

УДК 697.97-5

С.В. Прохоров, Нгуен Ван Вьонг, А.А. Шилин, Г.И. Однокопылов, В.А. Шевчук

Методика постановки эксперимента в среде CoDeSys на примере системы управления вентиляцией

Предложена методика создания экспериментальной установки для выполнения исследований на примере системы управления вентиляцией. Приведен синтез корректирующих динамических элементов, позволяющих обеспечить адекватность динамических свойств мощного асинхронного двигателя при использовании прототипа системы вентиляции на экспериментальной установке. Основные элементы конструкции реализованы с помощью технологии 3D-печати. Приведены результаты моделирования и эксперимента на установке. Предложенная методология создания экспериментальной установки может быть применена для других технологических процессов, что позволит уменьшить затраты на выполнение экспериментов.

Ключевые слова: эксперимент, вентиляция воздуха, управление вентиляцией, CoDeSys, программируемый логический контроллер, 3D-прототипирование.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-4-109-115

Создание научно-экспериментальной установки всегда связано со значительными материальными затратами. Возможно, этот факт является основной причиной преобладания количества научных работ, которые представляют только теоретический материал без экспериментального подтверждения. В результате даже в журналах инженерной направленности существуют проблемы реализации полученных теоретических результатов в действующих объектах. В данной работе основное внимание уделено проблеме построения математической модели объекта и методам реализации изменяемой части математической модели в микроконтроллере.

При построении математической модели в работах обычно преследуется цель повышения адекватности модели процессам в действующем объекте, что приводит к значительному усложнению математических выражений, дифференциальных уравнений и т.д. Однако на этапе реализации системы управления большинство проблем связано не с отсутствием высокой степени адекватности динамических свойств модели объекту, а с весьма посредственным качеством измерения физических величин и оценкой переменных состояния дифференциальных уравнений. Особенно остро это выражено на недорогих программируемых логических контроллерах (ПЛК), где разрядность АЦП составляет 10–12 бит [1, 2].

Методам реализации изменяемой части математической модели в микроконтроллере в научной литературе редко уделяется особое внимание, поскольку результатом работы является разработка кода. Сама реализация программного кода, если не содержит уникальных алгоритмов и подходов, не имеет научной новизны. Поэтому, несмотря на значительную практическую значимость, подобный материал публикуется в основном на интернет-форумах сообществ инженеров, работающих на реальных объектах управления технологическими процессами [3]. В этой связи добавление статью материала, позволяющего реализовать научную идею и повторить экспериментальную часть на доступном оборудова-

нии, является актуальной задачей для многих научных работ.

Весьма часто в научных работах реализацию алгоритмов и программного обеспечения ПЛК выполняют с использованием среды CoDeSys. Данная среда не только удобна в процессе разработки программного обеспечения и проектирования микропроцессорных систем управления, но и содержит функциональные элементы для обеспечения научных экспериментов. В частности, следует упомянуть встроенный Tracer, который позволяет фиксировать переходные процессы в Flash-памяти с последующей выгрузкой

Самой дорогой частью экспериментальной установки в большинстве случаев является действующий прототип объекта управления. Однако с появлением доступных по цене 3D-принтеров решение этой проблемы во многом упрощается и требует гораздо меньших затрат [4–7]. Для построения подобных прототипов объектов кроме инженерных решений требуется синтез и методика расчета динамических и энергетических характеристик корректирующих элементов, обеспечивающих адекватность прототипа проектным характеристикам объекта.

Построение прототипа

В качестве примера построения прототипа рассмотрим систему управления вентиляцией с преобразователем частоты на базе асинхронного двигателя мощностью 2,2 кВт. Структурная схема системы представлена на рис. 1.

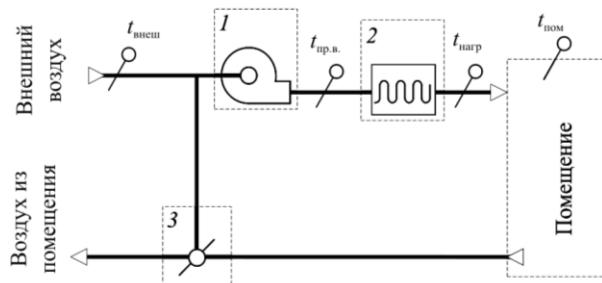


Рис. 1. Структурная схема управления системой вентиляции

На рисунке изображена вентиляционная установка, состоящая из приточного вентилятора 1, нагревателя 2, клапана смешения с приводом 3, а также обозначены следующие температуры: $t_{\text{внеш}}$ – температура внешнего воздуха, $^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{пр.в}}$ – температура приточного воздуха, $^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{нагр}}$ – температура нагретого воздуха, $^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{пом}}$ – температура воздуха в помещении, $^{\circ}\text{C}$. Практически все дополнительные элементы можно заменить на их прототипы, которые имеют на порядок меньшие размеры.

В частности, привод заслонки можно заменить сервоприводом Servo SG90. Для обеспечения совместимости динамических характеристик привода постоянной скорости для заслонки и практически безынерционного (0,1–0,4 с) сервопривода следует добавить интегрирующее звено, представленное дифференциальным уравнением

$$\frac{dy(t)}{dt} = \frac{1}{T} x(t), \quad (1)$$

где время T вычисляется исходя из характеристик привода постоянной скорости. Обычно задается от 20 до 160 с.

В качестве прототипа вентилятора можно использовать обычный бесконтактный двигатель для охлаждения оборудования персональных компьютеров. Основные связующие элементы и воздуховоды системы вентиляции созданы на 3D-принтере. В результате экспериментальная установка представлена на рис. 2.

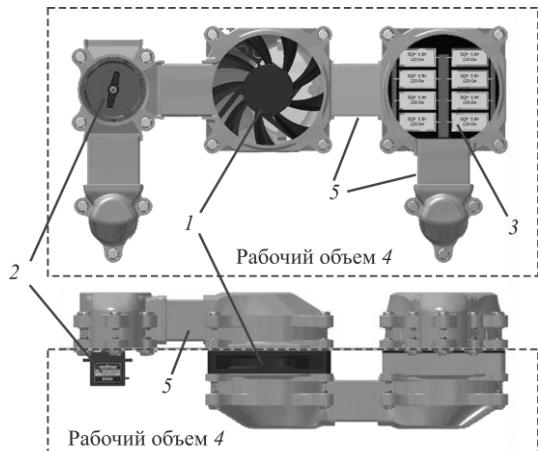


Рис. 2. Изображение экспериментальной установки прототипа системы вентиляции

На рисунке представлены следующие элементы: вентилятор 1, клапан с сервоприводом 2, нагреватель 3, пластиковый короб (рабочий объем) 4, а также воздуховоды 5.

Обычно инерционность мощного двигателя заметно превышает инерционность вентилятора охлаждения. Поэтому для придания адекватных динамических свойств в структуру также следует добавить корректирующий динамический элемент.

Синтез корректирующего элемента вентилятора

Для синтеза корректирующего элемента сложно предложить обобщенную универсальную методику.

Поэтому рассмотрим реализацию синтеза элемента на примере двигателя АИР90Л4 мощностью 2,2 кВт со скалярным управлением в частотном преобразователе. Для качественного описания работы динамических режимов двигателя можно воспользоваться материалами, представленными в работах [8, 9]. Здесь представлена система уравнений, описывающая работу асинхронного двигателя в неподвижной системе координат α, β :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dI_{1\alpha}}{dt} = \frac{1}{\sigma \cdot L_1} \cdot U_{1\alpha} - \frac{R_2}{\sigma \cdot L_1} \cdot I_{1\alpha} + \frac{R_2 \cdot L_m}{\sigma \cdot L_1 \cdot L_2} \cdot \Psi_{2\alpha} + \\ + \frac{L_m}{\sigma \cdot L_1 \cdot L_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2\beta}; \\ \frac{dI_{1\beta}}{dt} = \frac{1}{\sigma \cdot L_1} \cdot U_{1\beta} - \frac{R_2}{\sigma \cdot L_1} \cdot I_{1\beta} + \frac{R_2 \cdot L_m}{\sigma \cdot L_1 \cdot L_2} \cdot \Psi_{2\beta} - \\ - \frac{L_m}{\sigma \cdot L_1 \cdot L_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2\alpha}; \\ \frac{d\Psi_{2\alpha}}{dt} = -\frac{R_2}{L_2} \cdot \Psi_{2\alpha} + \frac{R_2 \cdot L_m}{L_2} \cdot I_{1\alpha} - z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2\beta}; \\ \frac{d\Psi_{2\beta}}{dt} = -\frac{R_2}{L_2} \cdot \Psi_{2\beta} + \frac{R_2 \cdot L_m}{L_2} \cdot I_{1\beta} + z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2\alpha}; \\ M_{\text{эм}} = \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot z_p \cdot (\Psi_{2\alpha} \cdot I_{1\beta} - \Psi_{2\beta} \cdot I_{1\alpha}); \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} \cdot (M_{\text{эм}} - M_{\text{с}}), \end{array} \right. \quad (2)$$

где $U_{1\alpha} = U_{1m} \cdot \sin(2\pi \cdot f_1) = \sqrt{2} \cdot U_1 \cdot \sin(2\pi \cdot f_1)$ – синусоидальная по форме составляющая напряжения статора по оси α ортогональной неподвижной системы координат α, β, θ ; $U_{1\beta} = U_{1m} \cos(2\pi f_1) = \sqrt{2} \cdot U_1 \cdot \cos(2\pi \cdot f_1)$ – косинусоидальная по форме составляющая напряжения статора по оси β системы координат α, β, θ ; $U_{1m} = \sqrt{2U_1}$ – амплитудное значение фазного напряжения статорной обмотки, В; U_1 – действующее значение фазного напряжения статорной обмотки, В; f_1 – частота напряжения статора, Гц; $I_{1\alpha}, I_{1\beta}$ – составляющие тока статора в системе координат α, β, θ ; $\Psi_{2\alpha}, \Psi_{2\beta}$ – составляющие потокосцепления ротора в системе координат α, β, θ ; $M_{\text{эм}}$ – электромагнитный момент двигателя, Н·м; $M_{\text{с}}$ – момент статического сопротивления на валу двигателя, включая собственный момент трения двигателя, Н·м; $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_1 \cdot L_2}$ – коэффициент рассеяния; J – момент инерции двигателя, кг·м².

С учетом механической части вентилятора были использованы параметры для моделирования системы, указанные в таблице.

Технические данные двигателя

Типоразмер	n , об/мин	$U_{\text{Н}}$, В	$P_{\text{двН}}$, кВт
АИР90L4	1420	380	2,2
При номинальной нагрузке		$s_{\text{Н}}$, %	$J_{\text{дв}}$, кг·м ²
		79,9	25,0
	3,6	0,79	0,52

Однако столь подробное описание математической модели неоправданно усложнит процедуру реализации. По этой причине воспользуемся результатами моделирования переходного процесса от управляющего сигнала к частоте оборотов двигателя. На рис. 3 представлены переходные процессы,

полученные по результатам моделирования ω_1, ψ_1 , и процессы эквивалентного звена второго порядка ω_2 и колебательного ω_3 .

В качестве эквивалентного звена выбрано инерционное второго порядка

$$\frac{d^2y(t)}{dt^2} = \frac{k}{T_1 T_2} x(t) - \frac{1}{T_1 T_2} y(t) - \frac{T_1 + T_2}{T_1 T_2} \cdot \frac{dy(t)}{dt}, \quad (3)$$

где T_1 и T_2 – время инерции звеньев, коэффициент передачи k выражен в рад/с, входное значение x выражено в относительных единицах к максимальному значению сигнала управления.

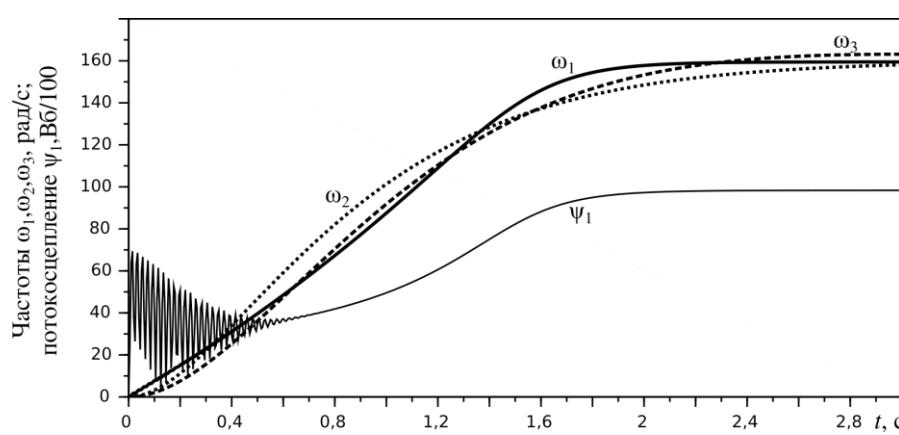


Рис. 3. Переходные процессы результатов моделирования и корректирующего звена

Параметры эквивалентного звена получены с помощью процедуры минимизации среднеквадратичной невязки переходных процессов моделирования и выхода эквивалентного звена. Процедура поиска параметров приведена в виде исходного кода скрипта на встроенным языке SciLab.

```

clear;
// чтение результатов моделирования
u=mopen('in3.txt','r');
l=mfscanf(-1,u,'%e %e %e %e')
Y1 = l(:,3) - ones(1,601)' .* 160
mclose(u);

itp = 0; // 1 -- поиск a0,a1; 0 -- поиск T1,T2
if itp == 1 then p0=[2.5;2.5]; // a0,a1
else p0=[0.3;0.3]; // T1,T2
end

function J=fnk(p)
if itp == 1 then a0=p(1); a1=p(2);
else
  a0=1/(p(1) * p(2));
  a1=(p(1) + p(2)) / (p(1) * p(2));
end

A=[0 1; -a0 -a1];
function dx=syst1(t, x), dx=A*x,endfunction
function J=Jac(t, y), J=A,endfunction
x0=[-160;0]; t0=0; t=0:0.005:3;
y=ode("stiff",x0,t0,t,syst1, Jac);
Y2 = Y1' - y(1,:);
J=Y2*Y2'; // plot(y(1,:)', Y1) // для отладки
endfunction

```

```

function [f, g, ind]=cst(p, ind)
f=fnk(p); g=numderivative(fnk,p);
endfunction
[f,xopt]=optim(cst,p0);

```

При выполнении скрипта вначале считывается файл с результатами моделирования работы синхронного двигателя. Далее подготавливается функция, обеспечивающая решение однородного дифференциального уравнения, представленного в матричной форме. Функционал представлен значением квадрата разности между выходом звена и исходного переходного процесса. Результат вычисления оптимальных значений представлен выражениями

$$T_1 = T_2 = 0,483 \text{ с}; Jf = 3,61 \cdot 10^4.$$

На рис. 3 переходный процесс инерционного эквивалентного звена показан пунктирной линией ω_2 .

Равенство постоянных времени свидетельствует о том, что, возможно, переходный процесс соответствует колебательному звену. По этой причине была выполнена процедура поиска оптимальных параметров для выражения

$$\frac{d^2y(t)}{dt^2} = kx(t) - a_0 y(t) - a_1 \frac{dy(t)}{dt}. \quad (4)$$

Оптимальные параметры в результате вычисления соответствуют значениям

$$a_0 = 2,876; a_1 = 2,600; Jf = 1,13 \cdot 10^4.$$

На рис. 3 переходный процесс колебательного звена показан штрих-линией ω_3 .

Следует отметить, что процедура поиска минимума функционала в таких системах устойчива только в небольшой окрестности изменения подбираемых параметров. По этой причине начальные значения важно выбрать близкими к оптимальным. Эти значения можно получить общезвестным графоаналитическим способом в процессе обработки кривой переходного процесса.

Среда программирования ПЛК CoDeSys

Для ознакомления и получения навыков программирования в среде CoDeSys [10] разработчиками реализован виртуальный ПЛК, обладающий широкими возможностями, соизмеримыми с ресурсами персонального компьютера. Этот факт позволяет создавать достаточно сложные проекты для ПЛК и тестируировать работы программ непосредственно на персональном компьютере. Однако для выполнения эксперимента виртуальный ПЛК непригоден по причине отсутствия исполнительной и измерительной системы.

Одним из решений может стать подключение к последовательному порту устройств ввода/вывода типа Adam-4000 [11], которые поддерживают передачу данных по протоколу ModBus. В статье реализована эта идея с использованием недорогой платы Arduino Nano на базе контролера AtMega328 [12]. Этот контроллер имеет аппаратно реализованные АЦП, таймеры с функцией ШИМ, несколько последовательных портов, а также USB-драйвер последовательного порта. Программное обеспечение устройства включает поддержку вышеуказанных аппаратных средств и реализацию ModBus протокола.

Для обеспечения функционирования в код CoDeSys проекта включена в ModBus протокол обмена дополнительная команда передачи данных на исполнительные устройства и приема измеренных значений. Функциональная схема устройства представлена на рис. 4, где изображен вентилятор (В), камера с клапаном и сервоприводом (Б), нагреватель (К), плата управления (Arduino), датчики: (Д1) температура внешнего воздуха, (Д2) температура приточного воздуха, (Д3) температура нагретого воздуха, (Д4) температура воздуха в помещении, а также стрелками указаны направления движения воздушных масс.

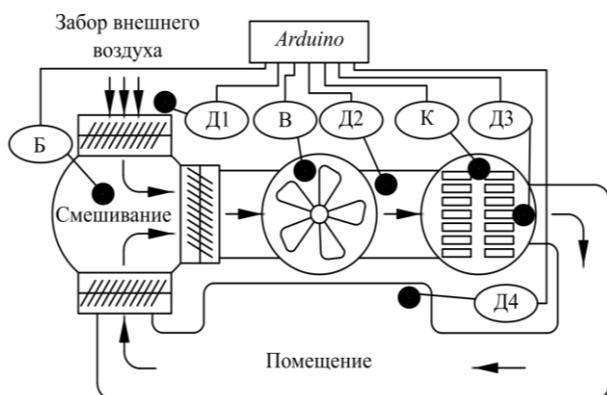


Рис. 4. Функциональная схема устройства

В проекте CoDeSys связь с оборудованием выполняется с помощью глобальных переменных. На рис. 5 дан фрагмент программы, представленной на языке CFC.

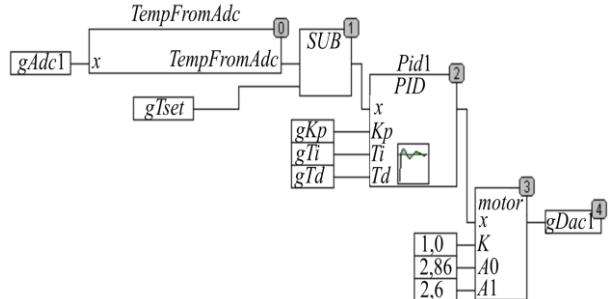


Рис. 5. Фрагмент программы ПЛК

На рисунке переменная gAdc1 содержит результат измерения канала АЦП. Это значение поступает на блок вычисления температуры (TempFromAdc), выполненный в соответствии со схемой измерения. В реализациях стандартных ПИД-регуляторов обычно есть возможность задавать диапазон изменения выходного сигнала. В данном случае значение на выходе регулятора соответствует диапазону значений выхода gDac1. Для используемого контролера значение широтно-импульсной модуляции может меняться от 0 до 255. Функциональный блок motor придает инерционные свойства асинхронного двигателя более быстрому двигателю в экспериментальной установке.

Для выполнения эксперимента достаточно поменять глобальную переменную на входе блока motor, которая задает значение управления исполнительным механизмом. Далее с помощью средств трассировки, которая включена в CoDeSys, фиксируются переходные процессы в автоматическом режиме. По окончании процесса данные можно считать из ПЛК в общепринятом формате .csv для использования в программном обеспечении, формирующем графический материал (MS Excel, GnuPlot, MatLab, SciLab и т.д.). На рис. 6 представлен переходный процесс. Как и во многих динамических объектах в автоматических системах теплоэнергетических процессов, переходный процесс представлен S-образной кривой разгона, которая может быть аппроксимирована инерционным звеном второго или третьего порядка.

Для получения параметров можно также воспользоваться вышеупомянутым скриптом для поиска параметров инерционного звена.

Математическая модель блока motor реализует корректирующий элемент согласно уравнению (4) вместе с динамическими свойствами представленного макета системы вентиляции.

Сам синтез системы регулятора и поиск оптимальных настроек параметров (K_p , T_i , T_d) выходит за рамки данной статьи и может быть рассмотрен в отдельной работе.

Заключение

В теории аналитического конструирования оптимальных регуляторов [13, 14] предполагается до-

ступность для измерения всех переменных состояния объекта управления или по крайней мере их оценка с помощью использования современной теории построения наблюдателей [15]. Однако при достаточно большом объеме теоретического материала в этой области весьма сложно найти успешно реализуемые методы оптимального управления. Чтобы убедится в сложности реализации управления на

ПЛК, следует внести в математическую модель некоторые корректировки, учитывающие качество системы измерения.

По этой причине в инженерно-технических сообществах для подобных объектов в подавляющем большинстве используется классический ПИД-регулятор и, часто примитивные методы настройки его параметров.

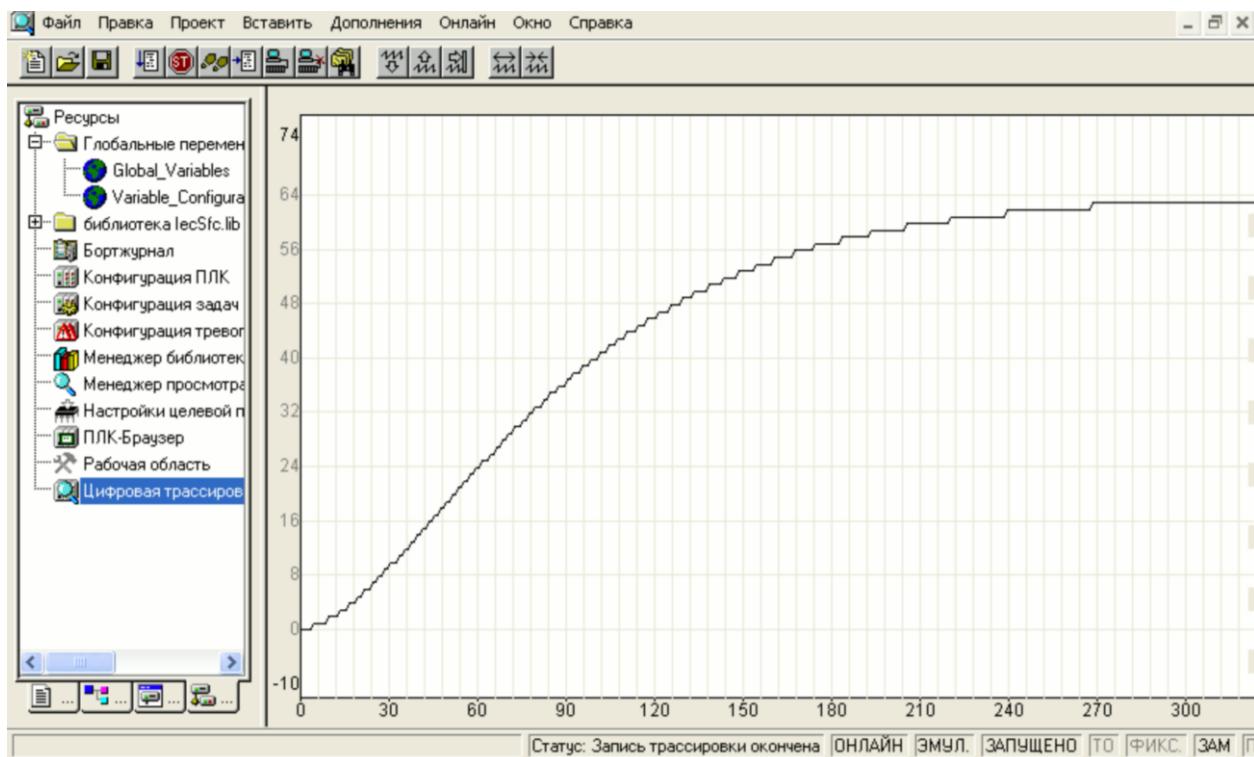


Рис. 6. Переходный процесс аппроксимированного звена

Материалы данной работы в большей мере могут быть полезны для исследователей, которые готовы найти практическое применение своим теоретическим разработкам в области автоматического регулирования, поскольку методика построения эксперимента может быть распространена и на другие объекты управления.

Представленная математическая модель, не смотря на свою простоту качественно отражает именно проблему реализации систем управления, поэтому специалисты в области синтеза наблюдателей для реализации методов АКОР могут протестировать работу современных методов на действующей системе.

В целом в работе предпринята попытка сформировать цепочку достаточно простых шагов-действий, позволяющих предоставить реальный объект управления для использования современных методов управления до реализации в действующих объектах с использованием среды CoDeSys [16–17]. Для освоения данной среды программирования имеется достаточно много публикаций на интернет-форумах. Поэтому в статье уделено внимание лишь той части описания работы в CoDeSys, где потребовалось создание специализированных блоков, реали-

зующих динамические элементы теории автоматического управления.

Работа выполнена при поддержке ТПУ и содержит некоторые результаты выпускных работ студентов, выполняющих проект под руководством авторов.

Литература

1. Ежов В. АЦП и ЦАП Analog Devices: обзор новинок 2018 года // Электроника: Наука, технология, бизнес. – 2019. – № 1. – С. 92–102.
2. Крюков А.И. Разработка программно-аппаратного средства для измерения напряжения на базе микроконтроллера атв atmega2560 и ацп ad7819 // Междунар. молодежная науч. конф. «XXII Туполевские чтения (Школа молодых ученых)». – 2015. – С. 684–686.
3. Энциклопедия АСУТП [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.bookasutp.ru/>, свободный (дата обращения: 15.12.2019).
4. Tignibidin A.V. Additive technologies for prototyping. Control of geometrical characteristics of abs plastic details for determining the original print sizes / A.V. Tignibidin, S.V. Takayuk // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2019. –Vol. 1210, No. 1. – P. 012140.
5. Performance evaluation of 3D printed miniature electromagnetic energy harvesters driven by air flow / N. Han,

D. Zhao, J.U. Schluter, E.S. Goh, H. Zhao, X. Jin // Applied energy. – 2016. – Vol. 178. – P. 672–680.

6. A review on experimental research using scale models for buildings: Application and methodologies / J.M. Lirola, E. Castaneda, B. Lauret, M. Khayet // Energy and Buildings. – 2017. – Vol. 142. – P. 72–110.

7. Development of a compact standalone esophageal pressure measurement device / A. Richter, C. Schnabel, P. Spieth, E. Koch // Current Directions in Biomedical Engineering. – 2018. – Vol. 4, No. 1. – P. 355–358.

8. Удут Л.С. Проектирование и исследование электроприводов. – Ч. 8: Асинхронный частотно-регулируемый электропривод / Л.С. Удут, О.П. Мальцева, Н.В. Кояин. – Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 2009. – 448 с.

9. Kang M. Simulation and analysis of squirrel cage induction machines under rotor internal faults / M. Kang, J. Huang // International Conference on Electrical Machines and Systems. – 2005. – Vol. 3. – P. 2023–2027.

10. Korobiichuk I. Remote control of nonlinear motion for mechatronic machine by means of CoDeSys compatible industrial controller / I. Korobiichuk, O. Dobrzhansky, M. Kachniarz // Tehnicki Vjesnik-Technical Gazette. – 2017. – Vol. 24, No. 6. – P. 1661–1667.

11. Мусиенко А.Д. Программно-аппаратный комплекс для изучения устройств сопряжения с объектами в мекатронике с использованием технологии RS-485 на базе модулей серии ADAM-4000 / А.Д. Мусиенко, В.Д. Иванов // Обучение и воспитание: методики и практика 2016/17 учебного года. – 2017. – С. 43–51.

12. Louis L. Working principle of Arduino and U sing IT // International Journal of Control, Automation, Communication and Systems (IJCACS). – 2016. – Vol. 1, No. 2. – P. 21–29.

13. Осенин В.Н. Синтез распределенной следящей системы на основе метода АКОР // Вестник Сарат. гос. техн. ун-та. – 2009. – Т. 1, № 1. – С. 88–94.

14. Степанченко И.В. Оценка вычислительной трудоемкости вариантов реализации алгоритма АКОР // Изв. Волгогр. гос. техн. ун-та. – 2007. – Т. 1, № 1. – С. 114–117.

15. Разработка наблюдателя полного порядка с оперативным мониторингом момента сопротивления для погружных асинхронных электродвигателей / А.С. Глазырин, С.Н. Кладиев, К.С. Афанасьев, В.В. Тимошкин, И.Г. Слепнёв, В.И. Полищук, Н. Sándor // Изв. Том. политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329, № 2. – С. 118–126.

16. Gusarova A.A. Modeling the Operation of the System in the CODESYS Software Environmentper / A.A. Gusarova, S.V. Shilkina // 2019 International Science and Technology Conference «EastConf». – IEEE, 2019. – P. 1–6.

17. Lugovkin V.V. Simulation of Automatic Control System for Blast-Furnace Stove / V.V. Lugovkin, V.A. Goltsev, S.Y. Zhuravlev // 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). – IEEE, 2018. – P. 1–4.

Нгуен Ван Выонг

Аспирант ОЭЭ ИШЭ НИ ТПУ
Ленина пр-т, д. 30, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-983-346-84-53
Эл. почта: vuongocolen@gmail.com

Шилин Александр Анатольевич

Д-р техн. наук, профессор ОЭЭ ИШЭ НИ ТПУ
Ленина пр-т, д. 30, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0002-4761-7249
Тел.: +7-903-954-00-88
Эл. почта: shilin@tpu.ru

Однокопылов Георгий Иванович

Д-р техн. наук, профессор ОЭЭ ИШЭ НИ ТПУ
Ленина пр-т, д. 30, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 56-32-55
Эл. почта: ogiz@ya.ru

Шевчук Владислав Алексеевич

Аспирант ОЭЭ ИШЭ НИ ТПУ
Ленина пр-т, д. 30, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-983-238-78-17
Эл. почта: shevchukvlal@yandex.ru

Prokhorov S.V., Nguyen V.V., Shlin A.A.,
Odnokopylov G.I., Shevchuk V.A.

Methodology for setting up an experiment in CoDeSys using the example of a ventilation control system

The paper proposes a methodology to create an experimental installation for research using the example of a ventilation control system. The synthesis of corrective dynamic elements, which ensure the adequacy of the dynamic properties of a powerful induction motor when using a prototype ventilation system in an experimental setup, is presented. The main structural elements are implemented using 3D printing technology. The results of modeling and experiment held on the installation are presented. The proposed methodology used to create an experimental setup can be applied to other technological processes, which will reduce the experiment costs.

Keywords: experiment, air ventilation, ventilation control, CoDeSys, programmable logic controller, 3D prototyping.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-4-109-115

References

- Ezhov V. ACZP i CZAP Analog Devices: obzor novinok 2018 goda. [ADCs and DACs Analog Devices: 2018 New Product Review]. E'lektronika: Nauka, texnologiya, biznes [Electronics: Science, Technology, Business.], 2019, no. 1, pp. 92–102.
- Kryukov A.I. Razrabotka programmno-apparatnogo sredstva dlya izmereniya napryazheniya na baze mikrokontrolera avr atmega2560 i aczp ad7819, Mezhdunarodnaya molodezhnaya nauchnaya konferenciya [Development of software and hardware for measuring voltage based on the avr atmega2560 microcontroller and ad7819 ADC]. «XXII Tupolevskie chteniya (Shkola Molody'x Ucheny'x)» [International Youth Scientific Conference «XXII Tupolev Readings (School of Young Scientists)»], 2015, pp. 684–686.
- Enciklopediya ASUTP [APCS encyclopedia]. Available at: <https://www.bookasutp.ru/>, (accesed: November 15, 2019).
- Tignibidin A.V., Takayuk S.V. Additive technologies for prototyping. Control of geometrical characteristics of abs plastic details for determining the original print sizes. Journal

Прохоров Сергей Валерьевич

Аспирант, Инженерной школы энергетики
отд. электроэнергетики и электротехники (ОЭЭ ИШЭ)
Национального исследовательского
Томского политехнического университета (НИ ТПУ)
Ленина пр-т, д. 30, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-923-440-25-78
Эл. почта: sergei_prohorov@inbox.ru

of Physics: Conference Series, IOP Publishing, 2019, vol. 1210, no 1, pp. 012140.

5. Han N., Zhao D., Schluter J.U., Goh E.S., Zhao H., Jin X. Performance evaluation of 3D printed miniature electromagnetic energy harvesters driven by air flow. *Applied energy*, 2016, vol. 178, pp. 672–680.

6. Lirola J.M., Castaneda E., Lauret B., Khayet M. A review on experimental research using scale models for buildings: Application and methodologies. *Energy and Buildings*, 2017, vol. 142, pp. 72–110.

7. Richter A., Schnabel C., Spieth P., Koch E. Development of a compact standalone esophageal pressure measurement device. *Current Directions in Biomedical Engineering*, 2018, vol. 4, no. 1, pp. 355–358.

8. Udu U.S., Mal'ceva O.P., Koyain N.V. *Proektirovaniye i issledovaniye e`lektroprivodov. Chast` 8 Asinxronnyj chastotnoreguliruemij e`lektroprivod* [Design and research of electric drives. Part 8 Asynchronous frequency-controlled electric drive]. Tomsk, Publishing house of Tomsk Polytechnic University. 2009. 448 p. (in Russ.).

9. Kang M., Huang J. Simulation and analysis of squirrel cage induction machines under rotor internal faults. *International Conference on Electrical Machines and Systems*, Sep 27, 2005, vol. 3, pp. 2023–2027.

10. Korobiichuk I., Dobrzhansky O., Kachniarz M. Remote control of nonlinear motion for mechatronic machine by means of CoDeSys compatible industrial controller. *Tehnicki Vjesnik-Technical Gazette*, 2017, vol. 24, no 6, P. 1661–1667.

11. Musienko A.D., Ivanov V.D. *Programmno-apparatnyj kompleks dlya izuchenija ustrojstv sopryazheniya s ob`ektami v mexatronike s ispol`zovaniem texnologii RS-485 na baze modulej serii ADAM-4000* [Hardware-software complex for studying devices for interfacing with objects in mechatronics using RS-485 technology based on ADAM-4000 series modules] *Obuchenie i vospitanie: metodiki i praktika 2016/2017 uchebnogo goda* [Education and training: methods and practice of the 2016/2017 school year.], 2017, pp. 43–51.

12. Louis L. Working principle of Arduino and U sing IT. *International Journal of Control, Automation, Communication and Systems (IJCACS)*, 2016, vol. 1, no. 2, pp. 21–29.

13. Osenin V.N. *Sintez raspredelenoj sledyashhej sistemy na osnove metoda AKOR* [Synthesis of a distributed tracking system based on the AKOR method]. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo texnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Saratov State Technical University], 2009, vol. 1, no. 1, pp. 88–94.

14. Stepanchenko I.V. *Ocenka vy`chislitel`noj trudoemosti variantov realizacii algoritma AKOR* [Assessment of the computational complexity of the AKOR algorithm implementation options]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo texnicheskogo universiteta* [Izvestia Volgograd State Technical University], 2007, vol. 1, no. 1, pp. 114–117.

15. Glazyrin A.C., Kladiev S.N., Afanas`ev K.S., Timoshkin V.V., Slepnyov I.G., Polishhuk V.I., Sándor H. *Razrabotka nablyudatelya polnogo poryadka s operativnym monitoringom momenta soprotyvleniya dlya pogruzchnyx*

asinxronnyx e`lektrodvigatelej [Development of a full-order observer with operational monitoring of the moment of resistance for submersible asynchronous electric motors]. *Izvestiya Tomskogo politexnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* [Izvestia, Tomsk Polytechnic University. Geo-Resource Engineering.], 2018, vol. 329, no. 2, pp. 118–126.

16. Gusanova A.A., Shilkina S.V. Modeling the Operation of the System in the CODESYS Software Environmentper. 2019 International Science and Technology Conference «EastConf», IEEE, 2019, pp. 1–6.

17. Lugovkin V.V., Goltsev V.A., Zhuravlev S.Y. Simulation of Automatic Control System for Blast-Furnace Stove. 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), IEEE, 2018, pp. 1–4.

Sergey V. Prokhorov

PhD student, Power Engineering School, National Research Tomsk Polytechnic University

30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050

Phone: +7-923-440-25-78

Email: sergei_prokhorov@inbox.ru

Vuong V. Nguyen

PhD student, Power Engineering School, NR TPU 30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050

Phone: +7-983-346-84-53

Email: vuongoicolen@gmail.com

Aleksander A. Shilin

Doctor of Engineering Science, Professor, Power Engineering School, Department of Electric Power and Electrical Engineering, NR TPU 30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050

ORCID: 0000-0002-4761-7249

Phone: +7-903-954-00-88

Email: shilin@tpu.ru

Georgy I. Odnokopylov

Doctor of Engineering Science, Professor

Division for Power and Electrical Engineering School of Energy & Power Engineering, NR TPU 30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050

Тел.: +7 (382-2) 56-32-55

Email: ogiz@ya.ru

Vladislav A. Shevchuk

PhD student, Division for Power and Electrical Engineering School of Energy & Power Engineering, NR TPU

30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050

Тел.: +7-983-238-78-17

Email: shevchukvlal@yandex.ru