



UDC 621.865.8: 681.513.2

# КООРДИНИРУЮЩАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРИВОДАМИ РОБОТА-МАНИПУЛЯТОРА

А.А. Гурский<sup>1</sup>, А.Е. Гончаренко<sup>2</sup>, С.М. Дубна<sup>3</sup><sup>1, 2, 3</sup>Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса<sup>1</sup>ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5158-2125>E-mail: <sup>1</sup>Gurskiy.kholod.automatic@mail.ru

Copyright © 2014 by author and the journal “Automation technological and business - processes”.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

*Аннотация:* В статье рассматривается система управления, обеспечивающая движение схвата робота-манипулятора по заданной траектории. Данная система управления функционирует в соответствии с принципом координации – согласования переходных процессов в контурах регулирования. Представлен обзор современных достижений в соответствующей области. Поставлена цель работы – повышение динамической точности системы управления, обеспечивающей движение схвата манипуляционного робота по заданной траектории. Для достижения поставленной цели необходимо было разработать модель системы управления приводами робота-манипулятора с координирующим уровнем, а также для сравнительного анализа результатов моделирования необходимо было разработать соответствующую модель программной САУ. Таким образом, в настоящей работе представлена, разработанная в среде MATLAB\Simulink, модель программной САУ с динамически несвязанными контурами регулирования, а также модель системы координирующего управления. В данной координирующей системе присутствует динамическая связность контуров регулирования посредством координирующих связей, благодаря которым снижается, по сравнению с традиционной программной САУ, ошибка слежения при отработке заданной траектории движения схвата. В работе представлен двухуровневый закон координирующего управления. Отражены результаты моделирования различных систем управления. На основании результатов моделирования делается вывод о целесообразности применения системы координирующего управления приводами робота-манипулятора при необходимости быстрого движения схвата по заданной траектории.

*Abstract:* The control system providing the movement of the gripper of the robot manipulator along the predetermined trajectory is considered in this article. This control system is coordinated. The system provides a concerted change of the control variables under the dynamic modes. The review of modern achievements in corresponding field is presented. The purpose of scientific work is dynamic accuracy increase of the control system providing the movement of the gripper of the robot manipulator along the predetermined trajectory. The model of the control system providing the dynamic link of the control loops are presented in this paper. In this control system the dynamic link of the control loops is realized with the aid of the coordinating links. The designed model of the control system by drivers of the robot manipulator is required for methods of synthesis development of the coordinating complex systems. For comparative analysis we have presented the model of the program control system which has no dynamic link between the control loops. These models are realized in the MATLAB\Simulink program. The coordinating control law of the robot manipulator drives is shown in this paper. The simulation results of various control systems are presented. We have presented the schedules of transition process. They have shown the positional change of the robot gripper in time. On the basis of the simulation results we have confirmed the efficiency of the coordinating control system use for the control drivers of the robot manipulator during the rapid movement along the predetermined trajectory. We have confirmed that for improving the accuracy of the predetermined trajectory fulfillment is required to realize the parametric synthesis of control system considering the discrepancy ratio of the control variables minimization.

**Ключевые слова:** Координирующее управление, манипуляционный робот, движение по заданной траектории.

## Введение

Координация – согласование процессов в различных динамических системах – вид управления, который имеет давнюю историю развития [1]. В настоящее время достаточный научный интерес к координирующим системам проявляется в классе технологических задач координирующего управления. К таким задачам можно отнести:



регулирование соотношения топливо-воздух в теплоэнергетических установках, автоматическое регулирование соотношения между уровнем воды и температурой в термосмешивающих установках [2, 3], регулирование производительности холодильного центробежного компрессора с учетом обеспечения оптимального соотношения параметров турбоустановки [4 – 5] и тд.

Существуют также траекторные задачи координирующего управления, к которым можно отнести: программное управление перемещением исполнительных органов станков с ЧПУ при обработке деталей, пространственное ориентирование механических систем, управление движением объекта в пространстве по траектории, и тд [1,6].

Траекторная задача координирующего управления может быть более сложной в связи с тем, что координационное целевое многообразие, которое определяет координирующие связи в системе, представляется сложной нелинейной зависимостью и в результате координирующая система является нелинейной. В частности, при синтезе системы координирующего управления (СКУ) холодильной установкой возникла задача регулирования соотношения параметров, изменяющегося при различных режимах функционирования. Так появилась работа [7], посвященная управлению движением по многообразию, определяемому нелинейной зависимостью в пространстве переменных  $X$  и  $Y$ . Данная работа [7] относится к классу траекторных задач координирующего управления, связанных с обеспечением движения объекта по заданной нелинейной траектории и является развитием исследований Бойчука Л.М., Мирошника И.В., Цыбулькина Г.А. в направлении реализации движения по нелинейному многообразию в пространстве переменных [1, 8 – 12]. В настоящее время область исследований в данном направлении должна охватить работы, связанные с определением особенностей синтеза сложных нелинейных координирующих систем, обеспечивающих движение объекта по траектории, а также особенности наилучшей структуры координирующей системы при реализации программного управления, особенности срыва с многообразия при выходе из области устойчивости системы и тд.

Настоящая работа является определенным шагом в развитии методов синтеза сложных нелинейных координирующих систем управления. В качестве примера применения данных нелинейных СКУ рассмотрена задача обеспечения движения схвата робота по заданной траектории. Таким образом, в работе выполняется синтез координирующей системы управления приводами промышленного робота-манипулятора.

При таких работах, как сварка, окраска и автоматическая резка, непрерывность движения по траектории с определенной скоростью достаточно важна. При этом необходимо, чтобы ошибка слежения – разница между планируемой траекторией и действительной траекторией была бы минимально возможной. Следовательно, разработка координирующей системы управления, обеспечивающей наименьшую ошибку слежения по сравнению с аналогичной программной системой управления, является актуальной. А также соответственно актуальной является работа, связанная с развитием методов синтеза нелинейных координирующих систем, обеспечивающих движение объекта по заданной нелинейной траектории.

Известно [13], что для обеспечения быстрого скоординированного движения схвата необходимо регулировать скорости движения по различным координатам. В данном случае алгоритм управления должен обеспечивать пропорциональное изменение скоростей движения схвата по различным координатам таким образом, чтобы все приводы начинали и заканчивали движение одновременно в моменты  $t_0$  и  $t_1$ . Необходимость управления движением робота с учетом динамического взаимовлияния между его звеньями обосновывалась [13].

В настоящее время существует множество работ, связанных с повышением точности отработки роботом движения по заданной траектории [11, 12, 14 – 20]. Наибольшее количество данных работ связано с применением интеллектуальных технологий управления – нечеткой логики и искусственных нейронных сетей [14 – 17]. Однако, следует отметить, что применение в данных случаях динамически несвязанных контуров регулирования положения схвата робота создает дополнительную задачу. Задача заключается в том, что для обеспечения быстрого скоординированного движения исполнительных органов манипулятора необходимо выполнить параметрический синтез САУ как оптимально связанной системы [21]. Следовательно, в настоящей работе обосновывается необходимость динамической связности каналов регулирования с помощью координирующих связей, которые обеспечивают оптимальную связность контуров регулирования для повышения точности отработки роботом заданной траектории.

### **Цель и задача настоящей работы**

Цель настоящей работы – повышение динамической точности системы управления, обеспечивающей движение схвата манипуляционного робота по заданной траектории.

Для достижения поставленной цели необходимо разработать модель системы управления приводами робота-манипулятора с координирующим уровнем управления, а также, для сравнительного анализа результатов моделирования, необходимо разработать модель соответствующей программной САУ, обеспечивающей движение схвата манипуляционного робота по заданной траектории.

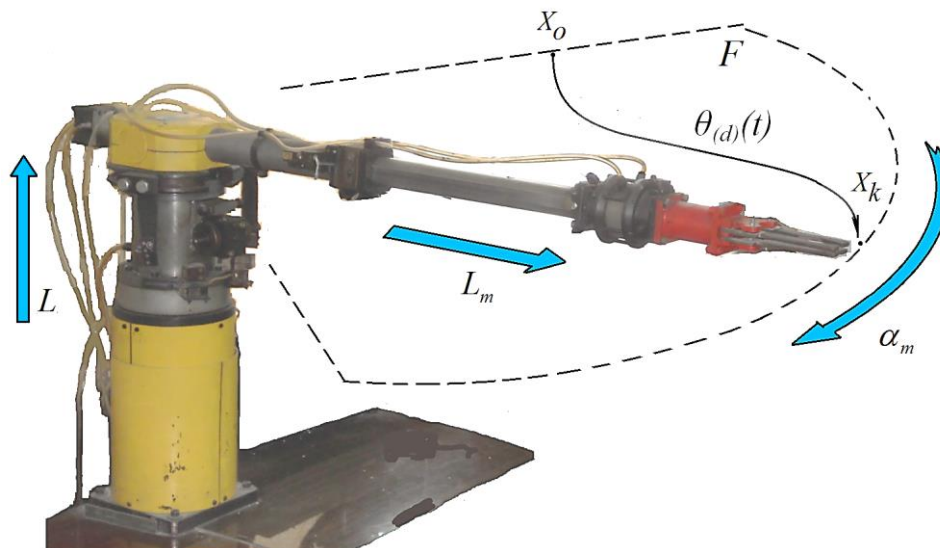
### **Особенности разработанной системы**

В основе выступает объект управления – манипуляционный промышленный робот, работающий в цилиндрической системе координат. Такой промышленный робот с пневматическими приводными системами установлен в лаборатории института механики, автоматизации и робототехники им. П.Н. Платонова Одесской национальной академии пищевых технологий (рисунки 1).



Динамические характеристики приводов промышленного робота получить в процессе его функционирования несложно, однако, следует учесть некоторую особенность. Пневматические приводные системы используются в основном при цикловых системах функционирования, а реализация управления положением и скоростью движения схвата робота является сложной задачей из-за сжимаемости воздуха. Таким образом, для обеспечения движения схвата робота по желаемой траектории больше всего подойдут электромеханические приводы. Данные приводы способны обеспечить движение объекта по заданной траектории в горизонтальной плоскости  $F$  (рисунок 1). При этом также необходимо выполнить синтез программной САУ. Данная система управления в настоящем случае представляет собой задатчик планируемой траектории движения и динамически несвязанные контуры регулирования угла поворота и положения манипулятора. В контуры регулирования включены ПД регуляторы, так как объекты являются астатическими и в упрощенном варианте описываются передаточными функциями:  $W(P) = 1/(J \cdot p)$ , где  $J$  – момент инерции привода. Очевидно, и установлено в результате моделирования, что увеличение скорости движения схвата по заданной траектории влечет за собой увеличение ошибки слежения.

Для уменьшения ошибки слежения и обеспечения координированного движения исполнительных органов манипулятора необходимо учитывать, при параметрическом синтезе САУ, не только интегралы ошибок регулирования по различным каналам, но и отклонения от заданной траектории движения, представленные в настоящей работе в виде невязок соотношений параметров. Минимизацию невязок соотношений параметров можно обеспечить за счет введения дополнительных координирующих связей в программную САУ, тем самым преобразуя ее в координирующую систему, или за счет определенной настройки динамически несвязанных контуров регулирования.



$\theta_{(d)}(t)$  – траектория движения схвата при электромеханических приводных системах

**Рис. 1 – Общий вид манипуляционного робота, работающего в цилиндрической системе координат,  $L_m$  и  $\alpha_m$  – положение и угол поворота манипулятора в плоскости  $F$**

В настоящей работе была разработана модель программной САУ с координирующими связями, которая представляется как двухуровневая координирующая система. Первый уровень такой системы – координирующий, он преобразует исходное динамически несвязанное управление во взаимосвязанное. Второй уровень – ведущий, обеспечивающий движение по заданной траектории  $\theta_{(d)}(t)$ . Были рассмотрены различные структуры систем координирующего управления, структурная схема модели наиболее подходящей системы для программного управления представлена средствами среды MATLAB/Simulink на рисунке 2. Следует отметить, что присутствие нелинейного звена НЗ в данной системе повысит сложность параметрического синтеза, так как система в данном случае будет вести себя как нелинейная. Параллельно с координирующей системой управления, для сравнительного анализа функционирования, была разработана модель программной САУ с динамически несвязанными контурами регулирования, в которых применены те же значения параметров настроек регуляторов, что и во 2-м уровне координирующей системы.

Закон управления системы

Двухуровневый закон управления координирующей системы, структурная схема которой представлена на рисунке 2, имеет следующий вид:

$$\bar{u} = \bar{u}_q + \alpha_\kappa \cdot \bar{u}_p = \begin{bmatrix} u_{1L_m} & u_{2\alpha_m} \end{bmatrix}^T,$$

где  $\bar{u}_q$  – стабилизирующий вектор управления, обуславливающий движение к целевому многообразию, определяемому соотношениями между углом поворота  $\alpha_m$  и положением  $L_m$ .



$\bar{u}_p$  – варьирующий вектор, обуславливающий движение по целевому многообразию;

$\alpha_k$  – коэффициент веса второго уровня – параметр, определяющий структурно-временную соподчиненность процесса (режим разделения движения – первоначальное движение к целевому многообразию регулируемого соотношения, а затем по нему).

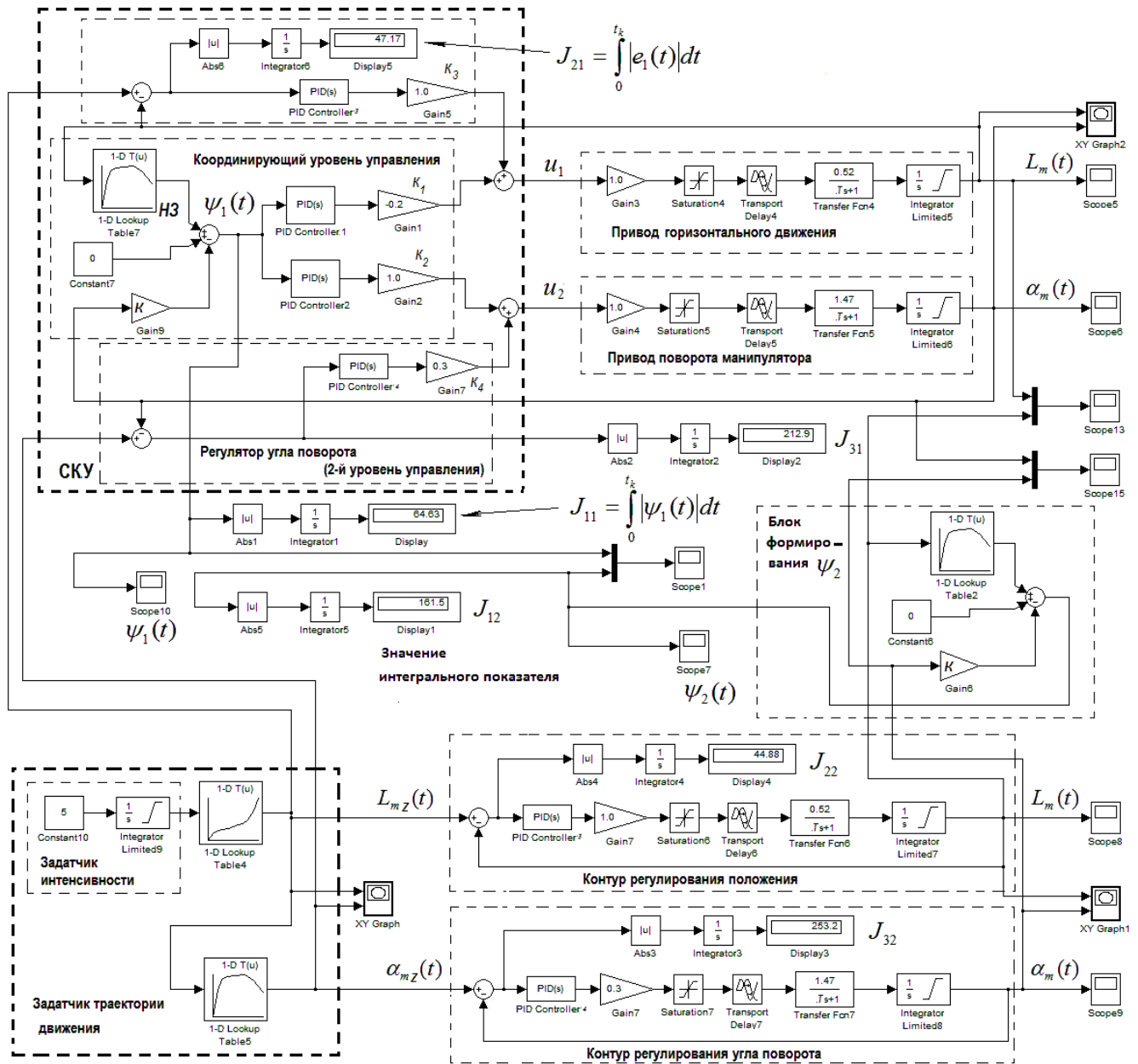


Рис. 2 – Структурные схемы моделей систем управления приводами манипуляционного робота, реализованных в среде MATLAB/Simulink

Закон управления первого уровня взаимосвязанный (координирующий), он связан с обработкой невязок соотношений. Закон управления первого уровня можно представить в следующем виде:

$$\bar{u}_q = Q \cdot \psi = Q \cdot A^T \cdot \bar{X} = H \cdot \bar{X},$$

где  $\psi = A^T \cdot \bar{X} - b = f(L_m) \cdot L_m(t) + k \cdot \alpha_m(t) - b$  – невязка по соотношению параметров;

$b$  – свободный член;



$H = Q \cdot A^T$  – матрица преобразования управления, для рассматриваемой системы

$$H = \begin{bmatrix} k_1 \cdot (1+P) \cdot f(L_m) & k_1 \cdot (1+P) \\ k_2 \cdot (1+P) \cdot f(L_m) & k_2 \cdot (1+P) \end{bmatrix};$$

$k_1 = -0,2$ ;  $k_2 = 0,8$ ;  $P$  – оператор дифференцирования;

$f(L_m)$  – нелинейная зависимость, отраженная в системе в виде звена НЗ (рисунок 2), описывающая траекторию движения схвата в координатах  $L_m - \alpha_m$ ;

$Q = [q_1 \quad q_2]^T$  – матрица параметров координирующего уровня, определяющего стабилизирующий вектор управления, обуславливающий движение к целевому многообразию;

$A^T = [a_1 \quad a_2]$  – матрица коэффициентов, определяющих регулируемое соотношение;

$X = [L_m(t) \quad \alpha_m(t)]^T$  – вектор регулируемых параметров;

Закон 2-го уровня управления, необходимый для отработки ошибок регулирования, в нашем случае следующий:

$$\begin{aligned} \bar{u}_p &= \begin{bmatrix} \langle 2 \rangle u_1 & \langle 2 \rangle u_2 \end{bmatrix}^T, \\ \langle 1 \rangle u_2 &= (k_{31} + k_{32} \cdot p) \cdot (L_{mz}(t) - L_m(t)), \\ \langle 2 \rangle u_2 &= (k_{41} + k_{42} \cdot p) \cdot (\alpha_{m.z}(t) - \alpha_m(t)); \end{aligned}$$

где  $k_{31}$ ,  $k_{32}$ ,  $k_{41}$ ,  $k_{42}$  – параметры настройки ПД-регуляторов;

$\alpha_{m.z}(t)$ ,  $L_{m.z}(t)$  – задающие воздействия по углу поворота и положению манипулятора в плоскости F;

T – знак транспонирования.

#### Анализ результатов моделирования

В результате моделирования были получены графики переходных процессов по углу поворота  $\alpha_m$  и положению  $L_m$  манипулятора и по невязкам  $\psi$  регулируемых соотношений при различных заданных траекториях движения. Из графиков, представленных на рисунке 3 видно, что координирующая система существенно более эффективно отрабатывает невязки соотношений между  $\alpha_m$  и  $L_m$  чем аналогичная программная САУ, при этом кривые переходных процессов по углу поворота  $\alpha_m$  и положению  $L_m$  манипулятора несущественно различны при разных системах управления. В этом можно убедиться при сравнении значений интегральных показателей качества работы систем, полученных в среде Simulink и представленных в таблице 1 [22].

Табл. 1 – Значения интегральных показателей качества работы различных САУ

Показатели:	$J = \int_0^{t_k}  \psi(t)  dt$	$J = \int_0^{t_k}  (\alpha_{m.z}(t) - \alpha_m(t))  dt$	$J = \int_0^{t_k}  (L_{m.z}(t) - L_m(t))  dt$
Системы:			
Координирующая САУ	64,63	47,17	212,9
Программная САУ	161,5	44,88	253,2

Из таблицы 1 видно, что при координирующей системе существенное улучшение качества регулирования по соотношению между  $\alpha_m$  и  $L_m$  (снижение значения интеграла невязки  $\psi$ ) привело к незначительному ухудшению качества регулирования по углу поворота  $\alpha_m$  манипулятора и к улучшению качества регулирования по положению  $L_m$  по сравнению с программной САУ с динамически несвязанными каналами регулирования.

Для оценки принципиальной пригодности исследуемой координирующей системы было рассмотрено ее функционирование при двух заданных траекториях движения схвата, представленных в координатах  $\alpha_m - L_m$  на рисунке 4. Соответственно на рисунке 3а представлены переходные процессы при движении системы по траектории  $\theta_{(d1)}(t)$ , а на рисунке 3б по траектории  $\theta_{(d2)}(t)$ , при этом параметры настройки системы не изменялись.

Из рисунка 4 видно, что мгновенные фактические значения положения схвата робота, при разных САУ, в некоторых случаях существенно отличаются от заданных значений положения, при этом существенное различие между заданным и фактическим значениями положения присутствует при традиционной программной САУ с динамически несвязанными каналами регулирования. Для сравнительного анализа мгновенные фактические и заданные значения положения схвата робота при различных САУ сведены в таблицу 2.

Необходимо отметить, что достаточно высокая относительная погрешность данных приведенных в таблице 2 ( $\gamma_{СКУ} = 15,38\%$  и  $\gamma_{САУ} = 46,15\%$ ) вызвана тем, что начальное положение схвата робота не расположено на заданной траектории движения. В остальных случаях относительная погрешность данных при СКУ не превышает 4 % в отличии от САУ с динамически несвязанными каналами регулирования.

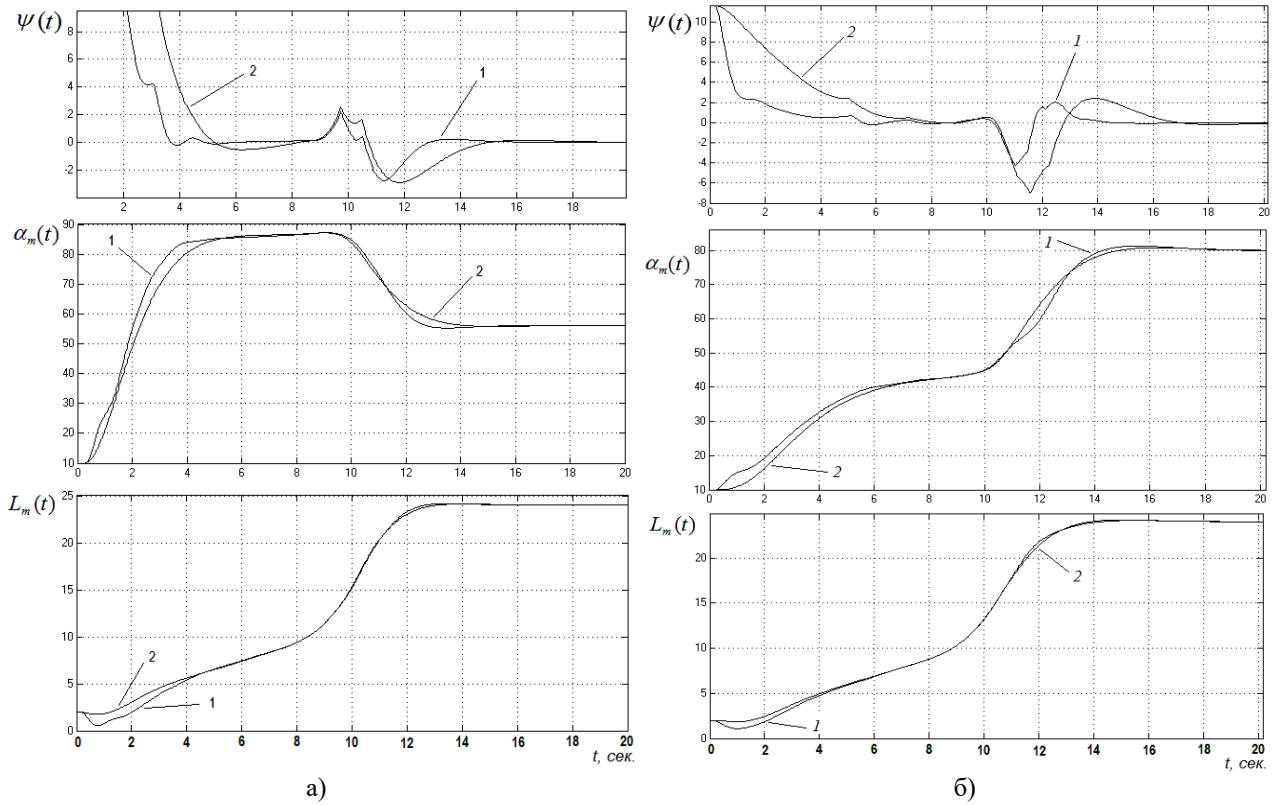


Рис. 3 – Графики переходных процессов по невязкам регулируемых соотношений  $\psi$ , по углу поворота  $\alpha_m$  и по положению  $L_m$  манипулятора в плоскости F при координирующей САУ (кривые 1) и при программной САУ (кривые 2)

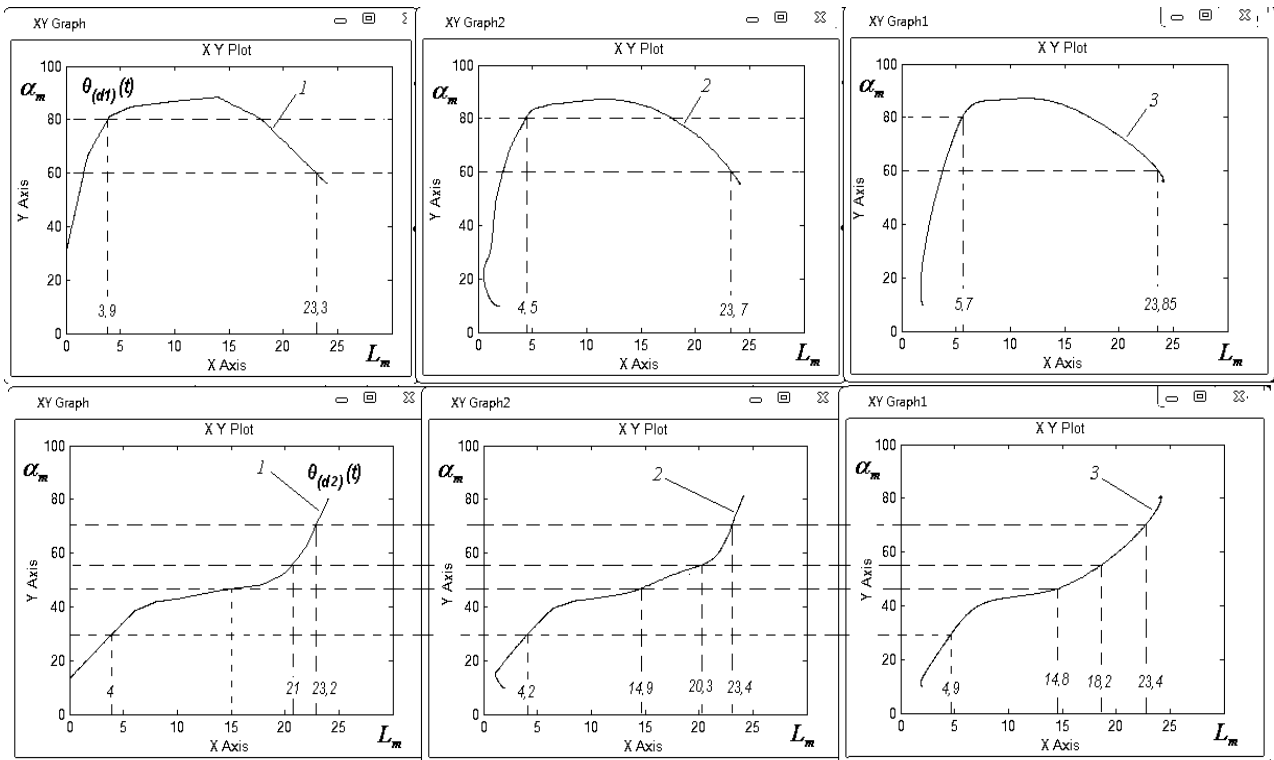


Рис. 4 – Траектории движения системы в плоскости координат: угол поворота  $\alpha_m$  – положение  $L_m$ , кривая 1 – заданная траектория движения; кривые 2 и 3 – фактические траектории при координирующей системе управления и при программной САУ с динамически несвязанными контурами регулирования



**Табл. 2 – Мгновенные фактические и заданные  $L_{m.z}(t)$  значения положения схвата робота-манипулятора,  $L_{m.СКУ}(t)$  – фактическое значение положения схвата при координирующей системе управления;  $L_{m.САУ}(t)$  – фактическое значение положения схвата при САУ с динамически несвязанными контурами регулирования;  $\gamma_{СКУ}, \%$  – относительная погрешность данных полученных при координирующей системе управления;  $\gamma_{САУ}, \%$  – относительная погрешность данных при САУ с динамически несвязанными контурами регулирования**

Траектория	$L_{m.z}(t)$	$L_{m.СКУ}(t)$	$L_{m.САУ}(t)$	$\gamma_{СКУ}, \%$	$\gamma_{САУ}, \%$
$\theta_{(d1)}(t)$	3,9	4,5	5,7	15,38	46,15
$\theta_{(d1)}(t)$	23,3	23,7	23,85	1,71	2,36
$\theta_{(d2)}(t)$	4	4,2	4,9	5	22,5
$\theta_{(d2)}(t)$	15	14,9	14,8	0,66	1,33
$\theta_{(d2)}(t)$	21	20,3	18,2	3,33	13,3
$\theta_{(d2)}(t)$	23,2	23,4	23,4	0,826	0,826

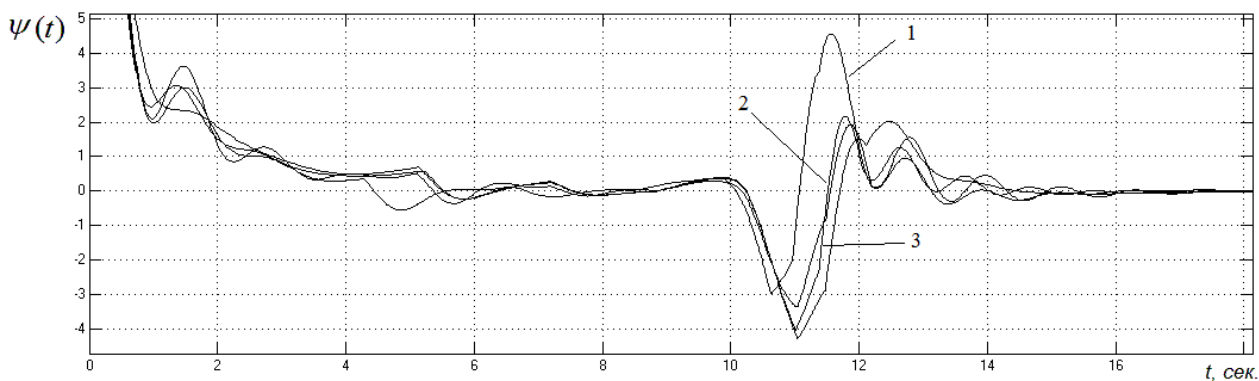
На основе данных, представленных в таблице 2, и на основе результатов моделирования, представленных на рисунке 3, можно сделать вывод, что координирующая система управления приводами робота-манипулятора обеспечивает более высокую точность обработки заданной траектории движения схвата, чем САУ с динамически несвязанными контурами регулирования. Однако, эффективность применения программной САУ с динамически несвязанными контурами регулирования можно повысить путем перенастройки регуляторов с учетом минимизации невязок соотношений параметров. Таким образом, возможно два пути синтеза САУ приводами манипулятора: с учетом ввода координирующих связей в систему управления или с учетом динамической несвязности контуров регулирования (традиционный путь). Следует отметить, что ввод координирующих связей в систему придает ей определенные свойства, отличные от традиционной программной САУ. В этом можно убедиться, рассмотрев результаты параметрического синтеза различных вариантов систем, сведенных в таблицу 3.

**Табл. 3 – Значения интегральных показателей качества работы различных САУ**

Показатели:	$J = \int_0^{t_k}  \psi(t)  dt$	$J = \int_0^{t_k} (\alpha_{m.z}(t) - \alpha_m(t)) dt$	$J = \int_0^{t_k} (L_{m.z}(t) - L_m(t)) dt$
Системы:			
Координирующая САУ	64,63	47,17	212,9
Программная САУ	145,3	47,18	212,9

Из таблицы 3 видно, что значения интегралов ошибок регулирования при различных системах управления, одинаковые, однако значения интегралов невязок соотношений параметров различны. При координирующей системе управления значение интегрального показателя по невязке соотношения параметров существенно меньше, чем при программной САУ с динамически несвязанными контурами регулирования.

Вышеприведенные результаты моделирования не являются достаточной основой для вывода о работоспособности координирующей системы управления приводами манипулятора, поэтому необходимо провести дополнительные эксперименты, связанные с оценкой чувствительности системы к изменению ее параметров. В результате проведения данных экспериментов было получено семейство графиков переходных процессов, представленных на рисунках 5 и 6. Наиболее важная работа в данном направлении связана с проверкой работы системы координирующего управления на робастность, при условии изменения параметров объекта управления на 40% (кривая 1 на рисунке 5).

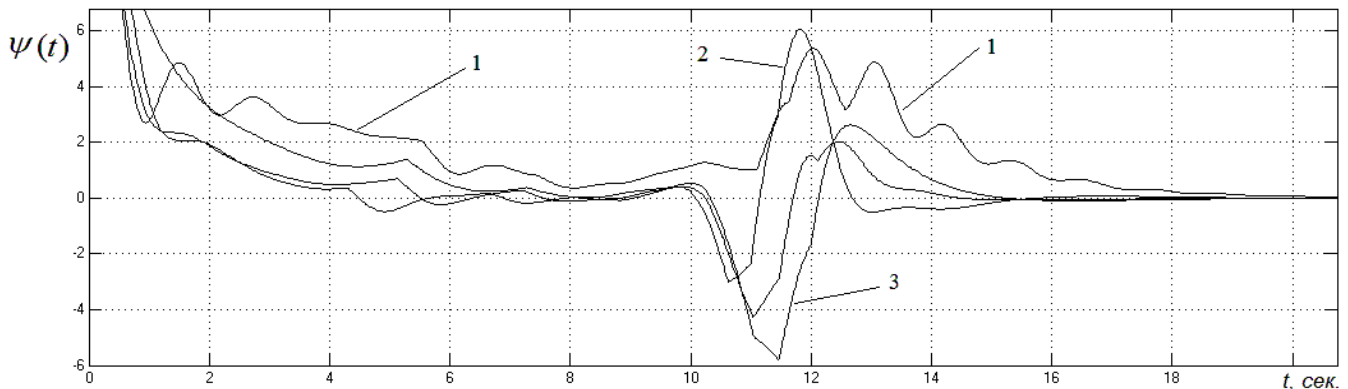


кривая 1 – при увеличенном параметра объекта управления на 40%; кривая 2 – при увеличенном параметре  $k_2$  на 30 %; кривая 3 – при увеличенном параметре  $k_1$  координирующего уровня управления на 40 %

**Рис. 5 – Графики переходных процессов по невязкам регулируемых соотношений  $\psi$**



Также на рисунках 5 и 6 представлены графики переходных процессов при изменении на 30% и на 40% отдельных параметров настроек 1-го (координирующего) уровня управления и при разрыве отдельных координирующих связей в системе ( $k_1 = 0$  или  $k_2 = 0$ ). Как видно из рисунков 5 и 6, система не потеряла устойчивость при существенном изменении ее параметров, только лишь ухудшилось в разной степени качество регулирования соотношения между  $\alpha_m$  и  $L_m$ .



кривая 1 – при увеличенном параметре  $k_2$  на 40% и при отсутствии контура регулирования угла поворота  $\alpha_m$ ;  
кривая 2 – параметр настройки координирующего уровня управления  $k_1 = 0$  (разрыв координирующей связи); кривая 3  
– параметр настройки координирующего уровня управления  $k_2 = 0$

**Рис. 6 – Графики переходных процессов по невязкам регулируемых соотношений  $\psi$**

Достаточно интересный результат приведен на рисунке 6 (кривая 1) – график переходного процесса при увеличенном параметре  $k_2$  на 40% и при отсутствии контура регулирования угла поворота  $\alpha_m$ . В данном случае система управления стремится отработать ошибку регулирования по положению робота манипулятора  $L_m$  и отклонение от соотношения между  $\alpha_m$  и  $L_m$ . Это является достаточным условием для достижения заданных конечных значений угла поворота  $\alpha_{m,z}$  и положения  $L_{m,z}$  манипулятора, несмотря на то, что отсутствует контур регулирования угла поворота  $\alpha_m$ . Однако, по качеству регулирования данная система, известная по принципу регулирования по ведущей координате [1], уступает системе, в которой присутствуют регуляторы, обрабатывающие ошибки регулирования по  $\alpha_m$  и по  $L_m$  и отклонение от соотношения между  $\alpha_m$  и  $L_m$ .

В достаточно крайнем случае, когда в СКУ одновременно отсутствует контур регулирования  $\alpha_m$  и разорвана определенная координирующая связь, как показано на рисунке 7, то система также не потеряет устойчивость.

Заданная траектория движения схвата при системе, представленной на рисунке 7, также будет отработана, но с меньшей точностью по сравнению с аналогичной координирующей системой управления, в которой отсутствует разрыв координирующей связи. При этом фактическая траектория движения схвата робота визуально существенно не будет отличаться от заданной (рисунок 7), однако ошибка слежения, возможно будет неудовлетворительна при выполнении определенных работ манипулятором.

#### Выводы

В настоящей работе был выполнен синтез координирующей системы управления приводами промышленного робота, а также был выполнен синтез программной САУ с динамически несвязанными контурами регулирования положения исполнительных органов манипулятора. На основании результатов синтеза и моделирования систем управления в среде MATLAB\Simulink можно сделать следующие выводы:

1. Для координированного движения исполнительных органов манипулятора необходимо рассматривать САУ приводов робота как оптимально связанную целостную систему.
2. Для повышения точности отработки заданной траектории движения схвата робота-манипулятора необходимо параметрический синтез программной САУ выполнять с учетом минимизации невязок соотношений параметров.
3. Введение координирующих связей по невязкам соотношений параметров в программную САУ с динамически несвязанными контурами регулирования преобразует ее в двухуровневую координирующую систему управления. Данная координирующая система управления позволяет минимизировать более чем в два раза значение интегрального показателя качества работы системы, отражающего точность отработки заданной траектории движения схвата робота-манипулятора. Таким образом, СКУ позволяет существенно снизить ошибку слежения по сравнению с программной САУ с динамически несвязанными контурами регулирования.
4. Разрыв отдельных связей в СКУ, в том числе координирующих, ухудшит качество регулирования, однако не приведет систему к потере устойчивости, это свидетельствует о повышенной «живучести» системы [23] и низкой чувствительности к изменению ее параметров.



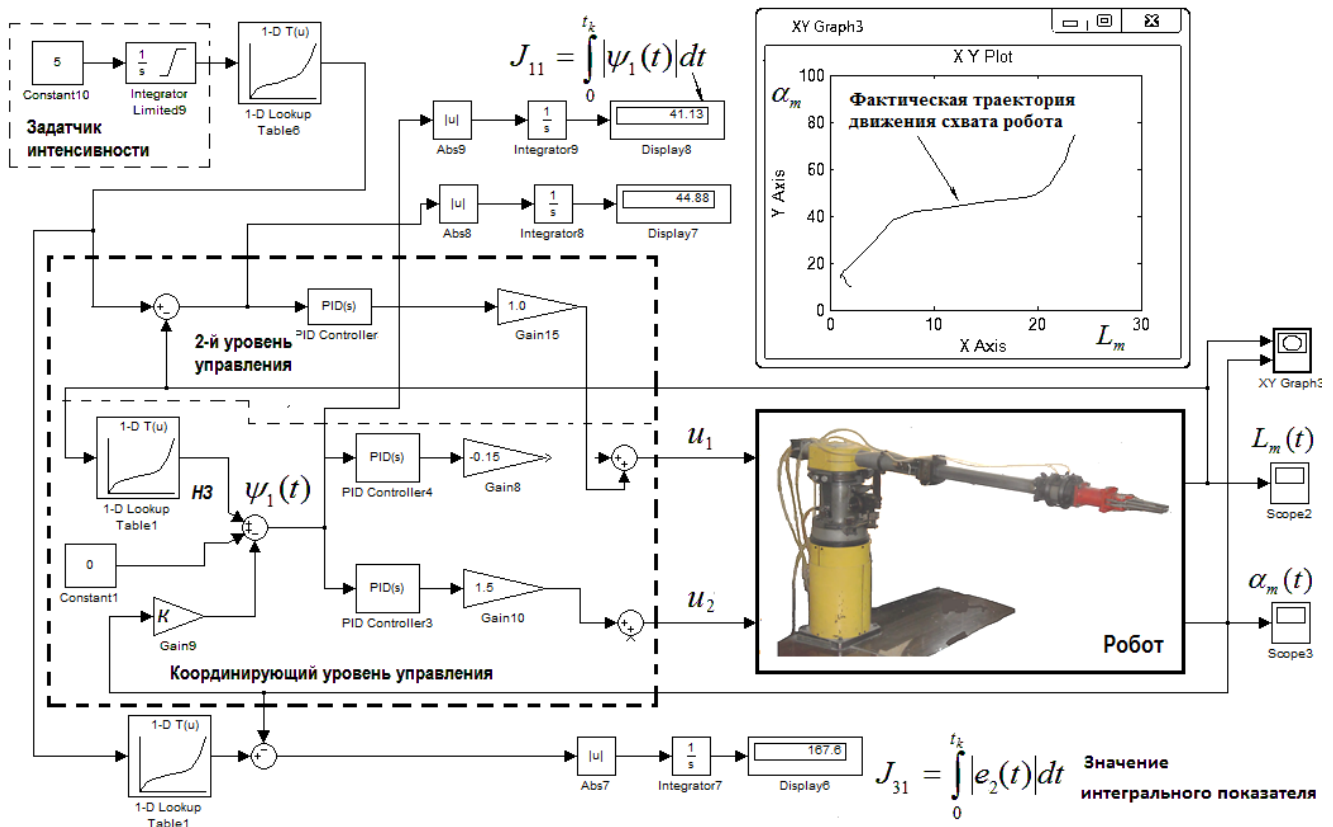


Рис. 7 – Структурная схема САУ с отсутствующим контуром регулирования  $\alpha_m$  и с разорванной определенной координирующей связью

#### Литература:

- [1] Л. М. Бойчук, *Синтез координирующих систем автоматического управления*, М: Энергоатомиздат, 1991.
- [2] В. Д. Романенко і Ю.Л. Мілявський “Розробка алгоритму координуючого керування для термозмішувальної установки при дії зовнішнього збурення”, *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*, vol. ?, no. 1, – сс. 84–89, 2011.
- [3] Ю.Л. Мілявський, “Розробка і дослідження системи координуючого цифрового керування хімічним реактором ідеального перемішування” в *Системний аналіз та інформаційні технології: матеріали 14-ї Міжнародної науково-технічної конференції SAIT 2012*, Київ, Україна, Квітень 24, 2012, Ю.Л. Мілявський, К.: ННК "ПСА" НТУУ "КПІ", 2012. с. 94;
- [4] А.А. Гурский и др., “Системы автоматического регулирования производительности холодильных центробежных компрессоров” *Холодильная техника и технология*, no. 5 сс. 72–76, month 2013;
- [5] А.А. Гурский и др., “Система управления, обеспечивающая энергоэффективное функционирование холодильной турбокомпрессорной установки,” *Автоматизация технологических и бизнес-процессов*, no. 1, сс. 62-66, месяц 2015;
- [6] А.Б. Филимонов и Н.Б. Филимонов “О проблематике синтеза координирующих систем автоматического управления” *Известия Южного федерального университета. Технические науки*, т. 128, no. 3, сс. 172–180, месяц 2012;
- [7] В.А. Денисенко и А.А. Гурский, “Реализация движения по нелинейным многообразиям,” в *сборник научных трудов ОГАХ: тезисы докладов третьего семинара Информационные системы и технологии*, Одесса, Украина, 11-12 октября, В.А. Денисенко, А.А. Гурский, Одесса: ОГАХ, 2005, pp. 70 - 71;
- [8] Л.М. Бойчук, “Синтез нелинейных двухуровневых систем координирующего управления,” *Автоматика*, т. , no. 5, сс. 86-89, месяц 1982;
- [9] И.В. Мирошник, *Согласованное управление многоканальными системами*, Л.: Энергоатомиздат, 1990;
- [10] Г.А. Цыбулькин, “Координирующее управление движением по двумерному многообразию с перекрестными связями между воспроизводящими системами” *Автоматика*, т. , no. 2, сс. 83–87, месяц 1988;
- [11] Г.А. Цыбулькин, “Двухуровневое координирующее управление манипуляционным роботом с кинематической избыточностью” *Проблемы управления и информатики*, т. , no. 3, сс. 143–150, месяц 1995;
- [12] Г.А. Цыбулькин, *Корректирующее управление траекторным движением*, К.: Сталь, 2012;
- [13] М. Шахинпур, *Курс робототехники*, пер. с англ., М.: Мир, 1990. ISBN 5-03-001375-X;



- [14] Фирас А. Рахим, Структура нечеткой системы для управления роботом-манипулятором в режиме он-лайн в неизвестной среде Fuzzy Logic Structure for On-line Control of Robot Manipulator in Unknown Environment = Структура нечеткой системы для управления роботом-манипулятором в режиме он-лайн в неизвестной среде / А.Г. Булгаков, Фирас А. Рахим // Prospects in Mechanical Engineering. Faculty of Mechanical Engineering: 53th Internationales Wissenschaftliches Kolloquium Technische Universitt Ilmenau, 08 – 12 September 2008. С. 183–184.
- [15] Фирас А. Рахим, *Методы построения интеллектуальных систем планирования и управления перемещением робота-манипулятора в неизвестной среде*: автореферат дис. кандидата тех. наук: 05.02.05, Новочеркасск, 2009;
- [16] В.М. Буянкин, “Двухконтурная система нейроуправления электроприводом с нейросамонастройкой” *Нейрокомпьютеры: разработка и применение*, no. 8–9, сс. 90–94, месяц 2006;
- [17] Z.-H. Jiang and T. Ishita, “A Neural Network Controller for Trajectory Control of Industrial Robot Manipulators,” *Journal of Computers*, vol. 3, no. 8, pp. 107–114, Jan. 2008;
- [18] Mehmet Bodur, “An Adaptive Cross-Entropy Tuning of the PID Control for Robot Manipulators,” *Proceedings of the World Congress on Engineering 2007, WCE 2007* vol. 1, no., pp. 24–131, July 2007;
- [19] Aldo R. Sartorius Castellanos, “Virtual and Remote Laboratory for Robot Manipulator Control Study,” *Int. J. Engng Ed.*, vol. 22, no. 4, pp. 702–710, month 2006;
- [20] А.А. Кобзев и др., “Анализ алгоритмов коррекции программной траектории в устройстве формирования управляющего воздействия для приводов робототехнических систем” *Современные проблемы науки и образования*, no. 6, сс. 51–59, месяц 2014;
- [21] В.Т. Морозовский, *Многосвязные системы автоматического регулирования*. М.: Энергия, 1970;
- [22] С.А. Бобриков, Е.Д. Пичугин, “Оптимальное цифровое управляющее устройство в системе с запаздыванием при заданном коэффициенте усиления” *Электротехнические и компьютерные системы*, no. 10, сс. 68–73, месяц 2013;
- [23] М.З. Згуровский, *Интегрированные системы оптимального управления и проектирования*. К.: Выща шк., 1990.

#### References:

- [1] L.M. Bojchuk, *Sintez koordinirujushhijh sistem avtomaticheskogo upravlenija*, М.: JEnergoatomizdat, 1991;
- [2] V.D. Romanenko and Ju.L. Miljavs'kij “ Rozrobka algoritmu koordinujuchoho keruvannja dlja termozmishuval'noj ustanovki pri dii zovnishn'ogo zburennja,” *Naukovi visti NTUU KPI*, vol. ?, no. 1, – сс. 84–89, 2011;
- [3] Ju.L. Miljavs'kij, “ Rozrobka i doslidzhennja sistemi koordinujuchoho cifrovogo keruvannja himichnim reaktorom ideal'nogo peremishuvannja ” v Sistemnij analiz ta informacijni tehnologii: materiali 14-i Mizhnarodnoj naukovotehnichnoi konferencii, SAIT 2012, Kyiv, Ukraine, April 24, 2012, Ju.L. Miljavs'kij, K.: NNK "IPSA" NTUU "KPI", 2012. с. 94;
- [4] A.A. Gurskij et al., “Sistemy avtomaticheskogo regulirovanija proizvoditel'nosti holodil'nyh centrobeznyh kompressorov,” *Holodil'naja tehnika i tehnologija*, no. 5, pp. 72–76, 72–76, month 2013;
- [5] A.A. Gurskij et al., “Sistema upravlenija, obespechivajushhaja jenergojeffektivnoe funkcionirovanie holodil'noj turbokompressornoj ustanovki,” *Avtomatizacija tehnologicheskijh i biznes-processov*, no. 1, pp. 62–66, month 2015;
- [6] A.B. Filimonov and N.B. Filimonov, “O problematike sinteza koordinirujushhijh sistem avtomaticheskogo upravlenija” *Izvestija JUzhnogo federal'nogo universiteta. Tehnicheskie nauki*, vol. 128, no. 3, pp. 172–180, month 2012;
- [7] V.A. Denisenko and A.A. Gurskij, “Realizacija dvizhenija po nelinejnym mnogoobrazijam,” v *sbornik nauchnyh trudov OGAH: tezisy dokladov tret'ego seminaru Informacionnye sistemy i tehnologii*, Odessa, Ukraine, 11-12 October, V.A. Denisenko, A.A. Gurskij, Одесса: ОГАХ, 2005, pp. 70 - 71;
- [8] L.M. Bojchuk, “ Sintez nelinejnyh dvuhurovnevnyh sistem koordinirujushhego upravlenija ” *Avtomatika*, vol. , no. 5, pp. 86–89, month 1982;
- [9] I.V. Miroshnik, *Soglasovannoe upravlenie mnogokanal'nymi sistemami*, L.: Energoatomizdat, 1990;
- [10] G.A. Cybul'kin, “ Koordinirujushhee upravlenie dvizheniem po dvumernomu mnogoobraziju s perekrestnymi svjazzami mezhdju vosproizvodjashhimi sistemami ” *Avtomatika*, vol. , no. 2, pp. 83–87, month 1988;
- [11] G.A. Cybul'kin, “Dvuhurovnevoe koordinirujushhee upravlenie manipuljacionnym robotom s kinematicheskij izbytochnost'ju,” *Problemy upravlenija i informatiki*, vol. , no. 3, pp. 143–150, month 1995;
- [12] G.A. Cybul'kin, *Korrektirujushhee upravlenie traektornym dvizheniem*, K.: Stal', 2012;
- [13] Shahinpur M. *Kurs robototehniki / M. Shahinpur; per. s angl. – М.: Mir, 1990. – 527 s. – ISBN 5-03-001375-X*
- [14] Firas A. Rahim. Fuzzy Logic Structure for On-line Control of Robot Manipulator in Unknown Environment = Структура нечеткой системы для управления роботом-манипулятором в режиме он-лайн в неизвестной среде / А.Г. Булгаков, Фирас А. Рахим // Prospects in Mechanical Engineering. Faculty of Mechanical Engineering: 53th Internationales Wissenschaftliches Kolloquium Technische Universitt Ilmenau, 08 – 12 September 2008. S. 183–184.
- [15] Firas A. Rahim, *Metody postroenija intellektual'nyh sistem planirovanija i upravlenija peremeshheniem robota-manipuljatora v neizvestnoj srede*: avtoreferat dis. kandidata teh. nauk: 05.02.05, Novoчеркасск, 2009;



- [16] V.M. Bujankin, “Dvuhkonturnaja sistema nejroupravlenija jelektroprivodom s nejrosamonastrojkoj;” *Nejrokomp'jutery: razrabotka i primenenie*, no. 8–9, pp. 90–94, month 2006;
- [17] Z.-H. Jiang and T. Ishita, “A Neural Network Controller for Trajectory Control of Industrial Robot Manipulators,” *Journal of Computers*, vol. 3, no. 8, pp. 107–114, Jan. 2008;
- [18] Mehmet Bodur, “An Adaptive Cross-Entropy Tuning of the PID Control for Robot Manipulators,” *Proceedings of the World Congress on Engineering 2007, WCE 2007* vol. 1, no., pp. 24–131, July 2007;
- [19] Aldo R. Sartorius Castellanos, “Virtual and Remote Laboratory for Robot Manipulator Control Study,” *Int. J. Engng Ed.*, vol. 22, no. 4, pp. 702–710, month 2006;
- [20] A.A. Kobzev et al., “Analiz algoritmov korrekcii programmnoj traektorii v ustrojstve formirovanija upravljajushhego vozdeystvija dlja privodov robototekhnicheskikh system,” *Sovremennye problemy nauki i obrazovanija*, no. 6, pp. 51-59, month 2014;
- [21] V.T. Morozovskij, *Mnogosvjaznye sistemy avtomaticheskogo regulirovanija*. M.: JEnergy, 1970;
- [22] S.A. Bobrikov and E.D. Pichugin, “Optimal'noe cifrovoe upravljajushhee ustrojstvo v sisteme s zapazdyvaniem pri zadannom koefefficente usilenija,” *Elektrotehnicheskie i komp'juternye sistemy*, no. 10, pp. 68–73, month 2013;
- [23] M.Z. Zgurovskij, *Integrirovannye sistemy optimal'nogo upravlenija i proektirovanija*. K.: Vyshha shk., 1990.

UDC 681.51

## MODEL-ORIENTED METHOD OF DESIGN IMPLEMENTATION WHEN CREATING DIGITAL FILTERS

V. Levinskyi <sup>1</sup>, M. Levinskyi <sup>2</sup><sup>1,2</sup>Odessa National Academy of food technologies, Odessa<sup>2</sup>ORCID: 0000-0002-6544-5110E-mail: <sup>2</sup>MaxLevinskyi@gmail.com

Copyright © 2014 by author and the journal “Automation technological and business - processes”.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

**Abstract:** This article discusses the example of model-oriented method of design and development of digital low-pass filters (LPF) for automatic control systems (ACS). Typically, high frequency noise and disturbance attenuation is carried out by analogue LPF. However, technical implementation of analogue filters higher than the second order arouse certain difficulties related with the need of precise passive components ratings selection (resistors, capacitors). If the noise and disturbances spectral composition is known, it is possible to build digital LPF with the Nyquist frequency greater than the maximum frequency in the noise spectrum. Such possibility has appeared because of cheap, energy-efficient, high-speed 32-bit microcontrollers market entry. They have analogue signals sampling rate of 30 kHz and above. The traditional approach using the “manual” method of filter parameters calculation, obtaining their recurrence expressions and further program implementation requires high qualification and a lot of time consumption from the developer. An alternative to this approach is the model-oriented method of design (MOMD) in MatLab environment when in the one environment the design of digital LPF, verificaton of its performance as a part of the ACS, generation and compilation of program codes for selected microcontroller family take place. MOMD can also be used in the designs of bandpass and bandstop filters for adaptive control systems or systems of technical diagnostics. If during the commissioning or the operation of ACS there is a need in digital LPF parameters change then this operation can be performed within half an hour. MOMD technology allows to significantly reduce the time for developing a specific product without loss of quality in its design ‘cause of extensive possibilities of MatLab development environment.

**Key words:** Model-oriented method, design, development, filtration, automatic control systems, core ARM Cortex M4, STM32F4 discovery.