт. Использование картофелеуборочных комбайнов позволяет значительно уменьшить трудоемкость и увеличить производительность, однако, из-за высокой стоимости, энергоемкости и трудоемкости его обслуживания их применение ограничено крупными и средними хозяйствами.

По данным МСХ РФ более 85 % всего возделываемого в России картофеля проходится на небольшие фермерские и личные подсобные хозяйства, где преобладают в основном картофелекопатели. Они бывают элеваторного, грохотного, роторного и комбинированного типа. Роторные сепарирующие поверхности состоят из батареи последовательных валов, на которых установлены рабочие органы. Они представляют собой роторно-паллерные элементы, которые обладают рядом преимуществ: большей эффективностью просеивания почвы, меньшей материалоэнергоемкостью и повреждаемостью клубней. Они также обладают возможностью одновременно с сепарацией почвы транспортировать массу вверх с углом наклона рабочей поверхности до 30°.

Для эффективной сепарации примесей и исключения защемления компонентов вороха эластичные паллерные выступы роторов должны иметь сферическую форму поверхности с наклоном против направления вращения роторов. Соударения картофеля с упругими рабочими элементами практически не приводят к повреждениям клубней за счет перехода части кинетической энергии почвы с клубнями в потенциальную энергию деформации упругого выступа ротора. Перемещение почво-клубневой массы роторами происходит с частичным отрывом от рабочей

поверхности, что способствует интенсификации процесса сепарации примесей и устойчивости перемещения вороха.

Процессы сепарации и транспортирования картофелесодержащей почвенной массы определяется угловой скоростью вращения роторов и площадью сечения просеивающих отверстий между роторами.

На первом этапе провели анализ перемещения клубней, который осуществляется в процессе взаимодействия с пальцами ротора (рисунок 1).

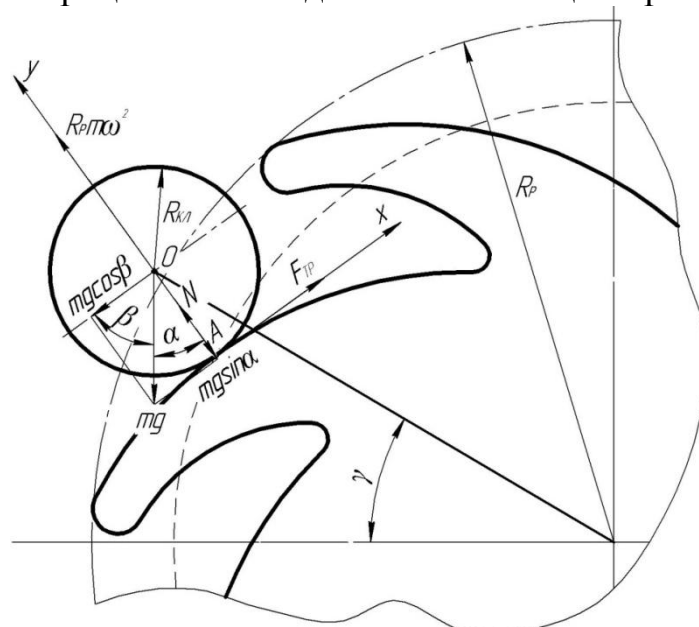


Рисунок 1 – Схема взаимодействия клубня с поверхностью выступа пальлерного ротора

В наиболее неустойчивом положении клубень находится в момент начала подъема. Согласно второму закону Ньютона спроецируем все силы на ось x и ось y

$$\begin{cases} \sum F_{kx} = ma_x = F_{TP} - mg \cos \beta \\ \sum F_{ky} = ma_y = N + R_p m \omega_p^2 - mg \sin \alpha \end{cases}, \quad (1)$$

где m - масса клубня, кг;

a_x и a_y - ускорения по оси x и y , m / c^2 ;

F_{TP} и N - силы трения и реакции опоры, Н;

R_p - радиус ротора, м;

ω_p - угловая скорость, c^{-1} .

Условие непрерывного перемещения клубня запишется

$$\begin{cases} F_{TP} \geq mg \cos \beta \\ N + R_p m \omega_p^2 \geq mg \sin \alpha \end{cases} \quad (2)$$

Из этого следует, что угловая скорость вращения ротора

$$\omega_p \geq \sqrt{\frac{g \sin \alpha}{R_p} - \frac{N}{m R_p}} \quad (3)$$

Исходя из того, что сила реакции опоры N намного меньше центробежной силы $R_p m \omega_p^2$ ею можно пренебречь, тогда выражение примет вид:

$$\omega_p \geq \sqrt{\frac{g \sin \alpha}{R_p}} \quad (4)$$

Для клубня средней фракции диаметром 50 мм и массой $m = 70$ грамм угловая скорость вращения роторов составит $\omega_p = 7,5 \text{ с}^{-1}$.

Угловая скорость вращения роторов будет определять уровень механических повреждений клубней, поэтому необходимо определить максимальную угловую скорость вращения роторов. Наибольшие воздействия на клубень (возможные повреждения) происходят в момент его попадания на палец. Так как скорость клубня, в момент удара, перпендикулярна линии контакта ОА (рисунок 1), ею можно пренебречь.

Уравнение взаимодействия клубня с пальцем ротора запишется

$$W = \omega_p R_p m, \quad (5)$$

где W - энергия, поглощенная при соударении, Дж.

Для расчетов принимаем значение полученное В.И. Табачуком $W = 0,14$ Дж.

Выразим угловую скорость вращения ротора ω_p

$$\omega_p = \frac{W}{R_p m} \quad (6)$$

Для принятых ранее параметров клубня $\omega_p = 19 \text{ с}^{-1}$.

Исходя из проведенного анализа и полученного ранее значения $\omega_p = 7,5 \text{ с}^{-1}$ можно сделать вывод, что повреждения клубней будут практически исключены.

Список литературы

1. Министерство сельского хозяйства РФ. – URL: <http://www.mcsx.ru/>
2. Резников Л.А., Ещенко В.Т. Основы проектирования и расчет сельскохозяйственных машин. – М.: Агропромиздат, 1991. – С. 425 – 446.
3. Туболев С.С., Шеломенцев С.И., Пшеченков К.А. Машинные технологии и техника для производства картофеля. - М.: Агроспас, 2010. - С. 176 - 193.

Алакин Виктор Михайлович – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: alakin@bmstu-aluga.ru.

Плахов Сергей Александрович – ст. преп. КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: sa.plahov@yandex.ru.

Никитин Геннадий Сергеевич – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: aser.port@yandex.ru.

В.М. Алакин, А.С. Королев

ОПИСАНИЕ РАБОТЫ СИСТЕМА ПОЛНОГО ПРИВОДА, ПОДКЛЮЧАЕМОГО АВТОМАТИЧЕСКИ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Система полного привода подключаемого автоматически (другое наименование – система On demand, в переводе «по требованию») является перспективным направлением развития полного привода легковых автомобилей. Данная система обеспечивает подключение колес одной из осей в случае проскальзывания колес другой оси. В обычных условиях эксплуатации автомобиль является передне- или заднеприводным. Практически все ведущие автопроизводители имеют в своем модельном ряду автомобили с автоматически подключаемым полным приводом. Известной системой полного привода подключаемого автоматически является 4Motion от Volkswagen. Конструкция системы полного привода подключаемого автоматически аналогична постоянному полному приводу. Исключение составляет наличие муфты подключения задней оси (рис. 1).

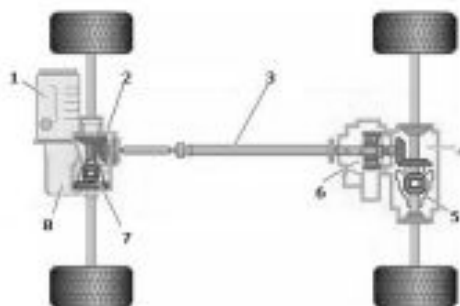


Рис. 1

Раздаточная коробка в системе автоматически подключаемого полного привода представляет собой, как правило, конический редуктор. Понижающая передача и межосевой дифференциал отсутствуют. В качестве муфты подключения задней оси используются вискомуфта или электронноуправляемая фрикционная муфта. Известной фрикционной муфтой является муфта Haldex, которая используется в системе полного привода 4Motion концерна Volkswagen. Система полного привода 4Motion относится к т.н. системам полного привода подключаемым автоматически. В данной системе крутящий момент двигателя распределяется по осям в зависимости от дорожной ситуации. Система 4Motion устанавливается на автомобили концерна Volkswagen с 1998 года. Название 4Motion является зарегистрированным товарным знаком. Система полного привода 4Motion включает дифференциал передней оси в коробке передач, раздаточную коробку, карданную передачу привода задней оси, многодисковую фрикционную муфту, главную передачу

и дифференциал задней оси. Дифференциал передней оси обеспечивает передачу крутящего момента от коробки передач к передним ведущим колесам. Корпус дифференциала передней оси соединен с раздаточной коробкой полым валом. Раздаточная коробка представляет собой коническую передачу, с помощью которой крутящий момент передается под углом 90 град. Карданная передача привода задней оси соединяет раздаточную коробку и фрикционную муфту. Карданная передача состоит из двух валов, соединенных шарниром равных угловых скоростей. К раздаточной коробке и фрикционной муфте валы присоединяются с помощью упругих муфт. Задний карданный вал имеет промежуточную опору.

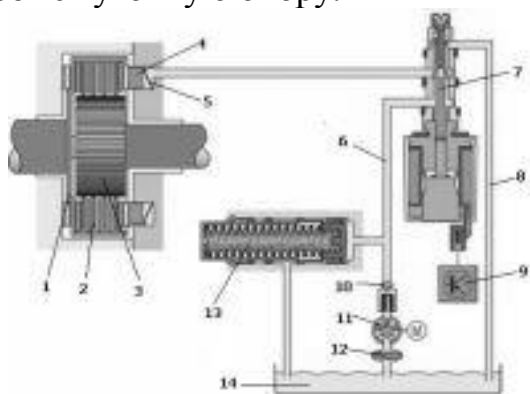


Рис. 2

Пакет фрикционных дисков представляет собой набор из фрикционных и стальных дисков. Фрикционные диски имеют внутреннее зацепление со ступицей. Стальные диски имеют внешнее зацепление с барабаном. Количество дисков определяет величину передаваемого крутящего момента (больше дисков – больше момент). Диски сжимаются поршнями. Муфта Haldex имеет электронное управление, включающее входные датчики, блок управления и исполнительные устройства. Входным датчиком системы управления является датчик температуры масла. Блок управления преобразует входящую информацию в управляющие воздействия на исполнительное устройство. Помимо датчика температуры масла электронный блок управления использует информацию от блока управления двигателем, блока управления системой ABS, получаемую по CAN-шине. Исполнительным устройством системы управления является клапан управления, регулирующий давление сжатия фрикционных дисков от 0 до 100% максимальной величины. Величина давления определяется положением клапана. Насос и аккумулятор давления обеспечивают поддержание давления масла в системе на уровне 3 МПа. трогании с места и разгоне автомобиля клапан управления закрыт, диски муфты максимально сжаты. На задние колеса передается максимальный крутящий момент. Если движение начинается с пробуксовкой обоих передних колес, клапан управления закрывается, фрикционные диски муфты сжимаются. Крутящий момент полностью передается на заднюю ось. При пробуксовке одного из передних колес в работу системы вначале включается электронная блокировка дифференциала. При движении с постоянной скоростью клапан открывается,

а диски сжимаются в зависимости от условий движения. На заднюю ось крутящий момент передается в определенных (незначительных) пределах. Пробуксовка в движении автомобиля определяется на основании сигналов от блока управления системы ABS. При этом клапан открывается в зависимости от условий движения (какая ось и какие колеса буксуют). При торможении клапан управления открыт, фрикционные диски муфты полностью разжаты. Крутящий момент на заднюю ось не передается. Принцип работы системы полного привода подключаемого автоматически заключается в следующем: крутящий момент от двигателя, через сцепление, коробку передач, главную передачу и дифференциал передается на переднюю ось автомобиля. Крутящий момент через раздаточную коробку и карданные валы также передается на фрикционную муфту. В нормальном положении фрикционная муфта имеет минимальное сжатие, при котором на заднюю ось передается до 10% крутящего момента. При проскальзывании колес передней оси по команде электронного блока управления срабатывает фрикционная муфта и передает крутящий момент на заднюю ось. Величина передаваемого на заднюю ось крутящего момента может изменяться в определенных пределах. Система полного привода подключаемого вручную заключается в следующем: Система полного привода подключаемого вручную (другое наименование - система Part Time, в переводе «частичное время») в настоящее время практически не применяется, т.к. является низкоэффективной. Вместе с тем, именно эта система обеспечивает жесткую связь передней и задней оси, передачу крутящего момента в соотношении 50:50 и поэтому является по-настоящему внедорожной. Устройство системы полного привода подключаемого вручную в целом аналогично системе постоянного полного привода. Основные отличия – отсутствие межосевого дифференциала и возможность подключения переднего моста в раздаточной коробке. Необходимо отметить, что в ряде конструкций постоянного полного привода используется функция отключения переднего моста. Правда в данном случае отключение и подключение это не одно и то же. На основании проведенных исследований было принято решение в использовании система полного привода подключаемого вручную для использования на малотоннажном автомобиле.

Список использованных источников

1. Программа самообучения VAG №241. Audi allroad quattro с понижающей передачей, 2012. – 241с.
2. "Four-father" Interview with Jorg Benzinger (Audi chief chassis engineer) Performance Car magazine March 2008, AGB Specialist Publications

Алакин Виктор Михайлович – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: alakin@bmstu-aluga.ru.

Королев Андрей Сергеевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: Korollew@mail.ru.

В.М. Алакин, С.С.Ерохин

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ДОГРУЗКИ МЭС ПРИ АГРЕГАТИРОВАНИИ ПЛУГА

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Основной обработкой почвы является вспашка. При вспашке почва измельчается, верхний, бесструктурный или задернелый слой укладывается на дно борозды и засыпается, а наверх выносится свежий, еще не распыленный слой почвы, в который впоследствии помещают семена культурных растений (при посеве). Вспашку производят плугами. Для более качественной и быстрой работы плуги агрегируют с тракторами (Рис.1).

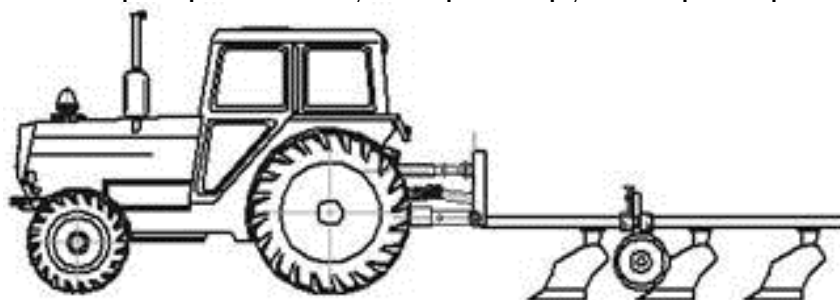


Рис. 1

Основным преимуществом навесных машин является то, что силы, действующие на навесную машину в вертикальной плоскости, передаются на трактор и увеличивают сцепной вес, улучшая его тяговые свойства (Рис.2). Это преимущество легко реализуется при силовом и позиционном регулировании глубины обработки почвы навесными машинами без опорных колес. При высотном способе регулирования глубины основное преимущество навесных машин не может быть полностью реализовано, так как из-за наличия опорных колес, на навесных машинах ведущие колеса трактора не догружаются. Чтобы устранить этот недостаток и максимально использовать массу навесной машины с опорными колесами для догрузки ведущих колес, на тракторе МТЗ в гидросистему включен гидравлический увеличитель сцепного веса (ГСВ), предназначенный для улучшения сцепных качеств трактора (т. е. уменьшения буксования и увеличения крюкового усилия).

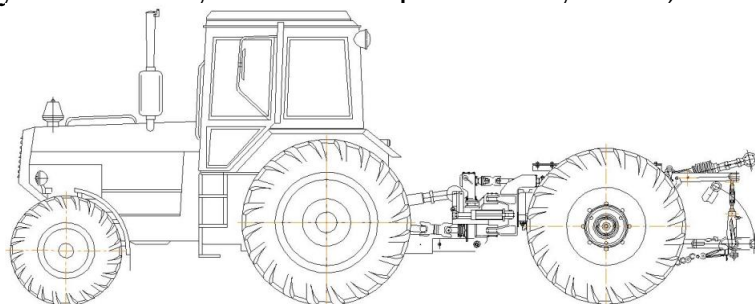


Рис. 2

Принцип действия гидроувеличителя сцепного веса или гидравлического догрузителя состоит в том, что при работе гидравлической системы трактора в подъемной полости основного силового цилиндра создается

давление подпора, которое стремится поднять навесную машину. Величина указанного давления недостаточная для подъема машины, поэтому копирование рельефа почвы опорными колесами не нарушается, однако с навесной машины как бы снимается часть массы за счет давления подпора в основном гидроцилиндре. Масса, снятая с навесной машины, прикладывается на определенном плече от задних колес и вызывает перераспределение нагрузки между передними и задними колесами, дополнительно увеличивая сцепной вес трактора.

Таким образом, гидравлический догрузатель ведущих колес является регулятором силового воздействия навесной машины с опорными колесами на трактор.

Использование ГСВ увеличивает нагрузки на задние колеса трактора на 11...37%. Это повышает тяговое усилие на 1100...3900 Н (110...390 кгс), что для трактора класса 14 кН соответствует увеличению тяги на 8...28%. Иначе говоря, 0,1 МПа (1 кгс/см²) подпора масла в цилиндре механизма навески увеличивает тяговое усилие трактора примерно на 1%. Одновременно тяговое сопротивление сельскохозяйственной машины (в частности, плуга) уменьшается примерно на 25%, так как при этом снижается вертикальная нагрузка на опорных колесах, что уменьшает сопротивление на их перекатывание по полю. Значительно снижается также буксование ведущих колес трактора. Все это способствует увеличению производительности машинно-тракторного агрегата, снижению погектарного расхода топлива и уменьшению износа шин.

Определим величину догрузки МЭС при агрегатировании плуга с помощью графоаналитического расчета усилий в звеньях почвообрабатывающих машин.

Метод расчета включает в основу статистическую модель механизмов и используется на этапе проектирования для расчета ориентировочных значений усилий, метод использует геометрическую интерпретацию принципа возможных перемещений.

Пусть на звеньях механизма, находящегося в равновесии, действуют внешние силы $P_1, P_2 \dots P_n$ тогда (1):

$$\sum_{i=1}^n P_i \cos \alpha_i ds_i = 0, \quad (1)$$

где ds_i - бесконечно малое виртуальное перемещение точки приложения силы P_i ; α_i - угол между направлениями силы и направления перемещения.

Если разделить уравнение на время dt , то получим уравнение возможных скоростей (2):

$$\sum_{i=1}^n P_i V_i \cos \alpha_i = 0, \quad (2)$$

Значение скоростей V_i в уравнение (2) определяют из плана скоростей. Произведение $V_i \cos \alpha_i$ геометрически представляет плечо H силы P в плане скоростей относительно полюса, тогда уравнение примет вид (3):

$$\sum_{i=1}^n P_i H_i = 0, \quad (3)$$

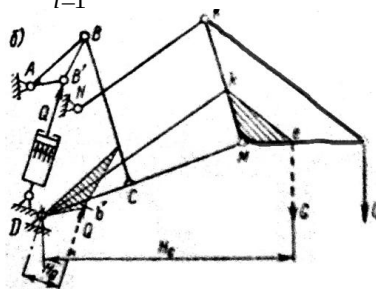


Рис. 3

План скоростей рассматривается как жесткий рычаг с опорой в полюсе А, находящийся в равновесии под действием сил, приложенных к концам повернутых векторов скоростей точек приложения этих сил. Значение плеч H_1 и H_2 берутся непосредственно со схемы, вычерченной в выбранном масштабе. Определение силы в навесном механизме находится по формуле (4):

$$Q = \frac{H_G}{H_Q} * G, \quad (4)$$

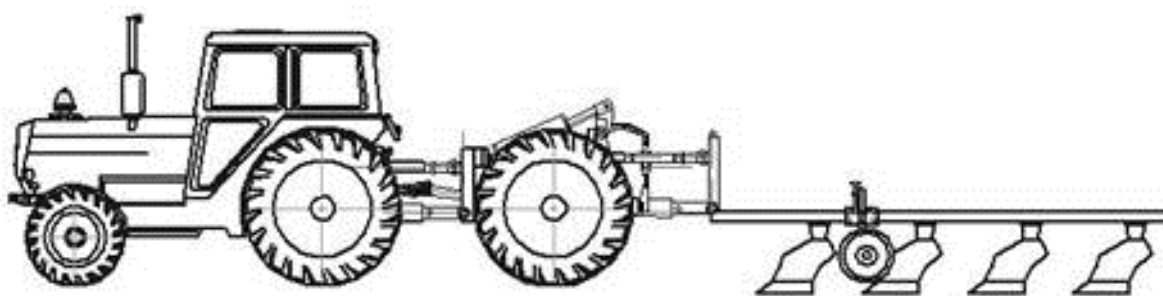


Рис.4

Гидроувеличитель сцепного веса следует использовать при работе со всеми почвообрабатывающими и другими машинами, имеющими опорные колеса. Особенно эффективно его применение на пахоте почв с переменным сопротивлением, на сплошной культивации, севе, посадке картофеля, междурядной обработке, а также при работе с полунавесными картофелеуборочными комбайнами.

Список использованных источников:

1. Лурье А.Б. Расчет и конструирование сельскохозяйственных машин, 1977г. -120с.
2. Барский И.Б. Конструирование и расчет тракторов. – М.: Машиностроение, 2008. - 354 с.
3. Кутьков Г.М. Теория трактора. – М.: Колос, 2006. - 287 с.

Алакин Виктор Михайлович – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: alakin@bmstu-aluga.ru.

Ерохин Сергей Сергеевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: eroha.88@mail.ru.

С.А. Голубина

ПЕРСПЕКТИВЫ УПРОЧНЕНИЯ ОТВАЛОВ ПЛУГОВ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

В сельскохозяйственном производстве Российской Федерации ежегодно возделывается более чем 115 млн га пашни. Для выполнения технологического процесса производится механическая обработка почвы: вспашка, глубокое рыхление, лущение, культивация, фрезерование, боронование и др.

Для создания благоприятных условий роста и развития культурных растений сельское хозяйство имеет более 135 тыс. плугов. В настоящее время по всем видам техники идет снижение парка машин (по плугам оно достигает 39%), в связи с этим нагрузка на сельскохозяйственные машины возрастет. Годовая потребность Российской Федерации в рабочих органах к сельскохозяйственным машинам оценивается значительным количеством (лемехи – 7 млн. шт., полевые доски – 3 млн. шт., отвалы – 2,4 млн. шт.).

Отвалы являются одной из наиболее металлоемких и дорогих деталей корпуса плуга. Отвал представляет собой изогнутую стальную пластину, располагающуюся под углом к стенке борозды. В процессе работы отвал отрезает пласт от стенки борозды, деформирует его, сдвигает в сторону и оборачивает верхним слоем вниз. При этом происходит уплотнение, скалывание и перемещение почвы по рабочей поверхности корпуса плуга. Наиболее интенсивное разрушение поверхностных слоев металла возникает под действием нормального давления и сдвигающего усилия при трении о плоскую или криволинейную поверхность клина.

Как известно, воздействие отвала на почву зависит от геометрической формы его поверхности, расположения и конфигурации. Отвал (рис.1) состоит из следующих частей: грудь отвала 4 – передняя часть, расположенная выше лемеха 5, крыло 2 – задняя часть, с левой стороны отвал ограничен полевым обрезом 3 (чтобы грудь корпуса не задевала стенку борозды), а с правой – бороздным обрезом 1 (чтобы отвал полностью оборачивал пласт и при этом крыло не задевало пласт).

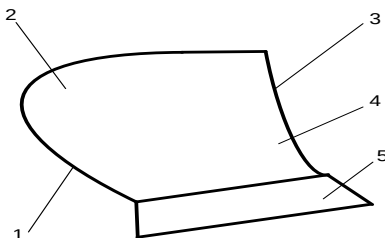


Рис. 1

В верхней части отвал обрезают так, чтобы не пересыпалась почва. Наружная поверхность лемеха и отвала представляет собой одну общую

поверхность корпуса плуга, от формы и размера которой зависит характер его работы. Форма груди отвала определяет крошащие свойства корпуса, а форма крыла – обрачивающие. Крошение почвы продолжается при дальнейшем движении пласта по искривленной поверхности и заканчивается после падения пласта с крыла отвала.

Отвалы плугов (тонкие плоские детали сложной формы) работают в условиях абразивного износа и значительных статических и динамических нагрузок. Эти детали должны иметь высокую прочность и износостойкость, однако в процессе работы происходит затупление лезвий из-за непрерывного взаимодействия металла с почвой и растениями, а также изменение их формы и размеров.

На износ рабочих органов плуга оказывает влияние значительное количество факторов.

В результате взаимодействия рабочих органов плуга при перемещении в почвенной среде возникает абразивное изнашивание, которое является функцией ряда переменных величин:

$$G = f(p, s, H, m, q),$$

где p – нормальное динамическое давление почвы на клин,

s – путь трения,

H – твердость металла,

m – показатель изнашивающей способности абразива,

q – площадь трения.

Механический состав и состояние почвы влияют как на интенсивность износа, так и на его характер.

Неравномерный износ рабочих органов плуга обусловлен прежде всего разным удельным давлением почвы на поверхность рабочего органа в различных её точках, а также зависит от скорости скольжения и ускорения контактирующих частиц.

Исследования влияния скорости движения на изменение удельных давлений в различных точках отвала плуга показывают, что наибольшее давление приходится на точки, расположенные на груди и у левого обреза крыла, наименьшее – на крыле отвала и у верхней его части.

С ростом скорости движения плуга неравномерность в распределении удельного давления по поверхности отвала увеличивается. Давление возрастает на груди отвала и уменьшается на его крыле, а в остальных местах перераспределяется.

Увеличение среднего удельного давления с повышением скорости движения объясняется ростом силы динамического давления пласта на грудь отвала. Почвенный пласт при больших скоростях движения, попадая на грудь отвала, отбрасывается в сторону, не достигая крыла. Поэтому на груди отвала давление увеличивается с повышением скорости, а на крыле – уменьшается.

В связи со значительными различиями почв по их изнашивающей способности, интенсивность изнашивания деталей рабочих органов различных зон отвала неравномерна.

По результатам эксплуатации в хозяйствах Калужской области, характерные износы отвалов приведены на рис. 2.



Рис. 2

Значительные износы деталей плугов часто делает их восстановление экономически не выгодным. По этой причине основным направлением повышения ресурса таких деталей следует считать предварительное упрочнение наиболее нагруженных кромок и поверхностей.

Благодаря широкому применению наплавочных покрытий возможно улучшение прочностных свойств, а также снижение скорости изнашивания поверхностей трения, эксплуатационных затрат, а также повышение качества обработки почвы.

Список литературы

1. *Лялякин В.П., Соловьев С.А., Аулов В.Ф.* Состояние и перспектива упрочнения и восстановления деталей почвообрабатывающих машин сварочно-наплавочными методами Труды ГОСНИТИ. 2014. Т.115.С. 96-104.
2. *Листопад Г.Е.* Сельскохозяйственные и мелиоративные машины. Москва, Агропромиздат, 1986, 688 с.
3. *Севернев М.М., Каплун Г.П., Короткевич В.А., Кот С.Н., Купреев П.Ф., Подлекарев Н.Н., Синявский И.А.* Износ деталей сельскохозяйственных машин. Ленинград, Колос, 1972, 288 с.

Голубина Светлана Александровна – ст. преп. КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: sa.plahov@yandex.ru.

В.М. Алакин, Э.И. Латыпов

ПРОЕКТ МОДЕРНИЗАЦИИ СЕРИЙНОГО ДВИГАТЕЛЯ ЗМЗ-405

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Двигатели ЗМЗ-405 предназначены для установки на грузовые автомобили ГАЗ-3302 «Газель Бизнес» полной массой до 3500 кг и на автомобили ГАЗ-2752 «Соболь» полной массой до 2980 кг, выпускаемых ОАО «ГАЗ» (рис.1).



Рис. 1

Двигатель ЗМЗ-405 - бензиновый, четырехтактный, четырехцилиндровый, рядный, шестнадцатиклапанный, с верхним расположением двух распределительных валов. Головка блока цилиндров ДВС ЗМЗ-405 отлита из алюминиевого сплава, общая для всех четырех цилиндров. Привод клапанов двигателя ЗМЗ-405 осуществляется от кулачков распределительного вала через гидравлические толкатели (гидротолкатели), установленные в гнездах головки блока цилиндров.

Как видно из графика зависимости крутящего момента от оборотов кривая момента имеет пики на 2,5 и 4-х тысячах оборотов, а на 3-х тысячах имеется «провал» (рис. 2). Именно этот «провал», а также крутизна пиков делают мотор недостаточно эластичным в диапазоне средних оборотов. Для получения хорошей эластичности и комфортных условий эксплуатации необходимо выровнять кривую момента таким образом, чтобы на средних оборотах он образовывал «полку», максимально приближенную к горизонтальной. Учитывая отсутствие на двигателе ЗМЗ-405 каких бы то ни было систем изменения фаз газораспределения, поправить кривую момента можно, используя впускной коллектор с изменяемой геометрией.

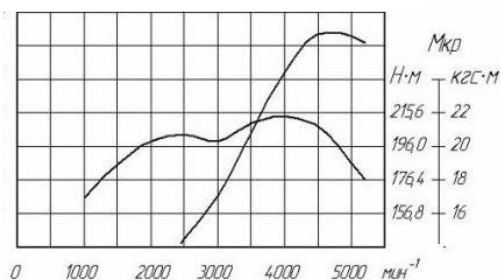


Рис. 2

На головку блока цилиндров крепится впускной коллектор постоянного объема, рассчитанный на получение максимального крутящего момента на 4000 об/мин. Вследствие этого КПД двигателя на низких и высоких оборотах ниже, чем на средних.

Впускной коллектор переменной длины применяется в атмосферных бензиновых и дизельных двигателях для обеспечения лучшего наполнения камеры сгорания воздухом на всем диапазоне оборотов двигателя (рис. 3).

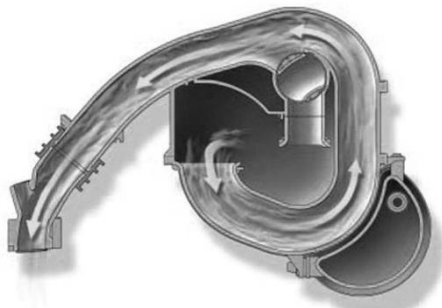


Рис. 3

На низких оборотах двигателя требуется достижение максимального крутящего момента как можно быстрее, для чего используется длинный впускной коллектор. Высокие обороты выводят двигатель на максимальную мощность при коротком впускном коллекторе. Работа впускного коллектора переменной длины осуществляется следующим образом. При закрытии впускных клапанов во впускном коллекторе остается часть воздуха, которая совершает колебания с частотой пропорциональной длине коллектора и оборотам двигателя. В определенный момент колебания воздуха входят в резонанс, чем достигается эффект нагнетания – т.н. резонансный наддув. При открытии впускных клапанов воздушная смесь в камеры сгорания нагнетается с большим давлением.

Система изменения геометрии впускного коллектора, примененная на двигателе ЗМЗ-405, делает его более эластичным и является одной из востребованных технологий повышения удобства эксплуатации, экономии топлива и снижения токсичности отработавших газов.

Список использованных источников

1. Голубев П.А., Завыленков Г.С. Двигатели ЗМЗ-405,406,409 автомобилей ГАЗ, УАЗ. Н. Новгород, 2008. – 320 с.
2. Луканин В.Н., Шатров М.Г. Двигатели внутреннего сгорания. Книга 2. Динамика и конструирование. 3-е изд., перераб. – М.: Высш. шк. , 2007. – 400 с.

Алакин Виктор Михайлович – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: alakin@bmstu-aluga.ru.

Латыпов Эльдар И. – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: k550@bk.ru.

©С.С. Керимов¹, В.М. Масюк², О.В. Сакович³

С.С. Керимов, В.М. Масюк, О.В. Сакович

РАЗРАБОТКА БОРТОВОГО КОМПЬЮТЕРА ДИАГНОСТИКИ ДВИГАТЕЛЯ С ПРОТИВОУГОННОЙ ФУНКЦИЕЙ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Актуальность задачи: в настоящее время разработка систем, связанных с экономией топлива, снижения износа являются одними из приоритетных в автомобилестроении. Здесь можно выделить следующие подзадачи: изучение системы распределенного впрыска топлива (инжектора) и его принципа работы; методики диагностики двигателя и его систем; типов диагностического оборудования; написания программы диагностики для подробного изучения протокола диагностики ISO 9141, разработка схемы контроллера.

Целью данной работы является создание бортового компьютера диагностики двигателя с противоугонной функцией.

Инжекторная система подачи топлива. Основное отличие от карбюраторной системы – подача топлива осуществляется путем принудительного впрыска топлива с помощью форсунок во впускной коллектор или в цилиндр. Автомобили с такой системой питания часто называют инжекторными. Рассмотрим систему подачи топлива двигателя ЗМЗ-406.2 Тип впрыска - многоточечный, то есть каждый цилиндр обслуживается отдельной изолированной форсункой во впускном коллекторе вблизи впускного клапана. Системой подачи топлива и зажиганием управляет блок управления Микас 7.1, на базе контроллера Siemens SAF-509. Угол опережения зажигания, время и длительность открытия форсунки определяется исходя из следующих параметров: температура двигателя, расход воздуха (через него рассчитывается цикловое наполнение цилиндров, по которому можно судить о нагрузке на двигатель), число оборотов, температура воздуха на впуске, процент открытия дроссельной заслонки, наличие детонации и так далее. Учитывая эти параметры, искра в цилиндре подается в нужный момент времени и обеспечивается оптимальный состав смеси при различных условиях эксплуатации. Благодаря этому инжекторный двигатель обладает более высоким КПД и ресурсом; большей экономичностью и мощностью, в отличие от карбюраторного мотора. Для определения всех параметров, необходимых для работы двигателя используются следующие датчики и устройства: датчик углового положения коленчатого вала (датчик синхронизации); датчик положения дроссельной заслонки; дроссельная заслонка; датчик массового расхода воздуха; электромагнитные форсунки; топливная рампа; регулятор дополнительного воздуха; датчик температуры воздуха во впускном коллекторе; реле системы управления двигателем; реле топливного насоса; электронный блок управления двигателем; регулятор давления топлива; датчик детонации; катушки зажигания; топливный электронасос;

датчик положения распределительного вала (фазы); свечи зажигания; датчик температуры охлаждающей жидкости. Чаще стали использовать лямбда-зонд в качестве обратной связи. Он устанавливается в выхлопную систему, и по нему можно судить, какая смесь (бедная или богатая). Исходя из полученных данных, вносятся корректировки в топливopодачу. Для проверки работоспособности, поиска неисправностей, настройки такой системы используется специальное диагностическое оборудование.

Диагностика. Диагностика осуществляется либо по компьютеру через com-порт, либо через специальный сканер. Для первого варианта необходим специальный адаптер. Существуют различные протоколы обмена данными, и различная аппаратная реализация. Это зависит от года выпуска и марки автомобиля. Например, с 1991 года существовал стандарт OBD. Согласно этому стандарту, связь устройства диагностики с блоком управления двигателем осуществляется по диагностической K- линии, либо по k- и L-линии. К этому стандарту относится ряд протоколов обмена данных. Позже появился стандарт OBD II. Так же к этому стандарту относятся следующие протоколы обмена: ISO15765-4 или CAN (Ford, Jaguar, Mazda, Mercedes, Nissan, Toyota, Lexus, Renault, Peugeot, Chrysler, Opel, VW, Audi, Porsche, Volvo, Saab и др.), ISO14230-4 или KWP2000 (Daewoo, Hyundai, KIA, Subaru STi и некоторые модели Mercedes), ISO9141-2 (Acura, Honda, Infinity, Lexus, Nissan, Toyota, и др.), J1850 VPW (Buick, Cadillac, Chevrolet, Chrysler, Dodge, GMC, Hummer, Isuzu, Oldsmobile, Pontiac, Saturn), J1850 PWM (Ford, Lincoln, Mercury, Jaguar, Mazda, Panoz, Saleen) [1].

Адаптеры. Для подключения к компьютеру существует огромное множество адаптеров, один из распространенных это elm327. Он поддерживает много протоколов. Но для диагностики, настройки двигателя и для перепрограммирования блока управления нужна диагностическая программа, которая иногда стоит больших денег.

Поэтому было решено изучить данный вопрос и создать собственное диагностическое оборудование. На первом этапе планируется осуществлять диагностику двигателя 3МЗ-406 с блоком управления Микас 7.1. Он использует протокол ISO 9141, для связи с электронным блоком управления (ЭБУ) используется 2 провода: K-LINE и GROUND. Обмен по последовательному интерфейсу K-Line происходит со скоростью 9600 бит/сек. Формат кадра 8N1.

При изучении протокола, могут возникать ошибки. Их проще отследить и устранить на компьютере, проще отладить программу, нежели на контроллере. Поэтому было решено написать программу диагностики для ПК и сделать собственный адаптер. Возможны различные варианты, например, можно использовать микросхему MC33199 или MC33290 (Motorola). Для согласования уровней между адаптером и com – портом, можно использовать микросхему MAX 232. Если используется ноутбук, то лучше использовать схему DS275 вместо MAX 232. Это связано с тем, что

напряжение на порте ноутбуку меньше, нежели у настольного компьютера. Одна из схем предложена на рисунке 1 с использованием DS275 и MC33199 [2].

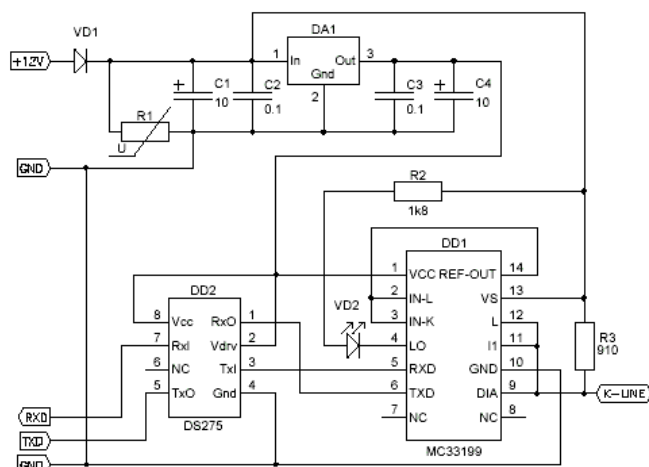


Рис. 1

Более простая схема основана на дискретных элементах. Для рассматриваемого случая это оптимальный вариант, поскольку она работает не хуже аналогов и ее себестоимость ниже. Было решено создать именно такой адаптер (рис. 2).

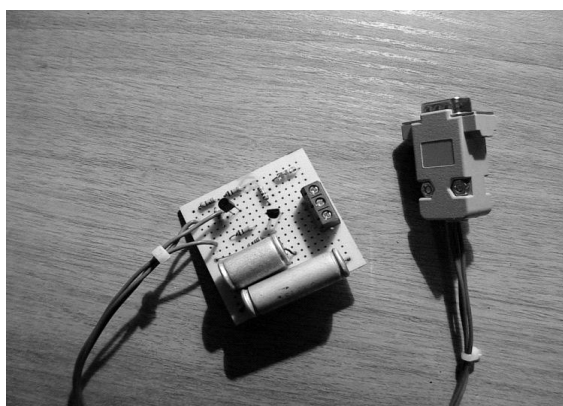
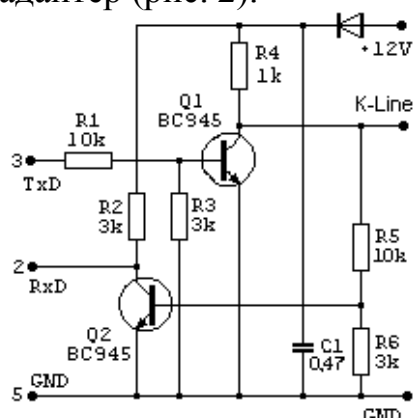


Рис. 2

Диод, защищающий схему от переполюсовки и должен быть с минимальным падением напряжения, например, диод Шоттки. Номинал резистора R4 подбирается в пределах 510 Ом - 1 КОм, замеряя ток между K-Line и общим проводом в пределах 15-20 мА. Основная проблема адаптеров такого типа - транзистор передающий сигнал от K-линии на компьютер (Q1 на приведенной схеме) медленно закрывается, что вызывает необходимость подбора резисторов для предотвращения перенасыщения транзистора. В противном случае фронт сигнала сильно запаздывает, что приводит к отсутствию связи [2].

Эксперимент показал, что данный адаптер успешно работает, диагностируя все системы - от Микаса до Bosch MP7 и со всеми программами - загрузчиками блоков Январь 5.1.

Тестовая версия программы диагностики. В процессе исследования проблемы, было решено создать собственную программу диагностики. На данном этапе создано тестовое консольное приложение на языке C# для Микас 7.1 обмен данными осуществляется по протоколу ISO 9141.

Программа позволяет запрашивать следующие параметры: тип блока управления, наличие детонации, напряжение бортовой сети, температура охлаждающей жидкости, частота вращения коленчатого вала.

Передача данных по протоколу осуществляется следующим образом:

Обмен с ЭБУ происходит путем посылки сообщений следующего формата:

[код команды]	[параметр(ы)]	[контрольная сумма]	[0x0D]
(тело сообщения)	(контрольная информация)	(Конец посылки)	

Число байтов в сообщении регламентируется только форматом команды и в заголовке сообщения не отражается.

Ответное сообщение имеет вид:

[возвращаемые параметры или код завершения команды]	[контрольная сумма]	[0x0D]
(тело сообщения)	(Контрольная информация)	(Конец посылки)

В случае двухбайтовых параметров первым передается младший байт. Контрольная сумма всегда представляется в виде одного байта. Значение этого байта равно дополнению до 0 суммы всех байт тела сообщения без учета переполнения.

Многократные команды. В зависимости от способа синхронизации с работой ПО ЭБУ, многократные команды делятся на команды первого и второго уровня.

Команды первого уровня не синхронизированы с вращением КВ двигателя и посылают данные из блока циклически. Время передачи списка команд определяется количеством команд и режимом работы двигателя. Команды второго уровня синхронизированы с вращением КВ и позволяют получать данные в заданном такте двигателя. Количество параметров в списке ограничено скоростью передачи [3].

Принцип работы. Для начала диагностики необходимо проверить тип блока управления. Согласно протоколу для запроса необходимо отправить байт 0x01, а блок управления должен прислать ответное сообщение, содержащее байт 0x0A. Кадр запроса типа ЭБУ выглядит следующим образом: 0x01 0xFF 0x0D, где второй байт – контрольная сумма, а третий обозначает конец посылки.

Бортовой компьютер. В дальнейшем диагностику автомобиля планируется осуществлять через бортовой компьютер, выполненный на базе микроконтроллера Atmega 16. Вывод информации будет производиться на LCD. Алгоритм диагностики берется из программы, описанной выше. Противоугонная функция реализуется следующим образом: в цепи питания ЭБУ производится разрыв, подключается схема с полевым транзисто-

ром. При включении зажигания включается контроллер. Система противоугонной сигнализации будет осуществляться по принципу кодового замка опроса состояния различных исполнительных устройств. Для повышения надежности устройства принимается комплекс мер, в виде установки оптронных развязок. При правильном включении приборов, контроллер подает управляющий сигнал на выходной порт, далее открывается полевой транзистор IRLR2905, работающий в режиме ключа. Преимущество такого типа транзисторов заключается в том, что он не греется, имеет малые габариты, выдерживает большой ток. Преимущество такого метода заключается в том, что если угонщик поменяет ЭБУ на свой, заведомо подготовленный, то двигатель не запустится, так как цепь питания имеет разрыв.

Контроллер имеет дублирующую противоугонную функцию – отключение напряжения на форсунках посредством отправки сообщения ЭБУ через k-line. До тех пор, пока не включена соответствующая комбинация приборов. Это не позволяет угонщику запустить двигатель, даже если он запитает ЭБУ в обход цепи зажигания.

Выводы: в ходе выполнения работы, была изучена система распределенного впрыска топлива, были рассмотрены варианты диагностического оборудования, была создана тестовая программа диагностики, реализующая протокол обмена данными ISO 9141, разработан бортовой компьютер с противоугонной функцией, продолжено дальнейшее развитие темы посредством создания бортового компьютера.

Список литературы

[1] Интернет-аукцион – Диагностический адаптер [Электронный ресурс]. URL: <http://krsk.24au.ru/2181900> (дата обращения 11.03.2014).

[2] K-Line. Диагностический адаптер [Электронный ресурс]. URL: <http://chiptuner.ru/content/kline/> (дата обращения 10.02.2014).

[3] Гуляев А. Описание протокола взаимодействия с ЭБУ Микас 5.4 и 7.1. [Электронный ресурс]. URL: http://www.gazclub.ru/faq/?mess_id=671 (дата обращения 15.02.2014).

[4] Электронная энциклопедия Википедия [Электронный ресурс]. URL: http://ru.wikipedia.org/wiki/Инжекторная_система_подачи_топлива (дата обращения 15.02.2014).

Масюк Владимир Михайлович – канд. физ.-мат. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: masyuk77@gmail.com.

Сакович Олег Валерьевич – ассистент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: osakovich@gmail.com.

Керимов Святослав Сергеевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: ic-kaluga@mail.ru.

СЕКЦИЯ 8.

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ,
ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ**

А.А. Белов, В.Ю. Захаров, Т.Г. Чернова

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРА КОРНЕЙ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ДИСПЕРСИОННОГО УРАВНЕНИЯ ДЛЯ АНИЗОТРОПНОЙ ПЛАЗМЫ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

В сильном магнитном поле ларморовский радиус заряженных частиц является эффективной длиной свободного пробега заряженных частиц, а циклотронная частота вращения играет роль эффективной частоты столкновений. Поэтому, помимо традиционного кинетического описания бесстолкновительной плазмы, находящейся в сильном магнитном поле, существуют различные анизотропные магнитогидродинамические модели (см., например, [1-6]), в рамках которых изучаются различные свойства околоземной плазмы, плазмы солнечного ветра и солнечной короны.

В данной работе рассматриваются малые возмущения однородного состояния анизотропной плазмы в рамках следующей системы магнитогидродинамических уравнений [4], [6-9]:

$$\begin{aligned} \frac{d\rho}{dt} + \rho \operatorname{div} \mathbf{v} &= 0 \\ \rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} + \nabla \left(p_{\perp} + \frac{B^2}{8\pi} \right) - \frac{1}{4\pi} (\mathbf{B} \cdot \nabla) &= \left(p_{\perp} - p_{\parallel} \right) [\mathbf{h} \operatorname{div} \mathbf{v} + (\mathbf{h} \cdot \nabla) \mathbf{h}] + \mathbf{h} (\mathbf{h} \cdot \nabla) \left(p_{\perp} - p_{\parallel} \right) \\ \frac{d}{dt} \frac{p_{\parallel} B^2}{\rho^3} &= - \frac{B^2}{\rho^3} \left[B (\mathbf{h} \cdot \nabla) \left(\frac{S_{\parallel}}{B} \right) + \frac{2S_{\perp}}{B} (\mathbf{h} \cdot \nabla) B \right] \\ \frac{d}{dt} \frac{p_{\perp}}{\rho B} &= - \frac{B}{\rho} (\mathbf{h} \cdot \nabla) \left(\frac{S_{\perp}}{B^2} \right) \\ \frac{d}{dt} \frac{S_{\parallel} B^3}{\rho^4} &= - \frac{3p_{\parallel} B^3}{\rho^4} (\mathbf{h} \cdot \nabla) \left(\frac{p_{\parallel}}{\rho} \right) \\ \frac{d}{dt} \frac{S_{\perp}}{\rho^2} &= - \frac{p_{\parallel}}{\rho^2} \left[(\mathbf{h} \cdot \nabla) \left(\frac{p_{\perp}}{\rho} \right) + \frac{p_{\perp}}{\rho} \frac{p_{\perp} - p_{\parallel}}{p_{\parallel} B} (\mathbf{h} \cdot \nabla) B \right] \\ \frac{d\mathbf{B}}{dt} + \mathbf{B} \operatorname{div} \mathbf{v} - (\mathbf{B} \cdot \nabla) \mathbf{v} &= 0 \\ \operatorname{div} \mathbf{B} &= 0 \end{aligned} \tag{1}$$

где ρ , $\mathbf{v}$, $p_{\parallel}$, $p_{\perp}$, $S_{\parallel}$, $S_{\perp}$ - плотность, вектор макроскопической скорости, продольное и поперечное давления плазмы, потоки вдоль магнитного поля $\mathbf{B}$ продольной и поперечной частей кинетической энергии, $\mathbf{h} = \mathbf{B}/B$.

В рамках системы (1) в [7] рассматривались малые возмущения однородного состояния плазмы и было получено следующее дисперсионное уравнение 6-й степени для фазовой скорости несжимаемых линейных волн ($\operatorname{div} \mathbf{v} = 0$):

$$\sum_{n=0}^6 C_n(\alpha, \beta, \gamma, l) V^n = 0 \quad (2)$$

$$V = \frac{\omega}{k_{\parallel} c_{\parallel}}, \quad k_{\parallel} = k \cdot \cos \theta, \quad c_{\parallel}^2 = \frac{p_{\parallel}}{\rho}, \quad l = \cos^2 \theta, \quad \alpha = \frac{p_{\perp}}{p_{\parallel}}, \quad \beta = \frac{B^2}{4\pi p_{\parallel}},$$

$$\gamma = \frac{S_{\parallel}}{p_{\parallel} c_{\parallel}} = \frac{S_{\perp}}{p_{\perp} c_{\parallel}},$$

$$C_0 = 3(1-\alpha)[\alpha^2(l-1) + \alpha(1+l) + 2(\beta-l)],$$

$$C_1 = 2\gamma[\beta(\alpha-2) + 3\alpha(1-2l) + \alpha^2(4l-3) + 2l],$$

$$C_2 = 4l + 2\beta(4\alpha-5) + 2\alpha^2(1+3l) + \alpha^3(l-1) - \alpha(1+11l),$$

$$C_3 = -2\gamma[\beta(\alpha-2) + \alpha^2(2l-1) - 2\alpha],$$

$$C_4 = 6l + \alpha(l-3) - 2l\alpha^2 + 2\beta(2-\alpha),$$

$$C_5 = 2\gamma(2l\alpha - 2l - \alpha),$$

$$C_6 = \alpha + l\alpha - 4l.$$

Здесь ω/k – фазовая скорость волны, V – безразмерная фазовая скорость, α характеризует степень анизотропии плазмы, β учитывает влияние магнитного поля, γ определяет степень влияния тепловых потоков, θ – угол между волновым вектором $\mathbf{k}$ и невозмущенным магнитным полем $\mathbf{B}$. В [7] численно анализировалось уравнение (2) при некоторых фиксированных значениях невозмущенных параметров α , β , γ , θ , был отмечен факт возможности появления комплексных корней. Применим предложенный в [8] метод для изучения характера корней дисперсионных уравнений типа (2) при произвольном значении угла θ . Перепишем уравнение (2) в виде

$$f(V) - tg^2\theta \cdot g(V) = 0, \quad (3)$$

где

$$f(V) = 2(V^2 - 1)(V^2 - V_A^2)f_1(V),$$

$$g(V) = \alpha(V^2 - 3)(V^4 - (1-\alpha)^2) + 2\beta(V^2 - 1)f_1(V)$$

$$f_1(V) = (2-\alpha)V^2 + \gamma(2-\alpha)V - 3(1-\alpha),$$

$$V_A^2 = (\alpha + \beta - 1).$$

При продольном распространении волны ($tg^2\theta = 0$) корни (2) совпадают с корнями функции $f(V)$, которая имеет шесть корней

$$V_{1\pm} = \pm 1, \quad V_{A\pm} = \pm \sqrt{\alpha + \beta - 1}, \quad V_{2\pm} = \frac{1}{2} \left(-\gamma \pm \sqrt{\gamma^2 + \frac{12(1-\alpha)}{2-\alpha}} \right).$$

Действительность этих корней гарантируется неравенствами

$$\alpha + \beta - 1 \geq 0 \quad (4)$$

$$\gamma^2 + \frac{12(1-\alpha)}{2-\alpha} \geq 0. \quad (5)$$

Нарушение неравенства (4) приводит к так называемой шланговой неустойчивости альфвеновской волны, скорость которой становится мнимой. Неравенство (5) будет выполняться при всех значениях тепловых потоков, если

$$\frac{12(1-\alpha)}{2-\alpha} \geq 0 \text{ (или } \alpha \in (0,1] \cup (2,+\infty)) \quad (6)$$

В дальнейшем будем предполагать, что параметры α и β удовлетворяют ограничениям (4) и (6).

Согласно [8], для анализа характера корней уравнения (3) нужно знать взаимное расположение корней функции $f(V)$ и знаки функции $g(V)$ в них.

В данной работе рассмотрим частный случай отсутствия тепловых потоков в невозмущенном состоянии и достаточно сильной поперечной анизотропии:

$$\gamma = 0 \text{ и } \alpha > 5. \quad (7)$$

При $\gamma = 0$ функции $f(V)$ и $g(V)$ являются четными, поэтому можно ограничиться рассмотрением положительных значений V . Функция $f(V)$ имеет три положительных корня

$$V_1 = 1, V_A = \sqrt{\alpha + \beta - 1}, V_2 = \sqrt{\frac{3(1-\alpha)}{2-\alpha}},$$

причем при $\alpha > 5$ всегда имеет место соотношение между корнями

$$V_1 < V_2 < V_A.$$

Нетрудно проверить следующие неравенства:

$$f(0) = 6V_A^2(\alpha - 1) > 0,$$

$$g(V_1) = 2\alpha^2(\alpha - 2) > 0,$$

$$g(V_2) = \frac{3\alpha(1-\alpha)^2(1+\alpha)(5-\alpha)}{(\alpha-2)^3} < 0.$$

Значение функции

$$g(0) = 3(\alpha - 1)[\alpha(\alpha - 1) - 2\beta]$$

может быть как положительным, так и отрицательным:

$$g(0) > 0 \text{ при } \beta < \beta^* = \frac{\alpha(\alpha - 1)}{2}, \quad (7a)$$

$$g(0) \leq 0 \text{ при } \beta \geq \beta^*. \quad (7б)$$

На рис.1 схематично построены графики функций $f(V)$ и $g_1(V) = tg^2\theta \cdot g(V)$ с учетом полученных выше неравенств. Кривые 1а и 2а соответствуют графику $g_1(V)$ при малых значениях $tg^2\theta$ для случая (7а) и (7б) соответственно.

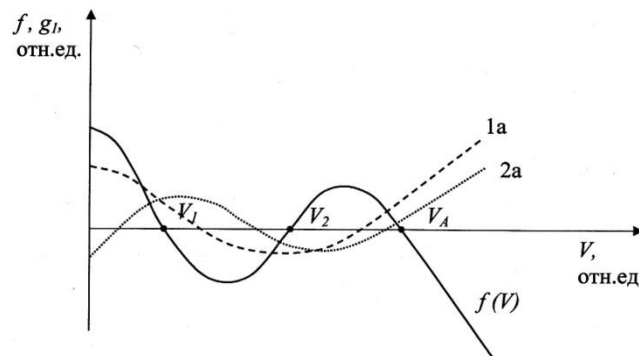


Рис. 1

В обоих случаях графики $f(V)$ и $g_1(V)$ имеют по три общих точки, и поэтому дисперсионное уравнение имеет только действительные корни. С увеличением $tg^2\theta$ знаки функции $g_1(V)$ в корнях функции $f(V)$ сохраняются, но их значения, в том числе и $g(0)$, будут увеличиваться по модулю. Очевидно, что для случая (7б) при любом значении $tg^2\theta$ графики $f(V)$ и $g_1(V) = tg^2\theta \cdot g(V)$ будут иметь три общих точки, тогда как для случая (7а) с ростом $tg^2\theta$ наступит момент, когда пропадет меньшая общая точка, что приведет к появлению комплексных корней и неустойчивости волны с меньшей фазовой скоростью.

Поскольку случай (7б) отличается от (7а) более большими значениями β , то в рамках рассмотренного частного случая можно сделать вывод о том, что с увеличением магнитного поля однородное состояние анизотропной плазмы становится более устойчивым относительно малых возмущений.

Список литературы

1. Chew G.F., Goldberger M.L., Low F.E. // Proc. Roy. Soc. London. 1956. A 236. P. 112.
2. Oraevskii V., Chodura R., Feneberg W. // J. Plasma Physics. 1968. V. 26. P. 95.
3. Whang Y.C. // Astrophys. J. 1971. V. 178. P. 221.
4. Namikawa T., Hamabata H. // J. Plasma Physics. 1981. V. 26. Pt 1. P. 95.
5. Duhau S. // J. Plasma Phys. 1984. V.32. P.23.
6. Ораевский В.Н., Коников Ю.В., Хазанов Г.В. Процессы переноса в анизотропной околоземной плазме. М.: Наука, 1985.
7. Джалилов Н.С., Кузнецов В.Д. // Физика плазмы. 2009. Т.35. № 11. С. 1041-1054.
8. Захаров В.Ю. Проблемы МГД бесстолкновительной плазмы в сильном магнитном поле/ М.: Изд-во МГУ, 1988. С.48.
9. Захаров В.Ю. // Изв. АН СССР. МЖГ. 1993. № 2. С.153.

Захаров Владимир Юрьевич – канд. физ.-мат. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: vladiyuz@mail.ru.

Чернова Татьяна Георгиевна – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: chernova-tg@yandex.ru.

Белов Анатолий Алексеевич – ст. преп. КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: math@bmstu-kaluga.ru.

А.К. Рамазанов

АППРОКСИМАЦИЯ ФУНКЦИЙ НАИПРОСТЕЙШИМИ ДРОБЯМИ В ИНТЕГРАЛЬНЫХ МЕТРИКАХ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Пусть D – единичный круг с центром в начале координат, а $T = \partial D$. Через $L_2(T)$ обозначим пространство суммируемых по Лебегу с квадратом на T функций, а через $AL_2(D)$ -- пространство голоморфных в D функций, суммируемых с квадратом по плоской мере Лебега в D .

Наипростейшей рациональной дробью называется рациональная функция вида

$$r_n(z) = \sum_{j=1}^k \frac{\nu_j}{z - \alpha_j}, \quad \nu_1 + \nu_2 + \dots + \nu_k = n, n \geq 1,$$

где ν_j -- целые неотрицательные числа; число n называется степенью наипростейшей рациональной дроби. Легко заметить, что любая наипростейшая рациональная дробь имеет вид

$$r_n(z) = (\log P_n(z))' = \frac{(P_n(z))'}{P_n(z)}, \quad P_n(z) = (z - \alpha_1)^{\nu_1} \dots (z - \alpha_k)^{\nu_k}.$$

Поэтому наипростейшую рациональную дробь называют еще логарифмической производной многочлена. Наипростейшие рациональные дроби являются частным случаем логарифмической производной рациональной дроби

$$r_{n,m}(z) = \frac{(P_n(z))'}{P_n(z)} - \frac{(Q_m(z))'}{Q_m(z)}, \quad n + m \geq 1,$$

где $P_n(z)$ -- многочлен степени не выше n , а $Q_m(z)$ -- многочлен степени не выше m .

Класс всех рациональных дробей указанного вида, с полюсами вне компакта K , будем обозначать через $SR_{n,m}(K)$, а через $r_{n,m}(z, f, B)$ -- наипростейшую дробь из $SR_{n,m}(K)$ наилучшего приближения для функции f из нормированного пространства B по норме этого пространства. В формулировке следующей теоремы нормированное пространство $Y(K)$ -- либо пространство $L_2(T)$, либо пространство $AL_2(D)$.

Теорема. Пусть $f \in Y(K) \setminus SR_{n,m}(K)$ и $n, m \in N$.

Тогда $r_{n,m}(., f, Y(K)) \in SR_{n,m}(K) \setminus SR_{n-1,m-1}(K), n-1 \geq 0, m-1 \geq 0$.

Следствие. При условиях теоремы справедливы следующие неравенства

$$\|r_{n-1,m-1}(f)\|_{Y(K)} \leq \|r_{n,m}(f)\|_{Y(K)} \leq \|f\|_{Y(K)}.$$

Используя теорему можно доказать, что наименьшие рациональные уклонения функции $f \in Y(K)$ в классе $SR_{n,m}(K)$ по ному пространства $Y(K)$ строго монотонно убывают.

Эту теорему также можно применить для доказательства интерполяционных свойств наипростейших рациональных функций наилучшего приближения в классе $SR_{n,m}(K)$. А именно доказывается, что

$$\left((f(z) - r_{n,m}(z))z \right)^{(s)} = 0, s = 1, \dots, \nu_j,$$

в точках инверсных полюсам рациональной функции наилучшего приближения $r_{n,m}(z)$.

С различными задачами аппроксимаций функций наипростейшими рациональными дробями и с историей вопроса можно ознакомиться в следующих статьях.

Литература.

1. Данченко В.И., Данченко Д.Я. О приближении наипростейшими дробями// Матем. заметки. 2001, 70, вып.4, С. 553—559.
2. Косухин О.Н. Об аппроксимативных свойствах наипростейших дробей// Вестник Московского ун-та. Сер.1 . Матем. Механ. 2001, №4, С. 54—59.
3. Бородин П.А., Косухин О.Н. О приближении наипростейшими дробями на действительной оси // Московского ун-та. Сер.1 . Матем. Механ. 2001, №1, С. 3—8.

Рамазанов Абдулкафар Кехриманович — канд. физ.-мат. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: ramazanov@bmstu-kaluga.ru.

М.С. Дубинина, В.И. Кристя

ВЛИЯНИЕ НЕЛОКАЛЬНОСТИ ИОНИЗАЦИИ АТОМОВ ГАЗА ЭЛЕКТРОНАМИ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В КАТОДНОМ СЛОЕ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Представлена модель распределения напряженности электрического поля, позволяющая учесть нелокальность без использования метода Монте-Карло. Рассчитано распределение в гелии с использованием данной модели.

Ключевые слова: *тлеющий разряд, катодный слой, распределение электрического поля.*

Тлеющий разряд в газах используется во многих типах электронных приборов (газовые лазеры, плазменные дисплеи, газоразрядные осветительные лампы на этапе зажигания), а также в технологических установках для травления микроструктур и напыления пленок [1-2]. Характерная особенность тлеющего разряда состоит в наличии тонкого катодного слоя (КС) с падением напряжения 10^2 - 10^3 вольт и большим значением напряженности электрического поля, в то время как в других частях разряда она имеет намного меньшую величину. Поэтому особенности взаимодействия плазмы тлеющего разряда с поверхностью катода определяются процессами, протекающими в катодном слое.

Основными типами заряженных частиц в катодном слое разряда в инертных газах являются электроны и положительные ионы [1]. Они ускоряются электрическим полем к аноду и катоду соответственно, в результате чего катод бомбардируется ионами и быстрыми атомами, образующимися при упругих столкновениях ионов с атомами рабочего газа [2]. Это приводит к эмиссии вторичных электронов, необходимых для поддержания разряда, а также к распылению поверхности катода. Катодное распыление уменьшает срок службы газоразрядных приборов, а также используется в качестве основного процесса в технологических установках. В связи с этим взаимодействие плазмы тлеющего разряда с поверхностью катода изучалось во многих работах. Но в этих работах использовалась либо локальная модель, в которой предполагалось, что средняя энергия электронов, ионизирующих атомы рабочего газа, определяется только напряженностью электрического поля в данной точке, либо расчет производился методом Монте-Карло, который требует больших затрат времени. В данной

работе представлена модель, позволяющая учесть нелокальность ионизации в КС без использования метода Монте-Карло.

Пусть КС тлеющего разряда расположен между плоскостью $z = 0$ и катодом, находящимся в плоскости $z = d_c$, где d_c - длина КС. В результате бомбардировки катода ионами, ускоряемыми в КС, плотность тока которых равна j_i , с его поверхности происходит эмиссия электронов, называемая ионно-электронной эмиссией, с плотностью тока $j_e(d_c) = \gamma_i j_i(d_c)$, где γ_i - коэффициент ионно-электронной эмиссии. Если длина КС намного превышает длину перезарядки иона в газе λ_c , т.е. d_c / λ_c имеет порядок 10^2 , что справедливо для многих типов газоразрядных приборов, то энергия электронов определяется напряженностью поля в данной точке и может использоваться локальная модель КС. При этом зависимость потенциала электрического поля от координаты z в КС близка к квадратичной:

$$\varphi(z) = -U_c z^2 / d_c^2, \quad (1)$$

а зависимость напряженности электрического поля E от z - линейной:

$$E(z) = -\varphi'(z) = 2U_c z / d_c^2. \quad (2)$$

В самостоятельном разряде выполняется условие поддержания разряда [2]:

$$\int_0^{d_c} \alpha(z) dz = \ln(1 + 1/\gamma_s), \quad (3)$$

где $\alpha(z)$ - ионизационный коэффициент рабочего газа, который для инертных газов в локальном приближении описывается выражением:

$$\alpha = A p \exp(-B p / E), \quad (4)$$

A и B - постоянные для данного рода газа.

Связь между плотностью ионного тока j_i и величиной катодного падения напряжения разряда U_c задается соотношением [4]:

$$j_i / p^2 = K U_c^{3/2} / (p d_c)^{5/2}, \quad (5)$$

где $K = 4\epsilon_0 (e p \lambda_c / M)^{1/2}$, p и T - давление и температура газа, $\lambda_c = kT / p \sigma_c$ - средняя длина перезарядки иона в газе, σ_c - сечение резонансной перезарядки иона на атоме газа, k - постоянная Больцмана, e и M - заряд и масса иона, ϵ_0 - диэлектрическая постоянная.

Уравнения (3) и (5) вместе с соотношениями (2) и (4) образуют систему, позволяющую рассчитать параметры КС тлеющего разряда U_c и d_c при заданной плотности разрядного тока j в локальном приближении.

В случае, когда d_c / λ_c имеет порядок 10, вследствие того, что согласно (2) электрическое поле может существенно изменяться на длине пробега электронов, их энергии не определяются значением электрического поля в данной точке. Поэтому для описания процесса ионизации нужно исполь-

зовать нелокальную модель. В этом случае система уравнений, описывающих процессы в КС, имеет вид:

$$\frac{dj_e}{dz} = -\alpha j_e, \quad \frac{dj_i}{dz} = \alpha j_e, \quad (6)$$

$$\frac{d\alpha}{dz} = \alpha^2 + c_1\alpha + c_2\varphi', \quad (7)$$

$$\varphi'' = -\frac{1}{\varepsilon_0} \sqrt{\frac{M}{2e}} \left[\int_0^z \frac{1/\lambda j_i(z_0) + \alpha(z_0) j_e(z_0)}{\sqrt{\varphi(z_0) - \varphi(z)}} \exp\left(\frac{z_0 - z}{\lambda}\right) dz_0 + \frac{j_i(0)}{\sqrt{-\varphi(z)}} \exp\left(\frac{-z}{\lambda}\right) \right], \quad (8)$$

с граничными условиями: $\varphi(0) = 0$, $\varphi'(0) = 0$, $\varphi(d_c) = -U_c$, $\alpha(d_c) = 0$, $j_e(d_c) = \gamma j_i(d_c)$.

Найденные из локальной и нелокальной моделей распределения напряженности электрического поля вдоль разрядного промежутка при $p = 133 \text{ Тт}$ приведены на Рис.1.

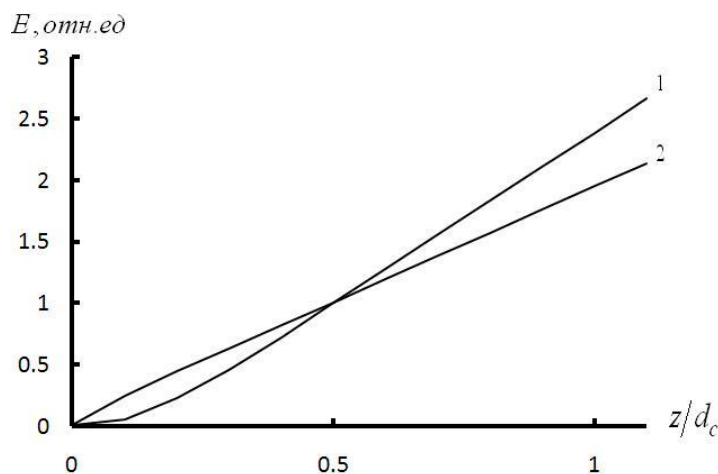


Рис.1. Распределение напряженности электрического поля в разрядном промежутке, найденное из локальной (1) и нелокальной (2) моделей.

Видно, что нелокальная ионизация газа электронами в КС обуславливает уменьшение напряженности поля вблизи катода, что должно приводить к уменьшению энергии бомбардирующих катод частиц и его менее интенсивному распылению.

Список литературы

- [1] Райзер, Ю.П. *Физика газового разряда*. Наука: М., 1987, 537 с.
- [2] Lieberman, M.A., Lichtenberg, A.J. *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing*. Wiley: New York, 1994, 572 с.
- [3] Kristya V.I. *Glow Discharges and Tokamaks*. Ed. Murphy S.A. New York: Nova Sci. Publ., 2010, p. 329-368.
- [4] Кристя В.И, Йе Наинг Тун Моделирование влияния диэлектрической пленки на поверхности электрода на переход тлеющего разряда в дуговой. *Изв. РАН. Серия физическая*, 2014, т.78, № 3, с. 752-756

Дубинина Мария Сергеевна – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: bodhisattvavpered@gmail.com.

Кристия Владимир Иванович – д-р физ.-мат. наук, профессор КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: kristya@bmstu-kaluga.ru.

V.I. Kristya, M.S. Dubinina

**AN INFLUENCE OF NON-LOCALITY OF GAS ATOM
IONIZATION BY ELECTRONS ON THE ELECTRIC FIELD
DISTRIBUTION IN THE GLOW DISCHARGE CATHODE
SHEATH.**

Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch, Kaluga,
248000, Russia

Model of distribution of the electric field intensity, that provides the possibility of considering the unlocality without using Monte-Carlo method, is proposed. Distribution in helium is calculated using this model.

Key words: *glow discharge, cathode sheath, electric field distribution.*

Dubinina M.S., student of the Kaluga Branch of the Bauman Moscow State Technical University. E-mail: bodhisattvavpered@gmail.com.

Kristya V.I., Dr. Sci. (Phys.&Math.), professor of the Kaluga Branch of the Bauman Moscow State Technical University. E-mail: kristya@bmstu-kaluga.ru.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА В ЗАДАЧАХ КЛАССИФИКАЦИИ ОДНОМЕРНЫХ СИГНАЛОВ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Введение. Задачи классификации возникают во многих областях человеческой деятельности. Используя классификацию по параметрам фиксируемых сигналов, можно получить разнообразные сведения об изучаемых процессах и объектах. Классификацию данных можно рассматривать как процесс, состоящий из двух этапов. На первом этапе строится модель, описывающая предварительно определённый набор классов или категорий. Модель строится на основе анализа записей множества данных, содержащих признаки объектов и соответствующую метку класса. В качестве признаков объекта в настоящей работе рассматриваются вейвлет-коэффициенты разложения одномерных сигналов. На втором этапе модель применяется для классификации новых, ранее неизвестных объектов [1].

Методы решения задачи. Вейвлет-разложением одномерного (временного) сигнала называется представление его в виде

$$f(t) = \sum_{j,k=-\infty}^{\infty} c_{j,k} \psi_{j,k}(t),$$

где вейвлеты $\psi_{j,k}(t)$ - функции, хорошо локализованные как во временной, так и в частотной области, и являющиеся сдвинутыми и масштабированными копиями одной единственной функции – материнского вейвлета $\psi(t)$ [2]. Коэффициенты $c_{j,k}$ можно рассматривать как координаты сигналов.

Преимущество использования вейвлетов в задачах классификации состоит в том, что, во-первых, значительная часть коэффициентов является пренебрежимо малыми по абсолютной величине и может быть обнулена, во-вторых, для сравнения может быть использована как частотная так и временная составляющая в зависимости от постановки задачи.

Число коэффициентов на практике поддается адаптивному регулированию (с использованием так называемой глубины разложения), что позволяет использовать различные подходы в задачах классификации.

Для отнесения сигнала к тому или иному классу достаточно построить уравнение логистической регрессии (либо в стандартной версии, либо используя принцип «один против всех») и затем провести задачу классификации.

Другими подходами, которые могут также использоваться для определения классов принадлежности являются байесовская классификация,

деревья решений, искусственные нейронные сети, метод ближайших соседей и т.п. [3]

Результаты. В ходе работы проведено математическое и численное моделирование сигналов различного вида. Моделируемые сигналы можно разделить на несколько групп:

- периодические сигналы, являющиеся суммой нескольких гармоник;
- периодические сигналы с наложенным на них белым шумом;
- периодические сигналы с наложенным на них цветным шумом;
- непериодические сигналы с наложенным на них белым шумом;
- непериодические сигналы с наложенным на них цветным шумом.

В ходе практической реализации было установлено, что классификация с использованием вейвлет-анализа значительно повышает точность классификации для всех групп, если сравнивать с классификацией на основе исходных временных сигналов, и имеет большую точность классификации, для непериодических сигналов и сигналов, содержащих цветные шумы, по сравнению с классификацией с использованием образов при преобразовании Фурье.

Выводы. Предлагаемый подход классификации на основе вейвлет-анализа показывает свои преимущества во многих практических приложениях. Поскольку в работе использовалась только логистическая регрессия, возможно, применение других методов классификации позволит ещё более улучшить точность классификации. Другой областью для дальнейшего изучения служит классификация многомерных сигналов, в частности изображений.

Литература.

1. Паклин Н.Б., Орешков В.И. Бизнес-аналитика: от данных к знаниям. – СПб.: Питер, 2013.
2. Блаттер К. Вейвлет-анализ. Основы теории. – М. Техносфера, 2004. <http://cs.stanford.edu/people/ang/>

Степанов Сергей Евгеньевич – канд. физ.-мат. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: stepanov@bmstu-kaluga.ru.

М.А. Горошко

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЕЙВЛЕТОВ ПРИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКЕ СПЕКТРОВ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ НА ВОЛЬФРАМЕ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Нейтронная спектроскопия широко применяется для получения информации о тепловых колебаниях атомов в молекулах и кристаллах. Результатами экспериментов, как правило, являются фононные дисперсионные кривые или фононные спектры кристалла [1]. При этом экспериментальные данные содержат как систематические, так и случайные погрешности.

Вопрос применения вейвлет-преобразований для обработки результатов физических экспериментов исследован достаточно обширно. Поэтому представляется целесообразным использовать вейвлеты для обработки спектров рассеяния нейтронов.

Предварительная обработка спектральных данных заключается не только в фильтрации сигнала от случайных и систематических погрешностей, но и в подготовке спектра к дальнейшему исследованию, в частности, локализации пиков. Для решения этих задач были выбраны два нетрадиционных вейвлет-преобразования: лифтинг-схема с линейной аппроксимацией сигнала и *a trous* преобразование Хаара.

Лифтинг-схема с линейной аппроксимацией сигнала относится к вейвлетам второго поколения и обладает рядом преимуществ в сравнении с классическими вейвлетами. В первую очередь следует отметить, что лифтинг-схема предоставляет уникальные возможности для сжатия, поскольку степень разреженности вейвлет-коэффициентов зависит от близости прогнозируемого значения к реальному измерению [2]. При обработке спектров высокий коэффициент сжатия может быть обеспечен с линейной аппроксимацией сигнала. Кроме того, вейвлет-функция, соответствующая данному преобразованию, имеет простой вид, что уменьшает вероятность искажения формы спектра на нижних уровнях разложения, а также при дальнейшем сглаживании сигнала.

В классическом вейвлет-анализе коэффициенты группируются по уровням разложения, поэтому сохраняется только порядок их соответствия исходным данным. В лифтинг-схеме результаты преобразования располагаются в массиве данных на местах исходных измерений. Дальнейшее сжатие сигнала возможно благодаря тому, что при переходе на следующий уровень разложения происходит автоматическое прореживание вейвлет-коэффициентов. Это усложняет реализацию алгоритмов, в которых необходимо точное соотнесение вейвлет-коэффициента с исходным измерени-

ем. К таким алгоритмам можно отнести алгоритмы локализации пиков в спектральных данных.

Избыточное вейвлет-преобразование не может быть использовано для сжатия данных, но значительно упрощает разработку и реализацию алгоритмов, предназначенных для фильтрации сигналов в режиме реального времени либо требующих точного соответствия коэффициентов разложения исходным данным [3].

Таким образом, вейвлет-преобразование выбирается в зависимости от решаемой задачи предварительной обработки спектра.

Поскольку на данном этапе основное внимание уделялось исследованию целесообразности применения вейвлетов при локализации пиков, использовался один из простейших методов локализации – метод превышения порога. Сглаживание исходных спектральных данных, а также данных после предварительной обработки с помощью вейвлетов, проводилось с использованием локальных кубических сплайнов.

Рассмотренные вейвлет-преобразования были использованы для обработки спектров рассеяния нейтронов на вольфраме, измеренных в идентичных условиях, но с различной статистической точностью. В частности, были решены следующие задачи:

1. Фильтрация спектров с помощью лифтинг-схемы с линейной аппроксимацией сигнала, которая заключалась в обнулении вейвлет-коэффициентов, имеющих значение ниже порога, принимаемого равным 7% от максимального значения сигнала. Также рассматривалось обнуление коэффициентов по принадлежности уровню разложения. При этом достигалось шестикратное сжатие без существенного искажения формы спектральной кривой.

2. Сглаживание исходных спектральных данных и спектров после предварительной обработки. Сравнительный анализ сигналов, сглаженных с помощью локальных кубических сплайнов, показал, что, во-первых, по мере увеличения статистической точности измерений сигналы не стремятся к определенному предельному значению. Данное наблюдение имело место как для исходных спектров, так и для спектров после обработки (рис. 1). Во-вторых, сглаживание спектров указанным способом приводит к снижению пиковой интенсивности синглета. Но в ряде случаев предварительная обработка с помощью вейвлетов позволяет уменьшить отрицательное влияние сглаживания (рис. 2).

3. Локализация пиков как по исходным данным, так и по данным после обработки с использованием *a trous* преобразования Хаара. Применение вейвлет-разложения позволило уменьшить количество ложных пиков даже без сглаживания сигнала. При этом локализацию можно проводить непосредственно по нижнему уровню разложения сигнала, соответствующему фильтру нижних частот, учитывая смещение тренда вправо на 2^{J-1} отсчета, где J – глубина разложения сигнала (рис. 3).

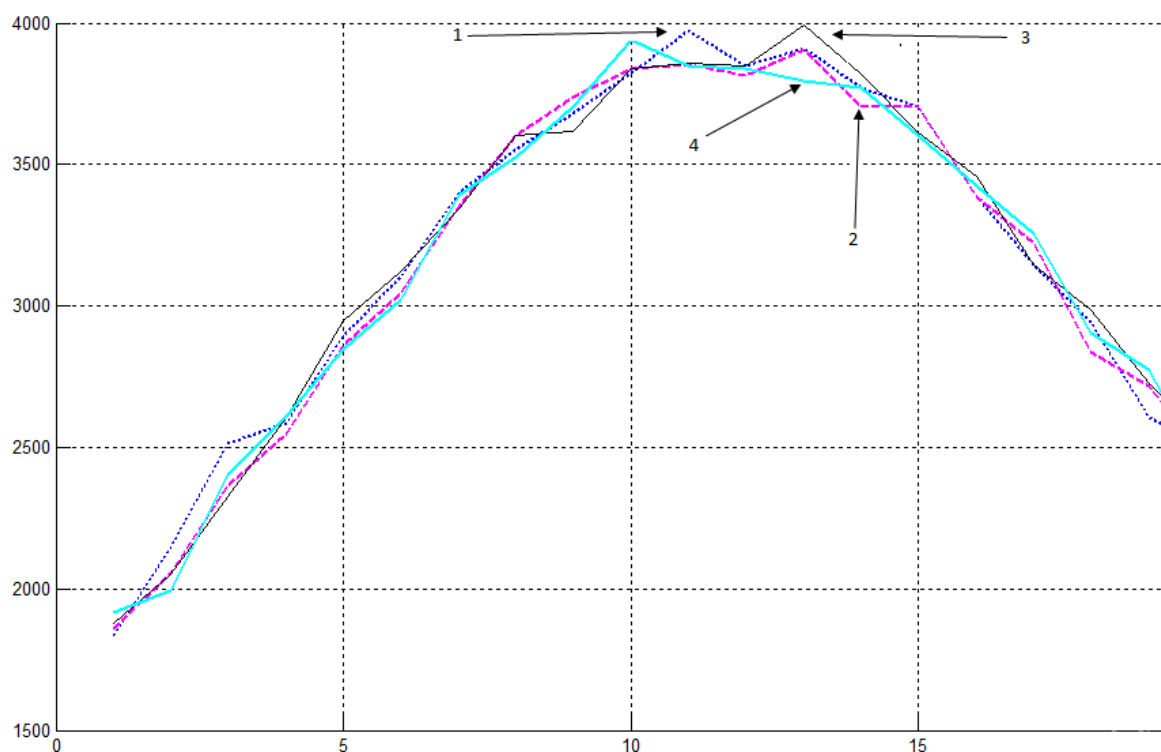


Рис. 1. Исходный сигнал детектора с различной статистической точностью.
Время сбора данных от 2 часов (сигнал 1) до 12 часов (сигнал 4)

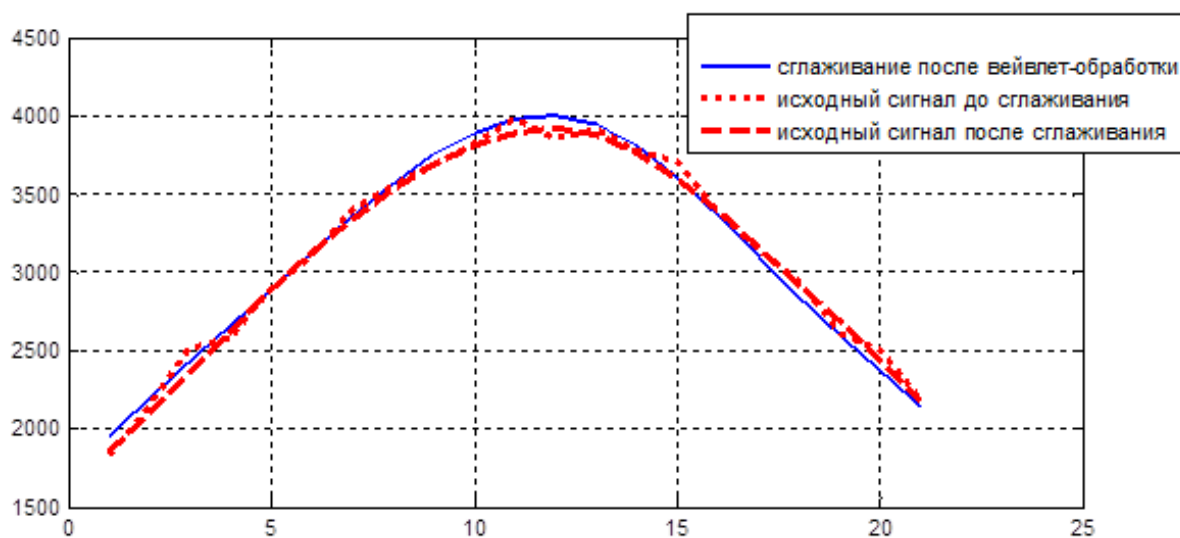
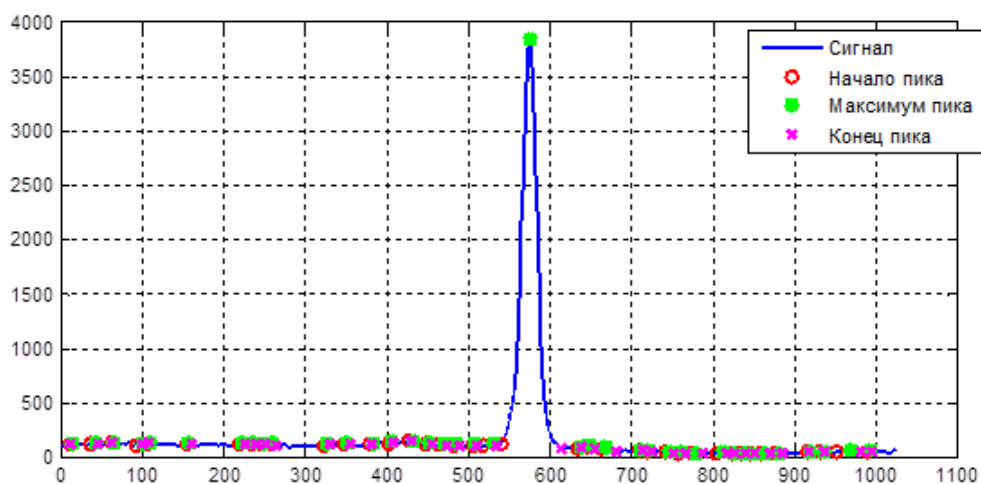
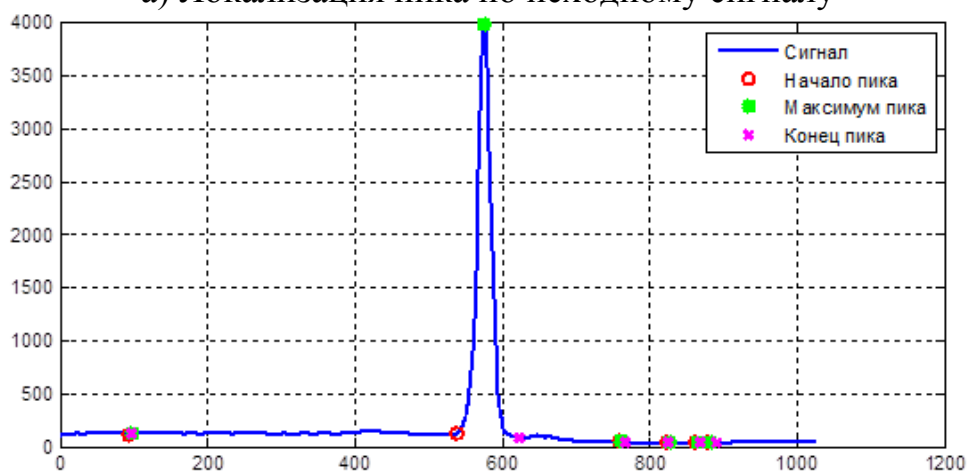


Рис. 2. Влияние сглаживания на сигнал до и после обработки с помощью
лифтинг-схемы (область пика)



а) Локализация пика по исходному сигналу



б) Локализация пика после фильтрации с помощью вейвлетов

Рис. 3. Локализация пика после сглаживания спектра

Полученные результаты показывают эффективность применения не-традиционных вейвлет-преобразований при фильтрации, сжатии и локализации пиков спектральных данных, в частности, спектров рассеяния нейтронов.

Список литературы

1. Новик Ю. З., Озеров Р. П., Хеннинг К. Структурная нейтронография, М.: Атомиздат, 1979, Т.1, 439 с.
2. W. Sweldens // Z. Angew. Math. Mech. 1996. № 76. P. 41-44.
3. Горошко М.А. Использование избыточного вейвлет-преобразования при обработке временных сигналов // Математические идеи П.Л. Чебышева и их приложение к современным проблемам естествознания. Научная школа-конференция молодых исследователей: Тезисы докладов. Обнинск, 2011. С. 19-20.

Горошко Марина Александровна – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры "Высшая математика" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: goroshko_ma@prospektr.ru.

Л.В. Савкин, В.М. Новичков, А.Е. Ширшаков

МНОГОУРОВНЕВАЯ РЕКОНФИГУРАЦИЯ МОДЕЛЕЙ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ КАК СРЕДСТВО ПОВЫШЕНИЯ ГИБКОСТИ АЛГОРИТМОВ ДИАГНОСТИКИ И КОНТРОЛЯ БОРТОВЫХ СИСТЕМ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Рассматривается способ многоуровневой реконфигурации в моделировании диагностических систем космических аппаратов с помощью матричных полей, состоящих из идентичных коммутируемых логических блоков (КЛБ). Исследуются методы повышения гибкости диагностических алгоритмов за счет метода многоуровневой реконфигурации диагностических моделей.

Предложен способ аппаратной реализации реконфигурируемой диагностической системы на базе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС).

Ключевые слова: диагностика, реконфигурация, коммутация, аппаратный уровень.

Постоянный рост сложности аппаратно-программного построения бортовых систем космических аппаратов (КА) требует и соответствующего усложнения программно-алгоритмического обеспечения (ПАО), ответственного для проведения диагностики и контроля данных систем в течение всего срока активного существования КА.

ПАО, реализующее алгоритмы диагностики и контроля бортовых систем относят, как правило, к системе диагностики и контроля (СКД) вычислительной системы бортового комплекса управления (БКУ). При этом аппаратная часть СКД, входит в состав бортовой вычислительной системы (БЦВС) и не выделяется как самостоятельная аппаратура среди других подсистем БКУ.

Посредством СКД осуществляется контроль работоспособности бортовых систем, формируются признаки аппаратной и функциональной исправности, формируются массивы входной и выходной контрольно-измерительной информации, осуществляется реконфигурация БЦВС в случае обнаружения отказа одной или нескольких вычислительных подсистем.

Не смотря на то, что вычислительные ресурсы БЦВС обеспечивают решение всех известных на сегодняшний день функциональных задач БКУ с определенным технологическим запасом по памяти и быстродействию, некоторые сбои и неисправности, возникающие, к примеру, в подсистемах БЦВС, не всегда удается локализовать с высокой степенью точности посредством СКД.

Сложные элементы БЦВС, такие как центральный процессор (ЦП) или процессор ввода-вывода (ПВВ), при возникновении в них неисправно-

стей, могут не выходить из строя полностью, а продолжать работать некорректно, пока СКД после фиксации неисправности, не произведет переключение в БЦВС на резервную вычислительную подсистему.

Таким образом, не смотря на широкие возможности бортового диагностического ПАО БКУ, уровень автоматизации поиска неисправностей в отношении аппаратной части самих цифровых модулей (вычислительные ядра, цифровые сигнальные процессоры и т. п.) остаётся невысоким. Поэтому СКД если и может обнаружить неисправность ЦП или ПВВ, то не всегда есть возможность выявить точную причину неисправности того же ЦП или ПВВ на уровне процессорного ядра или базовых цифровых элементов (логические элементы, триггеры, мультиплексоры, АЦП и т. п.).

В виду того, что повышение эффективности методов контроля и диагностики технического состояния бортовых систем КА является важнейшей составляющей обеспечения безотказного функционирования КА и его надежности в целом, ставится вопрос о возможности аппаратного выделения СКД из состава БЦВС БКУ и рассмотрении ее в качестве самостоятельной подсистемы БКУ.

В процессе построения модели диагностической системы необходимо учитывать иерархическое деление аппаратных уровней бортовых систем КА на всех этапах их бортового диагностирования, что связано с выбором необходимого объема информации о состоянии аппаратуры, а точнее о состоянии аппаратных уровней той или иной бортовой системы (рисунок 1).

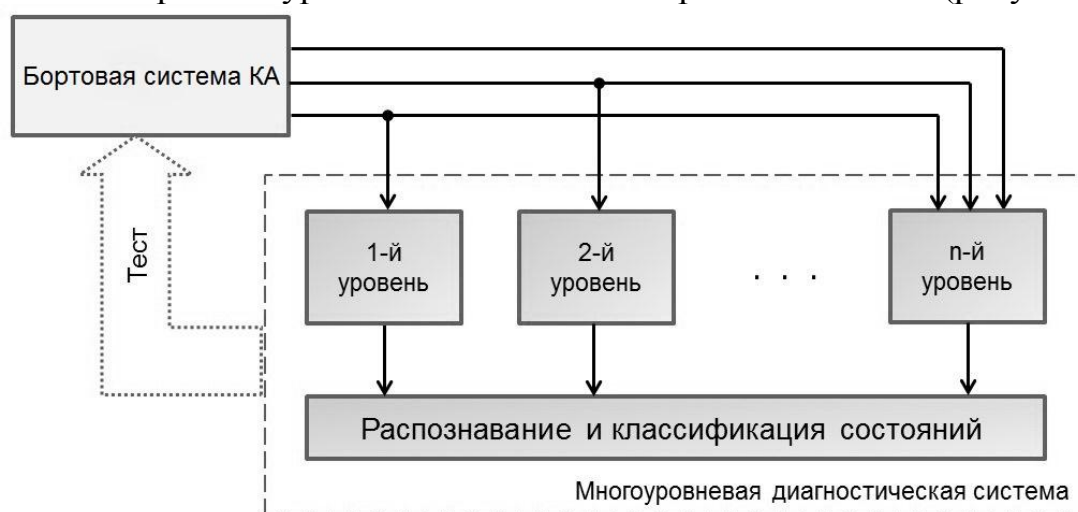


Рисунок 1 - Иерархия диагностической системы с разным объемом первичной информации, поступающей на каждый уровень

В данном случае целесообразно строить многоуровневую модель диагностической системы, в которой каждому уровню диагностики будет соответствовать определенная совокупность диагностических признаков, необходимых для определения состояния бортовой системы КА с заданной точностью.

На первом уровне диагностики ставится задача обнаружить сам факт появления сбоя или неисправности в бортовой системе. Второй уровень предполагает локализацию подсистемы, в которой был зафиксирован сбой или отказ.

На третьем и последующем уровнях, в зависимости от системно-функциональной иерархии осуществляется локализация неисправности, соответствующей своему аппаратному уровню (блоки и узлы, входящие в состав основных подсистем). На последнем уровне диагностирования решают задачу локализации дефектного элемента или базового устройства, вплоть до элементов на кристалле микропроцессора (регистры, внутренняя память, АЛУ и т.п.).

Из рисунка 1 также ясно, что для эффективной реализации многоуровневой модели диагностической системы важное значение имеет контролепригодность бортовых систем КА.

В целях повышения гибкости алгоритмов моделей диагностических систем, предлагается подход, использующий возможности многоуровневой аппаратной реконфигурации, который, может быть реализован благодаря использованию ПЛИС FPGA.

Данный подход позволяет создавать новые диагностические уровни в СКД и корректировать имеющиеся непосредственно на борту КА. Такая возможность может обеспечить высокую адаптацию диагностической модели к сложным системным неисправностям и отказам бортовых систем, локализовать которые с максимальной точностью невозможно с помощью штатного диагностического обеспечения.

Уровни конфигурации диагностической системы должны распределяться по иерархическому принципу, начиная от уровня отдельных коммутируемых логических блоков (КЛБ), входящих в состав ПЛИС, и вплоть до подсистем, образующих независимые диагностические модели. Базовые логические компоненты располагаются на кристалле ПЛИС FPGA в виде матрицы. Соединениями между элементами данной матрицы можно управлять путем замыкания транзисторных ключей, для чего предназначены низкоуровневые языки описания аппаратуры (HDL)

Матричное расположение базовых компонентов в ПЛИС обеспечивает возможность распределения вычислительных ресурсов диагностической системы на различных участках топологии вычислительного поля.

На рисунке 2 схематично представлен принцип матричного формирования уровней аппаратной конфигурации модели диагностической системы.

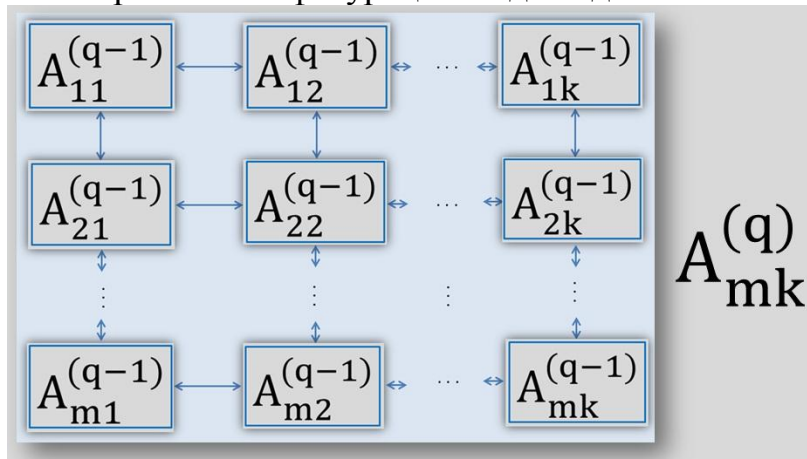


Рисунок 2-Рост уровней аппаратной конфигурации

Здесь каждый элемент более высокого аппаратного уровня q образован путем коммутации элементов более низкого аппаратного уровня $(q-1)$, где $q = \overline{1, n}$, n - порядковый номер аппаратного уровня модели диагностической системы.

Для данной модели элементами первого аппаратного уровня будут служить КЛБ, а элементы последних (верхних) аппаратных уровней будут определяться исходя из сложности самой модели диагностической системы.

Таким образом, количество уровней конфигурации диагностической системы определяется необходимым числом наборов базовых математических операций, соответствующих тому или иному диагностическому алгоритму. Любое изменение алгоритма диагностики приводит либо к реконфигурации одного из аппаратных уровней, либо к увеличению или уменьшению уровня аппаратной конфигурации.

Достоинством данных моделей диагностических систем является возможность создания аппаратно-вычислительных платформ с корректируемой архитектурой, степень сложности и число реконфигурируемых уровней которой, ограничиваются лишь набором базовых вычислительных операций и характеристиками применяемых в СКД ПЛИС.

Список литературы

1. *Алексеев А.А., Кораблев Ю.А., Шестопалов М.Ю.* Идентификация и диагностика систем.-М.: Издательский центр «Академия», 2009-352 с.

2. *Баран Е.Д.* LabVIEW FPGA. Реконфигурируемые измерительные и управляющие системы.-М.: ДМК Пресс.-488 с.

3. *Каляев И.А., Левин И.И., Семерников Е.А., Шмойлов В.И.* Реконфигурируемые мультиконвейерные вычислительные структуры /Изд. 2-е, перераб. и доп. / Под общ. Ред. *И.А. Каляева*. - Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2009. – 344 с.

Савкин Леонид Васильевич – аспирант ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина». E-mail: Android4.1@mail.ru.

Новичков Вадим Михайлович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Приборы и измерительно-вычислительные комплексы» Московского авиационного института (Национального исследовательского университета) «МАИ», E-mail: v13217@ya.ru.

Ширшаков Александр Евгеньевич – канд. техн. наук, первый заместитель генерального директора по электрическим системам ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина», E-mail: shirshakov@laspace.ru.

В.И. Кристя, Йе Наинг Тун

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПЫЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ЭЛЕКТРОДА С ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЛЕНКОЙ ПЕРЕМЕННОЙ ТОЛЩИНЫ В ТЛЕЮЩЕМ РАЗРЯДЕ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Исследовано влияние параметров разряда и характеристик рельефа на степень неоднородности коэффициента распыления электрода в случае наличия на нем тонкой диэлектрической оксидной пленки переменной толщины.

Ключевые слова: *тлеющий разряд, распыление электрода, коэффициент распыления, диэлектрическая пленка.*

Распыление поверхности электродов является одним из факторов, ограничивающих срок службы газоразрядных приборов. Наличие на электроде диэлектрической пленки, толщина которой изменяется вдоль его поверхности, приводит к искривлению силовых линий электрического поля в приэлектродном слое разряда, оказывающему влияние на движение заряженных частиц [1]. В результате этого может происходить фокусировка ионов на участках с меньшей толщиной пленки, а также изменяться их энергетический спектр вследствие преимущественной фокусировки низкоэнергетичных ионов. Поэтому основная характеристика процесса распыления – усредненный по энергиям ионов коэффициент распыления, существенно зависящий от энергий ионов, может отличаться на различных участках электрода даже в случае, когда коэффициент распыления материала пленки моноэнергетическим пучком ионов во всех его точках имеет одинаковую величину. Однако количественные исследования влияния энергетической сепарации ионов на величину коэффициента распыления ранее не проводились.

В данной работе исследовано влияние параметров разряда и характеристик рельефа на степень неоднородности коэффициента распыления электрода в случае наличия на нем тонкой диэлектрической оксидной пленки переменной толщины.

Пусть катодный слой тлеющего разряда расположен между плоскостью $z = 0$ и поверхностью тонкой диэлектрической пленки на поверхности катода, описываемой уравнением $z_c = d_c + h_f \cos kx$, где $k = 2\pi / l_f$, d_c - ширина катодного слоя разряда, h_f и l_f - амплитуда и период неодно-

родности толщины пленки. Если средняя толщина пленки равна H_f , то граница между пленкой и металлической подложкой катода определяется уравнением $z = z_b = d_c + H_f$. Ионы рабочего газа,двигающиеся в рабочем газе, подвергаются резонансной перезарядке на его атомах, интенсивность которой характеризуется средней длиной пробега иона между перезарядками λ_c , а между перезарядками ускоряются электрическим полем в направлении катода [2]. Вследствие искривленности его поверхности, в приповерхностном слое разряда толщиной порядка l_f электрическое поле имеет ненулевую x - компоненту, величина которой периодически изменяется вдоль оси x . В результате, так как напряженность электрического поля в пленке на несколько порядков превышает ее значение в разряде у поверхности катода [1], происходит отклонение траекторий ионов в направлении впадин рельефа, приводящее к нарушению однородности бомбардирующего мишень ионного потока.

Для случая, когда искривленность поверхности электрода мала, т.е. выполняется условие

$$h_f \ll l_f \sim \lambda_c \ll d_c, \quad (1)$$

а следовательно, мала и неоднородность ионного потока вблизи него, выражение для функции распределения потока ионов по энергиям ε в приэлектродном слое, полученное ранее [1], имеет вид:

$$f_i(x, z, \varepsilon) = f_{i0}(z, \varepsilon) + f_{i1}(z, \varepsilon) \cos kx, \quad (2)$$

где $f_{i0}(z, \varepsilon)$ и $f_{i1}(z, \varepsilon)$ - функция распределения потока ионов у гладкого электрода и поправка к ней, обусловленная искривленностью поверхности электрода.

При этом распределение плотности потока ионов вдоль поверхности катода (при $z = d_c$) имеет вид:

$$j_i(x, d_c) = \frac{1}{M_i} \int_0^{eU_c} f_i(x, d_c, \varepsilon) d\varepsilon, \quad (3)$$

где M_i - масса иона.

Электрод распыляется бомбардирующими его ионами, если их энергии превосходят пороговое значение ε_t , причем зависимость коэффициента распыления от энергии частиц имеет вид [3]:

$$Y(\varepsilon/\varepsilon_t) = a(1 - \sqrt{\varepsilon_t/\varepsilon})^{5/2} [1 + b(\sqrt{\varepsilon/\varepsilon_t} - 1)], \quad (4)$$

где a и b - постоянные, зависящие от материала электрода и сорта ионов. Поэтому плотность потока распыленных атомов материала электрода у его поверхности определяется формулой [4]:

$$j_{si}(x, d_c) = \frac{1}{M_i} \int_{\varepsilon_t}^{eU_c} Y(\varepsilon / \varepsilon_t) f_i(x, d_c, \varepsilon) d\varepsilon, \quad (5)$$

а коэффициент распыления электрода ионами, усредненный по их энергиям, равен:

$$Y_i(x) = j_{si}(x, d_c) / j_i(x, d_c). \quad (6)$$

Подстановка в (3), (5) и (6) соотношений (2), (4) и выражений для $f_{i0}(z, \varepsilon)$ и $f_{i1}(z, \varepsilon)$ с учетом условия (1) дает

$$Y_i(x) = Y_{i0} + Y_{i1} \cos kx, \quad (7)$$

где Y_{i0} и Y_{i1} - коэффициент распыления ионами гладкого электрода и поправка к нему, обусловленная искривленностью поверхности электрода,

$$Y_{i0} = R_{i0}, \quad Y_{i1} = (h_f / \lambda_c) (R_{i1} - R_{i0} (1 + 1 / (1 + k\lambda_c))), \quad (8)$$

причем

$$\begin{aligned} R_{i0} &= (d_c / \lambda_c) \int_0^{\sqrt{1-\delta}} Y((1-t^2)/\delta) \exp[-d_c / \lambda_c (1-t)] dt, \\ R_{i1} &= (d_c / \lambda_c) \int_0^{\sqrt{1-\delta}} Y((1-t^2)/\delta) \exp[-d_c / \lambda_c (1-t)] dt + \\ &+ (d_c / \lambda_c) \int_0^{\sqrt{1-\delta}} Y((1-t^2)/\delta) \exp[-(d_c / \lambda_c) (1 + k\lambda_c) (1-t)] dt, \end{aligned}$$

$\delta = \varepsilon_t / eU_c$, U_c - падение напряжения на катодном слое разряда.

Рассчитанные при $d_c / \lambda_c = 20$, $\lambda_c / l_f = 1$, $H_f = 1 \times 10^{-8}$ м, $\delta = 0,05$, $h_f / H_f = 0,08$, $h_f / \lambda_c = 0,0001$ энергетический спектр ионов f_{i0} , а также поправка к нему f_{i1} , обусловленная искривленностью поверхности пленки приведены на рисунке 1.

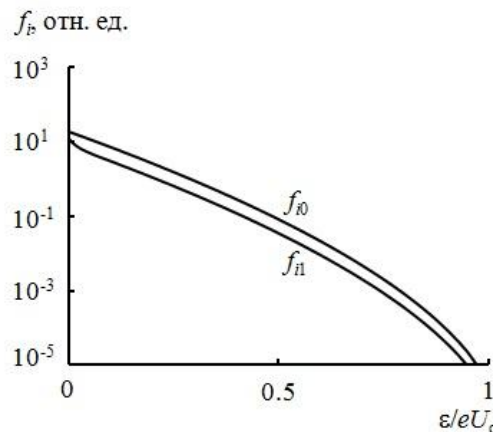


Рис. 1

Из него следует, что уже небольшая неоднородность толщины пленки вдоль поверхности катода приводит к заметному изменению энергетического распределения ионного потока.

Зависимости усредненного по энергиям ионов коэффициента распыления гладкого электрода Y_{i0} и поправки к нему Y_{i1} , возникающей из-за искривленности поверхности электрода, от отношения d_c/λ_c приведены на рисунке 2.

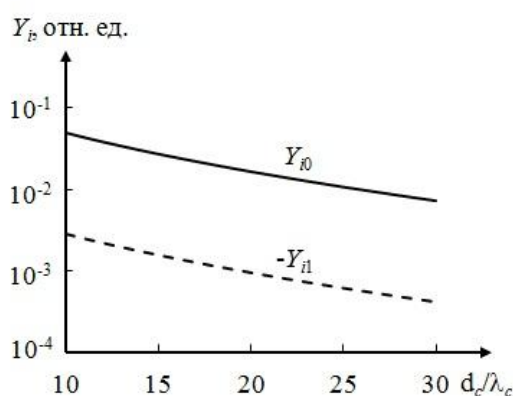


Рис. 2

Видно, что при наличии на поверхности электрода диэлектрической пленки переменной толщины коэффициент распыления имеет пониженное значение во впадинах рельефа (при $x = nl_f$, где n - целое число). Плотность же потока атомов, распыленных с электрода ионами, достигает максимального значения на участках с меньшей толщиной пленки из-за большей плотности ионного потока на них. Это должно приводить к увеличению неоднородности толщины пленки с течением времени.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Калужской области (проект № 14 - 42 - 03057).

Список литературы

1. Kristya V.I. *Glow Discharges and Tokamaks*/ Ed. Murphy S.A. - New York: Nova Science Publishers, 2010, p. 329-368.
2. Райзер Ю.П. *Физика газового разряда*, М.: Наука, 1987, 592 с.
3. Yoshimura S., Hine K., Kiuchi M., Hashimoto J., Terauchi M., Honda Y., Nishitani M., Hamaguchi S. Sputtering Yields of CaO, SrO, and BaO by Monochromatic Noble Gas Ion Bombardment. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2012, vol. 51(8), 08NB02.
4. Кристя В.И., Йе Наинг Тун. Влияние неоднородности ионного потока на распыление мишени с поверхностным рельефом в тлеющем разряде. *Поверхность*, 2013, № 3, с. 109-112.

Кристия Владимир Иванович – д-р физ.-мат. наук, профессор КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: kristya@bmstu-kaluga.ru.

Йе Наинг Тун – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: royalyelay03@gmail.com.

V.I. Kristya, Ye Naing Tun

SIMULATION OF SPUTTERING OF THE ELECTRODE SURFACE WITH A DIELECTRIC FILM OF VARIABLE THICKNESS IN GLOW DISCHARGE

Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch, Kaluga, 248000, Russia

Influence of the discharge parameters and relief characteristics on inhomogeneity of the electrode sputtering coefficient under the presence of a thin dielectric oxide film of variable thickness on it.

Key words: *glow discharge, electrode sputtering, sputtering coefficient, dielectric film.*

Kristya V.I., Dr. Sci. (Phys.&Math.), professor of the Kaluga Branch of the Bauman Moscow State Technical University. E-mail: kristya@bmstu-kaluga.ru.

Ye Naing Tun, postgraduate of Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University. E-mail: royalyelay03@gmail.com.

Л.Г. Гущина

**О ЕДИНСТВЕННОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИИ
ПЛОТНОСТНОГО РАЗРЕЗА ДЛЯ ОДНОЙ МОДЕЛИ ЗЕМНОЙ
КОРЫ ПО ПОВЕРХНОСТНЫМ ВОЛНАМ ЛЯВА
С ПРИВЛЕЧЕНИЕМ ДАННЫХ ГЛУБИННОГО
СЕЙСМИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ.**

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

В данной работе рассматривается возможность нахождения плотности разреза земной коры в верхней мантии по данным сейсмологии с привлечением данных глубинного сейсмического зондирования. Исследуется однозначность восстановления плотностного разреза для плоской двухслойной на полупространстве модели с постоянными параметрами в первом слое и в полупространстве и зависящими от глубины регулярными параметрами во втором слое.

Ключевые слова: сейсмология, зондирование, волны, обертона, плотность.

Изучение глубинного строения Земли представляет большой интерес для научной и практической деятельности человека. Из-за технических трудностей прямые наблюдения и исследования структуры земной коры на глубине более нескольких километров от дневной поверхности не могут быть проведены повсеместно. Поэтому, наблюдая различного рода явления на земной поверхности, интерпретируя экспериментальные данные наблюдений, получаем большинство сведений о свойствах земных недр и процессах, происходящих в глубинах Земли [1]. Подобный подход приводит к решению ряда задач геофизической интерпретации; на одном и том же участке земной поверхности экспериментальному исследованию подвергаются поля различной физической природы, например, электромагнитное, гравитационное, сейсмическое, а искомая структура, поскольку она влияет на характеристики поля, изучается по последним.

Большие трудности в решении обратных задач геофизики связаны с тем, что они, в основном, имеют неединственное решение, к тому же неустойчивое относительно ошибок экспериментальных данных. Кроме того правильность и точность интерпретации наблюдаемых явлений зависит от правильности выбора теоретических посылок.

Все это приводит к тому, что результаты интерпретации часто обладают малой надёжностью и совершенно неудовлетворительной точностью. Один из способов повышения надёжности результатов интерпретации наблюдаемых явлений есть комплексное использование различных методов

геофизики с учетом геологической ситуации при исследовании глубинного строения Земли. При решении конкретной задачи данные одного метода могут браться за основные, данные других – привлекаться в качестве дополнительной информации при построении теоретической модели или при численных расчётах. Результаты различных методов могут сопоставляться и на основе этого делать выводы о правильности и точности методов. В результате последовательного и совместного применения методов можно получить совершенно новые сведения о строении Земли.

Рассмотрим задачу о дисперсии поверхностных волн. Земная кора в силу своей неоднородности является диспергирующей по отношению к поверхностным волнам, определяя различие в скорости распространения волн различных частот колебаний [2]; таким образом «дисперсионные кривые» поверхностных волн: $c = c^{(s)}(w)$, где c – фазовая скорость волны, s – номер обертона – несут информацию о строении среды. Но при интерпретации дисперсионных кривых необходимо учитывать неединственность решения этой задачи в общем случае. Так как при рассмотрении конкретной задачи интерпретации нас интересует единственное решение, которое соответствует реальной данной структуре, то необходимо ввести некоторые ограничения на теоретическую модель, пользуясь дополнительными данными, или внести изменения в общую постановку задачи. В [4] доказывался ряд теорем единственности определения структуры земной коры по поверхностным волнам Рэлея и Лява в рамках плоской слоистой модели. В частности, доказано, для структуры произвольного (но конечного) числа слоёв – n на подстилающем упругом пространстве, что, если $b_1 = \min_{1 \leq i \leq n+1} b_i$, то двум структурам, различающимся хотя бы одним из существенных параметров $\vec{p}^{(n)}$ отвечают различные дисперсионные кривые основного тона волн Лява

b_i – скорости волн сдвига;

$\vec{p}^{(n)} = \{n, b_i, \gamma_i, h_i\}$;

$\gamma_i = \mu_i / \mu_{i+1}$;

μ_i – модуль сдвига i –го слоя; h_i – толщины слоев; $i = 1, 2, \dots, n$.

В настоящей работе рассматривается структура, состоящая из двух плоскопараллельных слоёв на упругом полупространстве, определяемая следующими параметрами:

ρ_1

– плотность первого слоя,

b_1

$= \text{const}$ – скорость волн сдвига в этом слое;

$\rho_2 = \rho_2(z), b_2 = b_2(z)$ / $z_1 \leq z \leq z_2$ / – соответствующие параметры во втором слое;

$\rho_3 = \text{const}, b_3 = \text{const}$ – параметры полупространства.

В рамках данной модели исследуется проблема единственности при определении регионального плотностного разреза по дисперсионной кривой основного тона волн Лява.

Волны Лява представляют ту часть упругого волнового поля, которая связана со сдвиговыми колебаниями, поляризованными вдоль дневной поверхности и распространяющимися вдоль неё. Таким образом рассматривается плоская волна с амплитудой $v(z)$, изменяющейся с глубиной, фазовой скоростью $c^S(w)$ и распространяющаяся вдоль оси Ох:

$$y(t, x, z) = v(z) \cdot \exp\{i\omega(t - x/c(w))\}. \quad (1)$$

Упругое смещение в волне Лява в первом слое среды и в подстилающем пространстве удовлетворяет уравнению колебаний [54]:

$$\frac{\partial^2 y_i}{\partial t^2} = b_i^2 \Delta_{x,z} y_i \quad (i=1,3) \quad (2)$$

И во втором слое

$$\rho_2(z) \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \operatorname{div}(\mu_2(z) \operatorname{grad} v), \quad (3)$$

Где

b_i — скорости волн сдвига в i — ом слое,

μ_i — жёсткость (или модуль сдвига),

ρ_i — Плотность вещества в слое,

$$b_i^2 = \mu_i / \rho_i. \quad (4)$$

На границах слоёв имеют место условия непрерывности упругих смещений и касательных напряжений: $[v]_{z=z_i} = 0$, $\left[\mu \frac{\partial v}{\partial z}\right]_{z=z_i} = 0$, ($i = 1, 2$).

Дневная поверхность свободна от напряжений:

$$\left[\frac{\partial v}{\partial z}\right]_{z=0} = 0. \quad (5)$$

В силу поверхностного характера волны

$$[v]_{z \rightarrow \infty} \rightarrow 0. \quad (6)$$

Учитывая (1) – (6), приходим к следующей задаче о собственных значениях:

$$\begin{aligned} v_i'' + w^2(\beta_i - \lambda)v_i &= 0, \quad (i = 1, 3) \\ \frac{1}{\mu_2(z)} * (\mu_2(z)v_2')' + w^2(\beta_2 - \lambda)v_2 &= 0 \\ [v]_{z=z_i} &= 0, \quad [\mu v']_{z_i} = 0, \quad (i = 1, 2) \\ [v']_{z=0} &= 0, \quad [v]_{z \rightarrow \infty} \rightarrow 0 \end{aligned} \quad (7)$$

$$\text{Где } \beta_{\text{ш}} = \frac{1}{b_i^2}, \quad \lambda(w) = \frac{1}{c^2(w)}.$$

Собственные значения $\lambda(w)$ — характеризуют дисперсию волн Лява. Из условия на бесконечности следует:

$$\lambda > \beta_3, v_3 = ce^{-w\sqrt{\lambda-\beta_3}z}. \quad (8)$$

Введём обозначения:

$$\kappa_3 = \sqrt{\lambda - \beta_3}, \quad A(\lambda) = v_3(z_2) = e^{-w\kappa_3 z_2}.$$

Положим $v_i = A(\lambda)u_i$.

В силу линейности всех условий для u_i получаем задачу аналогичную (7):

$$\begin{aligned} u_1'' + w^2(\beta_1 - \lambda)u_1 &= 0, \quad (0 < z < z_1) \\ u_1'(0) &= 0, \quad [\mu_1 u_1']_{z=z_1} = \mu_2(z_1)u_2'(z_1), u_1(z_1) = u_2(z_1) \\ \frac{1}{\mu_2(z)} * (\mu_2(z)u_2')' + w^2(\beta_2 - \lambda)u_2 &= 0, \quad (z_1 < z < z_2) \\ u_2(z_2) &= 1, \quad \mu_2(z_2)u_2'(z_2) = -w\kappa_3\mu_3 \end{aligned} \quad (9)$$

Каждой паре (w, λ) отвечает единственное решение задачи Коши для регулярных коэффициентов. Последовательно однозначно определяем

$$u_2(z, w, \lambda), u_1(z, w, \lambda) \text{ и из уравнения} \quad u_1'(0, w, \lambda) = 0, \quad (10)$$

определяем спектр $\lambda^{(k)} = \lambda^{(k)}(w)$, $(k = 0, 1, 2, \dots)$.

Исследованию подлежит возможность однозначного определения плотностного разреза $\rho(z)$ по дисперсионной кривой основного тона $\lambda^{(0)} = \lambda^{(0)}(w)$ при известном скоростном разрезе $b(z)$, который может быть однозначно определён, например, по данным глубинного сейсмического зондирования, при условии монотонного возрастания скорости с глубиной [2].

Из условий задачи (1.9) видно, что спектр собственных значений зависит от отношения μ_i/μ_1 ($i=2,3$), а тем самым от отношения при извест-

ных скоростях от отношения плотностей ρ_i/ρ_1 , $\rho_i b_i^2 = \mu_i$, ($i = 2, 3$). Соот-

ветственно спектр не изменится при изменении плотностей, сохраняющем их отношение. Значит, вопрос о единственности обратного соответствия можно рассматривать, например, при фиксированном ρ_1 .

Будем рассматривать класс структур заданной выше геометрической конфигурации, параметры которой удовлетворяют следующим условиям:

а) величины z_i, b_i , а также ρ_1 - известны, причём $b_2(z)$ имеет n производных при произвольном, но фиксированном n ,

б) $b_1 = \min\{b_1, \min b_2(z), b_3\}$,

в) $\rho_2(z)$ принадлежит классу многочленов степени n .

Задача состоит в том, чтобы по заданному $\lambda^{(0)}(w)$ найти распределение плотности $\{\rho_2(z), \rho_3\}$. Исследование единственности аналогично [4] проводилось сопоставлением высокочастотных асимптотик дисперсионных кривых, отвечающих различным структурам. Для получения асимпто-

тик находилось, прежде всего, аддитивное представление дисперсионного уравнения (10).

Доказано, что в рассматриваемом классе структур дисперсионная кривая основного тона волны Лява несёт полную информацию о распределении плотностей. Показано, что аналогичную структуру имеют асимптотические представления любого обертона с точностью до множителей, не зависящих от среды. Можно сделать вывод, что совместная интерпретация дисперсионных данных различных гармоник не может привести к уточнению решения обратной задачи. Это, тем более, заслуживает внимания, так как извлечь из наблюдений данные о дисперсии обертонов труднее, нежели данные, относящиеся к основному тону.

Литература.

1. В.В.Белоусов. Комплексное исследование глубинного строения Земли. Вестник АН СССР, 1970, №5.
2. М.Л.Гервер, В.М.Маркушевич. Определение по годографу скорости распространения сейсмической волны. Вычисл. сейсм., вып. 3, 1967, изд. «Наука».
3. А.Н.Тихонов, Ф.Ф.Самарский. Уравнения математической физики. М., изд. «Наука», 1977.
4. В.Б.Гласко. О единственности решения некоторых обратных задач сейсмологии. Ж. вычисл. матем. и матем. Физ., 1970, №6.

Гущина Л.Г. – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры "Высшая математика" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: luidaroy@gmail.com.

Ю.В. Обрубов, Н.Д. Влайков

ПОИСК АСТЕРОИДОВ, РОДСТВЕННЫХ АПОФИСУ, ПО УРАВНЕНИЮ РЕГРЕССИИ ЭВОЛЮЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ ОРБИТ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

На первом этапе поиска генетически связанных астероидов часто используют различные критерии близости орбит: D - критерий Саутворта-Хокинса [1], T - критерий Тиссерана [2], постоянные Лидова C_1 и C_2 [3,4] и другие. Близкие значения данных критериев дают возможность предполагать наличие связи между объектами. Однако эти критерии не являются постоянными, меняясь в различной степени в результате эволюции орбиты. При изучении влияния планетных возмущений на критерии близости орбит околоземных объектов, оказалось, что относительное постоянство сохраняют геоцентрические скорости, критерий Тиссерана, постоянные Лидова, собственные эксцентриситеты и наклоны орбит [5]. Таким образом, при выборе объектов с близкими значениями критериев следует учитывать не только их значение на данном интервале времени, но и некоторую окрестность, в пределах которой данный критерий может меняться под действием планетных возмущений.

Астероид Апофис является одним из потенциально опасных для Земли объектов. Поиск болидов, возможно связанных с Апофисом [6], дал положительный результат – было обнаружено 4 таких болида. Но, кроме мелких осколков, могут быть и крупные, которые сейчас могут наблюдаться в виде астероидов. Поэтому есть смысл поиска родственных Апофису объектов.

Астероид Апофис входит в группу Атона. Элементы орбит астероидов этой группы были получены из каталога NASA [7]. Для всех объектов по формулам (1), (2) были вычислены постоянные Лидова C_1 и C_2 .

$$C_1 = (1 - e^2) \cos^2 i \quad (1)$$

$$C_2 = e^2 (0,4 - \sin^2 i \sin^2 \omega) \quad (2)$$

Результаты вычислений представлены на Рис. 1 в координатной плоскости $C_1 - C_2$.

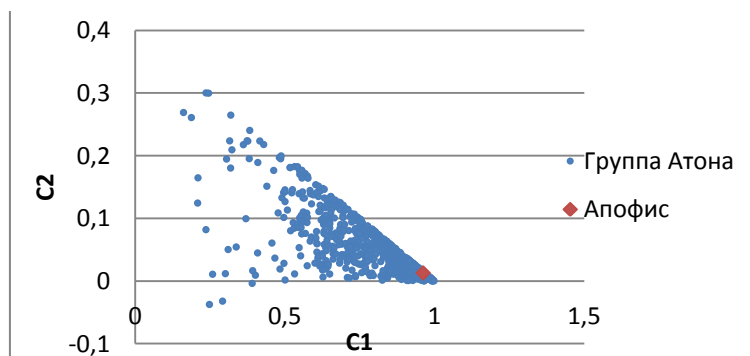


Рис. 1 Постоянные Лидова для астероидов группы Атона и Апофиса.

Значения C_1 и C_2 астероида Апофис, вычисленные по элементам орбит на момент времени $t = 2000$, равны соответственно: $C_1 = 0,960$, $C_2 = 0,015$. Его положение на плоскости $C_1 - C_2$ можно видеть на Рис. 1.

Используя неявный одношаговый высокоточный метод Эверхарта, мы вычислили возмущения элементов орбит астероида Апофис на интервале времени от -14000 лет до 14000 лет [8]. Для всех оскулирующих орбит постоянные Лидова находятся в пределах: $C_{1\min} = 0,918107$, $C_{1\max} = 0,967084$, $C_{2\min} = 0,011981$, $C_{2\max} = 0,032196$.

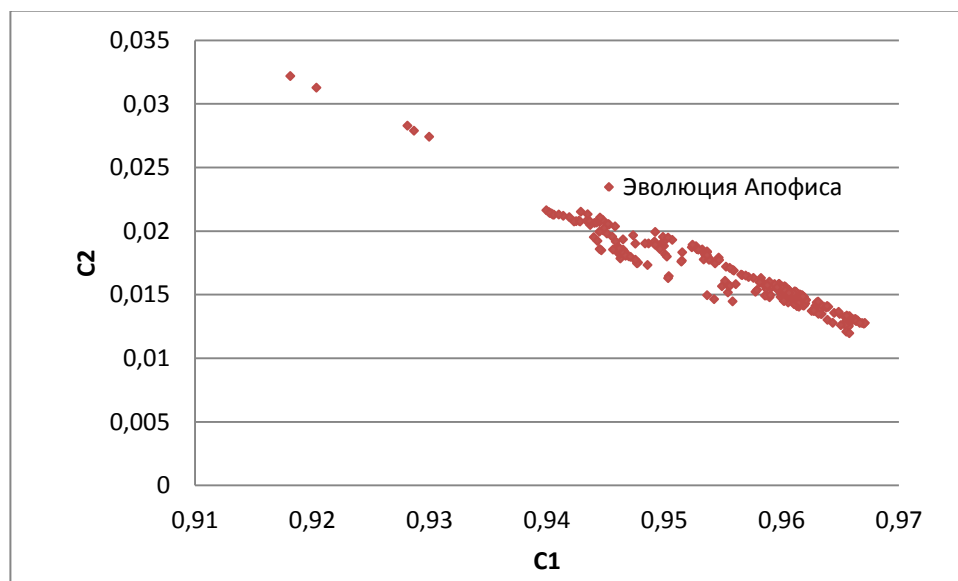


Рис. 2 Постоянные Лидова для эволюции Апофиса.

На Рис. 2 представлена эволюция Апофиса на координатной плоскости $C_1 - C_2$.

Каждой из 281-й оскулирующей орбите соответствует точка на плоскости $C_1 - C_2$. Для данных вычисленных значений C_1 и C_2 уравнение парной линейной регрессии имеет вид:

$$\hat{C}_2 = 0.34357 - 0.34224C_1 \quad (3)$$

Максимальное отклонение предсказанного результата от вычисленного:

$$E = \left| \hat{C}_2 - C_{2\text{набл}} \right| = 0,00283$$

Можно предположить, что если среди астероидов группы Атона имеются объекты, генетически связанные с Апофисом, то на плоскости $C_1 - C_2$ они должны располагаться вблизи линии регрессии.

Для дальнейшего поиска возможно связанных астероидов зададим область со следующими границами:

$$\begin{cases} C_{1\min} \leq C_1 \leq C_{1\max} \\ \hat{C}_2 - E \leq C_2 \leq \hat{C}_2 + E \end{cases} \quad (4)$$

В нашем случае:

$$\begin{cases} 0,918 \leq C_1 \leq 0,967 \\ 0,341 - 0,342C_1 \leq C_2 \leq 0,346 - 0,342C_1 \end{cases} \quad (5)$$

В эту область, кроме Апофиса, попадает 62 объекта. Расположение элементов данного множества в плоскости $C_1 - C_2$ представлено на Рис. 3.

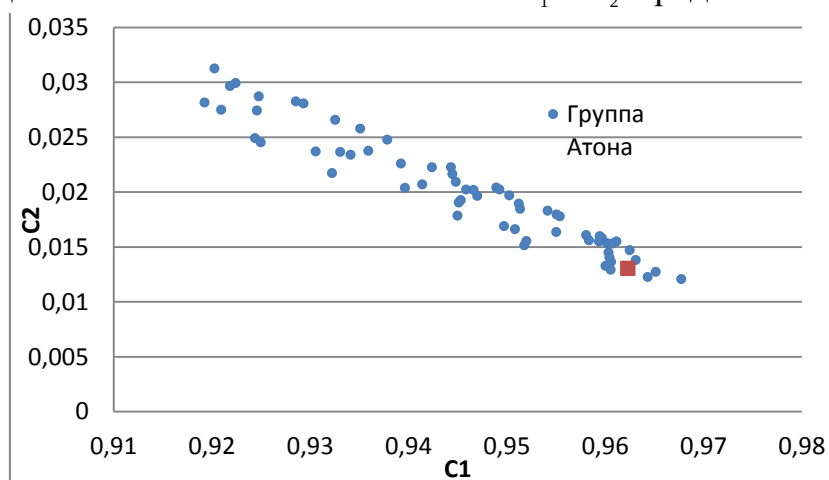


Рис. 3 Часть группы Атона, попадающая в заданную область.

Среди выбранных 62-х объектов 33 имеют $D \leq 0,3$, а для 18 из них $D < 0,2$, что может говорить о их принадлежности к рою Апофиса.

В таблице 1. Приведен список астероидов, попавших в заданную область (кроме Апофиса) и для которых значение D - критерия Саутворта-Хокинса не превышает 0.2.

Таблица 1

№	Объект	D -критерий
1	(2012 DK4)	0,06495964
2	(2005 GE60)	0,09098052
3	(2012 XL16)	0,09227973
4	(2012 BN1)	0,101094926
5	(2004 BY1)	0,111037873
6	(2002 CW11)	0,120777354
7	(2012 FT35)	0,122838276
8	(2002 VX91)	0,128939131
9	(2007 EC)	0,148936105
10	(2011 CH22)	0,157112562
11	(2012 BK14)	0,158653709
12	(2010 FN)	0,163936849
13	(2004 FM17)	0,185054986
14	(2002 XY38)	0,189072589
15	(2006 XP4)	0,193982125
16	(2012 CM2)	0,196572883
17	(2003 YX1)	0,198770976
18	(2009 BL71)	0,199197213

Дальнейшие исследования выделенной группы необходимо проводить с помощью кластерного анализа и изучения эволюции орбит данных объектов.

Список литературы.

1. Southworth R.B. & Hawkins G.S. Statistics of meteor streams // Smith. Contrib. Astrophys., 1963, Vol. 7, P. 261-285
2. Kozai H. Short-period comets and Apollo-Amor-Aten type asteroids in view of Tisserand invariant // Celestial Mech. And Dynam. Astron. 1992. Vol. 54. P.237-240
3. Лидов М.Л. Эволюция орбит искусственных спутников планет под действием гравитационных возмущений // Искусственные спутники земли. 1961. Вып. 8. С.5-45
4. Лидов М.Л., Ярская М.В. Интегрируемые случаи в задаче об эволюции орбиты спутника при совместном влиянии внешнего тела и нецентральности поля планеты // Косм. иссл. 1974. Т.12. №2. С. 155-170
5. Обрубов Ю.В., Влайков Н.Д. Влияние планетных возмущений на критерии близости орбит околоземных объектов // V Бредихинские чтения: материалы Международной конференции. – 12-16 мая 2014. Заволжск, Россия. URL: // <http://agora.guru.ru/display.php?conf=bredikhin2014>. –С. 27
6. Бабаджанов П.Б., Кохирова Г.И., Обрубов Ю.В. Астероид Апофис и связанные с ним болиды // Доклады Академии наук Республики Таджикистан. – 2012. Т. – 55, №. 7. – С. 555-560
7. ATE orbital elements URL: // http://neo.jpl.nasa.gov/cgi-bin/neo_elem (дата обращения 13.09.2013)
8. Обрубов Ю. В., Влайков Н. Д. // Наукоемкие технологии в приборостроении и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе: материалы Всероссийской научно-технической конференции. – 10–12 декабря 2013. Т. – 3. — С. 155-158

Обрубов Юрий Викторович – д-р физ.-мат. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: obrubovyu@yandex.ru.

Влайков Николай Дмитриевич – ст. преп. КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: nick-vlaikov@yandex.ru.

В.А. Беляев

**ПОЛНОЕ ОПИСАНИЕ СТРУКТУРЫ МНОЖЕСТВА
СХОДИМОСТИ РАВНОМЕРНО ОГРАНИЧЕННОЙ
ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ПОЛИНОМОВ НА КОМПАКТЕ
НЕ РАЗБИВАЮЩЕГО КОМПЛЕКСНОЙ ПЛОСКОСТИ.**

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Проблема состоит в следующем: описать структуру множества E , принадлежащего компакту K на комплексной плоскости, для которого существует последовательность полиномов, равномерно ограниченная на K , сходящаяся поточечно на E и расходящаяся на $K \setminus E$.

Мы будем предполагать, что компакт K не разбивает плоскость в том смысле, что дополнение K до всей плоскости есть связная область.

Некоторые результаты в этом направлении были получены М.А. Лаврентьевым, А.Я. Хинчиным, М.В. Келдышем, С.Н. Мергеляном, С.В. Колесниковым, (см., например, [1])

Введем некоторые обозначения: через ∂K обозначим границу K , а через $O(K)$ обозначим совокупность ограниченных связных составляющих дополнения к множеству ∂K до всей комплексной плоскости.

Через $\{B\}$ обозначим множество тех областей из $O(K)$, каждая из которых полностью принадлежит E , а $\{G\} = O(K) \setminus \{B\}$. Так как K не разбивает плоскости, то ∂K совпадает с границей дополнения к множеству K до всей комплексной плоскости.

Теперь сформулируем две теоремы о единственности аналитических функций, (см., например, [2]).

Теорема 1. Если две аналитические функции в области G имеют равные значения на бесконечном множестве точек, имеющих предельную точку внутри G , то эти функции равные между собой в каждой точке области G .

Теорема 2. Если две аналитические функции в круге $|z| < 1$ ограничены в этом круге и имеют равные значения на множестве точек $\{z_n\}_1^\infty$, $|z_n| < 1$, таких, что ряд $\sum_{k=1}^\infty (1 - |z_n|)$, расходится, то такие две функции тождественно равны между собой в круге $|z| < 1$.

Из теоремы 1 вытекает, что если $G_m \in \{G\}$ и $E \cap G_m$ имеет внутреннюю предельную точку, принадлежащую G_m , то $G_m \subset E$.

Следовательно, в каждой из областей $G_m \in \{G\}$ точек множества E не более чем счетно и $\partial G_m \subset \partial K$.

Пусть $W = \varphi_m(z)$ конформное и однолистное отображение G_m на круг $|w| < 1$ и $W_{m,n} = \varphi_m(z_n)$, где $\{z_n\} = E \cap G_m$. Из теоремы 2 следует, что если $\sum_{k=1}^\infty (1 - \varphi_m|z_n|) = \infty$, $G_m \subset E$.

В работе [3] доказана

Теорема 3. Если $\omega(E \cap \partial G_m, Z) > 0$, где $Z \in G_m$, а $\omega(E \cap \partial G_m, Z)$ гармоническая мера множества $E \cap \partial G_m$, то $G_m \subset E$.

Основной результат статьи содержится в следующей теореме

Теорема 4. Для того, чтобы существовала последовательность полиномов равномерно ограниченная на K , которая сходится поточечно на E , $E \subset K$, и расходится в каждой точке $E \setminus K$, необходимо и достаточно выполнение следующих условий:

1. $E \cap K$ – типа $F_{\sigma, \delta}$
2. $\omega(E \cap \partial G_m, Z) = 0, \forall G_m \in \{G\}$
3. $\sum (1 - \varphi_m |z_n|) < \infty, \forall G_m \in \{G\}$, где $w = \varphi_m(z)$ конформное и однолистное отображение области G_m на круг $|w| < 1$, а суммирование берется по всем точкам множества $E \cap G_m$.

Литература

1. Мергелян С.Н. *Некоторые проблемы математики и механики* // Новосибирск. – 1961. – с. 133-172.
2. Привамов И.И. *Введение в теорию функций комплексного переменного* // Москва. – 1960. – с. 202, 281.
3. Беляев В.А. // В сб. *Труды МГТУ №583*. – Москва. – 2002.

Беляев Валерий Александрович – канд. физ.-мат. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: belaev.valerij@yandex.ru.

РАЗРАБОТКА ПРИЛОЖЕНИЙ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ ДЛЯ ОЦЕНКИ СЛУЧАЙНЫХ СОБЫТИЙ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Постановка задачи и описание алгоритма.

В настоящее время во многих приборах бытового и специального назначения (мобильные телефоны, резервные источники питания и т.п.) устанавливаются различные типы аккумуляторов. Поэтому крайне важно знать факторы, которые могут нарушить стабильную работу аккумуляторов, а, следовательно, и всей системы. Одним из таких факторов может быть редкое случайное явление теплового разгона. В результате теплового разгона происходит мощное выделение энергии, которое вызывает резкое повышение температуры внутри аккумулятора, что, в свою очередь, приводит к прогоранию сепаратора между пластинами и вскипанию электролита. Тепловой разгон неминуемо приводит к выходу системы из строя или сбоям в работе и, следовательно, является серьезным препятствием в работе очень большого числа современных приборов и систем.

Причины теплового разгона в настоящее время неясны, в связи с чем практически отсутствуют попытки математического моделирования этого процесса, что не позволяет надежно предсказать его возникновение, или, по крайней мере, оценить предрасположенность различных аккумуляторов к тепловому разгону.

Мы предлагаем для решения данной проблемы использовать формализм нечеткой логики как наиболее подходящий в условиях неполной и плохо формализованной информации.

Поскольку в нашем случае наиболее удобным является табличный способ ввода и визуализации вычислений, в качестве наиболее подходящего инструмента вычислений мы выбрали электронные таблицы Excel с определенной пользователем трапециевидной функцией принадлежности. К наиболее существенным достоинствам электронных таблиц для научных исследований следует отнести широкие возможности математического, статистического и графического анализа данных, эффективное моделирование проблем типа «что будет, если», а также возможность разработки собственных приложений на языке программирования высокого уровня Visual Basic for Application (VBA). Методика создания функций пользователя в Excel 2013 для разработки приложений нечеткой логики описана в [1]. В частности, в приложениях нечеткой логики часто используются трапециевидные функции принадлеж-

ности. Пример графика трапецевидной функции принадлежности показан на рис. 1, где выделены точки, x-координаты которых соответствуют параметрам трапеции a, b, c, d . В данном случае $a = 300, b = 500, c = d = 700$.

Для проведения вычислений на основе формализма нечеткой логики мы использовали следующий алгоритм [2]:

1) определяется система показателей и нечетких переменных, описывающих исследуемый процесс, и формируется соответствующее каждому показателю терм-множество значений;

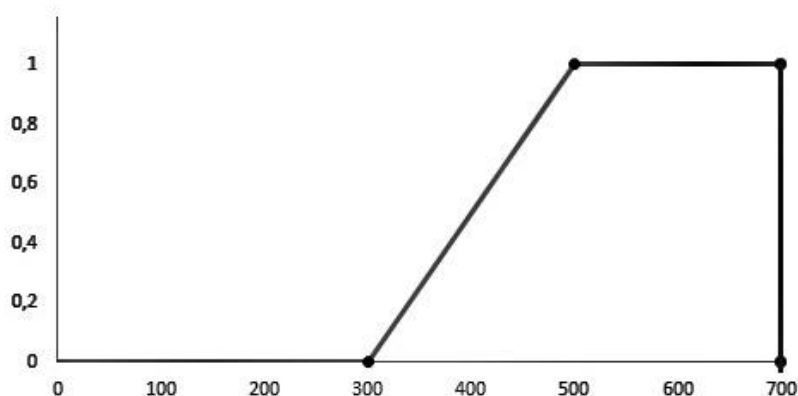


Рис. 1. Пример трапецевидной функции принадлежности

2) для каждого показателя определяется уровень значимости; если все показатели считаются равнозначными, уровень значимости каждого показателя равен $1/N$, где N – число показателей;

3) задаются текущие значения всех показателей и определяются соответствующие им значения функций принадлежности λ_{ij} , где $i = 1, \dots, N$; $j = 1, \dots, m$; N – число показателей; m – число уровней классификатора;

4) строится классификация результирующего показателя g и вычисляется его значение по формуле:

$$g = \sum_{j=1}^m g_j \sum_{i=1}^N r_i \lambda_{ij} .$$

Здесь r_i – уровень значимости i -го показателя, а $g_j = 0.9 - 0.2(j - 1)$.

Оценка риска развития теплового разгона в никель-кадмиевых аккумуляторах.

Как отмечено в [3], тепловой разгон наблюдается в различных типах аккумуляторов: никель-кадмиевых, свинцово-кислотных, литиевых.

Из экспериментальных данных [3] можно сделать следующие выводы:

1. Явление теплового разгона является случайным и достаточно редким.
2. Вероятность теплового разгона повышается с ростом напряжения заряда аккумуляторов.

3. Вероятность теплового разгона уменьшается с уменьшением емкости аккумулятора.

4. Тепловой разгон никогда не возникает в новых аккумуляторах или в аккумуляторах с небольшим сроком эксплуатации. В данных [3] во всех

случаях теплового разгона аккумуляторы имели сроки эксплуатации больше пяти лет при гарантийном сроке службы в три года. Можно считать, что вероятность появления теплового разгона увеличивается с ростом срока эксплуатации аккумуляторов.

Для прогнозирования явления теплового разгона мы ввели следующие нечеткие переменные: «Высокая температура», «Высокое напряжение», «Большая емкость», «Большой срок эксплуатации». Для простоты мы не рассматривали другие терм-множества (например, включающие значения «Низкая температура», «Низкое напряжение» и т.п.).

Исходя из сделанных выше выводов и экспериментальных данных [3], можно определить трапециевидные функции принадлежности переменных следующим образом:

- функция принадлежности переменной «Высокая температура» с параметрами [200; 400; 700; 700];
- функция принадлежности переменной «Высокое напряжение» с параметрами [2; 2,5; 4; 4];
- функция принадлежности переменной «Большая емкость» с параметрами [24; 48; 60; 60];
- функция принадлежности переменной «Срок эксплуатации» с параметрами [5; 8; 15; 15].

Параметр g оценивает степень риска развития теплового разгона.

Результаты наших вычислений подтверждают вывод, полученный в экспериментах [3], что в некоторых партиях аккумуляторов тепловой разгон не наблюдается при очень большом числе циклов (несколько тысяч). В другой же партии тех же самых аккумуляторов тепловой разгон происходит довольно легко, если применять жесткие режимы заряда (т.е. вести заряд при больших напряжениях заряда). В наших вычислениях также на вероятность возникновения теплового разгона существенное влияние при прочих равных условиях оказывало значительное повышение температуры или емкости.

Литература

- Семененко М.Г., Черняев С.И. Функции пользователя в Excel 2013: разработка приложений нечеткой логики// Успехи современного естествознания, 2014, №3, с. 114-117.
- Недосекин А.О. Математические основы моделирования финансовой деятельности с использованием нечетко-множественных описаний: дис... докт. экон. наук. СПб., 2003. С. 61–68.
- Галушкин Д.Н., Галушкин Н.Е., Язвинская Н.Н. Тепловой разгон в никель-кадмиевых аккумуляторах// Фундаментальные исследования, 2012, № 11-1, с. 116-119.

Семененко Марина Геннадиевна – канд. физ.-мат. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: msemenenko2009@yandex.ru.

СОДЕРЖАНИЕ

СЕКЦИЯ 5.

КЛАССИЧЕСКИЕ И СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ; АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВОМ

3

Корнюшин Ю.П., Егунов Н.Д., Корнюшин П.Ю.

Идентификация параметров исполнительных устройств регуляторов
паровых энергетической турбины с использованием аппарата
матричных операторов

4

Корнюшина Е.Ю.

Классификация спектров, основанная на вейвлетах и методах
машинного обучения.....

17

Наинг Аунг Со, Нэй Тве

Матричные операторы цифровых систем управления: аналитическая
схема построения [I].....

23

Наинг Аунг Со, Нэй Тве

Матричные операторы цифровых систем управления: аналитическая
схема построения [II]

34

Наинг Аунг Со, Нэй Тве.

Матричные операторы цифровых систем управления: ортогональные
базисы дискретной переменной [I].....

43

Наинг Аунг Со, Нэй Тве

Матричные операторы цифровых систем управления: ортогональные
базисы дискретной переменной [II]

53

Петровичев М.А., Нэй Тве, Наинг Аунг Со

Проблема моментов: построение математических моделей систем
управления в форме матрично-операторных соотношений [I]

62

Петровичев М.А., Нэй Тве, Наинг Аунг Со

Проблема моментов: построение математических моделей систем
управления в форме матрично-операторных соотношений [II]

72

Акименко Д.А., Тин Зар Аунг, Со Нэй Лин Аунг

Проекционный метод синтеза систем автоматического управления
в классе систем с запаздыванием.....

81

Краснощеченко В.И.

Стабилизация неустойчивого предельного цикла релейной
хаотической системы

89

Мышляев Ю.И., Финошин А.В., Долгов Я.А., Зюзин А.А.

Управление колебаниями системы маятник-тележка с приводом
методом скоростного биградиента.....

105

<i>Ивашина Е.А., Корлякова М.О., Прокопов Е.Ю.</i>	
Формирование иерархической модели нейросетевого решения задачи стереореконструкции.....	112
<i>Лапиков А.Л., Пащенко В.Н.</i>	
Алгоритм решения прямой задачи кинематики для многосекционного манипулятора параллельной структуры	119
<i>Аксенов Н.В., Филиппов Д.В., Якушев А.А.</i>	
Аппаратно - программный комплекс для структурной и параметрической идентификации объектов управления	124
<i>Сакович О.В., Лапиков А.Л., Масюк В.М.</i>	
Исследование движения платформы Гью - Стюарта при линейной аппроксимации закона изменения обобщенных координат при перемещении вдоль осей декартовой системы координат	129
<i>Ратанов С.С., Чернецова М.Н., Белова В.А.</i>	
Исследование применимости датчиков цветности для прототипа интеллектуального склада-сортировщика	134
<i>Ларина Т.В.</i>	
Классификация изображений, включающих содержательную информацию, на основе вейвлет - преобразования	139
<i>Тун Тун Чжо, Тин Эй Чжо, Макаренков А.М.</i>	
Компенсация влияния фактора случайности параметров модели при решении задачи синтеза программных управлений.....	143
<i>Васин П.А., Похвалитова А.А., Панов В.П.</i>	
Моделирование процессов сжатия измерительной информации	149
<i>Макаренков А.М., Мьо Паинг Сат</i>	
О возможности построения параллельного алгоритма анализа одного класса систем с распределенными случайными параметрами	153
<i>Тин Эй Чжо, Тун Тун Чжо, Макаренков А.М.</i>	
Оптимизация параметров PID-регуляторов с учетом случайности параметров объекта управления	156
<i>Брынза А.А., Корлякова М.О.</i>	
Подход к построению систем поиска и распознавания дорожных знаков.....	161
<i>Аунг Чжо Со, Макаренков А.М., Широкова З.Г.</i>	
Применение усредненных проекционных моделей для идентификации переменных случайных параметров стохастических систем	164
<i>Кузнецов Д.В., Пчелкин О.П.</i>	
Разработка адаптивной системы управления вынужденными колебаниями мотор - маятника	169

<i>Масюк В.М., Севостьянов А.В., Солдатов К.И.</i> Разработка лабораторного стенда по исследованию динамики летательных аппаратов	174
<i>Быков А.И., Лапиков А.Л.</i> Решение прямой позиционной задачи для промышленного робота Бриг–10Б	178
СЕКЦИЯ 6. ЭКОЛОГИЯ И БЕЗОПАСНОСТЬ	183
<i>Власенкова Е.В., Логинова А.Ю., Никулина С.Н.</i> Анализ содержания фосфатов в реках Калужской области.....	184
<i>Никулина С.Н., Дыхно Я.Н., Куликова И.И., Санютина Я.А.</i> Механизм воздействия когерентного излучения на различные загрязнители водных сред	189
<i>Максимов В.В., Матеров А.А., Мирзоев Э.Э.</i> Определение выхода меди и состава осадка при каталитическом восстановлении сульфатно-хлоридных растворов меди(II)	196
<i>Логинова А.Ю., Мишина Е.А., Силаева Н.А., Власенкова Е.В.</i> Роль активных форм кислорода в процессах самоочищения природных водных экосистем.....	200
<i>Матеров А.А., Гришакова В.В.</i> Анализ системы мониторинга за состояние атмосферного воздуха в городах и населенных пунктах	209
<i>Христофорова М.И., Гришакова В.В., Никулина С.Н.</i> Водоподготовка на Северном водозаборе	212
<i>Кусачева С.А., Лисенко А.И., Морозенко М.И.</i> Исследование влияния антропогенной нагрузки на состояние экосистемы леса.....	215
<i>Никулина С.Н., Дыхно Я.Н., Куликова И.И., Санютина Я.А.</i> Некоторые аспекты очистки подземных природных вод г. Калуги от биологического загрязнения и нефтепродуктов	217
<i>Корабельникова Ю.В., Гришакова В.В.</i> Общие сведения о Муниципальном Унитарном Предприятии "Полигон ТБО"	220
<i>Смельцов М.А., Маркелова Н.П., Челенко А.В.</i> Один из аспектов повышения технико-экономической эффективности вспомогательных цехов предприятия радиоэлектроники.....	223
<i>Николаева Т.С.</i> Одно из направлений совершенствования техники очистки сточных вод.....	226

<i>Шемель И.Г.</i> Основы RGB –моделирования процессов структурообразования в золях.....	231
<i>Останин А.Н., Шемель И.Г.</i> Особенности аналитического определения содержания никеля в присутствии железа	236
<i>Котосова Я.В., Гришакова В.В.</i> Очистка сточных вод предприятия ООО «ПСМА Рус».....	239
<i>Жукова Ю.М., Коржавый А.П., Никулина С.Н.</i> Проблемы реализации в практику безреагентных способов очистки загрязненных вод.....	241
<i>Кусачева С.А., Матеров А.А., Мирзоев Э.Э.</i> Разработка комплексной ресурсосберегающей технологии утилизации отходов органического происхождения для агропромышленного сектора	245
<i>Бычков Н.А., Семёнова Е.И., Горбачева М.С.</i> Экологическая наука Калужского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана через призму реформ образовательной и научной деятельности в РФ	249
СЕКЦИЯ 7. ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ.....	254
<i>Пономарев А.И., Садковский Б.П., Шинкоренко Е.А.</i> Исследование различных видов пневматических подвесок автомобилей	255
<i>Алакин В.М., Пономарев А.И., Садковский Б.П., Зубина В.А.</i> Обзор конструкций и применения пневматических подвесок на грузовых автомобилях	258
<i>Алакин В.М., Плахов С.А., Никитин Г.С.</i> Обоснование угловой скорости вращения рабочих органов роторного картофелекопателя	260
<i>Алакин В.М., Королев А.С.</i> Описание работы системы полного привода, подключаемого автоматически.....	263
<i>Алакин В.М., Ерохин С.С.</i> Определение величины догрузки МЭС при агрегатировании плуга.....	266
<i>Голубина С.А.</i> Перспективы упрочнения отвалов плугов.....	269
<i>Алакин В.М., Латыпов Э.</i> Проект модернизации серийного двигателя ЗМЗ-405.....	272
<i>Масюк В.М., Сакович О.В., Керимов С.С.</i> Разработка бортового компьютера диагностики двигателя с противоугонной функцией	274

СЕКЦИЯ 8.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ.....

279

Захаров В.Ю., Чернова Т.Г., Белов А.А.

Анализ характера корней многопараметрического дисперсионного уравнения для анизотропной плазмы.....

280

Рамазанов А.К.

Аппроксимация функций простейшими дробями в интегральных метриках

284

Дубинина М.С., Крестя В.И.

Влияние нелокальности ионизации атомов газа электронами на распределение электрического поля в катодном слое тлеющего разряда

286

Степанов С.Е.

Использование вейвлет - анализа в задачах классификации одномерных сигналов

290

Горошко М.А.

Использование вейвлетов при предварительной обработке спектров рассеяния нейтронов на вольфраме.....

292

Савкин Л.В., Новичков В.М., Шишаков А.Е.

Многоуровневая реконфигурация моделей диагностических систем как средство повышения гибкости алгоритмов диагностики и контроля бортовых систем космических аппаратов

296

Йе Наинг Тун, Крестя В.И.

Моделирование распыления поверхности электрода с диэлектрической пленкой переменной толщины

300

Гущина Л.Г.

О единственности восстановления плотностного разреза для одной модели земной коры по поверхностным волнам Лява с привлечением данных глубинного сейсмического зондирования

305

Обрубов Ю.В., Влайков Н.Д.

Поиск астероидов, родственных Апофису, по уравнению регрессии эволюции элементов орбит

310

Беляев В.А.

Полное описание структуры множества сходимости равномерно ограниченной последовательности полиномов на компакте не разбивающего комплексной плоскости

314

Семененко М.Г.

Разработка приложений нечеткой логики для оценки случайных событий в технических системах

316

СОДЕРЖАНИЕ

319

**НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ
В ПРИБОРО - И МАШИНОСТРОЕНИИ
И РАЗВИТИЕ ИННОВАЦИОННОЙ
ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В ВУЗЕ**

**Материалы
Всероссийской научно-технической конференции**

Том 2

Научное издание

Все работы публикуются в авторской редакции. Авторы несут ответственность за подбор и точность приведенных фактов, цитат, статистических данных и прочих сведений

Подписано в печать 17.11.2014.

Формат 60х90/16. Печать офсетная. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».

Печ. л. 20,25. Усл. п. л. 18,83. Тираж 60 экз. Заказ № 147

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
107005, Москва, 2-я Бауманская, 5

Оригинал-макет подготовлен и отпечатан в Редакционно-издательском отделе
КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана
248000, г. Калуга, ул. Баженова, 2, тел. 57-31-87