

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕСТИРУЮЩИХ СИГНАЛОВ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ИНЕРЦИОННЫХ ОБЪЕКТОВ

Парсункин Б.Н., Леднов А.В., Сухоносова Т.Г.

Аннотация. Целью работы является обоснование плана тестирующих воздействий для компенсации неконтролируемых возмущений в условиях печей для нагрева металла перед прокаткой. В работе решается задача формирования входных тестирующих сигнальных воздействий для определения динамических характеристик объекта по его переходной характеристике. В работе для компенсации низкочастотных и случайных возмущений предлагается метод формирования сигнальных идентифицирующих воздействий, на основе системы ортогональных функций Уолша. Неконтролируемые технологические возмущения, действующие на реальных теплоэнергетических объектах, искажают информацию об их динамических параметрах, что приводит к ухудшению качества управления. Причем можно отметить, что характеристики объекта имеют значительную инерционность, а возмущения низкочастотные, характеристики имеют вертикальный и горизонтальный дрейф. Влияние этих возмущений можно значительно уменьшить за счет правильного формирования входных тестирующих сигнальных воздействий. Сигнальные воздействия при идентификации инерционного объекта с запаздыванием проверялась на специальной установке и показала высокую эффективность.

Ключевые слова: функция Уолша, компенсация возмущений динамические характеристики объекта управления, тестирующие воздействия.

SIMULATION TESTING SIGNALS TO IDENTIFY THE INERTIAL CONTROLLED OBJECTS

Parsunkin B.N., Lednov A.V., Sukhonosova T.G.

Abstract. The aim of this work is to study the plan of testing actions to compensate for disturbances in uncontrolled conditions furnaces for heating of metals before rolling. We solve the problem of the formation of the input signal of testing to determine the impact of dynamic characteristics of an object by its characteristic. In this paper, to compensate for the low-frequency and random perturbations offering etsy method of forming the signal identifying the impacts, on the basis of a system of orthogonal Walsh functions. Uncontrolled process disturbance acting on the actual thermal energy objects distort the information on their dynamic parameters, which leads to deterioration of quality control. And it is possible to note the characteristics of Ob-project have considerable inertia, and low-frequency perturbations, the characteristics are the vertical and horizontal drift. The impact of these disturbances can be considerable, but reduced by the proper formation of test input signal influences. Alarm influence in the identification of the inertial object with delay was tested in a special unit and showed high efficiency.

Keywords: Walsh function, dynamic compensation of disturbances characteristics control object, test exposure.

Введение

Неконтролируемые технологические возмущения, искажают информацию об их динамических параметрах, что приводит к ухудшению качества управления. Характеристики теплоэнергетических объектов имеют значительную инерционность, а также подвержены вертикальному и горизонтальному дрейфу вследствие действия низкочастотных возмущений. Влияние этих возмущений можно уменьшить за счет правильного формирования входных тестирующих сигнальных воздействий. При определении динамических характеристик объекта по его переходной характеристике (кривой разгона) на вход подается ступенчатый пробный сигнал. Для компенсации возмущений в работе [1] предлагается одновременное изменение всех входных воздействий по заданному плану эксперимента. В работах [2-5] в качестве решения предлагается вносить во входное воздействие дополнительную периодическую составляющую и затем выделять из выходного сигнала реакцию объекта на нее.

Целью данной работы является обоснование плана тестирующих воздействий для компенсации неконтролируемых возмущений на основе системы ортогональных функций Уолша, являющийся продолжением работ [6-8]. Проверка методики проходила на лабораторном стенде.

Методика выбора идентифицирующих воздействий

Практическое использование метода показано на примере получения переходных характеристик объекта, динамические свойства которого аппроксимируются передаточной функцией вида

$$W(p) = \frac{K_0 e^{-\tau_d p}}{T_0 p + 1}, \quad (1)$$

где K_0 – коэффициент передачи объекта, °С/%; τ_d – время запаздывания, с; T_0 – постоянная времени объекта, с.

Изменение входного параметра объекта $x(\tau)$ по каналу управления на интервале времени $\tau \in (0; T)$ можно представить в виде

$$x(\tau) = x_0 + A\varphi(\tau) \text{ при } 0 \leq \tau \leq T, \quad (2)$$

где τ – текущее время, с; T – общий интервал времени, используемый для экспериментального определения переходных характеристик по данному каналу управления; $x_0 = x(\tau = 0)$ – начальное значение $x(\tau)$, равное среднему значению входного параметра (процент хода регулирующего органа или процент поворота вала исполнительного механизма) на рабочем интервале изменения x ; A – постоянная величина, определяющая величину амплитуды тестирующего воздействия; $\varphi(\tau)$ – формирующая функция, определяющая текущее значение входного параметра на интервале $\tau \in (0; T)$.

Функция $\varphi(\tau)$ – является непериодической кусочно-монотонной, определяемой на интервале $\tau \in (0; T)$ в соответствии с условием

$$\varphi_n(\tau) = \sum_{i=1}^m \int_0^T \psi_n(\tau) \varphi_0(\tau - i\Delta\tau) d\tau, i = 0, 1, \dots, m, \quad (3)$$

где $\Delta\tau$ – промежуток времени, в течение которого значение входного параметра остается постоянным; причем величина $\Delta\tau \geq 4T_0$ выбирается, исходя из необходимости обеспечения погрешности определения K_0 менее 2% при условии изменения выходной величины по экспоненциальному закону, определяемому условием (1); $m = T/\Delta\tau$ – количество переходных характеристик, которое необходимо экспериментально получить по каналу управления; $\varphi_0(\tau)$ – единичная функция на промежутке времени $\Delta\tau$ между двумя моментами времени подачи сигнальных воздействий

$$\varphi_0(\tau) = \begin{cases} 0, & \text{при } \tau \leq 0; \\ 1, & \text{при } 0 \leq \tau \leq \Delta\tau; \\ 0, & \text{при } \tau > \Delta\tau. \end{cases} \quad (4)$$

Искомая сигнум-функция переключения $\psi_n(\tau)$, постоянная на отрезке времени $\tau_i - \tau_{i-1} = \Delta\tau$ определяет направление идентифицирующего воздействия, принимающая на интервале $\tau \in (0; T)$ значения

$$\psi_n(\tau_i) = \{-1, +1\}, \quad (5)$$

где τ_i – момент времени подачи сигнальных воздействий.

Для определенности примем на первом интервале $0 < \tau \leq \Delta\tau(\tau_1 - \tau_0)$, что сигнум-функция $\psi_n(\tau) = +1$.

В установившемся режиме связь между входным и выходным параметрами на рабочем участке статической характеристики объекта управления можно представить в виде

$$y(\tau) = Y_0 + AK_0 \varphi(\tau) + Y_c(\tau) \text{ при } 0 \leq \tau \leq T, \quad (6)$$

где $y(\tau)$ – текущее значение контролируемого выходного параметра объекта по каналу управления; Y_0 – начальное значение выходного параметра $y(\tau = 0)$ при x_0 ; $Y_c(\tau)$ – составляющая $y(\tau)$, определяющая влияние неконтролируемых технологических возмущений, действующих на величину $y(\tau)$ в реальных производственных условиях.

Наличие $Y_c(\tau)$ обуславливает появление существенных (до 6-7 %) ошибок в определении K_0 методами, изложенными в [1]. В рассматриваемом в статье методе определение величины K_0 предлагается осуществлять, исходя из экспериментально определяемой на интервале времени $\tau \in (0; T)$ интегральной оценки вида

$$R(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T y(\tau) \psi_n(\tau) d\tau, \text{ при } 0 \leq \tau \leq T, \quad (7)$$

где $\psi_n(\tau)$ – обеспечивает переключение знака интегрирования на интервале $\tau \in (0; T)$.

Для уменьшения ошибки в определении K_0 необходимо синтезировать функцию $\psi_n(\tau)$ таким образом, чтобы составляющая интегральной оценки r_c , определяемая величиной $Y_c(\tau)$ в (6), была по абсолютной величине минимальной (практически нулевой), т.е.

$$r_c = \left| \frac{1}{T} \int_0^T Y_c(\tau) \psi_n(\tau) d\tau \right| \rightarrow \min. \quad (8)$$

Для функции $\psi_n(\tau)$, кроме (5), введем второе условие-ограничение

$$\int_0^T \psi_n(\tau) d\tau = 0. \quad (9)$$

Условие (9) означает, что на интервале $\tau \in (0; T)$ общее время, в течение которого $\psi_n(\tau)$ принимает значение $+1$, равно времени, в течение которого $\psi_n(\tau) = -1$, и это время равно $0,5T$.

Подстановка (6) в (7) с учетом условий (5) и (9) дает

$$R(T) = 0,5AK_0 + r_c(T). \quad (10)$$

Качественный вид траектории изменения величины $Y_c(\tau)$ на интервале $\tau \in (0; T)$ может быть получен в процессе предварительных экспериментов на объекте путем анализа характера изменения величины $y(\tau)$ при $x(\tau) = const$ на интервале времени $\tau \in (0; T)$.

В соответствии с известной теоремой Вейерштрасса траекторию изменения $Y_c(\tau)$ на интервале $\tau \in (0; T)$ можно с любой наперед заданной точностью представить в виде полинома

$$Y_c(\tau) = \sum_{k=0}^n a_k \tau^k + \delta_n(\tau) \text{ при } 0 \leq \tau \leq T \text{ и } k = 0, 1, \dots, n, \quad (11)$$

где n – степень аппроксимирующего полинома; a_k – постоянные коэффициенты аппроксимирующего полинома; $\delta_n(\tau) < \varepsilon$ – функция ошибки полиномиального представления случайного процесса $Y_c(\tau)$ на интервале $\tau \in (0; T)$.

Конкретные значения коэффициентов a_k по известной экспериментально полученной траектории изменения $Y_c(\tau)$ при необходимости могут быть найдены любым известным способом наилучшего приближения функции многочленами (3), например, путем последовательного решения задачи минимизации функции ошибки $\delta_n(\tau)$, при увеличении значения n , методом наименьших квадратов.

С учетом (11) величину $r_c(T)$ можно представить в виде

$$r_c(T) = \frac{1}{T} \int_0^T \delta_n(\tau) \psi_n(\tau) d\tau + \frac{1}{T} \sum_{k=0}^n a_k \int_0^T \tau^k \psi_n(\tau) d\tau. \quad (12)$$

На основании (12) может быть сформулировано третье условие-ограничение, накладываемое на функцию $\psi_n(\tau)$

$$\int_0^T \tau^k \psi(\tau) d\tau = 0, \quad k = 0, 1, \dots, n, \quad 0 \leq \tau \leq T. \quad (13)$$

При выполнении условия (13) для формирования плана идентифицирующих воздействий оказывается достаточной только информация о степени аппроксимирующего полинома n , а вычисление конкретных значений a_k становится необязательным.

Поставленным требованиям удовлетворяют ряд функций из системы ортогональных функций Уолша.

Переключающая функция $\psi_n(\tau)$, удовлетворяющая условиям (5), (9), (13), будет иметь вид

$$\psi_n(\tau) = \prod_{k=1}^{n+1} \text{SignSin} \frac{2^k \pi \tau}{T}, \quad 0 \leq \tau \leq T. \quad (14)$$

С учетом (13) погрешность определения K_0 равна

$$r_c(T) = \frac{1}{T} \int_0^T \delta_n(\tau) \psi_n(\tau) d\tau. \quad (15)$$

Функция $\delta_n(\tau)$ на интервале $\tau \in (0; T)$ является знакопеременной не менее $n + 1$ раз и не является линейной комбинацией функции $\psi_n(\tau)$, также существенно знакопеременной. Это позволяет принять гипотезу о достижимой малости погрешности определения значения K_0 в соответствии с выражением

$$K_0 = \frac{2R(T)}{A} \quad (16)$$

за счет правильного выбора значения n для каждого конкретного практического случая. Сформированные в соответствии с (14), составленные из равновеликих промежутков времени функции $\psi_n(\tau)$ для случаев $n = 0, 1, 2, 3, 4$ представлены на рис. 1

Общая продолжительность интервала времени T определяется величинами n и T_0 ,
 $T = m\Delta\tau \geq 2^{n+1}4T_0, \quad (17)$

где $m = 2^{n+1}$ определяет зависимость числа переходных характеристик от величины n .

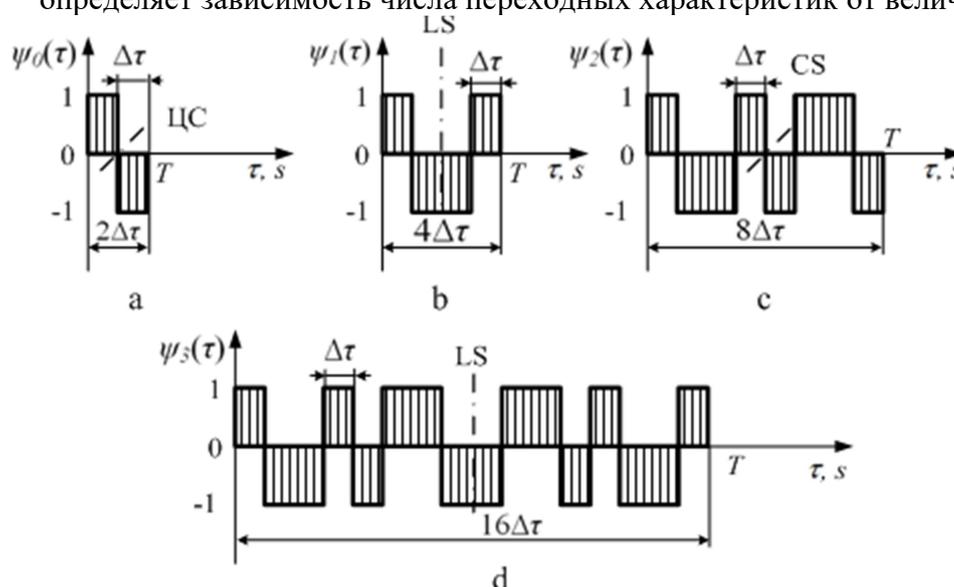


Рис. 1. Временные диаграммы переключающих функций $\psi_n(\tau)$

Для практического использования предложенной методики вычисление $R(T)$ целесообразно производить в соответствии с выражением

$$R(T) = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^m (y(\tau_i)\Delta\tau)\psi_n(\tau), \tau \in (0, T), \quad (18)$$

где $y(\tau_i)$ – значение выходного параметра $y(\tau)$ в моменты времени переключения управляющих воздействий τ_i .

Учитывая, что $T = m\Delta\tau$, получим

$$R(T) = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^m y(\tau_i)\psi_n(\tau). \quad (19)$$

Определение K_0 с учетом (19) производится достаточно просто без значительных затрат времени на вычисления [9].

Лабораторный эксперимент по идентификации инерционного объекта с запаздыванием

Эффективность рассматриваемого метода планирования сигнальных воздействий при идентификации инерционного объекта с запаздыванием проверялась на специальной установке, рис. 2.

Установка обеспечивала измерение температуры кварцевого электрического нагревателя с помощью термопары, рабочий спай которой помещен в защитный фарфоровый чехол.

Различные траектории возмущающих воздействий $Y_c(\tau_i)$ задавались с помощью соответствующего перемещения движка реостата, включенного последовательно с нихромовой спиралью нагревателя. Питание нагревателя и реостата осуществлялось стабилизированным напряжением от автотрансформатора, подвижный контакт которого механически связан с выходным валом исполнительного механизма постоянной скорости.

По каждой экспериментальной характеристике определялись значения параметров K_0 , T_0 , τ_3 , рекомендованным в [5] способом.

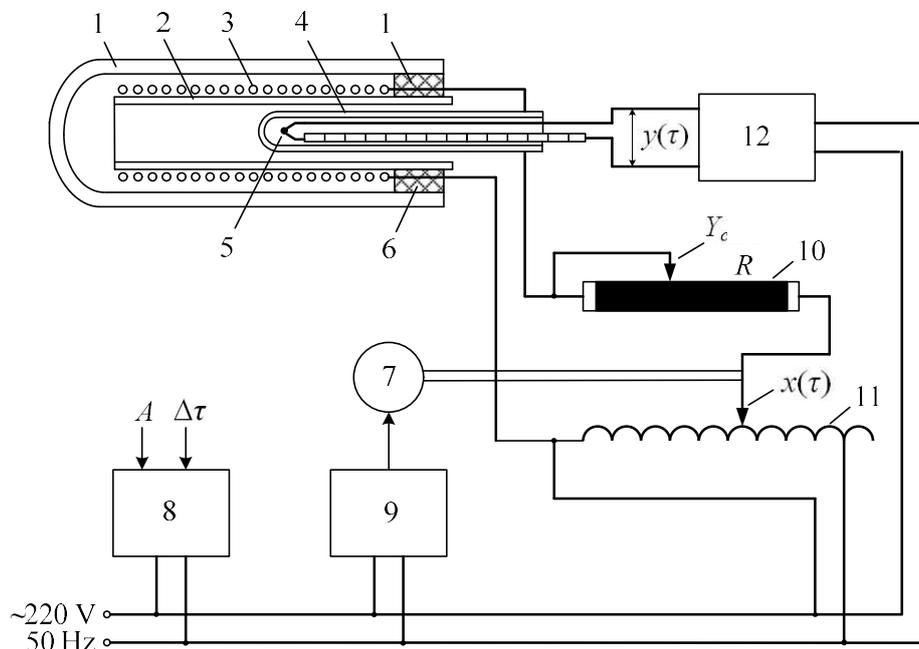


Рис. 1. Установка для проведения эксперимента по идентификации параметров инерционного объекта:
 1 – внешний кварцевый наконечник, 2 – внутренняя кварцевая трубка, 3 – нихромовый нагреватель,
 4 – фарфоровый наконечник, 5 – рабочий спай термопары ТХА, 6 – изолирующие керамические вставки,
 7 – исполнительный механизм МЭО-4/63, 8 – реле времени, 9 – блок управления, 10 – реостат,
 11 – автотрансформатор, 12 – электронный автоматический потенциометр

За достоверные значения параметров идентификации в каждой сравниваемой серии, определяемой принятым значением m , принимались средние величины полученных значений параметров. Для случаев реализации плана идентифицирующих воздействий в соответствии с $\psi_n(\tau)$ определение значения K_0 осуществлялось по формуле (16), где $R(T)$ вычислялось в соответствии с (19). Величина A измерялась в процентах хода вала исполнительного механизма, значение $\Delta\tau$ принималось равным 350 с.

В качестве истинных значений каждого параметра идентификации приняты средние значения каждого параметра, полученные по 16 переходным характеристикам при отсутствии технологических возмущений, т.е. при $Y_c(\tau) = 0$ ($n = 0$): $\tau_3 = 4,83$ с, $T_0 = 90,05$ с, $K_0 = 4,59^\circ\text{C}/\%$ хода ИМ.

Затем проводился эксперимент с линейным дрейфом динамической характеристики (рис. 3). Изображение траекторий изменения выходного сигнала во времени на интервале $\tau \in (0,1400)$ внешнего возмущающего воздействия $Y_c(\tau) = 0,0643\tau$ ($n = 1$), переключающей функции $\psi_1(\tau)$, рис. 1, б, формирующей функции $\varphi_1(\tau)$, и соответствующих этим функциям траекторий изменения входного $x(\tau)$ и выходного $y(\tau)$ параметров объекта представлены соответственно на рис. 3.

При реализации плана $\psi_1(\tau)$, см. рис. 1, б, получены следующие значения параметров идентификации объекта: $\tau_3 = 5,3$ с, $T_0 = 91$ с, $K_0 = 4,65^\circ\text{C}/\%$ хода ИМ.

В случае использования методики [2], предусматривающей формирование плана идентифицирующих воздействий в виде периодической функции, средние значения параметров идентификации получаются равными: $\tau_3 = 5,4$ с, $T_0 = 91$ с, $K_0 = 4,73^\circ\text{C}/\%$ хода ИМ.

Для случая компенсации изменения возмущения $Y_c(\tau)$ по линейному закону планы идентифицирующих воздействий, рекомендованные в [2] и сформированные согласно $\psi_1(\tau)$, совпадают. Разница относительных ошибок определения не превышает 2%.

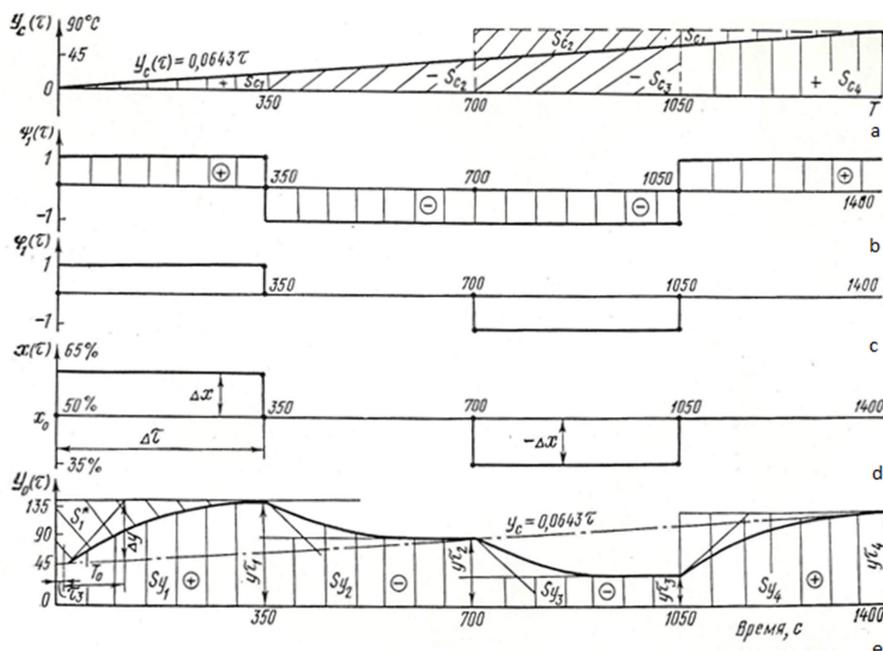


Рис. 3. Пример формирования воздействий и соответствующих им откликов объекта для случая линейного дрейфа $Y_c(\tau)$

При реализации метода, рекомендованного в [2], предусматривающей формирование плана идентифицирующих воздействий в виде периодической функции при $m = 8$, получены средние значения параметров объекта: $\tau_3 = 5$ с, $T_0 = 95,25$ с, $K_0 = 4,33^\circ\text{C}/\%$ хода ИМ. При реализации плана в соответствии с $\psi_2(\tau)$, рис. 1, с, получены значения параметров идентификации объекта: $\tau_3 = 4,85$ с, $T_0 = 94,94$ с, $K_0 = 4,49^\circ\text{C}/\%$ хода ИМ.

Разница относительных погрешностей определения K_0 по двум сравниваемым методикам увеличилась практически в два раза, что свидетельствует о преимуществе рассматриваемого метода перед применяемым на практике в настоящее время.

Заключение

В работе обоснована методика формирования переключающей функции на основе системы ортогональных функций Уолша для идентификации инерционных объектов и оценки эффективности мероприятия.

Проведен лабораторный эксперимент по определению динамических характеристик объекта по его переходной характеристике при монотонно-изменяющемся возмущении. Полученные результаты показывают максимальное приближение динамических характеристик объекта, снятых в условиях дрейфа с эталонными без воздействия возмущений.

Список используемых источников

1. Талалай, А.М., Активная идентификация при адаптивном управлении // Автоматика. и телемеханика, 1986. – № 9.
2. Забиров, Р.Р. Идентификация параметров объекта управления при комбинированной системе регулирования // Современные проблемы науки и образования. – 2005. – № 1. – С. 28-28;
3. Александров, А.Г. Оптимальные и адаптивные системы : Учеб. пособие для вузов по спец. «Автоматика и упр. в техн. системах». – М.: Высш. шк, 1989. – 263 с.
4. Ицкович, Э.Л. Методы рациональной автоматизации производства Инфра-инженерия. – М. 2009. – 255 с.
5. Кулаков, Г.Т. Инженерные экспресс-методы расчета промышленных систем регулирования. – Минск : Высшая школа, 1984. – 192 с.
6. Формирование тестирующих сигналов для идентификации теплоэнергетических объектов управления / Б.Н. Парсункин [и др.] // Известия вузов. Энергетика. – 1988. – №6. – С. 65-70.
7. Оперативное определение эффективности работы микропроцессорных систем управления технологическими процессами / Леднов А.В. [и др.] // Сталь. – 1987. – № 9. – С. 101-104.

8. Парсункин, Б.Н. Методика оценки эффективности мероприятия по совершенствованию показателей производственного процесса / Б.Н. Парсункин, Т.Г. Сухонослова, Е.И. Полухина // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2016. – Т. 14, № 3. – С. 121-126.

9. Доронин, В.Ю. Специализированный программный комплекс «ПАРАДИГМА» как платформа для построения систем управления производством цехового уровня промышленных предприятий / В.Ю. Доронин [и др.] // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. – 2011. – № 1-2. – С. 67-71.

Парсункин Борис Николаевич – д-р. техн. наук, профессор кафедры автоматизированных систем управления ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». E-mail: tgobuhova@gmail.com.

Леднов Анатолий Викторович – канд. техн. наук, доцент кафедры вычислительной техники и программирования ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»; менеджер по работе с ключевыми заказчиками, ЗАО «КонсОМ СКС». E-mail: alednov@mail.ru.

Сухонослова Татьяна Геннадьевна – ст. преподаватель кафедры автоматизированных систем управления ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». E-mail: tgobuhova@gmail.com.

Парсункин Б.Н., Леднов А.В., Сухонослова Т.Г. Моделирование тестирующих сигналов для идентификации инерционных объектов // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. – 2016. – Т.4. – №2. – С. 10-16.

Parsunkin, B.N., Lednov, A.V. and Sukhonosova, T.G. (2016) Simulation testing signals to identify the inertial controlled objects. Software of systems in the industrial and social fields, 4 (2): 10-16.
