

**Часть 8 АВТОМАТИЗАЦИЯ И ОПТИМИЗАЦИЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
И ПРОИЗВОДСТВ НА БАЗЕ СОВРЕМЕННЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ, МЕТОДОВ
И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ**

СОДЕРЖАНИЕ

Афонин А.Н., Ломакин В.В., Асадуллаев Р.Г. Моделирование процесса резания при субтрактивной обработке многослойных гетерогенных структур	3
Бушуев Д.А., Рубанов В.Г., Бажанов А.Г., Методы интеграции моделей электродвигателей в среду MSC.ADAMS для совместного моделирования динамики механических объектов с системами управления	10
Ващенко Р.А., Бажанов А.Г., Рубанов В.Г. Организация взаимодействия совокупности технологических узлов вращающейся цементной печи	15
Величко Д.В., Рубанов В.Г., Костин С.В. Анализ регуляторов температуры системы управления секцией туннельной печи	20
Воронкова М.Н., Масленников А.С. Оптимизация режимов обработки резанием	26
Гольцов Ю.А., Кижук А.С., Рубанов В.Г. Бифуркационные явления в широтно-импульсной системе управления теплотехническим объектом	31
Колтунов Л.И., Гольцов Ю.А., Кижук А.С. Математическое моделирование электростатических систем для процессов фильтрации и ионизации воздуха	37
Коренева Т.Ю., Бушуев Д.А., Юдин Д.А. Гибридное моделирование динамики системы управления манипуляционного робота и его механических элементов	43
Крюков А.В., Переверзев Н.П., Рубанов В.Г. Параметрическая идентификация объектов управления численными способами	48
Крюков А.В., Рубанов В.Г. Проблемы оценки уровня знаний обучающихся в электронных системах тестирования	54
Кузьмичёва Т.Г., Путивцева Н.П., Пусная О.П. О возможных подходах к анализу и прогнозированию свойств высокодисперсных	

ферритовых материалов и к подбору оптимальных параметров их получения	59
Люлюченко М.В., Рябов А.А. Автоматизация бизнес-процессов как условие экономического развития предприятия	64
Манаенкова Т.А., Резниченко О.С. Применение дробного интегрирования при исследовании уравнения теплопроводности	70
Никитенко А.А., Добринский Е.П., Коленченко В.В., Кижук А.С. Система управления мобильной платформой на основе одноплатного компьютера RASPBERRY PI.....	74
Паращук Е.М. Система навигации транспортного робота с применением явления фоторецепции и логического закона управления.....	79
Покутнева С.К., Порхало В.А., Бажанов А.Г. Регулирование мощности котла по соотношению «ГАЗ - ВОЗДУХ».....	85
Рыбин И.А. Разработка системы нечеткого вывода для интеллектуального адаптивного управления холодильной камерой	90
Рыбин И.А., Рубанов В.Г. Оптимизация параметров псевдолинейных корректирующих устройств в системе MATLAB.....	96
Степовой А.А., Бажанов А.Г., Рубанов В.Г. Применение искусственных нейронных сетей для решения задач прогнозирования на примере температуры отходящих газов вращающейся цементной печи	100
Ямковая М.А., Шадрин С.В. Математическая модель силовой цепи электротехнического комплекса для размерной электрохимической обработки	105

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ ПРИ СУБТРАКТИВНОЙ ОБРАБОТКЕ МНОГОСЛОЙНЫХ ГЕТЕРОГЕННЫХ СТРУКТУР

**Афонин А.Н., д-р техн. наук,
Ломакин В.В., канд. техн. наук, доц.,
Асадуллаев Р.Г., канд. техн. наук**
*Белгородский государственный национальный
исследовательский университет*

В настоящее время в приборо- и машиностроении возрастает доля деталей, имеющих микро- и наноразмерные поверхности различной формы с жёсткими допусками. К таким деталям относятся, в частности, детали MEMS. В технологических процессах изготовления данных деталей часто используются операции субтрактивной обработки резанием, например сверление и фрезерование [8]. Для проектирования технологии данной обработки необходима информация о влиянии режимов резания на такие параметры, как сила резания и температура, так как традиционные рекомендации по выбору режимов резания к микрообработке слабо применимы [7, 9]. Методики аналитических расчетов данных параметров при микрообработке на сегодняшний день разработаны только для некоторых конкретных случаев, поскольку основаны на применении эмпирических коэффициентов. В связи с этим, для исследования процессов резания при субтрактивной микрообработке целесообразно использовать имитационное моделирование.

Среди методов имитационного моделирования обработки резанием наибольшее распространение в последнее время нашел метод конечных элементов (МКЭ) [1, 2, 3, 6], относящийся к численным матричным методам моделирования физических полей, описываемых системами дифференциальных уравнений. Идея МКЭ состоит в том, что любую непрерывную величину можно аппроксимировать дискретной моделью, которая строится на множестве кусочно-непрерывных функций, определенных на конечном числе областей.

Основным недостатком МКЭ, как и всех численных методов, является то, что он дает лишь частные решения для конкретных условий моделирования, не позволяя выявить характер влияния независимых переменных на зависимые. Однако, данную задачу можно решить, произведя регрессионный анализ результатов вычислительного

эксперимента по моделированию с помощью МКЭ субтрактивной обработки микрорезанием с варьированием в требуемых пределах независимых переменных (скорость резания, подача, диаметр инструмента и механические свойства материала заготовки).

Моделирование обработки производилось в системе DEFORM 3D, являющейся одной из наиболее мощных систем для моделирования обработки резанием с помощью МКЭ. 3D модель инструмента была создана в формате файлов для стереолитографии (*.stl) в отечественной системе трехмерного моделирования T-Flex CAD 3D. При моделировании резания к инструменту прикладывалось вращательное движение вокруг собственной оси и поступательное движение подачи.

Поскольку упругая составляющая деформации заготовки при резании составляет не более 0,1%, заготовка для ускорения времени расчета принимается жестко-пластичной. Инструмент при расчете полей напряжений и деформаций в заготовке принимается идеально жестким. Подобные упрощения не вносят существенной погрешности в результаты расчета. Механические свойства материала заготовки и инструмента задавались путем выбора соответствующего материала из имеющихся в программном комплексе библиотек. Коэффициент трения между инструментом и заготовкой принимался равным 0,38.

Моделировалась обработка без применения смазочно-охлаждающих технологических сред.

В качестве критерия разрушения был принят нормализованный критерий Кокрафта-Лейтема (Cocraft-Lathem), поскольку он достаточно адекватно описывает разрушение поликристаллических металлов. Численное значение критерия разрушения было принято равным 0,64.

Переразбиение конечноэлементной сетки по мере деформирования заготовки производится автоматически. Условия переразбиения задавались таким образом, чтобы наиболее мелкие элементы были в местах наибольшей деформации, что повышает точность расчетов.

На рис. 1 приведены поля эквивалентных напряжений и деформаций при фрезеровании заготовки из стали 45 фрезой диаметром 100 мкм.

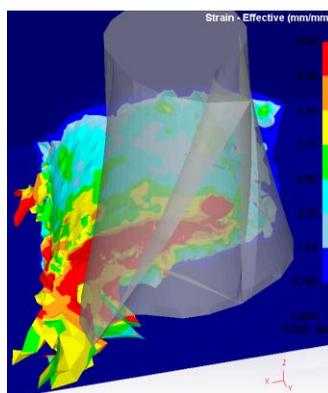
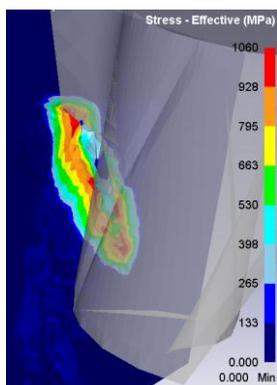
На рис. 2 приведены поля эквивалентных напряжений и деформаций при сверлении заготовки из стали 45 сверлом диаметром 200 мкм.

График силы резания P_y при фрезеровании заготовки из стали 45 фрезой диаметром 100 мкм и силы резания P_z при сверлении

заготовки из стали 45 сверлом диаметром 200 мкм представлен на рисунке 3.

Полученные в результате моделирования силы резания хорошо совпадают с известными экспериментальными данными [4, 5, 9, 10].

Для выявления характера влияния режимов резания на силы резания и температуру проведен вычислительный эксперимент по моделированию микрофрезерования и микросверления при различных режимах обработки. Диапазон варьирования скорости резания составил от 1 до 20 м/мин для скорости резания v , от 1 до 50 мм/мин для подачи s , от 0,0005 до 0,01 мм для глубины резания t и от 0,05 до 0,5 мм для диаметра фрезы и сверла d .



Напряжения (а) и деформации (б) при фрезеровании заготовки из стали 45 фрезой диаметром 100 мкм.

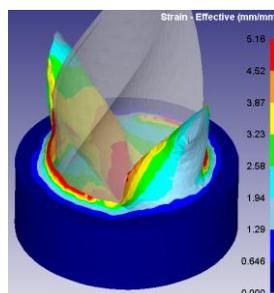
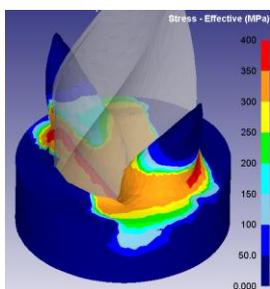
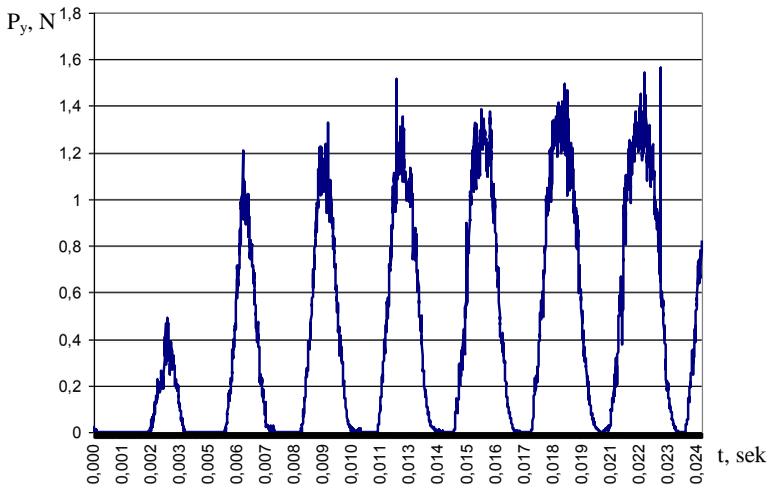
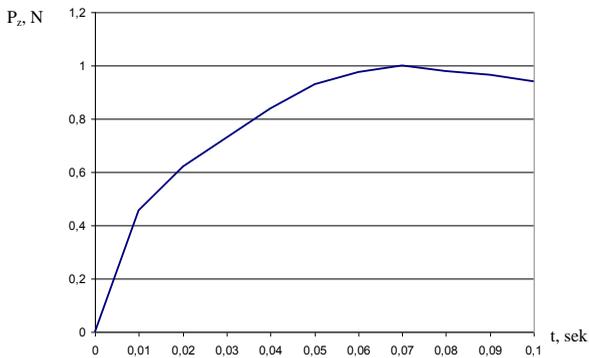


Рисунок 2 - Напряжения (а) и деформации (б) при сверлении заготовки из стали 45 сверлом диаметром 200 мкм.



а



б

Рисунок 3. - Графики силы резания P_y (а) при фрезеровании заготовки из стали 45 фрезой диаметром 100 мкм и силы резания P_z (б) при сверлении заготовки из стали 45 сверлом диаметром 200 мкм.

В результате регрессионного анализа результатов проведенного вычислительного эксперимента был получен комплекс математических моделей, описывающих характера влияния режимов микрорезания при

сверлении и фрезеровании на силы резания и температуру. В качестве примера подобных моделей можно привести зависимости температуры и силы резания при фрезеровании заготовки из стали 45:

$$T = 153 - 1,149V + 0,231V^2 + 210t + 5,3t^2 + 51,1d + 0,525s - 0,0012s^2;$$

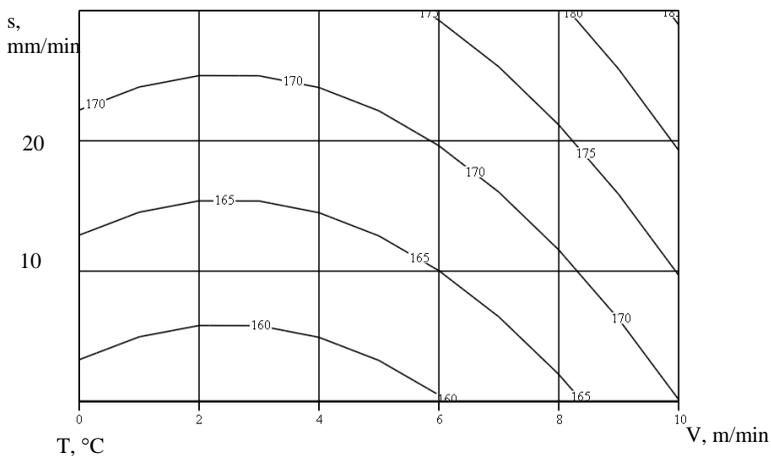
$$P = 0,248 + 5,12d - 0,02523V + 0,00534V^2 + 122,7t + 0,00165s^2.$$

Полученные при расчете по данным формулам графики зависимости температуры (а) и силы (б) резания от подачи s и скорости резания v при фрезеровании заготовки из стали 45 фрезой диаметром 100 мкм с подачей 10 мм/мин приведены на рисунке 4.

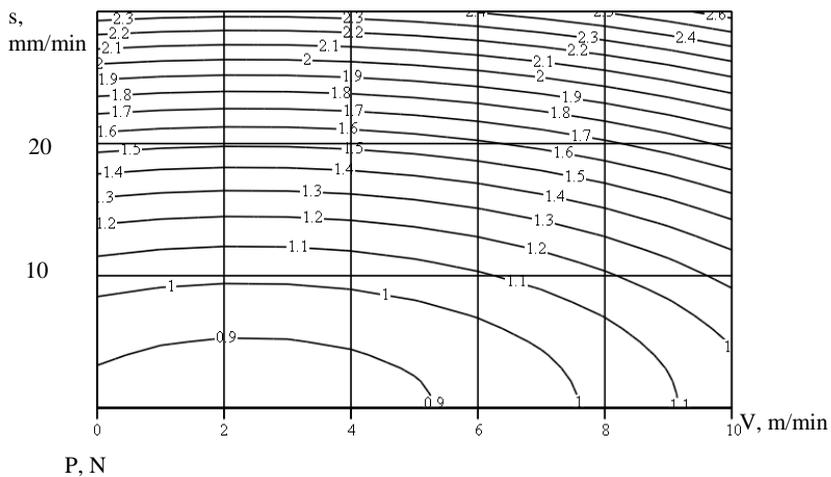
Из анализа полученных математических моделей можно сделать вывод о том, что наибольшее влияние на силу резания оказывают глубина резания и подача, а на температуру резания оказывает скорость резания.

Разработанный комплекс моделей дает возможность выбирать режимы обработки при проектировании технологических процессов субтрактивной обработки микроскопических деталей.

Работы проводятся при поддержке Минобрнауки РФ в рамках соглашения №14.578.21.0070 «Разработка технологии для субтрактивной обработки многослойных гетерогенных структур с нанометровой точностью позиционирования исполнительных механизмов», уникальный идентификатор проекта RFMEFI57814X0070.



а



б

Рисунок 4. - Графики зависимости температуры (а) и силы (б) резания от подачи s и скорости резания v при фрезеровании заготовки из стали 45 фрезой диаметром 100 мм с подачей 10 мм/мин.

Список литературы:

1. Киричек А.В., Афонин А.Н. Моделирование нарезания резьбы с помощью метода конечных элементов // Известия ОрелГТУ. Машиностроение. Приборостроение, 2008, №4-2/272 (550). С. 29-32.
2. Корендяев Г.К. О конечноэлементном моделировании процесса обработки металлов резанием // Вестник научно-технического развития, 2015, № 2 (90), 3(91).
3. Криворучко Д.В., Залого В.О., Корбач В.Г. Основи 3D-модельовання процесів механічної обробки методом скінченних елементів: навчальний. - Суми: Вид-во СумДУ, 2009. 208 с.
4. Afazov S.M., Ratchev S.M., Segal J. Modelling and simulation of micro-milling cutting forces // Journal of Materials Processing Technology, №210 (2010). Pp. 2154–2162.
5. Dilip Kumar Bagal. Experimental investigation and modelling microdrilling operation of aerospace material. - Rourkela: National Institute Of Technology, PhD Thesis, 2012.
6. Kirichek A.V., Afonin A.N. Stress-Strain State of the Thread-Milling Tool and Blank // Russian Engineering Research, Vol. 27, No. 10, 2007. Pp. 715-718.
7. Klocke F., Gerschwiler K., Abouridouane M. Size effects of micro drilling in steel // Production Engineering, 2009, Volume 3, Issue 1. Pp 69-72.
8. Mahalik N. P. Micromanufacturing and Nanotechnology. - Berlin: Springer-Verlag, 2006. 477 P.
9. Newby, G. Empirical analysis of cutting force constants in micro-end-milling operations / G. Newby, S. Venkatachalam, S.Y. Liang // Journal of Materials Processing Technology №192–193 (2007). Pp. 41–47.
10. Xiaoliang, Jin. Prediction of micro-milling forces with finite element method / Xiaoliang Jin, Yusuf Altintas // Journal of Materials Processing Technology, №212 (2012). Pp. 542– 552.

МЕТОДЫ ИНТЕГРАЦИИ МОДЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ В СРЕДУ MSC.ADAMS ДЛЯ СОВМЕСТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ МЕХАНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ С СИСТЕМАМИ УПРАВЛЕНИЯ

**Бушуев Д.А., ст. преподаватель,
Рубанов В.Г., д-р техн. наук, проф.,
Бажанов А.Г., канд. техн. наук, доц.**

*Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова*

Одним из перспективных направлений в компьютерном инженерном анализе мехатронных и робототехнических систем и автоматизированных комплексов является осуществление совместного динамического моделирования механических объектов с системами управления. Ярким примером такой системной взаимной интеграции можно считать связку MSC.Adams с MATLAB/Simulink. Основное достоинство данного подхода заключается в возможности учета реальной динамики сложных механических объектов (трения, нелинейных эффектов в передачах, податливости звеньев, контактного взаимодействия с внешними объектами и др.) при моделировании в процессе проектирования и отладки систем автоматического управления [1]. Данная статья посвящена рассмотрению возможностей решения наиболее часто возникающей задачи по добавлению модели электродвигателей в механические объекты, созданные в среде MSC.Adams с модулем Machinery.

При наличии модуля Motor в MSC.Adams Machinery (начиная с версии 2014) существует три способа интеграции модели электродвигателей для моделирования динамики с механическими объектами:

- использование моментной кривой, задаваемой вручную (Curve Based);
- использование стандартных моделей электродвигателей с параметрами, задаваемыми в модуле Motor (Analytical);
- использование внешней модели электродвигателя (External), созданной в среде моделирования систем управления MATLAB/Simulink, MSC.Easy5, LabView и др.

Первый способ требует точного знания зависимости тягового момента от частоты вращения и применения интерполяции, ввиду чего

используется редко из-за необходимости выполнения предварительных расчетов и заполнения соответствующей таблицы.

С помощью метода Analytical модуля Motog можно создавать вентильные, шаговые, асинхронные двигатели, а также коллекторные двигатели постоянного тока с последовательным и параллельным возбуждением. Однако используемые модели электродвигателей при данном представлении являются упрощенными, поскольку не содержат некоторых нелинейностей и динамических компонент, например, в уравнениях для расчета момента в коллекторных машинах постоянного тока не учитывается ЭДС самоиндукции в цепи якоря [2].

Рассмотрим третий способ на примере интеграции модели двигателя постоянного тока с независимым возбуждением.

При совместном моделировании динамики механических объектов с системами управления выходным параметром моделей электродвигателей является тяговый момент M_T , а входным – круговая частота вращения вала ω , которая в двигателе постоянного тока используется для задания обратной связи по ЭДС, наводимой в обмотке якоря магнитным потоком обмотки возбуждения Φ_e .

На основании закона Кирхгофа запишем уравнение для якорной цепи:

$$U_y = I_a R_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + E_o, \quad (1)$$

где I_a – ток якорной цепи, R_a – суммарное активное сопротивление якорной цепи; L_a – суммарная индуктивность якорной цепи; E_o – ЭДС, наводимая в обмотке якоря магнитным потоком Φ_e , равная

$$E_o = k_{эм} \omega, \quad (2)$$

где ω – круговая частота вращения вала; $k_{эм}$ – единый электромагнитный коэффициент, определяемый как

$$k_{эм} = \frac{p}{2\pi} \frac{N}{a} \Phi_e,$$

где p – число пар полюсов, N – число проводников в обмотке якоря, a – число параллельных ветвей обмотки.

Поскольку в паспортных данных конструктивные сведения, как правило, отсутствуют, электромагнитный коэффициент можно приблизительно вычислить по регулировочной характеристике двигателя в номинальном режиме работы

$$\omega_n = \frac{U_n}{k_{эм}} - \frac{I_n R_a}{k_{эм}},$$

откуда

$$k_{ЭМ} = \frac{U_n - I_n R_a}{\omega_n},$$

где U_n , I_n , ω_n – номинальные значения напряжения, тока и частоты вращения.

Подставляя в уравнение (1), с учетом соотношения (2), выражение для определения момента, развиваемого двигателем

$$M = I_a k_{ЭМ},$$

получим

$$U_y(t) = \frac{M(t)}{k_{ЭМ}} R_a + \frac{L_a}{k_{ЭМ}} \frac{dM(t)}{dt} + k_{ЭМ} \omega(t),$$

или, в операторной форме

$$U_y(t) = \frac{M(t)}{k_{ЭМ}} (L_a p + R_a) + k_{ЭМ} \omega(t), \quad (3)$$

где p – оператор Лапласа.

Таким образом, момент, развиваемый двигателем, исходя из уравнения (3) равен

$$M(t) = \frac{k_{ЭМ} (U_y(t) - k_{ЭМ} \omega(t))}{L_a p + R_a}. \quad (4)$$

Учитывая полученное соотношение (4) для определения момента, структура модели двигателя постоянного тока в среде Simulink при совместном моделировании с механическими объектами может быть представлена в следующем виде (рис. 1).

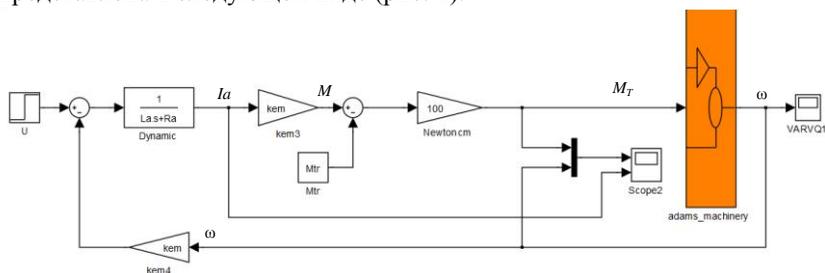


Рисунок 1 – Структура модели двигателя постоянного тока в среде Simulink при совместном моделировании с механическими объектами

В качестве примера моделировался электродвигатель постоянного тока СЛ-369А (с паспортными данными, взятыми из [3]) с закрепленным на валу маховиком (рис. 2). Следует заметить, что

габариты двигателя в данном случае не совпадают с паспортными, однако инерционные свойства якоря были учтены на шаге задания геометрии.

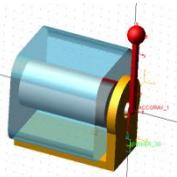


Рисунок 2 – Механическая часть электродвигателя с маховиком

В результате совместного моделирования получились следующие результаты (рис. 3).

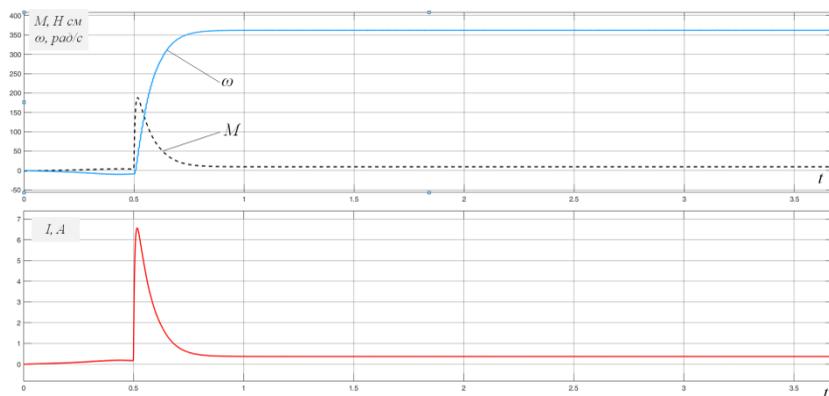


Рисунок 3 – Результаты моделирования

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Белгородской области в рамках проекта №14-41-08016 «р_офи_м» и проекта ПСР №А-5/15.

Список литературы:

1. Коренева Т.Ю., Бушуев Д.А. Разработка и исследование модели манипулятора в среде MSC ADAMS // Сб. докл. междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых БГТУ им. В. Г. Шухова «Исследования и инновации в ВУЗе», Белгород, 01-30 мая 2015 г. Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2015. С. 2871-2875.

2. MSC Combined Documentation 2015 [Электронный ресурс]. Систем. требования: AdobeAcrobatReader. URL: "\\MSC.Software\Combined Documentation\2015\main_library.pdf" (дата обращения: 01.10.2016).
3. Волков Н.И., Миловзоров В.П. Электромашинные устройства автоматики. Учеб. для вузов по спец. «Автоматика и телемеханика», 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк. 1986. 335 с.

ОРГАНИЗАЦИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СОВОКУПНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УЗЛОВ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ЦЕМЕНТНОЙ ПЕЧИ

Вашенко Р.А., аспирант,
Бажанов А.Г., канд. техн. наук, доц.,
Рубанов В.Г., д-р техн. наук, проф.
*Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова*

Комплекс процессов, происходящих во вращающихся печах под воздействием тепловой энергии, весьма обширен и сложен. Процессы горения топлива, движения газов и материала, теплообмена и физико-химических превращений сырьевой смеси тесно связаны между собой [1]. Возникает достаточно большое количество трудностей при эксплуатации печного агрегата. К ним можно отнести проблемы поддержания оптимальных показателей и параметров технологического процесса, сложность их описания в виде дифференциальных уравнений ввиду трудно структурируемой физико-химической динамики объекта. Чтобы получить возможность проводить детальное изучение всех процессов, предлагается заменить непрерывное поведение технологической величины ее дискретным представлением в виде режимов, представляющих собой элементарную часть переходного процесса, происходящего с этой величиной в объекте [2]. Такой подход является исследованием технологических процессов «снизу» и для его реализации строятся модели в виде нечетких диаграмм поведения узлов, которые служат основой для создания автоматизированной системы управления цементной печью [3].

На сегодняшний день по результатам изучения и исследования процесса обжига клинкера, а также на основе специализированной литературы и мнений экспертов-технологов ЗАО «Осколцемент», г. Старый Оскол, разработаны модели одиннадцати узлов цементной печи: «Ток нагрузки на главный привод печи – $U_{I_{\text{ГП}}}$ », «Температура материала в зоне подогрева – $U_{T_{\text{П}}}$ », «Разрежение в горячей головке печи – $U_{P_{\text{ГК}}}$ », «Концентрация углекислого газа в отходящих газах – U_{CO_2} », «Температура готового клинкера – $U_{T_{\text{К}}}$ », «Концентрация

кислорода в отходящих газах – U_{O_2} », «Температура материала в зоне сушки – $U_{T_{МЗС}}$ », «Температура вторичного воздуха – $U_{T_{ВВ}}$ », «Температура отходящих газов – $U_{T_{ОТГ}}$ », «Температура аспирационного воздуха – $U_{T_{ав}}$ », «Гранулометрический состав клинкера – U_{Gran} ».

Напомним, что узел – это часть технологической структурной схемы аппарата, которая соответствует конкретной выходной технологической величине и включает все воздействующие на эту величину входные величины аппарата, направленные связи между ними с учетом всех промежуточных величин и параметров [4].

С помощью методики, предложенной в [5], созданы модели функционирования показанных выше технологических величин в виде нечетких диаграмм поведения

Но поскольку реализация алгоритма совместной работы узлов для советующей системы заключается в получении производственных правил, которые позволяют советующей системе определить режим работы цементной печи и оценить состояние технологического процесса, то возникает проблема их большого количества.

Каждому узлу вращающейся печи соответствует выходная позиция P , которая содержит информацию о режиме работы конкретной выходной технологической величины (рис. 1).

Соответственно, чем больше рассматривается узлов, тем больше выходных позиций P ,

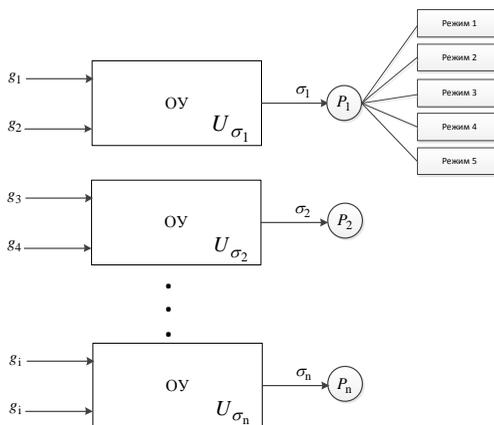


Рисунок 1 – Выходные позиции узлов цементной печи

в которых содержится как минимум несколько значений режима работы технологической величины. Следовательно, значительно увеличивается количество производственных правил – конструкции типа: «Если (P_1 is Z) И (P_2 is PS) И (P_3 is PB) И (P_4 is PB) И (P_n is PB), то «Перевести на тихий ход».

Данная проблема приводит к тому, что экспертам и специалистам крайне затруднительно оценить адекватность данных правил.

Учитывая, что технологические величины реального объекта достаточно тесно взаимодействуют друг с другом, то за счет выявления межузловых связей необходимо добиться снижения количества производственных правил. Поэтому целью является сокращение количества выходных позиций P , что показано на рис. 2.

Данную задачу можно решить путем агрегирования моделей на основе нечетких диаграмм поведения, то есть эквивалентного преобразования в более крупные модели.

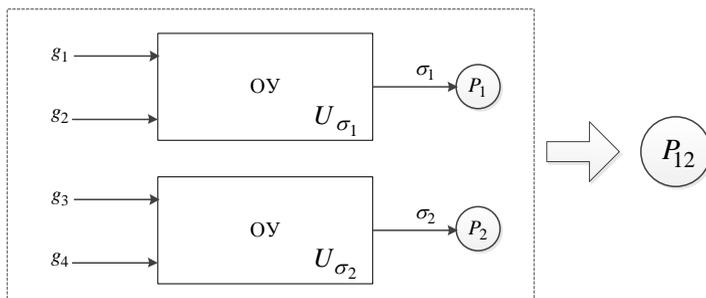


Рисунок 2 – Сокращение выходных позиций узлов

Анализируя модели узлов вращающейся печи в виде нечетких диаграмм поведения, можно проследить тесную взаимосвязь выходных технологических величин, как прямое, так и косвенно влияние друг на друга. Это объясняется тем, что процессы внутри печного агрегата связаны между собой. Необходимо использовать данные особенности протекания технологических процессов для осуществления преобразований по укрупнению моделей.

На рис. 3 показана схема взаимодействия, основанная на последовательном соединении двух узлов, когда выходная технологическая величина σ_1 узла U_{σ_1} является входным

возмущающим воздействием (g_3) для другой выходной технологической величины σ_2 узла U_{σ_2} .

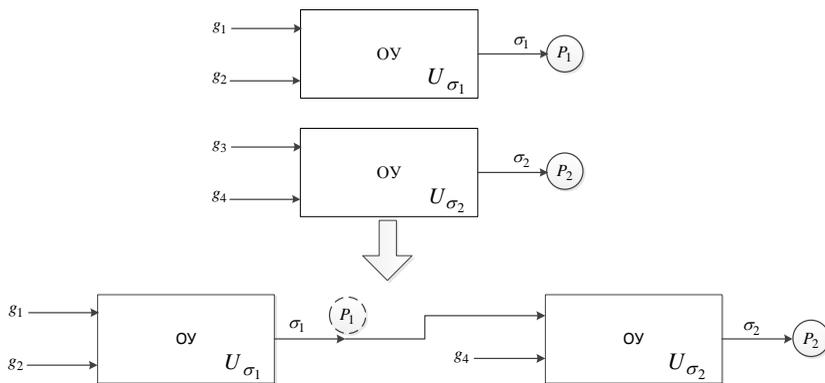


Рис. 3. Схема взаимодействия узлов U_{σ_1} и U_{σ_2}

Можно заметить, что вместо двух выходных позиций P_1 и P_2 , получаем одну выходную позицию P_2 , которая содержит всю необходимую информацию о двух узлах U_{σ_1} и U_{σ_2} .

Функционирование модели узла U_{σ_1} при этом никак не изменяется, а данные о режиме работы выходной технологической величины σ_1 поступают на вход узла U_{σ_2} вместо считывания этого параметра с датчика. Таким образом, узлы U_{σ_1} и U_{σ_2} рассматриваются не как отдельно функционирующие модели, а как одна, но более крупная модель, характеристики которой содержатся в одной выходной позиции P_2 .

Выходная технологическая величина σ_i может являться входным возмущающим воздействием g_i для нескольких узлов или несколько выходных технологических величин σ_i могут являться входными возмущающими воздействиями для узла.

Основные преимущества при осуществлении агрегирования моделей на основе взаимосвязи узлов: уменьшение выходных позиций P , снижение количества продукционных правил, сокращение числа подсетей в единой структуре управления, более точная и быстрая оценка функционирования моделей узлов.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Белгородской области в рамках проекта №14-41-08016 «р_офи_м» и в рамках выполнения проекта ПСР №А-5/15.

Список литературы:

1. Древицкий Е.Г., Добровольский А.Г., Коробок А.А. Повышение эффективности работы вращающихся печей. М.: Стройиздат, 1990.
2. Магергут В.З., Игнатенко В.А., Бажанов А.Г., Шаптала В.Г. Подходы к построению дискретных моделей непрерывных технологических процессов для синтеза управляющих автоматов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова, 2013. № 2. С. 100 – 102.
3. Магергут В.З., Юдин Д.А., Бажанов А.Г., Порхало В.А., Копылов А.С., Степовой А.А., Ващенко Р.А. Интеллектуальная советующая система управления цементными вращающимися печами с применением технического зрения // Мир цемента. 2013. № 2. С. 51 – 59.
4. Магергут В.З., Юдицкий С.А., Перов В.Л. Построение логических моделей химико-технологических объектов (первичные и исходные модели). М.: МХТИ им. Д.И. Менделеева, 1988.
5. Бажанов А.Г., Ващенко Р.А., Магергут В.З. Нечеткие диаграммы поведения узлов для сложных технологических объектов, принципы их построения и использования // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2014. № 9. С. 26 – 34.

АНАЛИЗ РЕГУЛЯТОРОВ ТЕМПЕРАТУРЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СЕКЦИЕЙ ТУННЕЛЬНОЙ ПЕЧИ

Величко Д.В., доц.
Рубанов В.Г. д-р техн. наук, проф.,
Костин С.В., магистрант

*Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова*

Управление температурой в секции туннельной печи вспенивания для производства пеностекольных блоков должно отвечать высоким требованиям к точности поддержания заданного значения температуры для достижения требуемого качества готовой продукции. Поэтому важно выбрать регулятор, при работе которого будут удовлетворены все требования. Туннельная печь достаточно инерционный объект [1, 2]. При анализе передаточной функции объекта управления, и рекомендаций по выбору регуляторов, был сделан вывод о том, что при таких параметрах объекта использование импульсного или аналогового регулятора может в итоге привести к одинаковым результатам [3]. Для ответа на вопрос об оптимальном регуляторе в среде Matlab Simulink было проведено моделирование работы системы управления температурой секции туннельной печи с ПИД-регулятором, двухпозиционным, трёхпозиционным, адаптивным трёхпозиционным с самонастройкой средней позиции (АТПР) [4]. Структурная схема системы стабилизации температуры имеет вид, представленный на рис. 1, который работает следующим образом: аналого-цифровой преобразователь (АЦП) контроллера оцифровывает рассогласование ε между сигналом $T_{зд}$, формируемым задатчиком ЗД, и сигналом с датчика W_d , находящегося в обратной связи системы.

Программно с помощью контроллера реализован регулятор W_p и широтно-импульсный модулятор сигнала (ШИМ), который необходим для управления температурой T_n ТЭНов W_n секции печи W_c . Объект управления W_{ou} состоит из нагревателей и пространства внутри печи.

Для создания модели работы было получено описание объекта управления в виде передаточной функции. Было предложено два варианта описания – в виде аperiodического звена первого порядка с запаздыванием и аperiodического звена второго порядка с запаздыванием – см. табл. 1, где T_0 – постоянная времени, K_0 –

коэффициент передачи объекта в установившемся режиме, τ_0 – время задержки.

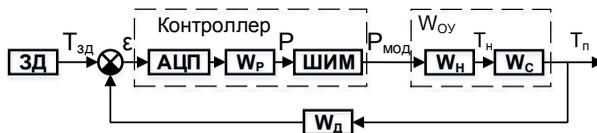


Рисунок 1 – Структурная схема системы управления

Таблица 1 – Математическое описание объекта управления

Вид дифференциального уравнения	Передаточная функция
$T_1 \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = K_1 x(t - \tau_1)$	$W_1(s) = \frac{K_1}{T_1 s + 1} e^{-\tau_1 s}$
$T_2^2 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + 2T_2 \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = K_2 x(t - \tau_2)$	$W_2(s) = \frac{K_2}{(T_2 s + 1)^2} e^{-\tau_2 s}$

В результате оценки переходной функции модели первого порядка получены коэффициенты $T_1 = 941$ с, $K_1 = 9,1$ [%P/°C], $\tau_1 = 572$ с, а при помощи метода Орманса были определены коэффициенты передаточной функции второго порядка $T_2 = 301$ с, $K_2 = 9,1$ [%P/°C], $\tau_2 = 692$ с.

Настройки ПИД-регулятора выбирались исходя из критерия оптимальности для типового переходного процесса с минимумом интеграла ошибки:

$$I = \int_0^{\infty} y^2(t) dt \rightarrow \min_{K_p, T_{из}}$$

где $y(t)$ – функция, описывающая переходный процесс, K_p , $T_{из}$ – коэффициент передачи и время издрорма – настройки регулятора. Двухпозиционный закон управления (ДПР) подключает нагрузку при сигнале рассогласования ε большим некоторого порогового значения $\varepsilon_{пор}$, отключает – при $\varepsilon \leq \varepsilon_{пор}$; Трёхпозиционный регулятор (ТПР) имеет фиксированную среднюю позицию, которая активна при $0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{пор}$. Адаптивный трёхпозиционный закон в процессе работы подстраивает среднюю позицию под условия нагрузки [5, 6]. Алгоритм работы простейшего адаптивного трёхпозиционного регулятора (АТПР) представлен на рис. 2 в виде сети Петри. В начальный момент времени активна средняя позиция СП.

Если регулируемая величина выходит из зоны нечувствительности, то срабатывает переход t_1 и начинает работать верхняя позиция ВП, если

выбег произошёл в большую сторону, либо нижняя позиция НП, через сработавший переход t_3 , если в меньшую. Параллельно происходит подстройка СП в сторону уменьшения $-\Delta$ либо увеличения $+\Delta$ в зависимости от активной в настоящий момент позиции. Если активна ВП, подстройка производится вверх, и наоборот, соответственно. Включение СП происходит по возврату в зону нечувствительности управляемой величины через переход t_2 или t_4 .

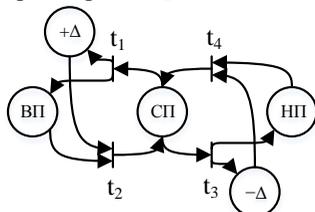


Рисунок 2 – Алгоритм работы АТПР

В процессе моделирования работы системы управления температурой в туннельной печи были получены результаты, представленные на рис. 3. Моделировались следующие условия: задающее воздействие составляет $600\text{ }^{\circ}\text{C}$, возмущение имеет величину $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (появление тигля в канале печи) и наносится непосредственно по нагрузке в момент времени $t = 2000\text{ с}$, а снимается при $t = 2300\text{ с}$. Была промоделирована работа системы при различном описании объекта управления. Результаты сведены в табл. 2.

Таблица 2 – Результаты моделирования работы системы управления

Регулятор	Описание объекта	$t_{\text{компл}}, \text{с}$	$t_{\text{р}}, \text{с}$	$\Delta T_{\text{уст}}, \text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{А}}, \text{ }^{\circ}\text{C}$
ПИД	1 порядок	300		300	
	2 порядок	520	6000	0	0
ДПР	1 порядок	-	2120	10	55
	2 порядок	-	2400	30	95
ТПР	1 порядок	600	2100	20	20
	2 порядок	630	2300	20	40
АТПР	1 порядок	380	1600	0	15
	2 порядок	380	2000	5	25

При анализе результатов выявлено, что, оказывается, описание объекта в виде апериодического звена первого порядка с запаздыванием даёт лучшие показатели качества, чем при описании звеном второго порядка (см. рис. 3). Анализируя поведение выходной координаты системы при использовании различных регуляторов и данных из табл. 2, можно сделать вывод, что наиболее предпочтителен для использования адаптивный трёхпозиционный регулятор, так как время компенсации возмущения $t_{\text{комп}}$ при его использовании низкое, однако в отличие от ПИД регулятора, выводит регулируемую величину на установившийся режим с ошибкой $\Delta T_{\text{уст}}$, но за меньшее время t_p , что положительно сказывается на энергопотреблении всей установки. Надо отметить, что сильное влияние на точность работы регуляторов оказывает запаздывание объекта, которое составляет 692 секунды. Именно этот параметр снижает эффективность работы позиционного регулятора, вызывая колебания с амплитудой T_A на нагрузке в установившемся режиме. В общем случае, благодаря запаздыванию, регулятор даёт команды на объект управления с опозданием, что приводит к выходу управляемой величины за пределы зоны нечувствительности и возникновению автоколебаний.

Для установления причин данного явления целесообразно построить комплексно-частотную характеристику (КЧХ) разомкнутой системы с оптимальным ПИД-регулятором при описании объекта управления различными способами (рис. 4). Можно заметить, что при описании объекта уравнением второго порядка запасы устойчивости ниже.

С точки зрения теории автоматического управления [7] оптимальное управление объектом второго порядка в любом случае даёт более длительный переходный процесс, чем при оптимальном управлении объектом первого порядка.

Так как в туннельной печи запаздывание существенно, то переходные процессы затягиваются, и, соответственно, при описании объекта уравнением второго порядка результат будет хуже.

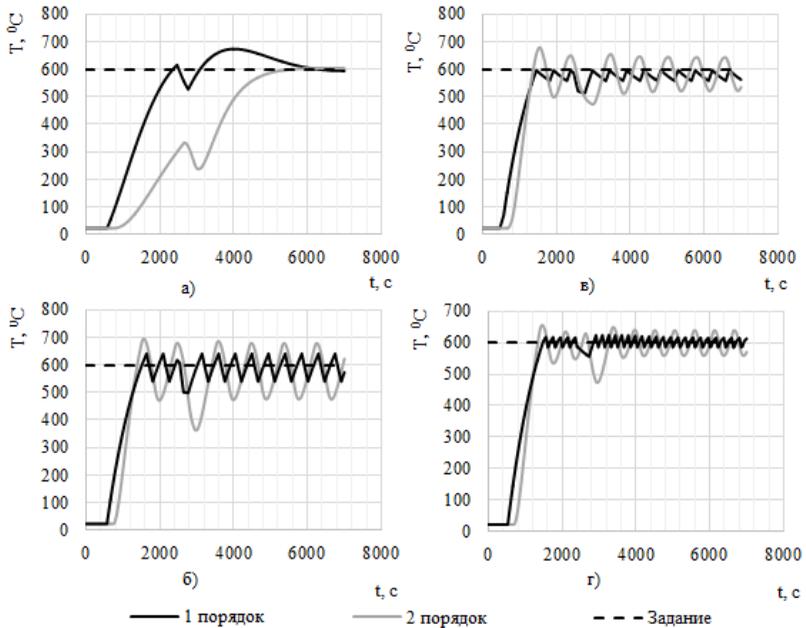


Рисунок 3 – Результаты моделирования работы системы с различными регуляторами при различном описании объекта управления: а – ПИД, б – ДПР, в – ТПР, г – АТПР

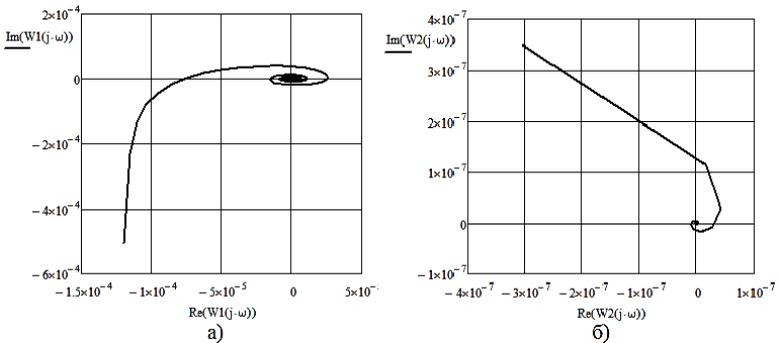


Рисунок 4 – КЧХ разомкнутой системы при описании ОУ с помощью уравнения: а – 1-го порядка, б – 2-го порядка

Итак, по результатам моделирования можно сделать вывод о том, что наилучшее качество регулирования температуры в секции туннельной печи даёт использование адаптивного трёхпозиционного регулятора, настройка параметров которого проводится для объекта, описываемого апериодическим звеном первого порядка с запаздыванием.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ № 14-41-08016 р_офи_м “Разработка интеллектуальных систем управления сложными технологическими процессами на основе советующих систем с техническим зрением”.

Список литературы:

1. Рубанов В.Г., Кижук А.С., Луценко О.В., Кузенко А.А. Автоматизированная система управления производством пеностеклянных теплоизолирующих облицовочных блоков // Строительство. 2000. №10. С.93–97.
2. Ильюшин Ю.В. Система автоматического регулирования температуры туннельной печи конвейерного типа // Альманах современной науки и образования. 2012. №4 (59). С.97–103.
3. Капелович А.П. Инженерные методы расчета при выборе автоматических регуляторов. М.: Металлургиздат, 1961. 191 с.
4. Магергут В.З., Величко Д.В., Андреев А.А. Автоматизация двухъярусной туннельной печи с использованием адаптивного трёхпозиционного регулятора // Математические методы в технике и технологиях: сб. тр. XXVIII Междунар. науч. конф., Рязань, 24-26 ноября 2015 г. / Рязанск. гос. радиотехн. ун-т; отв. ред. А.А. Большаков. Рязань, 2015. Т.8. С.133-139.
5. Величко Д.В., Магергут В.З. Построение детерминированной и стохастической динамических моделей процесса нагрева пеностеклянной шихты // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2015. №2. С.90–94.
6. Порхало В.А., Бажанов А.Г., Магергут В.З. Информационные представления адаптивного трёхпозиционного алгоритма для его аппаратных и программных реализаций // Научные ведомости Белгородского государственного университета. 2011. №1 (96). Вып.17/1. С. 161–168.
7. Рубанов В.Г. Теория автоматического управления (нелинейные, оптимальные и цифровые системы): учеб. Пособие / В.Г. Рубанов. – Ч.II. Белгород: Изд-во БГТУ, 2006. 256 с.

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ РЕЗАНИЕМ

**Воронкова М.Н., канд. техн. наук, доц.,
Масленников А.С.**

*Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова*

Одна из актуальных задач машиностроения – дальнейшее развитие, совершенствование и разработка новых технологических методов обработки заготовок, применение новых конструкционных материалов и оптимизация режимов обработки.

На примере технологии изготовления «гайки» для муфты фрикционной мы рассмотрим методику оптимизации режимов резания для токарной операции.

Для расчета оптимальных значений режимов резания с использованием методов линейного программирования введены технические ограничения и оценочную функцию приводим к линейному виду логарифмированием, воспользовавшись методическими указаниями [1].

В качестве оценочной функции при оптимизации по двум параметрам n и S необходимо использовать минимальную себестоимость:

$$F_{\min} = \frac{c}{n \cdot S} \quad (1)$$

Из формулы (1) видно, что функция F_{\min} будет наименьшей, когда произведение (nS) будет максимальным.

Технические ограничения строятся на основе известных зависимостей. Ограничение по стойкости инструмента будет получено из следующих выражений (2) и (3):

$$v = \frac{C_v}{T^m \cdot t^x \cdot S^y} \cdot K_v, \quad (2)$$

$$v = \frac{\pi D n}{1000}, \quad (3)$$

где T - период стойкости инструмента, мин.; m - показатель относительной стойкости; t - глубина резания, мм; D - диаметр заготовки, мм; C_v , x , y – коэффициенты, характеризующие условия обработки; K_v -

общий поправочный коэффициент. После преобразований получим техническое ограничение (4) в следующем виде:

$$ns^y \leq \frac{318 \cdot C_v}{D \cdot T^m \cdot t^x} \cdot K_v. \quad (4)$$

Аналогично определяются и другие технические ограничения. После логарифмирования получим:

$$\ln n + y \ln s = \ln \frac{318 \cdot C_v}{D \cdot T^m \cdot t^x} \cdot K_v \quad (5)$$

Введем обозначения:

$$x_1 = \ln(n), \quad (6)$$

$$x_2 = \ln(100s), \quad (7)$$

$$b_1 = \ln \frac{318 \cdot C_v}{D \cdot T^m \cdot t^x} \cdot K_v \cdot 100^{\delta} \quad (8)$$

Выделим наиболее важные ограничения:

Ограничение 1. Ограничение по стойкости инструмента. Находим в соответствии с рекомендациями [2] значения коэффициентов, входящих в уравнение (8):

$C_v=290$; $m=0,20$; $t=1,3$; $x_v=0,15$; $y_v=0,35$; $T=60$ мин.

$$K_v = K_{mv} \cdot K_{nv} \cdot K_{uv} \cdot K_r = 0,95$$

$$\text{Тогда } nS^{0,35} \leq \frac{318 \cdot 290}{59,4 \cdot 60^{0,2} \cdot 1,3^{0,15}} \cdot 0,95$$

$$\text{или } nS^{0,35} \leq 231,19.$$

Приводим полученное неравенство к линейному виду логарифмированием и после обозначения получаем:

$$x_1 + 0,35x_2 \leq b_1, \text{ где } b_1 = \ln(231,19 \cdot 100^{0,35}) = 7,05.$$

Ограничение 2. Мощность электродвигателя привода главного движения станка. Это ограничение выражается условием $N_{y\delta} \leq N_{\eta}$, где N - мощность электродвигателя привода главного привода станка, кВт, η - КПД кинематической цепи от электродвигателя к инструменту.

Эффективная мощность, затрачиваемая на процесс резания:

$$N_{\text{эф}} = \frac{P_z \cdot V}{102 \cdot 60}, \quad (9)$$

где P_z – сила резания, определяется как:

$$P_z = C_p \cdot t^{x_{Pz}} \cdot s^{y_{Pz}} \cdot v^{n_{Pz}} \cdot K_p \quad (10)$$

Подставляем в выражение значение составляющей силы резания P_z , получаем неравенство для второго технического ограничения:

$$n^{n+1} s^y \leq \frac{620 \cdot (10^3)^{n+1} \cdot N \cdot \eta}{C_p \cdot t^{x_{Pz}} \cdot D^{n_{Pz}+1} \cdot \pi^{n_{Pz}+1} \cdot K_p} \quad (11)$$

Значения коэффициентов определяем в соответствии с рекомендациями[2]:

$$C_p=300, x=1,0, y=0,75, n=-0,15.$$

$$K_{mp}=0,64, K_{\varphi p}=0,89, K_{\gamma p}=1, K_{\lambda p}=1, K_{r p}=0,87$$

$$K_p = K_{mp} \cdot K_{\varphi p} \cdot K_{\lambda p} \cdot K_{\gamma p} \cdot K_{r p} = 0,5$$

Мощность электродвигателя для станка 16A20Ф3 $N=11$ кВт, $\eta=0,75$. Тогда:

$$n^{0,85} s^{0,75} \leq \frac{620 \cdot (10^3)^{0,85} \cdot 11 \cdot 0,75}{300 \cdot 1,4^1 \cdot 59,4^{0,85} \cdot \pi^{0,85} \cdot 0,5} \leq 2007,53$$

После приведения к линейному виду и введения обозначений получим:

$$0,85x_1 + 0,75x_2 \leq b_2, \text{ где } b_2 = \ln(2007,53 \cdot 100^{0,75}) = 11,05.$$

Ограничение 3. Ограничение по минимальной частоте вращения шпинделя. Для частоты вращения шпинделя n это ограничение имеет вид $n \geq n_{\text{нб min}}$. Для станка 16A20Ф3 $n_{\text{нб min}} = 6,3 \text{ мин}^{-1}$. Тогда:

$$x_1 \geq b_3,$$

$$\text{где } b_3 = \ln(6,3) = 1,84.$$

Ограничение 4. Ограничение по максимальной частоте вращения шпинделя. Для частоты вращения шпинделя n это ограничение имеет вид $n \leq n_{\text{нб max}}$. Для станка 16A20Ф3 $n_{\text{нб max}} = 1250 \text{ мин}^{-1}$. Тогда:

$$x_1 \leq b_4,$$

$$\text{где } b_4 = \ln(1250) = 7,13.$$

При аналогичных преобразованиях были получены в линейном виде последующие ограничения: ограничение 5 – по наибольшей

подаче, ограничение 6 – по наименьшей подаче, ограничение 7 – по прочности режущего инструмента, ограничение 8 – по жесткости режущего инструмента, ограничение 9 – по требуемой шероховатости поверхности. Полученные ограничения образуют математическую модель процесса резания в аналитическом виде. Кроме технических ограничений, представляемых в виде системы неравенств, в состав модели входит оценочная функция f :

$$\begin{cases} x_1 + 0,35x_2 \leq 7,05 \\ 0,85x_1 + 0,75x_2 \leq 11,05 \\ x_1 \geq 1,84 \\ x_1 \leq 7,13 \\ x_2 \geq 2,30 \\ x_2 \leq 5,29 \\ -0,15x_1 + 0,75x_2 \leq 1,78 \\ -0,15x_1 + 0,75x_2 \leq 7,52 \\ x_1 \leq 7,04 \end{cases}$$

$$f_0 = (x_1 + x_2)_{\max}$$

Представленная математическая модель, решается графическим методом.

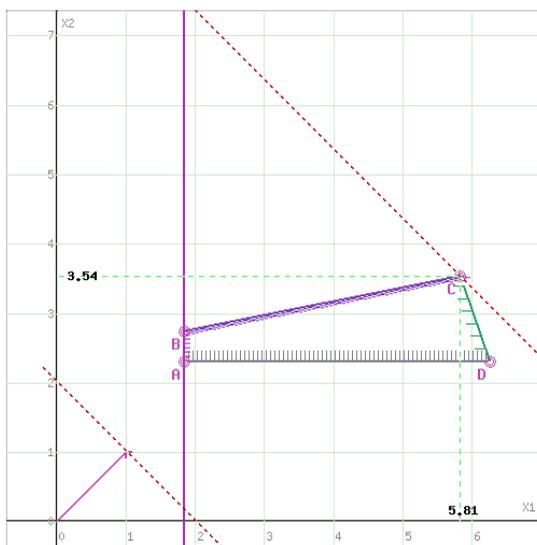


Рисунок 1 – Графическое построение математической модели определения оптимальных режимов резания

Получаем график математической модели, на котором область оптимальных значений представлена многоугольником ABCD. Максимальное значение оценочной функции f находится в точке C. Координаты этой точки являются оптимальными значениями:

$$x_1 = 5,81 \quad x_2 = 3,54.$$

Численные значения оптимальных режимов резания вычисляются по следующим зависимостям:

$$n_{opt} = e^{x_{1opt}} = e^{5,81} = 340 \text{ мин}^{-1}$$
$$S_{opt} = \frac{1}{100} \cdot e^{x_{2opt}} = \frac{1}{100} \cdot e^{3,54} = 0,34 \text{ мм / об}$$

Полученные режимы резания позволяют снизить износ инструмента, оптимизировать работу станка, а именно приблизить соотношение скорости изготовления детали и качества продукции, что повышает эффективность технологии изготовления детали в целом. Таким образом, можно выполнять автоматизацию и повышать эффективность практически в любом технологическом процессе.

Список литературы:

1. Аверченков В.И., Горленко О.А., Ильицкий В.Б. и др. Сборник задач и упражнений по технологии машиностроения: Учебное пособие для машиностроительных вузов по специальности «Технология машиностроения», «Металлорежущие станки и инструменты» Под общ.ред. Горленко О.А. – М.: Машиностроение. 1988, 192 с.
2. Косиловой А.Г. и Мещерякова Р.К.. Справочник технолога-машиностроителя. Т.1. М.: Машиностроение. 2003, 656 с.
3. Дуюн Т.А., Гринек А.В. Математическое моделирование технологических процессов в машиностроении: учеб. пособие. Белгород: Изд-во БГТУ. 2010, 100 с.
4. Шрубченко И.В., Рыбалко В.Ю. Оптимизация режимов резания при обработке поверхностей качения опор технологических барабанов // Технология машиностроения. 2013. №8. С. 12-16.
5. Шрубченко И.В., Мурыгина Л.В., Рыбалко В.Ю., Щетинин Н.А. Оптимизация режимов обработки бандажей на специальном стенде // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2013. № 3с. 91-96.

БИФУРКАЦИОННЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИМ ОБЪЕКТОМ

**Гольцов Ю.А., ст. преподаватель,
Кижук А.С., канд. техн. наук, доц.,
Рубанов В.Г., д-р техн. наук, проф.**

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Технология выращивания монокристаллов представляет собой процесс управляемой кристаллизации, при котором качество растущего кристалла определяется точностью управления условиями фазовых переходов [1]. При выращивании кристалла синтетического сапфира необходимо обеспечить закон изменения температуры в тигле от 25°C до 2050°C с определённой степенью наращивания и спада температуры, что предполагает применение автоматической системы управления с возможностью программного задания изменения температуры в тигле с заданной точностью.

Для решения задачи синтеза закона управления классическим методом аппроксимации по экспериментальной кривой разгона теплового объекта определена передаточная функция нагревательной установки следующего вида:

$$W(s) = \frac{K}{(T_1 \cdot s + 1)(T_2 \cdot s + 1)}, \quad (1)$$

где K – коэффициент передачи объекта, T_1, T_2 – постоянные времени объекта.

Используемые в настоящее время регуляторы температуры с тиристорными преобразователями существенно искажают форму кривой тока, потребляемого из сети, приводя к возникновению в питающей сети несинусоидальных режимов.

Для устранения указанных недостатков на базе патента авторов [2] разработана и реализована система управления нагревателем высокой мощности, построенная на основе высокочастотного преобразователя электрической энергии с широтно-импульсным регулированием [3].

Однако в нелинейных импульсных системах при вариации параметров объекта управления, а также воздействии внешних возмущений возможно возникновение сложных нелинейных явлений,

включая колебания на пониженных частотах, кратных частоте модуляции, квазипериодические и хаотические режимы [4,5].

Следствием этого является многократное увеличение амплитуды колебаний температуры нагревательной установки, снижение точности регулирования и нарушение хода технологического процесса.

Целью данной работы является численное исследование бифуркационных явлений в динамике импульсной системы управления нагревательной установкой.

1. Постановка и аналитическое решение задачи

Уравнение движения системы управления нагревательной установкой, непрерывная линейная которой описывается передаточной функцией (1), имеет вид

$$T_1 T_2 \frac{d^2 x}{dt^2} + (T_1 + T_2) \frac{dx}{dt} + x = K \varphi(\varepsilon), \quad (2)$$

где x – температура в нагревательной установке; ε , $\varphi(\varepsilon)$ – сигналы на входе и выходе широтно-импульсного модулятора, соответственно; K – коэффициент передачи непрерывной линейной части системы; T_1 , T_2 –

постоянные времени. Введем $x = x_1$, $\frac{dx}{dt} = x_2$ и перепишем уравнение движения (2) в нормальной форме Коши:

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= x_2, \\ \frac{dx_2}{dt} &= -\frac{1}{T_1 T_2} x_1 - \frac{T_1 + T_2}{T_1 T_2} x_2 + \frac{K}{T_1 T_2} \varphi(\varepsilon). \end{aligned} \quad (3)$$

Выходной сигнал модулятора $\varphi(\varepsilon)$

$$\varphi(\varepsilon) = \begin{cases} 1, & k \cdot T_0 < t < k \cdot T_0 + \tau_k; \\ 0, & k \cdot T_0 + \tau_k < t < (k+1) \cdot T_0; \end{cases} \quad (4)$$

$$k \in N;$$

где T_0 – период модуляции, τ_k – ширина импульса, определяемая видом импульсной модуляции. В работе рассматривается система с широтно-импульсной модуляцией первого рода (ШИМ-1) и пропорциональным

корректирующим звеном в цепи обратной связи. Тогда входной сигнал модулятора определяется выражением

$$\varepsilon = \alpha(V_{ref} - \beta x_1(kT_0)).$$

Здесь V_{ref} – сигнал задания температуры нагревательной установки, β – коэффициент передачи датчика температуры, α – коэффициент усиления.

При ШИМ-1 величина τ_k находится как:

$$\tau_k = \begin{cases} 0, & \varepsilon < 0; \\ T_0, & \varepsilon > V_s; \\ \frac{T_0 \varepsilon}{V_s}, & 0 \leq \varepsilon \leq V_s, \end{cases} .$$

где V_s – опорный сигнал модулятора.

Введем обозначения

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{1}{T_1 T_2} & -\frac{T_2 + T_1}{T_1 T_2} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K}{T_1 T_2} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Уравнения движения (3) примут вид:

$$\begin{aligned} \frac{dX}{dt} &= A \cdot X + B \cdot \varphi(\varepsilon); \\ \frac{dX}{dt} &= \begin{cases} A \cdot X + B, & \text{если } \varepsilon > 0 \\ A \cdot X, & \text{если } \varepsilon < 0 \end{cases}, \end{aligned} \quad (6)$$

Исследование динамической системы (6) можно свести к изучению свойств двумерного кусочно-гладкого отображения:

$$\begin{aligned} X_{k+1} &= F(X_k), \quad k = 0, 1, 2, \dots, \quad X_k = X(kT_0), \\ F(X_k) &= \exp(AT_0)[X_k + D] - \exp(A(T_0 - \tau_k))D, \quad D = A^{-1}B. \end{aligned}$$

Здесь ширина импульса τ_k согласно (5) определяется

$$\tau_k = \begin{cases} 0, & \varepsilon_k < 0; \\ T_0, & \varepsilon_k > V_s; \\ \frac{T_0 \varepsilon_k}{V_s}, & 0 \leq \varepsilon_k \leq V_s, \end{cases} \quad \cdot \varepsilon_k = \alpha(V_{ref} - CX_k),$$

где $C = (\beta, 0)$ – матрица - строка.

В исследованиях были выбраны следующие значения параметров модели: $T_1 T_2 = 10240 \text{ с}^2$; $T_1 + T_2 = 352 \text{ с}$; $K = 327.8 \text{ C}^\circ/(\text{В} \cdot \text{с})$; $T_0 = 10 \text{ с}$; $U_0 = 24 \text{ В}$ – напряжение питания; $\beta = 0.01 \text{ В/C}^\circ$; $V_s = 5 \text{ В}$; $\alpha > 0$; $V_{ref} = 5 \text{ В}$. Период T периодического движения динамической системы (6) в общем случае является кратным периоду внешнего воздействия T_0 : $T = mT_0$, $m = 1, 2, \dots$. Движение с таким периодом будем называть m -циклом или циклом периода m .

2. Бифуркационный анализ

На рис. 2 приведены однопараметрические бифуркационные диаграммы, рассчитанные для разных значений U_0 при изменении коэффициента усиления α .

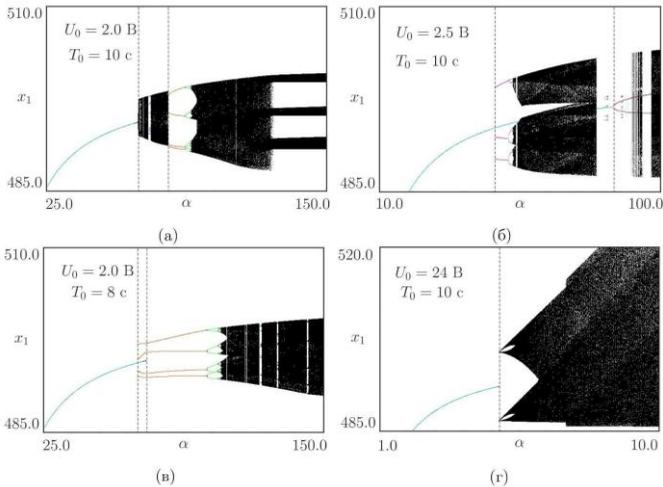


Рисунок 2 – Бифуркационные диаграммы при различных параметрах U_0 и T_0 , $V_s = 5 \text{ В}$, $V_{ref} = 5 \text{ В}$ (соответствует уставке 500 C°)

При проведении бифуркационного анализа в качестве варьируемых параметров были выбраны напряжение питания U_0 и коэффициент усиления α . При малых значениях U_0 система демонстрирует квазипериодическое поведение с ярко выраженной мультистабильностью. На рис. 2, а изображена бифуркационная диаграмма, иллюстрирующая рождение замкнутой инвариантной кривой, отвечающей двухчастотному квазипериодическому режиму.

Бифуркационная диаграмма, изображенная на рис. 2, б, иллюстрирует типичный сценарий рождения сосуществующих аттракторов. На рис. 2, в показан случай субкритического учетверения периода 1-цикла через так называемую бифуркацию граничного столкновения («border - collision bifurcation», см., например, [4–10]). На рис. 2, г представлен пример рождения 4-х полосного хаотического аттрактора (four-band chaotic attractor) через border-collision flip bifurcation [4,10].

Заключение

В статье представлены результаты бифуркационного анализа широтно-импульсной системы управления нагревательной установкой.

Выявлено, что при малых значениях напряжения питания системы демонстрирует квазипериодическое поведение с ярко выраженной мультистабильностью (см., например, [10]). Но при этом система имеет достаточно большой запас устойчивости по коэффициенту усиления.

Однако, при увеличении напряжения питания область устойчивости 1-цикла (рабочего режима) сужается, и потеря устойчивости происходит через бифуркацию граничного столкновения, приводящая к внезапной хаотизации колебаний.

*Авторы выражают благодарность проф. Жусубалиеву Ж.Т. за обсуждение результатов исследований и полезные комментарии.

Работа выполнена в рамках программы стратегического развития БГТУ им. В.Г. Шухова на 2012-2016 годы, договор № А-4/15 от 14.04.2015 г.

Список литературы:

1. Лодиз Р., Паркер Р. Рост монокристаллов. М.: Мир, 1974. 540 с.
2. Пат. 2515129 Российская Федерация, МПК G05D 23/00. Система регулирования температуры электронагрева / Кижук А.С., Рубанов В.Г., Чуев А.В.; патентообладатель Белгород БГТУ им.В.Г.Шухова. - № 2013101096/09; заявл. 09.01.13; опубл. 27.04.14, Бюл. № 12. 5 с.

3. Гольцов Ю.А., Кижук А.С., Рубанов В.Г. Управление температурным полем нагревательной установки в форме модели дробного порядка // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2016. № 2. С. 38-44.
4. Zhusubaliyev, Zh.T. and E. Mosekilde, 2003. Bifurcations and Chaos in Piecewise-Smooth Dynamical Systems. Singapore: World Scientific, pp: 363.
5. Banerjee, S. and G. C. Verghese, 2001. Nonlinear Phenomena in Power Electronics, IEEE Press, New York, USA.
6. Bernardo, Di. M., M. I. Feigin, S. J. Hogan and M. E. Homer, 1999. Local Analysis of C -bifurcations in n-dimensional Piecewise-Smooth Dynamical Systems // Chaos, Solitons and Fractals, 10(1): 1881-1908.
7. Nusse, H. E. and J. A. Yorke, 1992. Border-Collision Bifurcations Including "Period Two to Period Three" for Piecewise Smooth Systems // Physica D, 57: 39-57.
8. Banerjee, S., P. Ranjan and C. Grebogi, 2000. Bifurcations in Two-Dimensional Piecewise Smooth Maps – Theory and Applications in Switching Circuits // IEEE Trans. Circ. Syst. I., 47(5): 633-643.
9. Zhusubaliyev, Zh.T., E. A. Soukhoterin and E Mosekilde, 2001. Border-Collision Bifurcations and Chaotic Oscillations in a Piecewise-Smooth Dynamical System // Int. J. Bifurcation Chaos, 11(12): 1193-1231.
10. Bernardo, Di. M., C. J. Budd, A. R. Champneys and P. Kowalczyk, 2008. Piecewise-smooth Dynamical Systems: Theory and Applications, in: Applied Mathematical Sciences, vol. 163, Springer, pp: 483.
11. Zhusubaliyev, Zh. T. and E. Mosekilde, 2015. Multistability and Hidden Attractors in a Multilevel DC/DC Converter // Mathematics and Computers in Simulation, 109: 32-45.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ ПРОЦЕССОВ ФИЛЬТРАЦИИ И ИОНИЗАЦИИ ВОЗДУХА

**Колтунов Л.И.,
Гольцов Ю.А., ст. преподаватель,
Кижук А.С., канд. техн. наук, доц.,
Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова**

Современные устройства ионизации воздуха в закрытых помещениях являются биполярными, что позволяет приблизиться к природным условиям и могут содержать один блок, как для процессов фильтрации, так и для создания потока воздуха в виде «ионного ветра», или два блока – вентилирующий и фильтрующий. Эти устройства выпускаются в виде различных и весьма многочисленных модификаций, но конструктивные схемы у них типовые.

Анализ существующих методов и моделей исследования электростатических устройств для фильтрации и ионизации воздуха показал, что аналитические методы не подходят для определения поля распределения электрического потенциала в межэлектродных системах этих устройств. Исследования этих устройств на основе вычислительных экспериментов на базе численных методов показали, что в них имеются как зоны ионизации для зарядки частиц, так и зоны электростатического осаждения этих частиц, причем возможно применение униполярной короны. На основе анализа конструкций электростатических устройств для процессов фильтрации и ионизации воздуха разработаны основные типовые схемы для их моделирования.

Например, одна из схем моделирования воздухоочистителей многокамерного типа с учетом симметрии показана на рис. 1, (G_i – границы исследуемой области $B_3(x,y)$; K_i и G_6 – коронирующие электроды, соотношения размеров определяются типом и видом различных электродных систем электрофильтров).

Для исследования электрических полей электростатических устройств выбрана и обоснована обобщенная математическая модель, при этом сформулированы краевые задачи с граничными условиями смешанного типа, учитывающие основные ограничения по исследуемым объектам и конструктивные особенности этих устройств. В основе модели подход, при котором отпадает необходимость определения

нелинейной зависимости между плотностью тока и напряженностью электрического поля в межэлектродных системах этих объектов. Особенность расчета электрического поля межэлектродного пространства электростатических устройств заключается в определении поля электрического потенциала φ и электрической функции потока χ , на основе которых вычисляются необходимые параметры (напряженность электростатического поля, эффективная площадь ионизации и др.) с последующим определением области рациональных соотношений параметров этих объектов.

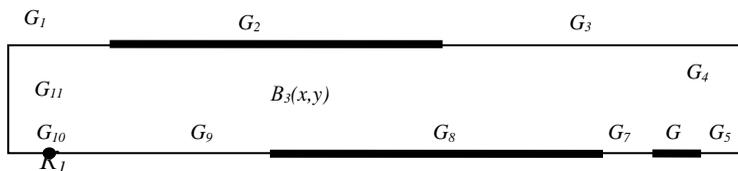


Рисунок 1 – Схема моделирования воздухоочистителей многокамерного типа

Для краевых задач электростатических устройств выполнены условия адаптации метода конечных разностей и переход к конечно-разностным аппроксимациям эллиптических уравнений и граничных условий. При этом представлены особенности дискретных моделей исследуемых объектов в операторной форме.

1. Например, для краевой задачи (см. рис. 1) с учетом уравнения эллиптического типа второго порядка и граничных условий смешанного типа исходные уравнения в операторной форме для определения поля электрического потенциала φ в узле (i, j) дискретной области $B_{g_3}(x, y)$ с границами G_i имеют вид:

$$\Omega_n \varphi^{(h)} \equiv \begin{cases} \Omega_{xx} \varphi_{mn} + \Omega_{yy} \varphi_{mn} = 0, (x_m, y_n) \in B_{g_3}(x, y), \\ \varphi_{mn} = c_1, (x_m, y_n) \in K_1, \\ \varphi_{mn} = c_2, (x_m, y_n) \in G_8, \\ \varphi_{mn} = c_3, (x_m, y_n) \in G_6, \\ \varphi_{mn} = 0, (x_m, y_n) \in G_2, \\ \Omega_n \varphi_{mn} = 0, (x_m, y_n) \in G_1, G_3, G_4, G_{11}, \\ \Omega_n \varphi_{mn} = 0, (x_m, y_n) \in G_5, G_7, G_9, G_{10}. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь $\Omega_{xx} = \partial^2 / \partial x^2$; $\Omega_{yy} = \partial^2 / \partial y^2$; $\Omega_n = \partial / \partial n$. Постоянные c_i определяются значениями высоковольтных потенциалов на электродах K_1, G_6, G_8 с учетом типовых промышленных образцов этих объектов.

2. Задача определения поля электрической функции потока χ для электростатического устройства (см. рис. 1) следующая. Определяется функция χ в узле (i, j) дискретной области $B_{g3}(x, y)$ с границами G_i с учетом уравнения эллиптического типа второго порядка и граничных условий смешанного типа, которые в операторной форме имеют вид:

$$\Omega_n \chi^{(h)} \equiv \begin{cases} \Omega_{xx} \chi_{mn} + \Omega_{yy} \chi_{mn} = 0, (x_m, y_n) \in B_{g3}(x, y), \\ \Omega_n \chi_{mn} = 0, (x_m, y_n) \in K_1, G_2, G_6, G_8, \\ \chi_{mn} = c_1, (x_m, y_n) \in G_1, G_{10}, G_{11}, \\ \chi_{mn} = c_2, (x_m, y_n) \in G_9, \\ \chi_{mn} = c_3, (x_m, y_n) \in G_7, \\ \chi_{mn} = 0, (x_m, y_n) \in G_3, G_4, G_5. \end{cases} \quad (2)$$

Математические модели предназначены для исследования характерных закономерностей электростатических устройств для процессов фильтрации и ионизации воздуха, а также для определения особенностей электрофильтров и автономных воздухоочистителей-ионизаторов для повышения их эффективности. На разработанной базе возможно исследование существующих схемных решений на основе эмпирических подходов при конструировании этих устройств. Таким образом, представлена основа для комплексного исследования электростатических устройств с применением современных технологий математического моделирования.

Результаты расчетов межэлектродных систем электростатических устройств и экспериментальных исследований представлены в относительных единицах с учетом законов подобия и размерности относительно базовых параметров объектов. Таким образом, без изменения параметров ионизационной камеры максимальное значение эффективной площади ионизации (F_e^*) зависит от расположения коронирующего электрода и зазора между камерами электрофильтров. При уменьшении зазора δ от 30 мм до минимальной величины эффективное значение F_e^* увеличивается от значения $F_{e(\min)}^*$ до максимума $F_{e(\max)}^*$ в диапазоне от 1 до $m_{11} = 1,43$ ($m_{11} = F_{e(\max)}^* / F_{e(\min)}^*$), причем максимальное значение $F_{e(\max)}^*$ увеличивается до 1,25 раза. С учетом изменения длины электродов (L_1^*) ионизационной камеры электрофильтров максимальные значения эффективной площади ионизации увеличиваются до 2,5 раз (см. рис. 2).

При исследованиях выявлена одна из важных закономерностей электростатических устройств и установлено, что увеличение эффективной площади ионизации F_e^* электрофильтров связано, во-первых, с краевыми эффектами ионизационной камеры, которые при ее уменьшении сближаются, что приводит к существенному увеличению F_e^* (в несколько раз), во-вторых, с суперпозицией полей камер.

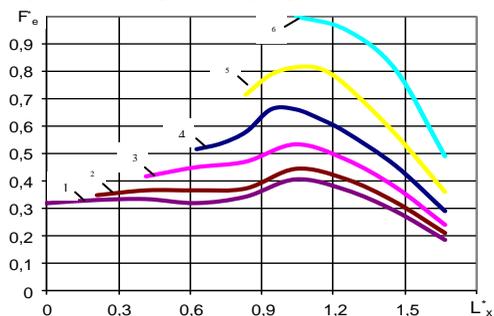


Рисунок 2 – Функциональные зависимости $F_e^* = f(L_x^*)$ с учетом изменения L_1^* ($\delta = \text{const}$):
 1 – $L_1^* = 1,625$; 2 – $L_1^* = 1,458$; 3 – $L_1^* = 1,25$;
 4 – $L_1^* = 1,042$; 5 – $L_1^* = 0,833$; 6 – $L_1^* = 0,625$

На этапе проектирования межэлектродных систем однокамерных воздухоочистителей-ионизаторов необходимо учитывать возможность увеличения их эффективности путем выбора рациональных соотношений размеров их камер и с учетом места расположения коронирующего электрода. Например, для воздухоочистителей-ионизаторов с учетом расхода воздуха в виде «ионного ветра» при изменении размеров камеры от $L_1^* = 1,625$ до $L_1^* = 0,625$ максимум $F_{e(\text{max})}^*$ увеличился приблизительно в 3 раза (см. рис. 3).

Вычислительные эксперименты с воздухоочистителями-ионизаторами многокамерного типа (например, «Супер-Плюс-Турбо», первой модификации) позволили установить, что выбор игольчатого электрода в задней полусфере этого прибора позволил получить лучшие результаты в сравнении с другими типами электродов.

Типовой пример результатов расчета плоскопараллельного электростатического поля показан на рис. 4 для воздухоочистителей-ионизаторов многокамерного типа (см. схему моделирования на рис. 1) в виде распределения эквипотенциальных поверхностей электр-

остатического поля с заданным шагом $\Delta\varphi$ (рис. 4, а), силовых поверхностей потока напряженности поля с заданным шагом $\Delta\chi$ (рис. 4, б) и распределения поверхностей равных напряженностей электростатического поля с заданным шагом ΔE (рис. 4, в).

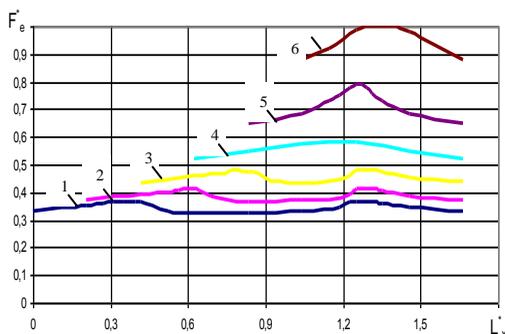


Рисунок 3 – Функциональные зависимости $F_e^* = f(L_x^*)$ с учетом изменения L_1^* :

- 1 – $L_1^* = 1,625$; 2 – $L_1^* = 1,458$; 3 – $L_1^* = 1,25$;
- 4 – $L_1^* = 1,042$; 5 – $L_1^* = 0,833$; 6 – $L_1^* = 0,625$

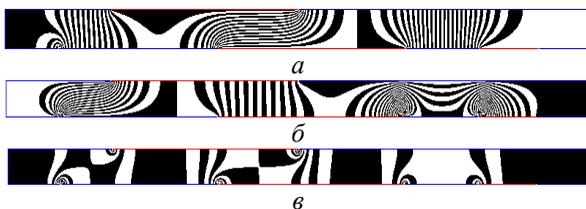


Рисунок 4 – Типовые результаты расчета поля воздухоочистителей-ионизаторов многокамерного типа

Установлено, что математическая модель двухзонного электро-фильтра, как объекта управления, может быть представлена в виде апериодического звена, причем постоянная времени переходного процесса, связанного с изменением концентрации положительных аэроионов в воздухе N_+^* , находится в пределах десятков секунд.

В результате проведенных исследований представлены особенности структур и схемных решений автоматизированных систем вентиляции на базе энергоэффективного оборудования с учетом

применения двухзонных электрофильтров и автономных воздухоочистителей-ионизаторов.

Список литературы:

1. Потапенко А.Н. Основы математического моделирования двухзонных электрофильтров и некоторые особенности их применения в энергоэффективных вентиляционных системах /А.Н. Потапенко, А.В. Белоусов, Л.И. Колтунов, Е.А. Потапенко// Известия вузов. Проблемы энергетики. 2006. № 5-6. С. 69-84.
2. Потапенко А.Н. Оценка степени ионизации воздуха двухзонными электрофильтрами и особенности автоматизированных систем вентиляции на базе электростатических устройств / А.Н. Потапенко, А.В. Белоусов, Л.И. Колтунов// Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2006. Прил. № 8. С. 119-126.
3. Колтунов Л.И. Исследование на основе математического моделирования особенностей электрофильтров систем газовоздушной очистки/ Л.И. Колтунов, А.Н. Потапенко, А.В. Белоусов // Научн. исследов. наносистем и ресурсосберегающие технол. в стройиндустрии: Сб. докл. Междунар. науч.-практич. конф. Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2007. Ч.8. С. 66 - 71.
4. Колтунов Л.И. Математическое моделирование автономных воздухоочистителей и двухзонных электрофильтров/ Л.И. Колтунов, А.Н. Потапенко // Научн. исследов. наносистем и ресурсосберегающие технол. в стройиндустрии: Сб. докл. Междунар. науч.-практич. конф. Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2007. С. 59 – 65.
5. Потапенко А.Н. Электростатические устройства для процессов фильтрации и особенности их математического моделирования/ А.Н. Потапенко, Л.И. Колтунов// Вестник БГТУ им В.Г. Шухова. 2007. №1 С. 61-66.
6. Колтунов Л.И. Математическое моделирование электродных систем электро-статических процессов фильтрации/ Л.И. Колтунов, А.В. Белоусов, А.Н. Потапенко // Телематика' 2013: Сб. трудов XX Всероссийской научно-методич. конф. Санкт-Петербург: Изд-во С-ПГИТМО, 2013. Т. 1. Секция А.
7. Белоусов А.В. Вопросы практического применения объектов фильтрации и ионизации воздуха в рамках автоматизированных систем диспетчерского управления инженерными системами зданий на примере БГТУ им. В.Г. Шухова/ А.В. Белоусов, С.Н. Глаголев, Л.И. Колтунов, Ю.А. Кошлич // Телематика' 2014: Сб. трудов XXI Всероссийской научно-методич. конф. Санкт-Петербург: Изд-во С-ПГИТМО, 2014. Т.1. Секция В.

ГИБРИДНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МАНИПУЛЯЦИОННОГО РОБОТА И ЕГО МЕХАНИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Коренева Т.Ю., магистрант,
Бушуев Д.А., ст. преподаватель,
Юдин Д.А., канд. техн. наук, ст. преподаватель
*Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова*

При проектировании механической системы необходимо учитывать не только её кинематические, но и динамические свойства. Математическое описание системы в этом случае заметно усложняется, а при создании сложных систем является затруднительным. Гибридное моделирование позволяет создать виртуальную модель системы, максимально приближённую к реальному объекту.

Для гибридного моделирования был выбран манипулятор с 4-мя вращательными звеньями, кинематическая схема которого представлена на рис. 1. Для его аналитического описания процесса перемещения были решены прямая и обратная задачи кинематики, соответственно методом Денавита-Хартенберга и геометрическим методом [1,2].

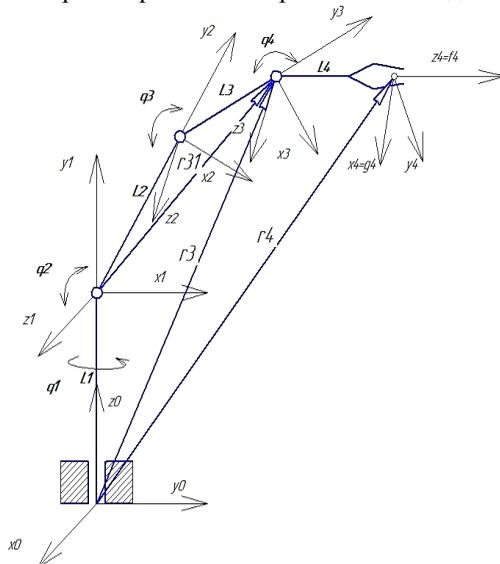


Рисунок 1 – Кинематическая схема манипулятора

Решение прямой задачи кинематики:

$$R_{01} = T_{OZ}(q_1) * T_{OX}(90^\circ) * T_{OY}(90^\circ) * T_i(0, L_1, 0),$$

$$R_{12} = T_{OZ}(-q_2) * T_i(0, L_2, 0),$$

$$R_{23} = T_{OZ}(-q_3) * T_i(0, L_3, 0),$$

$$R_{34} = T_{OZ}(-q_2) * T_i(0, L_2, 0) * T_{OX}(-90^\circ) * T_{OZ}(90^\circ),$$

где $T_{OZ}(\alpha)$, $T_{OX}(\alpha)$, $T_{OY}(\alpha)$ - функции поворота оси координат соответственно вокруг осей OZ, OX, OY на угол α , а $T_i(xL, yL, zL)$ - функция перемещения системы координат по осям OZ, OX, OY на zL , yL , xL соответственно.

Решение обратной задачи кинематики:

$$q_{1(1)} = \text{sign}(X_{30}) * \arccos \frac{Y_{30}}{\sqrt{Y_{30}^2 + X_{30}^2}} + \pi * \text{entier} \left(\frac{1}{2} \left(1 - \frac{Y_{30}}{\sqrt{Y_{30}^2 + X_{30}^2}} \right) \right),$$

$$q_{2(1),(2),(3),(4)} = -\text{sign}((\bar{r}_{31})_{x1}) * \arccos \frac{(\bar{r}_{31})_{y1}}{|\bar{r}_{31}|} \pm \arccos \frac{L_2^2 + |\bar{r}_{31}|^2 - L_3^2}{2 * L_2 * |\bar{r}_{31}|},$$

$$q_{3(1),(2),(3),(4)} = -\text{sign}((\bar{r}_{32})_{x2}) * \arccos \frac{(\bar{r}_{32})_{y2}}{|\bar{r}_{32}|},$$

$$q_{4(1),(2),(3),(4)} = -\text{sign}((\bar{f}_4)_{x3}) * \arccos \left(\frac{(\bar{f}_4)_{y3}}{|\bar{f}_4|} \right).$$

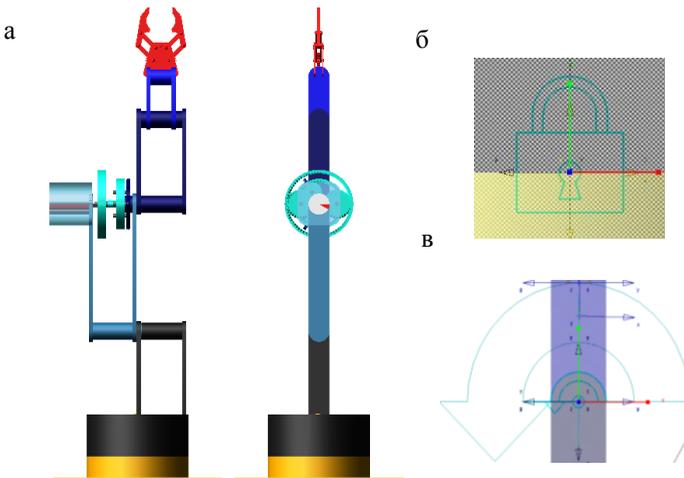


Рисунок 2 – Схема манипулятора в MSC.Adams:

- а – модель манипулятора, вид спереди и сбоку соответственно;
- б – жёсткая связь «fixed joint»; в – поворотный шарнир «revolute joint» и наложенное движение «imposed rotational joint motion»;

Для исследования динамики работы манипулятора в ходе проведенного анализа современных CAE (Computer Aided Engineering) систем была выбрана программная среда MSC.Adams, предназначенная для моделирования динамики сложных систем и механизмов. При моделировании в ней могут учитываться нелинейные эффекты в механических передачах, наличие люфтов в соединениях звеньев и их податливость, различные законы управления, задаваемые в режиме совместного моделирования с средой Matlab/Simulink [3, 4].

Модель разрабатываемого манипулятора в среде Adams состоит из неподвижного основания и четырёх звеньев (рис. 2,а). Основание с первым звеном соединено с помощью жёсткой связи «fixed joint» (рис. 2,б), сами звенья соединены друг с другом с помощью поворотных шарниров «revolute joint» (рис. 2,в, маленькая стрелка) [5].

Перемещение звеньев с определённой скоростью осуществляется с помощью задания максимального момента через наложенные движения «imposed rotational joint motion» (рис. 2,в, большая стрелка). Кроме того измеряется момент сопротивления, необходимый для подбора приводов, путём снятия показаний (measures) с наложенных движений при максимальной скорости движения звена.

Функциональная схема системы автоматического управления положением звена состоит из следующих элементов: задатчика, формирующего задающее воздействие, определяющее необходимое положение звена манипулятора на основе информации, полученной с подсистемы верхнего уровня при решении обратной задачи кинематики; датчика, вырабатывающего сигнал о текущем положении звена, который сравнивается с сигналом задатчика; ПИД-регулятора, формирующего закон управления; усилительно-преобразовательного элемента, например, на основе полупроводникового H-моста; исполнительного элемента - ДПТ НВ с редуктором; объекта управления – звена (рис. 3).

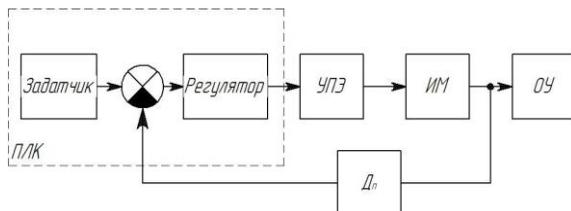


Рисунок 3 – Функциональная схема системы автоматического управления положением звена

Настройка ПИД-регулятора производилась в два этапа:

- 1) идентификация объекта управления, состоящего из ДПТ НВ (смоделированного через блоки Matlab/Simulink), редуктора и механической части (заданных в блоке Adams – adams_sub) с помощью модуля «ident» Matlab (рис. 4,а);
- 2) непосредственно настройка ПИД-регулятора с помощью функции «Tune» для модели, представленной на рис. 4,б.

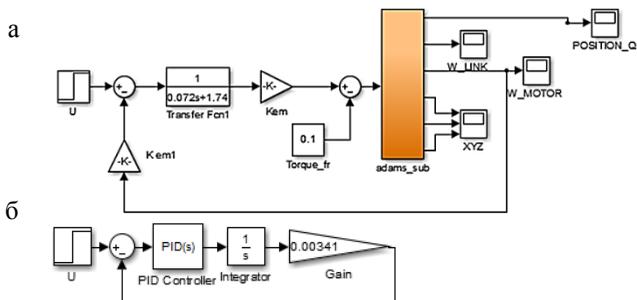


Рисунок 4 – Схемы для настройки ПИД-регулятора

Модель системы управления манипулятора представлена на рис. 5. Как видно, в звене 3 на вход механической части (adams_sub) передаётся момент, обрабатываемый «imposed rotational joint motion». На остальные входы задаются обобщённые координаты, полученные с помощью решения обратной задачи кинематики, т.е. рассматривается только статический режим.

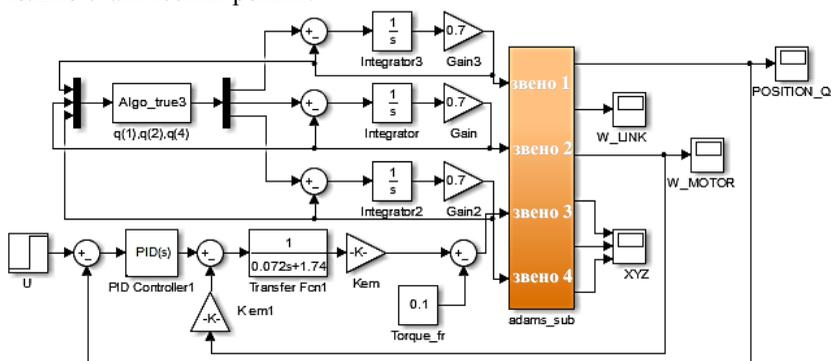


Рисунок 5 – Система управления манипулятора в Matlab/Simulink

Как видно наличие динамических свойств в звене манипулятора приводит к ухудшению показателей качества работы системы, а именно снижается быстродействие системы (рис. 6), следовательно, в дальнейшем необходимо синтезировать более сложные алгоритмы управления с применением местных обратных связей или интеллектуальных регуляторов.

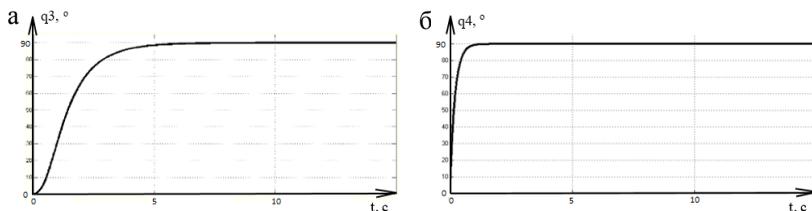


Рисунок 6 – Перемещение звена 3 на 90° – а;
перемещение звена 4 на 90° – б

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Белгородской области в рамках проекта №14-41-08016 «р_офи_м».

Список литературы:

1. Зенкевич С.Л. Управление роботами. Основы управления манипуляционными роботами. М.: МГТУ, 2000. С.381
2. Магергут В.З., Рубанов В.Г., Юдин Д.А., Бушуев Д.А. Роботы с компьютерным управлением. Лабораторный практикум: Учебное пособие с грифом УМО., Белгород: Изд-во БГТУ, 2009. 136 с.
3. Буров А. Г. Совместное использование вычислительных пакетов MSC.Adams и MATLAB. М.: MSC Software Rus, 2004. 43 с.
4. Коренева Т.Ю., Бушуев Д.А. Разработка и исследование модели манипулятора в среде MSC ADAMS // Сб. докл. междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых БГТУ им. В. Г. Шухова «Исследования и инновации в ВУЗе», Белгород. 01-30 мая 2015 г. Белгород: Изд-во – БГТУ им. В.Г. Шухова, 2015. С. 2871-2875.
5. Darina H., Michal B., Patrik Š., František K. Kinematical Analysis of Crank Slider Mechanism Using MSC.Adams/View // Procedia Engineering, 2012. №48. Pp. 213-222.

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ ЧИСЛЕННЫМИ СПОСОБАМИ

**Крюков А.В., ст. преподаватель,
Переверзев Н.П., магистрант,
Рубанов В.Г., д-р техн. наук, проф.**
*Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова*

В настоящее время проблемы, связанные с созданием математических моделей объектов технологических процессов, экономики и живой природы, формируют одно из основных направлений науки и техники – моделирование. Это объясняется тем, что математические модели объектов широко применяются как при создании систем управления этими объектами, так и при их эксплуатации.

В общем виде задача идентификации заключается в определении оператора объекта, преобразующего входные воздействия в выходные. В связи с этим выделяют задачи структурной и параметрической идентификации [1].

При структурной идентификации определяют структуру и вид оператора объекта, или другими словами вид математической модели объекта.

Задачей структурной идентификации является представление реального объекта управления в виде математической модели. Конкретный выбор математической модели зависит от типа объекта.

Построение и обоснование метода идентификации предполагают рассмотрение ряда очень сложных вопросов, таких как [2]:

- построение алгоритма идентификации,
- исследование точности полученных результатов;
- анализ ошибок, порожденных природой самого алгоритма;
- анализ ошибок, связанных с наличием шумов, с квантованием входных и выходных сигналов;
- исследование подходов, которые обеспечили бы ускорение сходимости алгоритма, уменьшили бы влияние шумов и т.д.

Решение различных задач идентификации осуществляется методами параметрической и непараметрической идентификации. В

настоящее время более широкое распространение получили методы параметрической идентификации.

Параметрическая идентификация объекта управления методом квадратур

Основной целью задачи является построение импульсной переходной функции (ИПФ) объекта по экспериментальным данным, которыми являются детерминированные входной $x(t)$ и выходной $y(t)$ сигналы, зафиксированные на конечном промежутке $[0, T]$, где T — время «памяти» объекта.

Данный метод не требует подачи специальных сигналов на вход системы. Применяется если есть массивы значений входных и выходных сигналов.

Метод основан на уравнение свертки:

$$y(t) = \int_0^t \omega(\tau)x(t-\tau)d\tau.$$

Произведя упрощения получим следующую систему:

$$\begin{cases} y_1 = \omega_1 x_1 \Delta + \delta_1, \\ y_2 = \omega_2 x_1 \Delta + \omega_1 x_2 \Delta + \delta_2, \\ \vdots \\ y_n = \omega_n x_1 \Delta + \omega_{n-1} x_2 \Delta + \dots + \omega_1 x_n \Delta + \delta_n. \end{cases}$$

Перейдём к соответствующему матричному виду записи данной системы:

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} = \Delta \cdot \begin{pmatrix} x_1 & 0 & \dots & 0 \\ x_2 & x_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_n & x_{n-1} & \dots & x_1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \vdots \\ \omega_n \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \vdots \\ \delta_n \end{pmatrix}.$$

Заменив матрицы получаем:

$$Y = \Delta \cdot W \cdot X,$$

$$W = \frac{1}{\Delta} \cdot Y \cdot X^{-1}.$$

Разработанное приложение (рис. 1) предназначено для идентификации различных линейных объектов методом квадратур, и реализовано в среде Delphi XE8. Основной целью программы является построение импульсной переходной функции объекта по экспериментальным данным, которыми являются детерминированные входной и выходной сигналы, зафиксированные на конечном промежутке. Работа программы основана на численном решении уравнения свертки, представленного в матричном виде. Входными данными для программы являются количество узловых точек, частота дискретизации, входные и выходные данные идентифицируемого объекта. Результатом работы программы является график импульсной переходной функции идентифицируемого объекта, который можно сохранить во внешний графический файл для последующей обработки.

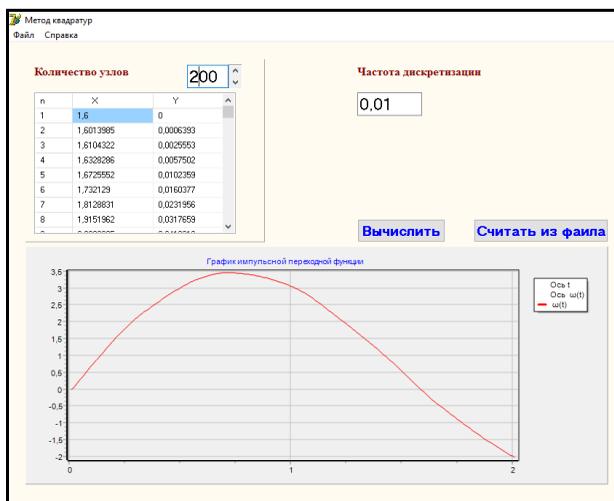


Рисунок 1 – Программное средство для идентификации объектов методом квадратур

Метод идентификация колебательной системы 2-го порядка по графику импульсной переходной функции

Передаточная функция колебательного системы второго порядка выглядит следующим образом:

$$W(S) = \frac{k}{T^2 s^2 + 2T\xi s + 1}.$$

Входными данными для данного метода являются значения графика импульсной переходной функции. Задача идентификации сводится к нахождению неизвестных k , T , ξ .

Для определения приближенных значений постоянной времени T и коэффициента демпфирования ξ по импульсной переходной характеристике воспользоваться следующими соотношениями:

$$\xi = \frac{\ln R}{\sqrt{\pi^2 + (\ln R)^2}},$$

где $R = \frac{A^+}{A^-}$, A^+ и A^- – площади, ограниченные графиком импульсной характеристики как показано на рис. 2.

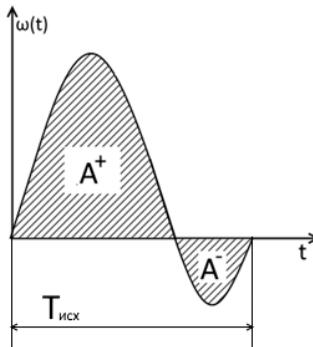


Рисунок 2 – Импульсная переходная функция колебательной системы

$$T = \frac{\sqrt{1 + \xi^2}}{\omega_{исх}}, \quad \omega_{исх} = \frac{2\pi}{T_{исх}},$$

где $T_{исх}$ – период одного колебания.

Разработанное приложение (рис. 3) предназначено для геометрической идентификации колебательной системы второго порядка методом площадей. Основной целью программы является нахождение неизвестных параметров колебательной системы:

коэффициента усиления, постоянной времени и коэффициента демпфирования по импульсной переходной характеристике идентифицируемого объекта. Работа программы основана на численном определении необходимых площадей методом левых прямоугольников. Входными данными для программы являются: количество узловых точек, частота дискретизации, значения импульсной переходной функции системы в различные моменты времени, зафиксированные на конечном промежутке. Результатом работы программы является график исходной импульсной переходной функции идентифицируемого объекта, а также параметры его передаточной функции.

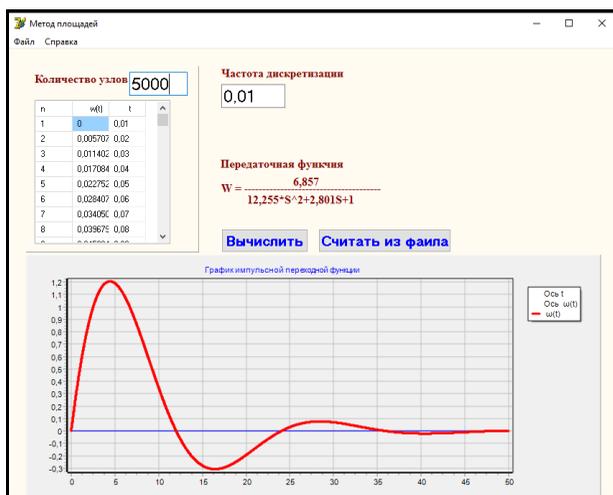


Рисунок 3 – Программное средство для идентификации колебательной системы 2-го порядка по графику её импульсной переходной функции

Список литературы:

1. Реализация алгоритма аппроксимации дробного интегродифференцирования с оценкой ошибки / В.Г. Рубанов, А.С. Кижук, Ю.А. Гольцов, Е.Б. Кариков // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2015. № 2. С. 148-152.
2. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 5-и тт.; 2-е изд., перераб. и доп. Т2: Статистическая динамика и идентификация систем автоматического

управления / под ред. К.А. Пупкова и Н.Д. Егупова. - М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 646с.

ПРОБЛЕМЫ ОЦЕНКИ УРОВНЯ ЗНАНИЙ ОБУЧАЮЩИХСЯ В ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМАХ ТЕСТИРОВАНИЯ

**Крюков А.В., ст. преподаватель,
Рубанов В.Г., д-р техн. наук, проф.**
*Белгородский государственный технологический
университет им. В. Г. Шухова*

В настоящее время интенсивно создаются обучающие системы, основной задачей которых является повышение эффективности процесса обучения.

При этом в системах тестирования важное место занимает вопрос оценки уровня знаний изучаемого учебного материала.

Любое тестирование завершается математико-статистической обработкой данных тестирования и поиском причинно-следственных связей между параметрами тестирования (теста, заданий) и результатами тестирования (качеством обучения) [1].

При анализе результатов тестирования приходится иметь дело с проблемой извлечения полезной (достоверной) информации из исходов некоторого эксперимента (ответов на вопросы теста). Важной особенностью исходов эксперимента является их случайность, т.е. непредсказуемость результата каждого опыта (ответа на каждый вопрос).

Математико-статистический аппарат и поддерживающий его компьютерный инструментальный для обработки данных полноправно используются в теории педагогических измерений.

Вопросам оценивания результатов тестирования посвящена достаточно большая литература. Первые исследования (начало XX в.) выполнены были на стыке педагогики, психологии, социологии и других наук, называемых часто поведенческими науками (Behavioral Sciences) или психометрикой (Psychometrika), педагогическими измерениями (Educational Measurements).

Общая проблема измерений в тестировании, порождающая все указанные в трудности, состоит в том, что результаты тестирования содержат неустранимые погрешности.

Достижению основных целей тестирования препятствует наличие объективно существующих неточностей в данных на всех этапах его проведения. Основными источниками неточностей педагогических измерений являются [2]:

- латентность (недоступность для прямого измерения) как уровня подготовленности тестируемого, так и уровня трудности задания. Более того, эти величины, тесно связаны между собой и проявляются в измеряемой функции успеха. Между тем, основные законы математической статистики основываются на гипотезах независимости оцениваемых величин.
- использование при оценке латентных параметров (с использованием модели Раша) гипотезы нормального распределения баллов, что справедливо в случае применимости Закона больших чисел, предъявляющего весьма жесткие формальные требования к обрабатываемым данным.
- необходимость использования для оценки с помощью статистических методов оценки моментов распределения, максимального правдоподобия больших выборок для получения достоверных результатов. Реально имеющиеся выборки баллов чаще всего имеют гораздо меньший объем, причем их увеличение невозможно из-за роста трудоемкости теста.

В силу указанных причин классические результаты теории измерений плохо применимы к измерениям в тестировании. В результате в настоящее время возникает объективная необходимость улучшения данной модели.

1. Стандартные методы оценки

В общепринятых методиках контролирующая система случайным образом задает ряд вопросов и на основе некоторого алгоритма выставляет результирующую оценку. При использовании стандартных подходов к оценке, сначала разрабатываются границы количества правильных ответов для теста. Пусть b – число правильных ответов, n – максимальное число правильных ответов, а $\mu(x)$ – оценка.

$$\mu(x) = \begin{cases} 1, & x \leq b_1, \\ 2, & b_1 < x \leq b_2, \\ 3, & b_2 < x \leq b_3, \\ 4, & b_3 < x \leq b_4, \\ 5, & b_4 < x \leq n. \end{cases}$$

Процентная оценка, как видно из названия, показывает количество правильных ответов на вопросы в %:

$$\mu(x) = \frac{b}{n} \cdot 100\%.$$

Далее рассматриваются методики, в которых учитываются сложность задания, текущие показатели модели обучаемого (рейтинги, количество пройденного материала и т.д.) и др.

2. Алгоритмический метод оценки

Алгоритмический подход основан на правилах вида: «если дан правильный ответ, то перейти на вопрос К1, если ошибка - вопрос К2. Такой метод позволяет выстроить «жесткий» алгоритм обучения.

Иерархическая структура теста показана на рис. 1.



Рисунок 1 – Структура теста в алгоритмическом подходе

В системе предусмотрена возможность увеличения числа используемых уровней - для этого нет других принципиальных ограничений, кроме целесообразности с точки зрения назначения теста и трудности для составителя.

Рассмотрим построение деревьев опроса на примере 1-уровневого тестирования. Для простоты примем число тестовых модульных заданий t при тестировании всей изучаемой дисциплины, равное 2. При заданных параметрах принцип оценивания следующий: при наборе на первой фазе опроса $t = 0$ знания учащегося оцениваются в минимальную сумму 0 баллов, и он исключается из дальнейшего тестирования. При получении максимального числа баллов $t = 2$ знания учащегося оцениваются в максимальную сумму 100 баллов, и он также исключается из дальнейшего тестирования (каждый правильный ответ оценивается в 50 баллов).

При получении 1 балла в первой фазе производится уточняющий опрос с заданием из того же набора. Для оценки баллов за каждый правильный уточняющий ответ предложено исходить из того, что при 1

правильном ответе в первой основной фазе и 1 правильном ответе в уточняющей фазе должна получиться сумма, несколько меньшая 100 баллов. Алгоритм одноступенчатого тестирования проиллюстрирован на дереве опроса на рис.2. На схеме черными точками показаны листья дерева, обозначающие завершение тестирования, белыми – промежуточные вершины, в которых тестирование еще не завершено. Рядом с листьями указано число правильных ответов и начисленная сумма баллов.

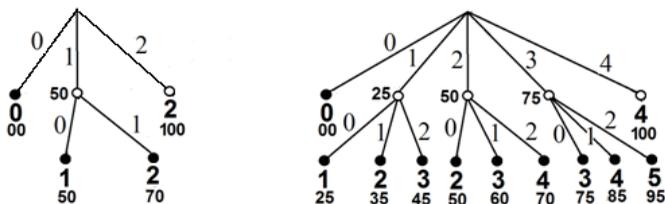


Рисунок 2 – Схема алгоритма одноступенчатого тестирования

3. Статистический метод оценки

Основное преимущество статистических методов распознавания состоит в возможности одновременного учета признаков различной физической природы, так как они характеризуются безразмерными величинами — вероятностями их появления при различных состояниях системы. Среди методов технической диагностики метод, основанный на обобщенной формуле Байеса, занимает особое место благодаря простоте и эффективности.

Разумеется, метод Байеса имеет недостатки: большой объем предварительной информации, «угнетение» редко встречающихся диагнозов и др. Однако в случаях, когда объем статистических данных позволяет применить метод Байеса, его целесообразно использовать как один из наиболее надежных и эффективных методов.

Суть метода состоит в том, что, если имеются состояние D_i (диагноз D_i) и простой признак k_j , встречающийся в этом состоянии, то вероятность совместного появления событий (наличия у системы состояния D_i и признака k_j) определится следующим образом:

$$P(D_i k_j) = P(D_i)P(k_j / D_i) = P(k_j)P(D_i / k_j).$$

Из этого соотношения и вытекает формула Байеса:

$$P(D_i / k_j) = P(D_i) \frac{P(k_j / D_i)}{P(k_j)}.$$

Исходными задачами такой диагностики являются:

- число состояний и количества признаков, по которым будет производиться обследование,
- таблица вероятностей возможной реализации признаков и априорных вероятностей диагноза,
- список признаков, которые присутствуют у исследуемого объекта и затем по методу Байеса рассчитываются апостериорные вероятности диагнозов.

Если обследование проводится по комплексу признаков K , причем каждый из признаков k_j имеет m_j разрядов, то используется обобщенная формула Байеса.

$$P(D_i / K^*) = \frac{P(D_i)P(K^* / D_i)}{\sum_{s=1}^n P(D_s)P(K^* / D_s)}.$$

Рассмотрение различные варианты методов контроля знаний обучающихся, анализ достоинств и недостатков каждого из подхода позволит разработать алгоритм проведения электронного тестирования, что позволит решить одну из основных задач по разработке данной системы.

Список литературы:

1. Интерактивная динамическая модель обучения основе интеллектуальной системы поддержки принятия решений многомерных баз знаний / М.А. Косоногова, В.В. Ломакин, С.С. Трухачев, Р. Асадуллаев // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2013. №1. С. 177–179.
2. Никифоров О.Ю. Обобщенная компонентная модель системы компьютерного тестирования // Образование, наука, бизнес: особенности регионального развития и интеграции: Материалы Всероссийской научно-методической конференции. 2006. С. 309-311.

О ВОЗМОЖНЫХ ПОДХОДАХ К АНАЛИЗУ И ПРОГНОЗИРОВАНИЮ СВОЙСТВ ВЫСОКОДИСПЕРСНЫХ ФЕРРИТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ И К ПОДБОРУ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ИХ ПОЛУЧЕНИЯ

Кузьмичёва Т.Г., канд. техн. наук, доц.,

Путивцева Н.П., канд. техн. наук,

Пусная О.П.

*Белгородский государственный национальный
исследовательский университет» (НИУ «БелГУ»)*

Создание наноразмерных магнитных материалов является актуальным направлением материаловедения, открывающим перспективы для совершенствования высокоточной магнитной записи, техники магнитных жидкостей, медицинских средств доставки и удержания лекарственных материалов в организме и гипертермии раковых клеток[1].

Выбор подходящей технологии зависит от требуемых выходных характеристик ферритовых материалов, таких как коэрцитивная сила H_c и поле магнитной анизотропии H_a . Применение разных технологий дает в результате ферритовые порошки с разными выходными характеристиками[2].

Сравнительный анализ получаемых в результате использования указанных технологий материалов показал, что используемые технологии не позволяют получать материалы, обладающие свойствами суперпарамагнетизма с размером частиц, близким к критическому. Проведенное имитационное моделирование позволяет предположить, что в результате синтеза порошков феррита бария криохимическим методом удастся получить магнитные характеристики, близкие к теоретическим.

Анализ литературных источников показал, что наиболее важными параметрами получаемых материалов для их дальнейшего практического использования являются [3]:

- подбор оптимального сочетания данных параметров с учетом различной степени их важности, который позволил произвести сравнение и выбор среди используемых для этого технологий;
- для оценивания показателей предпочтительности указанных технологий для получения в результате их применения

высокодисперсных порошков с оптимальными значениями параметров был использован метод анализа иерархий.

Иерархия для выбора оптимальной технологии получения ферритовых материалов с определенными желаемыми свойствами имеет вид:

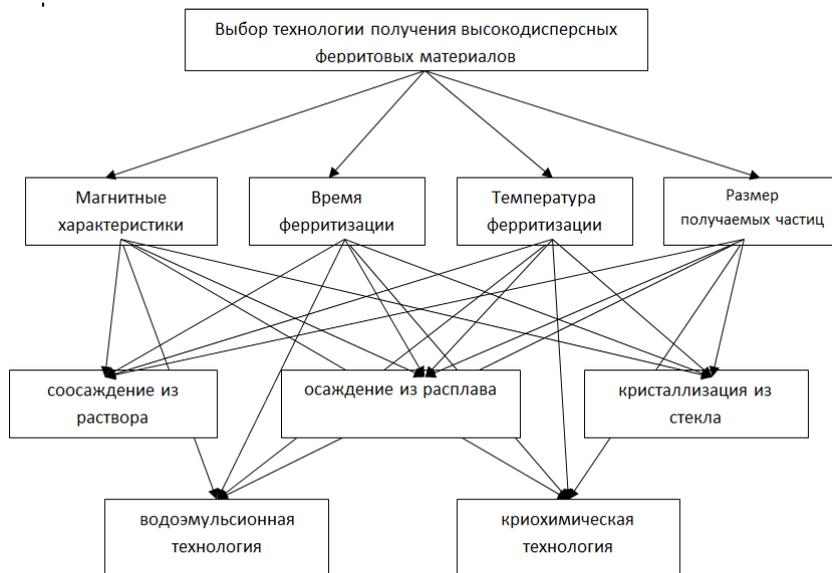


Рисунок 1 - Иерархия для выбора оптимальной технологии получения ферритовых материалов с определенными желаемыми свойствами

Таблица 1 – Матрица парных сравнений критериев

Выбор технологии	Магнитные характеристики	Время ферритизации	Температура ферритизации	Размер частиц	Нормированный вектор локальных приоритетов критериев
Магнитные характеристики	1	1	6	1/8	0.1330216
Время ферритизации		1	6	1/8	0.1330216

Температура ферритизации			1	1/9	0.0336915
Размер частиц				1	0.7002652

Вначале произведем парное сравнение критериев для того, чтобы определить, какой из них наиболее важен при выборе технологии получения ферритовых материалов с определенными желаемыми свойствами.

$$ИС= 0.1330418; ОС= 0.1478242$$

Таким образом, среди выбранных критериев наибольшую важность имеет размер частиц.

Таблица 2 – Матрица парных сравнений альтернатив по критерию «Магнитные характеристики»

Магнитные характеристики	Соосаждение из раствора	Соосаждение из расплава	Кристаллизация из стекла	Водоэмульсионная технология	Криохимическая технология	Нормированный вектор локальных приоритетов альтернатив по критерию Магнитные характеристики
Соосаждение из раствора	1	1	4	3	1/6	0.1449571
Соосаждение из расплава		1	4	3	1/6	0.1449571
Кристаллизация из стекла			1	1/2	1/9	0.0406588
Водоэмульсионная технология				1	1/8	0.0616273
Криохимическая технология					1	0.6077997

$$ИС= 0.0526844; ОС= 0.0470396$$

По критерию «Магнитные характеристики» наилучшей является криохимическая технология.

Построив матрицы парных сравнений альтернатив по оставшимся критериям, получаем, что:

- при использовании криохимической технологии затрачивается наименьшее количество времени на процесс ферритизации.

$$ИС= 0.0721647; ОС= 0.0644328$$

- наименьшая температура ферритизации достигается при использовании технологии соосаждения из раствора.

$$ИС= 0.0276255; ОС= 0.0246656$$

- криохимическая технология дает наименьший размер частиц

$$ИС= 0.3333516; ОС= 0.2976353$$

Получим вектор глобальных приоритетов технологий:

соосаждение из раствора - 0.1207271

осаждение из расплава - 0.1825840

кристаллизация из стекла - 0.0452071

водоэмульсионная технология - 0.1154543

криохимическая технология - 0.5360275

Общая согласованность иерархии: 0.1901063

Таким образом, наиболее предпочтительной для получения ферритовых порошков с магнитными характеристиками, близкими к теоретическим является криохимическая технология.

Для анализа свойств процесса ферритизации и прогноза значений могут также быть использованы модели регрессионного анализа и аппарат временных рядов.

Регрессионный анализ позволяет оценить зависимость характеристики от составляющих ее значение факторов, определить, как будет меняться зависимая величина при изменении значений фактора.

Так, анализ зависимости размера частиц от времени показал, что она может быть задана уравнением парной линейной регрессии.

Если исследуется меняющийся во времени процесс, наилучшим методом его анализа и построения прогноза является построение временного ряда. Зависимость однофазности от времени может быть задана кривой с насыщением. При этом должна быть установлена нижняя или верхняя граница изменения уровней ряда[4]. В качестве такой кривой могут быть использованы гиперболы вида:

$$y = a + \frac{b}{t} \quad ; \text{ либо} \quad y = a + \frac{b}{c+t} .$$

$$y = a + \frac{b}{t}$$

Равносторонняя гипербола ($y = a + \frac{b}{t}$) при $b > 0$ означает, что уровни ряда снижаются во времени и асимптотически приближаются к параметру a .

$$y = a + \frac{b}{t}$$

Если $b < 0$, то уравнение тренда ($y = a + \frac{b}{t}$) характеризует тенденцию к росту уровней ряда с асимптотической границей, равной параметру a .

Таким образом, изучение фундаментальных свойств синтезированных порошков позволит установить механизмы их формирования и возможности управления ими, а значит разработать эффективные методы создания микро- и наноразмерных магнитных порошков с требуемыми характеристиками.

Список литературы:

1. Magnetic Properties of Nanodispersed Ferrite Powders with Cryochemical Prehistory / G. Kuzmicheva, K.A. Mozul, L.P. Ol'khovik et al. // *Physics of the Solid State*. 2011. V. 53, N. 11, P.2284-2289.
2. Synthesis of Fine-Grained Calcium Hexaferrite and Investigation of Its Structural and Magnetic Parameters / T.G. Kuzmicheva, S.V. Blazhevich, L.P. Ol'khovik et al // *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. 2011. V. 47, N5, P.638–644.
3. О совершенствовании технологии получения ферритовых материалов / Т.Г. Кузьмичева, Н.П. Путивцева, О.С. Резниченко // *Таврический научный обозреватель : Электронный научный журнал*. Вып. февраль 2016. № 2 (7). С. 171-177. Режим доступа к журн. URL: <http://tavr.science/stat/2016/02/TNO-7.pdf>
4. Синтез высокодисперсного гексаферрита кальция и исследование его структурных и магнитных параметров / Т.Г. Кузьмичева, С.В. Блажевич, Л.П. Ольховик и др. // *Физикохимия поверхности и защита материалов*. 2011. Т.47. №5. с.534-540.

АВТОМАТИЗАЦИЯ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ КАК УСЛОВИЕ ЭКОНОМИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ ПРЕДПРИЯТИЯ

**Люлюченко М.В., магистрант,
Рябов А.А., канд. экон. наук, доц.**
*Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова*

В настоящее время в России на фоне прошедшего мирового финансового кризиса и политической изоляции обостряются экономические проблемы, такие как отток инвестиционного капитала, ускоряющиеся темпы инфляции, увеличение стоимости привлеченного капитала и другие проблемы, которые в совокупности способствуют ужесточению конкурентной борьбы как внутри страны, так и на мировом рынке. В сложившихся условиях актуализируется вопрос эффективности функционирования отдельных субъектов экономики – предприятий, в связи с чем возникает необходимость в дополнительных конкурентных преимуществах. Предприятие может быть успешным и конкурентоспособным в том случае, если использует все возможные резервы увеличения эффективности. В среде перехода к информационной модели инновационного развития экономики одним из главных конкурентных преимуществ предприятия является автоматизация и оптимизация бизнес-процессов, что означает внедрение компьютерных технологий в основные процессы организации с целью повышения их эффективности [7].

Бизнес-процесс определяют как постоянно повторяющуюся последовательность взаимосвязанных мероприятий, операций, действий, в ходе выполнения которых происходит использование ресурсов внешней среды, вследствие чего создается ценность для потребителя и выдается ему результат [8]. У бизнес-процесса всегда есть менеджер, управляющий им и несущий ответственность за результаты. При этом, так как бизнес-процесс начинается со спроса потребителя и заканчивается его удовлетворением, то в рамках предприятия можно насчитать минимум несколько десятков бизнес-процессов – производство, управление персоналом, продажа, финансовое обеспечение, маркетинг и многие другие. Существуют 3 основных вида бизнес-процессов на предприятии:

1. Управляющие. Управление функционирование системы (стратегический менеджмент, корпоративное управление).

2. Операционные. Непосредственная среда функционирования предприятия (производство, маркетинг, продажи, снабжение).

3. Поддерживающие. Процессы, обслуживающие бизнес (бухгалтерский учет, управление персоналом, техническая поддержка и др.) [2].

Взаимодействие между бизнес-процессами в рамках предприятия создает огромную информационную базу, управление которой без автоматизации и оптимизации становится трудоемким и затратным процессом. Внедрение автоматизированных систем в деятельность организации связано с изменением подходов к управлению, в частности это позволяет перейти к формализации системы управления, рассматривая его как совокупность взаимосвязанных процессов. Это позволит в перспективе в полном объеме анализировать и оценивать деятельность предприятия, с целью выявления узких мест и резервов повышения эффективности.

Существуют различные структурные элементы автоматизации бизнес-процессов, которые в совокупности представляют систему комплексной автоматизации бизнес-процессов предприятия:

- CRM-системы. Используются для усиления взаимодействия с потребителем.

- MES-системы. Применяются в целях повышения управляемости предприятием на операционном уровне.

- платформенные технологии BPP и среднеинтегрированные ERP-системы;

- HRM-продуктов. Повышение эффективности управления персоналом предприятия.

- WMS-программы. Повышение эффективности логистических процессов [8].

В современных условиях российские предприятия не обладают достаточными финансовыми возможностями необходимыми для внедрения комплексной автоматизации бизнес-процессов, в связи с чем организации в большинстве случаев отдают предпочтение точечным решениям в этой сфере, проводя автоматизацию только важных и основных процессов [3].

Алгоритм автоматизации и оптимизации бизнес-процесс предприятия имеет несколько этапов:

1. Выбор методологии описания бизнес процессов.

2. Определение бизнес-процессов предприятия и информационной системы.

3. Выбор продуктов для автоматизации оптимизации бизнес-процессов.

4. Тестовое (апробация) внедрение.

5. Комплексное полное внедрение.

Данный процесс представляется сложным в связи с рядом критериев, которые необходимо учитывать при автоматизации:

- стоимость внедряемого продукта;
- разнообразие автоматизированных информационных систем;
- множество классов систем;
- длительность внедрения продукта (внедрение систем автоматизации отдельных бизнес-процессов может затянуться на несколько лет).

Основные преимущества автоматизации и оптимизации бизнес-процессов предприятия:

- Высвобождение ресурсов (человеческих, финансовых).
- Снижение трудоемкости (как следствие затрат).
- Ускорение информационных потоков.
- Облегчения анализа и оценки деятельности и др.

Одним и наиболее распространенных и востребованных продуктов автоматизации бизнес-процессов в России является ERP-система.

Согласно данным The Gartner Glossary of Information Technology Acronyms and Terms «ERP система (Enterprise Resource Planning - управление ресурсами предприятия) – это программный пакет, который реализует стратегию ERP - организационная стратегия интеграции производства и операций, управления трудовыми ресурсами, финансового менеджмента и управления активами, ориентированная на непрерывную балансировку и оптимизацию ресурсов предприятия посредством специализированного интегрированного пакета прикладного программного обеспечения, обеспечивающего общую модель данных и процессов для всех сфер деятельности»[9].

Внедрение систем ERP позволяет предприятию:

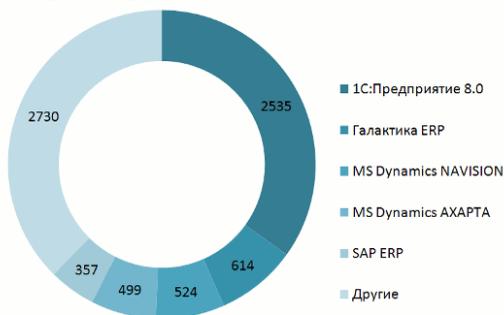
- планировать материальное-техническое обеспечение;
- регулировать наличие продукции и уменьшать затраты на хранение;
- регулировать процесс производства, своевременно реагируя на внешние вызовы;
- оптимизировать бизнес-процессы в компании за счет сокращения материальных и временных затрат и другое.

К основным преимуществам внедрения ERP систем можно отнести своевременное пополнение материальных ресурсов, увеличения оборачиваемости оборотных средств, повышение объемов производства и повышение эффективности, снижение трудозатрат на формирование бухгалтерской отчетности и многое другое

Наиболее часто внедряемые ERP платформы в России:

1. 1С: Предприятие 8
2. Галактика ERP
3. Microsoft Dynamics AXAPTA
4. Microsoft Dynamics Navision
5. SAP ERP [5].

Согласно данным TAdviser Report, которая оценивает структуру рынка поставщиков ERP-систем в зависимости от внедренных ERP-проектов, а не полученной выручки, лидером в России является компания «1С» (рис. 1), что качественно выделяется российского производителя на фоне зарубежных поставщиков (SAP, Microsoft).



Рисинок 1 – Структура внедренных ERP-платформ в России 2014 г.[5]

Однако исследования компания IDC, основанные на выручке поставщиков ERP-систем, обозначают лидером рынка «SAP», приписывая ей долю в 50% рынка, вторым является «1С» охватывая 30% [1].

Объем российского рынка ERP-систем (включая продажу лицензий, услуги по внедрению и сопровождению программ, а также облачных сервисов) согласно исследованиям TAdviser Report, в 2014 году вырос на 4 процента, и достиг 99,2 миллиарда рублей. Эксперты сделали негативные прогнозы на 2015-2016 годы – падение на 15-20% в национальной валюте, что обосновывают нестабильной экономико-политической ситуацией [1].

Эти данные позволяет судить об эффективном развитии российской отрасли информационных технологий и успешно движении в сторону импортозамещения. По сути, рынок систем управления предприятием находится в точке бифуркации, то есть ситуации выходом, из которой может быть либо качественный прорыв, либо полная деградация. От того, насколько эффективно будет развиваться эта область, будет зависеть эффективность функционирования большинства предприятий.

Автоматизация и оптимизация бизнес-процессов предприятия сложная многоступенчатая процедура, приносящая множество преимуществ, начиная со снижения трудоемкости и заканчивая повышением эффективности деятельности, от ее проведения зависит успешное будущее предприятия. Данная сфера имеет огромный потенциал для развития, в частности активизируются и набирают вес в ней российские ИТ-компании.

Список литературы:

1. Боссу в помощь [Электронный ресурс]. Российская газета Режим доступа: <https://rg.ru/2015/11/27/erp-sistemy.html> (15.09.2016)
2. Википедия [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org> (15.09.2016)
3. Дорошенко Ю.А., Климашевская А.А. Технологическая модернизация предприятия как фактор повышения его конкурентоспособности// Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2016. №4. С. 186–191.
4. Ермолина Л.В. Стратегическая эффективность организации // Вестник Самарского государственного университета. - 2011. №10(91) С. 37–40
5. Обзор рынка 2015. Системы автоматизации деятельности предприятий [Электронный ресурс].

6. РосБизнесКонсалтинг. Режим доступа: http://marketing.rbc.ru/reviews/it-business/chapter_2_1.shtml (15.09.2016)
7. Селиверстов Ю.И. Проблемы совершенствования системы государственной антикризисной поддержки малого и среднего предпринимательства Белгородской области: монография / Ю.И. Селиверстов, А.С. Левченко, Н.В. Королева. Белгород: Изд-во БГТУ, 2015. 209 с.
8. Яблочников Е.И., Молочник В.И., Фомина Ю.Н. Реинжиниринг бизнес- процессов проектирования и производства / Учебное пособие. СПб: СПбГУИТМО, 2008. 152 с.
9. The Gartner Glossary of Information Technology Acronyms and Terms (англ.). Gartner (2004). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.gartner.com/it-glossary/enterprise-resource-planning-erp> (15.09.2016)

ПРИМЕНЕНИЕ ДРОБНОГО ИНТЕГРИРОВАНИЯ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Манаенкова Т.А., канд. физ.-мат. наук,
Резниченко О.С., ст. преподаватель
*Белгородский государственный национальный
исследовательский университет» (НИУ «БелГУ»)*

Необходимость обобщения понятия дифференцирования целого порядка от функции на дифференциал дробного порядка очень часто возникает при изучении термодинамических процессов. Например, известно, что дифференциальные уравнения порядка $\frac{1}{2}$ описывают некоторые физические процессы, в частности, изменение температуры в объектах управления климатических систем, диффузионные процессы при заряде суперконденсаторов [2].

Сложность обобщения заключается в отсутствии физической интерпретации понятия дробной производной и дробных интегралов. Например, все мы знаем, что производные первого порядка по времени – это «средняя скорость» точечного объекта на некотором конечном интервале времени. Соответственно производные второго порядка задают «среднее ускорение» на некотором временном интервале. Дробные производные не дают аналогичных интерпретаций, которые можно приписать точечным свойствам объекта или малого интервала, – скорее это свойства всего пути-траектории в целом. Поэтому смысловые интерпретации дробных производных (вернее дифференциальных уравнений с дробными производными) отображаются в описаниях диффузионных процессов, в которых объект моделирования принципиально считается распределенным, и рассматриваются всевозможные распределения плотности.

Математическая модель задачи о прогреве полубесконечной области $x > 0$, с нулевой начальной температурой при определенных предположениях сводится к исследованию уравнения диффузии Фурье:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \quad a = \text{const} > 0 \quad (1)$$

где $u = u(x, t)$ - функция двух независимых переменных x и t , которая задает температуру области в точке x в момент времени t , a – коэффициент диффузии.

С учетом начального условия

$$u(x,0) = 0, \quad 0 \leq x < \infty, \quad (2)$$

при выполнении условия А.Н. Тихонова

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \max_{[0;T]} |u| \exp(-\varepsilon x^2) = 0, \quad \varepsilon > 0, \quad (3)$$

уравнение (1) сводится к уравнению вида

$$u_x(x,t) = -\frac{1}{a} D_{0,t}^{1/2} u(x,t). \quad (4)$$

Здесь $D_{0,t}^{1/2} u(x_0,t)$ является дробной производной порядка $\frac{1}{2}$,

которая для произвольного порядка α определяется следующим образом:

$$D_{0+}^{\alpha} u(t) = \frac{d^n}{dt^n} (I_{0+}^{n-\alpha} u)(t)$$

– левосторонняя дробная производная Римана-Лиувилля, а

$$I_{0+}^{\alpha} u(t) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^t (t-s)^{\alpha-1} u(s) ds$$

– левосторонний дробный интеграл Римана-Лиувилля порядка $\alpha > 0$, $[1]$, а $\Gamma(p)$ – гамма-функция.

Поддействуем оператором $D_{0,t}^{-1/2}$ на уравнение (4). Учитывая свойство дробных интегралов и производных как взаимнообратных операторов:

$$I_{0,t}^{\alpha} D_{0,t}^{\alpha} f = f(t) - \sum_{k=0}^{n-1} \frac{I_{0,t}^{\alpha-1} f(0) t^{\alpha-1}}{\Gamma(\alpha-k)}, \quad \text{где } n = [\text{Re } \alpha] + 1$$

и дополнительное начальное условие $D_{0,t}^{1/2} u(x,0) = 0$.

В итоге получим уравнение

$$\frac{\partial}{\partial x} D_{0,t}^{-1/2} u(x,t) = -\frac{1}{a} u(x,t). \quad (5)$$

При решении многих дифференциальных уравнений, содержащих дробные производные часто применяют преобразование Лапласа функции. Приведем основные определения и свойства этого преобразования для примера их применения.

Преобразование Лапласа:

$$L(p) = \int_0^{\infty} e^{-pt} f(t) dt \quad (6)$$

Свойства:

$$L\{f'(t)\} = pF(p) - f(0) \quad (7)$$

$$L(D_{0,t}^{-\alpha} f(t), p) = p^{-\alpha} F(p), \text{ при } \alpha > 0 \quad (8)$$

Обратное преобразование Лапласа:

$$L^{-1} g(t) == L^{-1}(g(p), t) = \frac{1}{2\pi i} \int_{\gamma-i\infty}^{\gamma+i\infty} e^{pt} g(p) dp, \quad \gamma = \text{Re } p. \quad (9)$$

Действуем преобразованием Лапласа на уравнение (5) с учетом условия (2) и свойства (8) по переменной t , получим:

$$p^{-1/2} \frac{\partial}{\partial x} U(x, p) = -\frac{1}{a} U(x, p). \quad (10)$$

Разделяем переменные и решаем уравнение по переменной x , получим:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} U(x, p) / U(x, p) &= -\frac{p^{1/2}}{a} \\ \ln(U(x, p)) &= -\frac{p^{1/2}}{a} x + C \\ U(x, p) &= C_1 \exp\left(-\frac{p^{1/2}}{a} x\right). \end{aligned} \quad (11)$$

После применения обратного преобразования Лапласа (9) на уравнение (1), получаем решение задачи (4), (2) вида:

$$u(x, t) = \frac{C_1}{2\pi i} \int_{\gamma-i\infty}^{\gamma+i\infty} e^{pt + \frac{\sqrt{p}}{a} x} dp$$

Таким образом был приведен пример обобщения уравнения с производными целого порядка на уравнение, содержащего производную дробного порядка, и представлен метод решения этой задачи с применением преобразования Лапласа.

Аналоги начально-краевых задач, содержащих дробные интегралы и производные были решены в работах [4], [5], применение таких задач можно дополнительно посмотреть в работах [1] – [3].

Список литературы:

1. Самко С.Г. Интегралы и производные дробного порядка и некоторые их приложения. / С.Г. Самко, А.А. Килбас, О.И.Маричев // Минск. Наука и техника, 1987.
2. Мишунин В.В. Особенности цифрового моделирования систем дробно-иррационального класса [Текст] / В.В. Мишунин А.И., Дементьев В.Г., Рубанов // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. Белгород, 2003. № 6. Ч. III. С. 142-144.
3. Нахушев А.М. Дробное исчисление и его применение / А.М. Нахушев // М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 272 с.
4. Глушак А.В. Задача типа Коши для абстрактного дифференциального уравнения с дробными производными / А.В. Глушак // Математические заметки, 2005. Т.77, вып.1. С. 28 – 41.
5. Глушак А.В. О разрешимости задач типа Коши для абстрактных дифференциальных уравнений с дробной производной Римана-Лиувилля / А.В. Глушак, Т.А. Манаенкова // Научные ведомости БелГУ. Математика. Физика, 2012. №17 (136), вып.28. С. 28 – 45.

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНОЙ ПЛАТФОРМОЙ НА ОСНОВЕ ОДНОПЛАТНОГО КОМПЬЮТЕРА RASPBERRY PI

**Никитенко А.А.,
Добринский Е.П.,
Коленченко В.В.,
Кижук А.С.**

*Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова*

Введение

В настоящее время разработка и производство мобильных роботов представляет собой динамично развивающуюся отрасль. Мобильные роботы находят свое применение в промышленности и бытовой сфере, постоянно расширяя перечень выполняемых возможностей и функций. Очевидно, что одной из базовых задач, которые должны решаться мобильными роботами, является задача позиционирования и поддержания траектории движения мобильного робота. Современные методы, описывающие решение данной задачи, основываются на основополагающих принципах синтеза систем управления. Среди этих методов можно выделить ПИД-регулятор и регулятор основанный на «нечеткой» логике [1]. При этом следует отметить, что нечеткий регулятор более прост в настройке, однако отличается сложностью программной реализации. Тогда как основной недостаток ПИД-регулятора сложность настройки его составляющих [3].

Цель работы

Перед реализацией проекта необходимо поставить ряд определенных задач выполнение которых позволило бы в той либо иной мере приблизится к достижению поставленной цели:

1. Создание работоспособной системы управления мобильной платформой;
2. Построение СУ на основе одноплатного компьютера на ОС Linux;
3. Разработка регулятора для поддержания траектории движения платформы на основании показаний энкодеров;
4. Разработка блока управления манипулятором.

Описание мобильной платформы

Мобильная платформа представляет собой трехколесную тележку, оснащенную двумя электроприводами постоянного тока,

закрепленными по бокам непосредственно к ведущим колесам, третье колесо расположено по центру и свободно вращается во всех направлениях.

Для приведения мобильной платформы в движение используются электродвигатели ЭПС-4КМ (табл.1).

Таблица 1 – Характеристики электродвигателя

Напряжение питания	12 В
нагрузочный момент	3 Н*м
пусковой момент	14 Н*м
потребляемый ток	8 А
частота вращения	55 об/мин

Питание платформы осуществляется от двух последовательно соединенных аккумуляторов Delta DT1212, имеющих напряжение на выходах 12В и емкость 12А*ч. Данная схема соединения позволяет уменьшить потери при неодинаковом разряде аккумуляторных батарей, а также увеличить коэффициент полезного действия (КПД). Поскольку питание двигателей осуществляется напряжением 12В в цепи питания установлен понижающий DC-DC преобразователь с КПД более 90%. Для питания электроники также применяется понижающий DC-DC преобразователь с 12В до 5В. Схема питания защищена от токов перегрузки и короткого замыкания посредством автоматического выключателя (рис. 1).

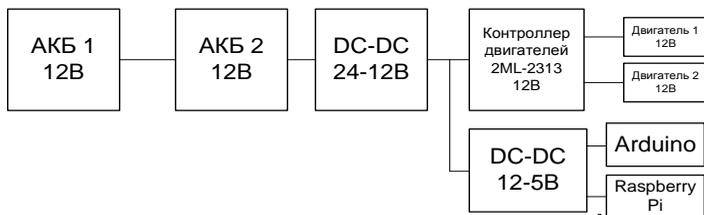


Рисунок 1 – Схема питания мобильной платформы

Внешний вид исследуемой мобильной платформы и электродвигателя (рис.2).

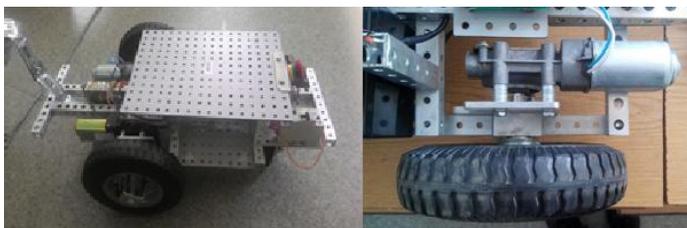


Рисунок 2 – Внешний вид исследуемой мобильной платформы

Система управления

Бортовая система управления мобильной платформой на аппаратном уровне реализована с помощью нескольких базовых блоков [2]:

1. Одноплатный компьютер Raspberry Pi;
2. Микропроцессорная платформа Arduino UNO;
3. Блок управления манипулятором;
4. Контроллер двигателей 2ML-2313.



Рисунок 3 – Аппаратная реализация бортовой системы управления

Главным вычислительным устройством, производящим обработку показаний датчиков и выработку управляющих воздействий, является одноплатный компьютер Raspberry Pi.

Для непосредственного управления двигателями постоянного тока используется драйвер 2ML-2313. Миникомпьютер на основании вычислений регулятора осуществляет выдачу управляющих команд определенного формата на драйвер (рис. 4).

Старт (1символ)	Адрес (3 символа)	Направление вращения(1символ)	Напряжение(%) (2символа)
M	000 - 255	F, B	00-99

Рисунок 4 – Пример управляющей команды

Драйвер двигателей постоянного тока 2ML-2313 в свою очередь коммутирует питание на двигатели в соответствии с приходящими командами. Связь Raspberry Pi и 2ML-2313 осуществляется через специальный преобразователь USART->RS-485, так как Raspberry Pi не имеет встроенного выхода RS-485.

Микропроцессорная платформа Arduino, в данном случае выступает как плата расширения, позволяя увеличить количество портов ввода/вывода на одноплатном компьютере Raspberry Pi, а также уменьшить вычислительную нагрузку посредством обработки «сырых» показаний с энкодеров двигателей. Связь между Arduino и Raspberry Pi осуществляется по шине I2C. Преимущество данной технологии в том, что она позволяет связать устройства с разным напряжением уровня без использования преобразователя логических уровней и подключить к одной шине несколько десятков различных устройств, что в дальнейшем позволит без существенных изменений в структуре бортовой системы управления расширить её функционал, например, для управления четырьмя двигателями.

Блок управления манипулятором также основан на микропроцессорной платформе Arduino. Данный блок предполагает управление пяти осевым манипулятором с рабочим органом.

Регулятор

В качестве средства выработки управляющего воздействия для корректировки и поддержания движения мобильной платформы согласно заданной траектории движения был выбран ПИД-регулятор [3] Данный регулятор программно реализован на микроконтроллере Raspberry Pi. ПИД-регулятор генерирует управляющее воздействие для двигателей мобильной платформы. Обратной связью служат показания инкрементальных энкодеров (рис.5).

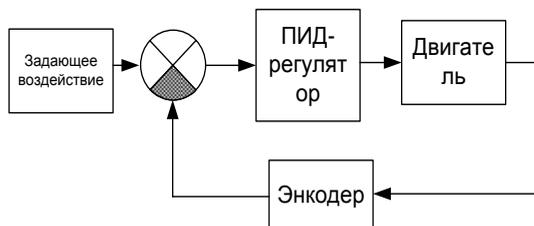


Рисунок 5 – Структурная схема системы управления

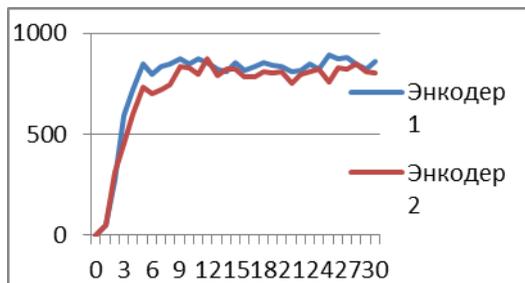


Рисунок 6 – График сигналов с энкодеров

Список литературы:

1. Деменков Н. П. Нечеткое управление в технических системах: учебное пособие / Н. П. Деменков. М.: МГТУ им Н.Э. Баумана, 2005. 200 с.
2. Разработка автоматизированной транспортно-складской системы с групповым управлением робокаров / Е.П. Добринский, Д.А. Бушуев, В.З. Магергут, А.Г. Бажанов//Труды 7-го международного симпозиума. Санкт-Петербург: Изд-во «Политехника-сервис», 2013. 556 с.
3. Денисенко В.З. Разработка ПИД-регуляторы: вопросы реализации / В.З. Денисенко // Современные технологии и автоматизация. 2008. №1. С. 86-99.
4. Черный С. П. Нечеткая многокаскадная система управления электроприводом постоянного тока / С.П. Черный, А.А. Гусаров // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2011. №6. С. 24-30.

СИСТЕМА НАВИГАЦИИ ТРАНСПОРТНОГО РОБОТА С ПРИМЕНЕНИЕМ ЯВЛЕНИЯ ФОТОРЕЦЕПЦИИ И ЛОГИЧЕСКОГО ЗАКОНА УПРАВЛЕНИЯ

Паращук Е.М., канд. техн. наук, доц.
*Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова*

В настоящее время автоматизация транспортно-складских операций в различных производствах не мыслима без применения транспортных роботов, основной задачей системы управления которого является обеспечение требования жесткого следования определенной траектории, одним из способов задания которой является применение светоотражательной полосы темного оттенка на светлом фоне [1].

Предлагаемое решение данной задачи основано на использовании явления фоторецепции и логического закона управления приводами колес транспортного робота, концептуальная модель которого представлена на рис.1.

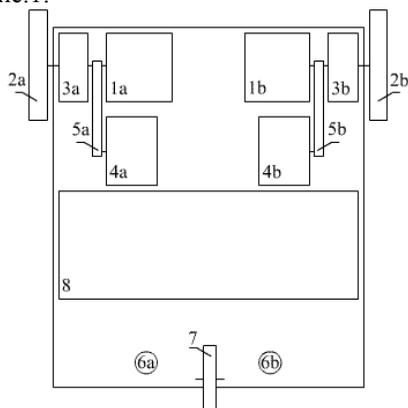


Рисунок 1 – Концептуальная модель мобильной платформы

Исполнительными устройствами робота являются маломощные двигатели постоянного тока (1a,1b), связанные с колесами (2a,2b) через редукторы (3a,3b). Для обеспечения обратной связи по скорости в конструкцию были введены тахогенераторы (4a,4b), связанные с валами двигателей посредством ремней (5a,5b). Фотодатчики (6a,6b) обеспечивают систему управления информацией о положении мобильной платформы относительно графической траектории. Колесо (7) является третьей точкой опоры робота и обеспечивает устойчивость горизонтального положения платформы. Печатная плата (8) содержит

«электронную начинку» робота, в основу которой положен микроконтроллер ATmega8. Как видно, механическая схема мобильной платформы собрана по «танковому принципу»: в конструкции имеются два ведущих колеса, взаимное вращение которых обеспечивает движение робота вперёд, назад и повороты с любым возможным углом (0-90°). Присутствие в конструкции двух фотодатчиков позволяет реализовывать сложные алгоритмы поведения робота, обеспечивающие высокую точность навигации.

Алгоритм движения робота, снабжённого двумя светочувствительными датчиками, по линии заключается в том, что когда оба датчика робота располагаются над светлым фоном по обе стороны от нарисованной тёмной линии (рис. 2, а), вращаются оба двигателя, обеспечивая движение вперёд. Аналогичное поведение определяется алгоритмом также и в ситуации, когда оба датчика робота располагаются над тёмной линией (рис. 2, б). Такая ситуация может возникнуть в случае серии резких поворотов, когда мобильная платформа окажется недостаточно маневренной для успешного прохождения трассы. Двигаясь прямо, робот вероятнее всего достигнет положения, когда один из датчиков окажется над светлым фоном (рис. 2, в). Очевидно, в такой ситуации для сохранения позиции над линией, мобильной платформе необходимо также осуществить поворот направо. Манёвр осуществляется остановкой правого двигателя и включением левого до тех пор, пока оба датчика робота не окажутся над белым фоном, по обе стороны от линии. Для поворота налево (рис. 2, г) роботу необходимо вращать правый двигатель и держать остановленным левый до тех пор, пока положение мобильной платформы над линией не нормализуется.

Блок-схема описанного выше алгоритма приведена на рис. 3. Здесь приняты следующие условные обозначения: «фд» - фотодатчик, «д» - двигатель. Выражения «фд1/2=1» и «фд1/2=0», «д1/2=1» и «д1/2=0» символизируют проверку на расположение датчика над тёмной и светлой поверхностью, а также включение и выключение двигателя соответственно. Данный алгоритм на стандартизированном математическом языке в виде помеченной сети Петри приведён на рис. 4: P0 – позиция, соответствующая положению обоих фотодатчиков робота над светлой поверхностью по обоим сторонам от тёмной линии, либо обоих фотодатчиков над тёмной линией; P1 – позиция, соответствующая положению левого фотодатчика робота над светлой поверхностью фона, а правого – над тёмной; P2 – позиция,

соответствующая положению правого фотодатчика робота над светлой поверхностью фона, а левого – над тёмной; $Z1, \bar{Z}1$ – пуск (останов) левого двигателя; $Z2, \bar{Z}2$ – пуск (останов) правого двигателя; $X1, \bar{X}1$ – сигнализация левого датчика о нахождении над светлой (темной) поверхностью фона; $X2, \bar{X}2$ – сигнализация правого датчика о нахождении над светлой (темной) поверхностью фона линии.

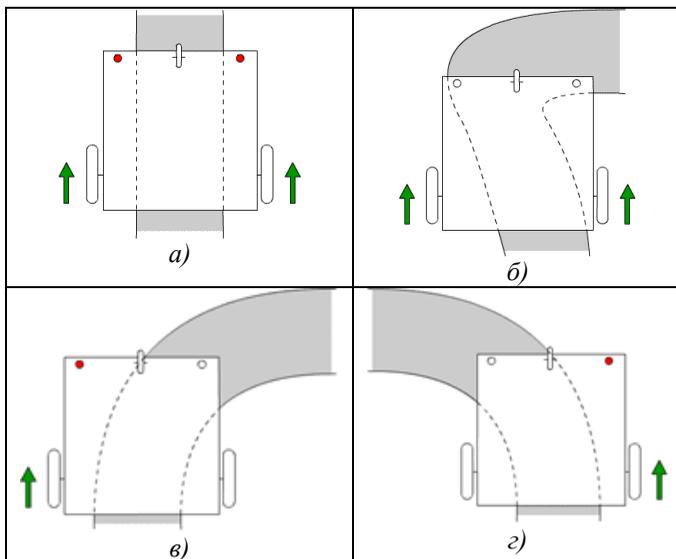


Рисунок 2 – Расположение датчиков над светоотражательной полосой

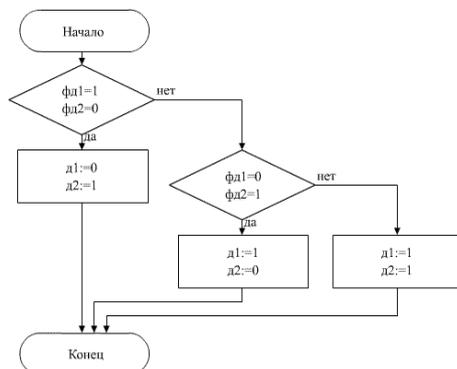


Рисунок 3 – Блок-схема алгоритма следования транспортного робота по траектории

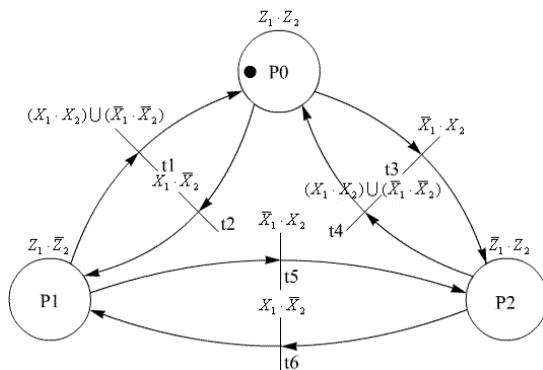


Рисунок 4 – Алгоритм в виде помеченной сети Петри

На рис. 5. приведена блок-схема одноконтурной системы автоматического регулирования (САР) с логическим регулятором.

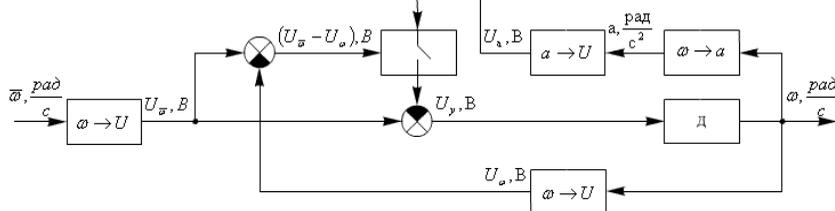


Рисунок 5 – Блок-схема одноконтурной САР с логическим регулятором

Входной задающий сигнал $\bar{\omega}$ поступает на вход преобразователя «скорость-напряжение» $\omega \rightarrow U$, выход которого является управляющим сигналом для объекта управления - двигателя постоянного тока. Скорость вращения вала двигателя снимается датчиком скорости $\omega \rightarrow U$ и сравнивается с заданным напряжением $U_{\bar{\omega}}, B$. Выход сумматора $(U_{\bar{\omega}} - U_{\omega}), B$ управляет поведением ключевого элемента. Второй управляющий сигнал для ключевого элемента является также и входом для него и вычисляется как напряжение $U_{a, B}$, эквивалентное ускорению вала двигателя, полученному последовательным соединением преобразователя «скорость-ускорение» $\omega \rightarrow a$ и датчика ускорения $a \rightarrow U$. Ключевой элемент открыт на интервалах времени, когда знаки управляющих сигналов противоположны («+» и «-», либо «-» и «+»), и закрыт – когда совпадают («+» и «+», либо «-» и «-»).

Принцип логического закона управления, реализованного в разработанной системе, поясняют эпюры напряжений (рис. 6) [2].

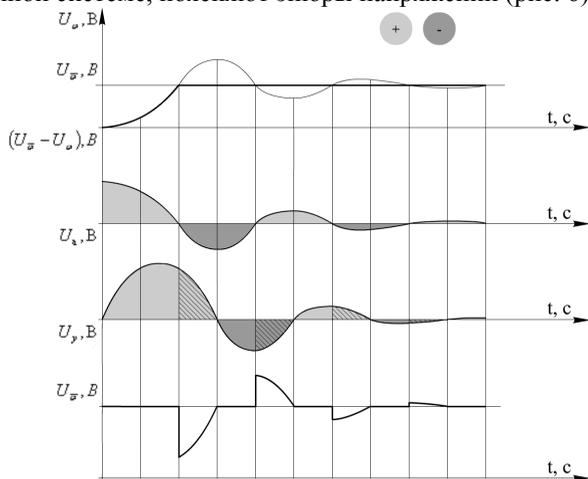


Рисунок 6 – Эпюры сигнальных напряжений в САУ с логическим регулятором

В период разгона исполнительного устройства до уровня напряжения задания $U_{\bar{\omega}}$ угловая скорость ω вращения двигателя имеет положительное значение, и отрицательная обратная связь по скорости должна быть отключена, чтобы не препятствовать разгону с максимально возможным нарастанием скорости. Это требование выполняется размыканием ключевого элемента на данном временном интервале под действием управляющих сигналов одинаковых знаков. В момент времени, когда скорость вращения двигателя начинает превышать заданную, необходимо обеспечить препятствие дальнейшему возрастанию управляемой величины. Это достигается замыканием ключа под действием управляющих сигналов противоположных знаков. Таким образом, управляющий сигнал двигателя U_y является разностью сигналов $U_{\bar{\omega}}$ и U_a , что позволяет изменять характер протекания переходного процесса системы в сторону значительного уменьшения выбросов над линией установившегося значения, либо в сторону снижения отклонения регулируемой величины под линией установившегося значения на основе взаимного анализа сигналов $(U_{\bar{\omega}} - U_{\omega})$ и U_a .

Общая электрическая схема разработанного устройства представлена на рис. 7.

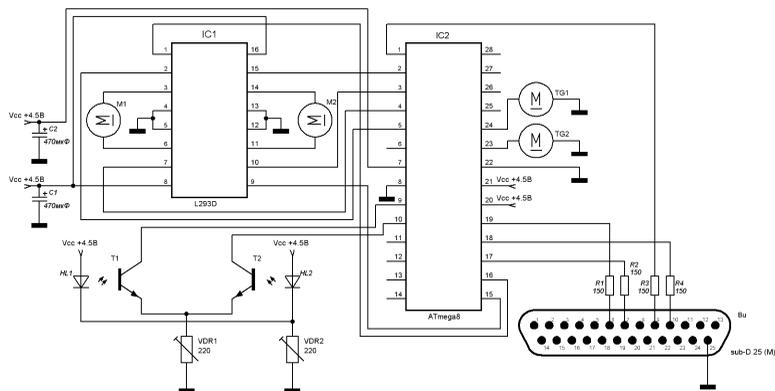


Рисунок 7 – Общая принципиальная электрическая схема мобильной платформы

Драйвер двигателей *L293D* соединён с выводами порта *D* микроконтроллера *ATmega8*. Линии *OC1B* и *OC1A* микроконтроллера соединены со входами *Enable2* и *Enable1* соответственно микросхемы *L293D* для реализации ШИМ-управления приводами. Фотодатчики подключены к выводам порта *B* микроконтроллера. Входы аналого-цифрового преобразователя *ADC0* и *ADC1* *ATmega8* использованы для подключения тахогенераторов. Стабилизация работы драйвера двигателей *L293D* и микроконтроллера *ATmega8* обеспечена использованием конденсаторов номиналом 470мкФ в цепях питания микросхем. Такое схемное решение защищает устройства от бросков по питанию, вызванных работой моторов. Источником питания мобильной платформы является батарея $4,5\text{В}$.

Список литературы:

1. Рубанов В.Г., Кижук А.С. Мобильные микропроцессорные системы автоматизации транспортно-складских операций. Мобильные робототехнические системы: монография. Белгород: Изд-во БГТУ, 2011. 288 с.
2. А.с. 1241190 СССР. Релейно-импульсная следящая система / Е.К. Алёхина Е.К., А. А. Горовой, А.В. Деревянченко, В.Г. Рубанов // Бюл. 1986. № 6.

РЕГУЛИРОВАНИЕ МОЩНОСТИ КОТЛА ПО СООТНОШЕНИЮ «ГАЗ - ВОЗДУХ»

Покутнева С. К. магистрант,
Порхало В.А., канд. техн. наук, доц.,
Бажанов А.Г., канд. техн. наук, доц.
*Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова*

Паровой котел — это сложный объект, в котором необходимо управлять множеством параметров. Управление ведется по таким параметрам, как уровень воды в барабане котла, соотношение «топливо - воздух», давление пара на выходе котла и разрежение в топке котла [1]. Достоинством парового котла является его высокая производительность. Максимальный КПД котла получается при определенном соотношении «газ - воздух».

Увеличение или уменьшение мощности котла осуществляется изменением объема сжимаемого топлива. Так как в котле предусмотрено 3 горелки, и они должны всегда работать (требование завода изготовителя), то регулирование мощности происходит с помощью изменения положения регулирующих клапанов, установленных на каждой горелке. Поскольку изменяется объем подаваемого газа в горелку, то для оптимального горения (качества сгорания топлива, формы пламени) необходимо пропорционально изменять количество подаваемого воздуха.

Перед розжигом устанавливается минимальное значение положения регулирующего клапана газа (минимальное давление газа на горелке), и минимальная частота вращения вентилятора (минимальное давление воздуха на горелке), для безопасного розжига. После розжига трех горелок начинается процесс либо автоматического регулирования мощности котла, либо ручного задания мощности котла.

Процесс регулирования мощности (давления пара на выходе из котла) следующей. Для увеличения давления на выходе из котла сперва увеличивается давление воздуха перед горелкой путем увеличения частоты вращения дутьевого вентилятора. Увеличение давления воздуха приводит к тому, что необходимо увеличивать давление газа перед горелкой, путем увеличения положения регулирующего клапана по газу. То есть для каждого значения давления воздуха перед горелкой, устанавливается необходимое значение давления топливного газа.

В процессе режимной наладки котла, для различной нагрузки котла происходит оптимальный (качество сгорания топлива, форма пламени) подбор соотношения воздух-газ. Далее это соотношение заносится в регулирующую программу ПЛК.

Регулирование мощностью котла является двухкаскадной САУ: 1 – й каскад поднимает давление пара до заданного уровня. 2 – ой каскад подбирает соотношение «газ - воздух». Структурная схема САУ регулирования соотношения «газ - воздух» может быть реализована как одноконтурная или каскадная [2] система и представлена на рис. 1.

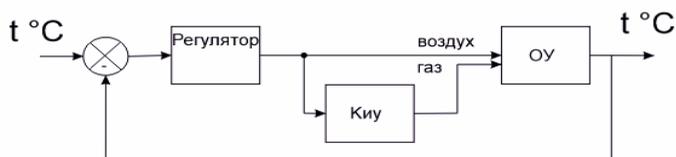


Рисунок 1 – Структурная схема поддержания требуемого расхода газа и воздуха

Регулирование соотношения «топливо – воздух», при работе на основном топливе производится индивидуально для каждой горелки, при работе на мазуте - регулирование совместное для всех горелок. Для оптимального режима горения на котельной используется режимная карта (табл. 1).

Для обеспечения качественного горения газа необходимо в достаточном количестве подвести воздух в зону горения и добиться хорошего перемешивания газа с воздухом. Кроме этого необходимо создание нужного температурного режима. Чтобы газ воспламенился необходимо его нагреть до температуры его воспламенения и в дальнейшем температура не должна опускаться ниже температуры воспламенения. Также необходимо организовать отвод продуктов сгорания в атмосферу. Полное горение достигается в том случае, если в продуктах сгорания выходящих в атмосферу отсутствуют горючие вещества. При этом углерод и водород соединяются вместе и образуют углекислый газ и пары воды[3].

Визуально при полном сгорании пламя светло-голубое или голубовато-фиолетовое. При полном сгорании топлива продукты горения характеризуются следующей формулой: $CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O$

Кроме этих газов в атмосферу с горючими газами выходит азот и оставшийся кислород.

Таблица 1 – Режимная карта парового котла

Наименование параметра	Нагрузка, % от номинальной			
	44%	66%	77%	93%
Паропроизводительность, т/ч	7,76	11,8	13,92	18,59
Давление пара в барабане, кгс/см ²	10	10	10	10
Температура питательной воды, °С после экономайзера до экономайзера	84	93	89	150
	50	54	58	120
Давление топлива перед горелкой, Мпа	0,5	0,65	1,09	1,7
Разряжение в топке котла, Па	30	30	30	30
Давление воздуха перед горелкой, кПа	0,1	0,18	0,43	0,85
Температура дутьевого воздуха, °С	27	27	27	27
Температура уходящих газов за котлом, °С	233	279	300	324
Состав уходящих газов за котлом кислород O ₂ , % окись углерода CO, ppm углекислый газ CO ₂ , %	11	10	8	6
	0	0	0	0
	5,59	6,15	7,28	8,41
Коэффициент избытка воздуха за котлом	1,99	1,82	1,55	1,36
Потери тепла, % с уходящими газами из – за химнедожега в окружающую среду	15,8	17,92	16,98	16,47
	0	0	0	0
	1,9	1,27	1,07	0,89
КПД котла брутто, %	82,3	80,8	82	82,6

Если сгорание газа происходит не полностью, то в атмосферу выбрасываются горючие вещества – угарный газ, водород, сажа, что характеризуется следующей химической формулой: $CH_4 + 2O_2 \sim CO_2 + 2H_2O + CO + H + C$.

Неполное сгорание газа происходит вследствие недостаточного количества воздуха.

Контур регулирования соотношения «топливо-воздух» осуществляет качественное сгорание топлива в топке котла. Данный регулятор осуществляет изменение давления газа перед горелкой, за счет изменения давления воздуха перед горелкой. Контроль давлений осуществляется перед горелкой, поскольку каждая горелка индивидуальна, и ее настройка производится во время пусконаладочных работ. Рассмотрим работу регулятора на первой горелке: давление воздуха, измеренное датчиком давления поступает на аналоговый вход контроллера. Прикладная программа ПЛК проводит обработку сигнала и производит управление электроприводом регулирующего клапана подачи газа поз.V1 дискретными сигналами «больше», «меньше». В прикладную программу во время пусконаладочных работ вносятся значения давления воздуха перед горелкой и давление газа перед горелкой в табличном виде. Значения берутся для работы котла под различной нагрузкой.

Далее рассмотрим контур регулирования давления в барабане котла. Данные о величине давления в барабане котла поступают с датчика избыточного давления на аналоговый вход контроллера. Прикладная программа ПЛК проводит обработку сигнала, и по цифровому сигналу управления передается на частотный привод поз. UK1 для изменения частоты вращения электродвигателя вентилятора, который производит изменение давления воздуха перед горелками. В соответствии с режимной картой работы котла это приводит к изменению положения регулирующих клапанов подачи газа на горелку, что в свою очередь приводит к увеличению или уменьшению количества подаваемого газа на котел, соответственно изменению давления пара в барабане котла (рис. 2).

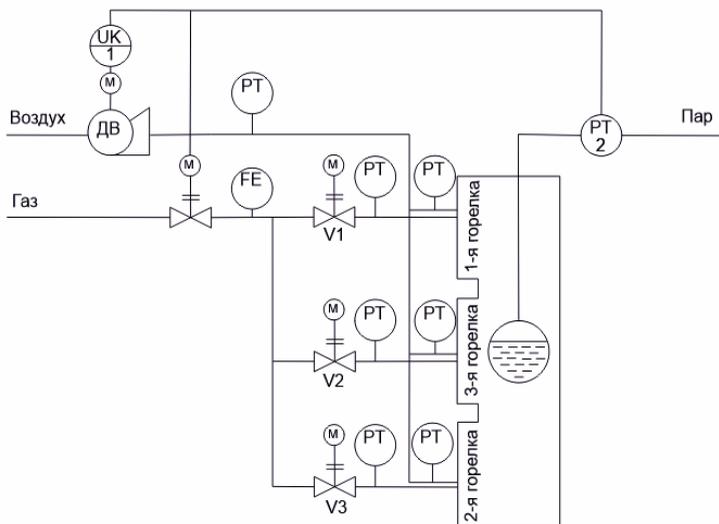


Рисунок 2 – Функциональная схема автоматизации поддержания требуемого расхода газа и воздуха

Таким образом, максимальный КПД котла мы получим, регулируя соотношения «газ - воздух». Под каждое давление пара на выходе подбираем свой расход воздуха и к нему подбираем необходимое количество газа, для полного сгорания топлива.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Белгородской области в рамках проекта №14-41-08016 «р_офи_м» и проекта ПСР №А-5/15.

Список литературы:

1. Соколов Б.А. Котельные установки и их эксплуатация: учебник для нач. проф. образования / Б.А. Соколов – М.: Издательский центр «Академия», 2007. 358 с.
2. Рубанов В.Г. Автоматизация печи обжига клинкера на основ каскадной и многосвязной систем управления / В.А. Порхало, В.Г. Рубанов, В.Г. Шаптала // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова, 2013. – № 2. 2013. С. 69–72.
3. Дудников Е.Г. Автоматическое управление в химической промышленности / Е.Г. Дудников, А.В. Казаков, Ю.Н. Софиева, А. Э. Софиев, А. М. Цирлин. М.: Химия, 1987. 368 с.

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ НЕЧЕТКОГО ВЫВОДА ДЛЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ХОЛОДИЛЬНОЙ КАМЕРОЙ

Рыбин И.А.

*Белгородский государственный технологический
университет им. В. Г. Шухова*

Позиционные системы, работающие по принципу «включено/выключено», применяются для управления такими промышленными и бытовыми объектами, как холодильные установки, газовые горелки, электрические плиты, в силу того, что обычно в таких объектах не требуется высокая точность поддержания регулируемой технологической величины и приемлем колебательный режим функционирования. Эти системы получили широкое распространение за счёт своей низкой стоимости, простоты создания и высокой надёжности при условии достаточности качества регулирования.

В данной работе объектом исследования является холодильник «АТЛАНТ» ХМ-6016-050, управляющее устройство которого представляет собой модуль Н60С-М1, содержащий микроконтроллер ATmega168PA в качестве основного вычислительного узла. Другими словами, управление работой холодильника и, в частности, позиционное регулирование температуры выполняет программа, «зашитая» в программную память данного микроконтроллера. Таким образом, изменяя программу можно реализовывать различные алгоритмы управления работой холодильника.

Целью работы является разработка программы, реализующей нечёткий адаптивный позиционный способ управления, для микроконтроллера ATmega168PA модуля Н60С-М1 холодильника «АТЛАНТ», а также сравнение данного способа с адаптивным трёхпозиционным способом регулирования температуры в холодильной камере.

Регулирование температуры в проектируемой системе разделено на два уровня [1]. На первом уровне с помощью правил нечёткой логики локализуется диапазон регулирования [2], в котором будет производиться дальнейшая адаптация, причём локализация диапазона регулирования происходит путём определения базового значения параметра этого диапазона по формуле:

$$U_{ao} = U_0(1 - \beta) + U_k \beta,$$

где U_{ad} – адаптируемый параметр управления, U_0 и U_k – параметры управления в двух крайних состояниях объекта, β – нормированный эквивалент состояния объекта, принимаемого за значение параметра адаптивной средней позиции на данном диапазоне, а на втором уровне значение параметра управления определяется с помощью адаптивного трёхпозиционного способа регулирования.

В качестве управляющего воздействия используется мощность работы компрессора, причём $U_k = 100\%$ (компрессор постоянно включен), $U_0 = 0\%$ (компрессор отключен).

Состояние объекта (нагрузка) изменяется под воздействием следующих трёх факторов: заданной температуры в холодильной камере $T_{зд}$, температуры внешней среды $T_{вн}$ и масса Q загруженных продуктов. Задача состоит в том, чтобы в зависимости от значений данных факторов на основе нечёткой логики определить адаптивную среднюю позицию мощности, расходуемой компрессором, которая бы обеспечила соответствие управляющего воздействия нагрузке холодильной камеры.

Введем для каждой лингвистической переменной (температура задания $T_{зд}$, температуры внешней среды $T_{вн}$, загрузка продуктов Q) по три нечётких термина: *PS* – положительное малое; *PM* – положительное среднее; *PB* – положительное большое. Опишем эти переменные с помощью треугольных и трапециевидных функций принадлежности (рис. 1).

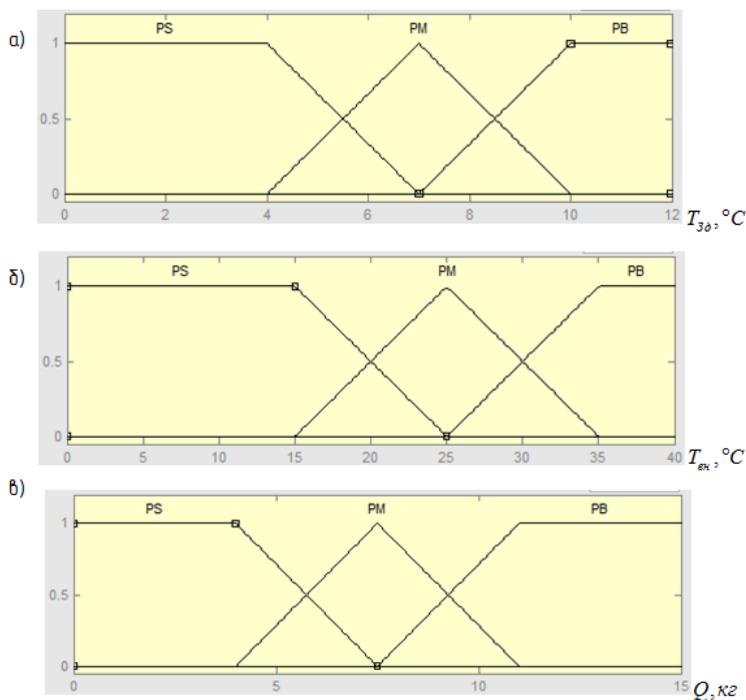


Рисунок 1 – Функции принадлежности влияющих факторов: $T_{ин}$
 а) температура задания; б) температура внешней среды; в) масса загруженных продуктов

Для управляющего воздействия (мощности компрессора) введём четыре терма: ZP – значение близкое к нулю, PS , PM , PB – положительное малое, среднее и большое значение соответственно. Функции принадлежности представлены на рис. 2.

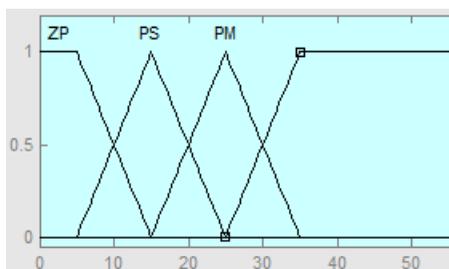


Рисунок 2 – Функции принадлежности для управляющего воздействия PS

Теперь составим продукционные правила в виде таблицы (таблица 1), на основе которых будет происходить управление. В первых трёх столбцах записаны предпосылки правил для трёх влияющих факторов, которые связаны друг с другом логической конъюнкцией, а в последнем столбце записаны термы заключения (управляющее воздействие).

Таблица 1 – Продукционные правила

№	Предпосылки			Заключение
	T_{30}	$T_{вн}$	Q	N
1	<i>PS</i>	<i>PS</i>	<i>PS</i>	<i>PM</i>
2	<i>PS</i>	<i>PS</i>	<i>PM</i>	<i>PM</i>
3	<i>PS</i>	<i>PS</i>	<i>PB</i>	<i>PB</i>
4	<i>PS</i>	<i>PM</i>	<i>PS</i>	<i>PB</i>
5	<i>PS</i>	<i>PM</i>	<i>PM</i>	<i>PB</i>
6	<i>PS</i>	<i>PM</i>	<i>PB</i>	<i>PB</i>
7	<i>PS</i>	<i>PB</i>	<i>PS</i>	<i>PB</i>
8	<i>PS</i>	<i>PB</i>	<i>PM</i>	<i>PB</i>
9	<i>PS</i>	<i>PB</i>	<i>PB</i>	<i>PB</i>
10	<i>PM</i>	<i>PS</i>	<i>PS</i>	<i>PS</i>
11	<i>PM</i>	<i>PS</i>	<i>PM</i>	<i>PS</i>
12	<i>PM</i>	<i>PS</i>	<i>PB</i>	<i>PM</i>
13	<i>PM</i>	<i>PM</i>	<i>PS</i>	<i>PM</i>
14	<i>PM</i>	<i>PM</i>	<i>PM</i>	<i>PM</i>
15	<i>PM</i>	<i>PM</i>	<i>PB</i>	<i>PB</i>
16	<i>PM</i>	<i>PB</i>	<i>PS</i>	<i>PM</i>
17	<i>PM</i>	<i>PB</i>	<i>PM</i>	<i>PB</i>
18	<i>PM</i>	<i>PB</i>	<i>PB</i>	<i>PB</i>
19	<i>PB</i>	<i>PS</i>	<i>PS</i>	<i>ZP</i>
20	<i>PB</i>	<i>PS</i>	<i>PM</i>	<i>ZP</i>

21	<i>PB</i>	<i>PS</i>	<i>PB</i>	<i>ZP</i>
22	<i>PB</i>	<i>PM</i>	<i>PS</i>	<i>PS</i>
23	<i>PB</i>	<i>PM</i>	<i>PM</i>	<i>PS</i>
24	<i>PB</i>	<i>PM</i>	<i>PB</i>	<i>PM</i>
25	<i>PB</i>	<i>PB</i>	<i>PS</i>	<i>PS</i>
26	<i>PB</i>	<i>PB</i>	<i>PM</i>	<i>PM</i>
27	<i>PB</i>	<i>PB</i>	<i>PB</i>	<i>PM</i>

Таким образом, при известных температуре задания $T_{з0}$, загрузки Q , устанавливаемых пользователем, и температуре внешней среды $T_{вн}$, измеренной с помощью датчика температуры, используя один из известных алгоритмов получения численного значения логического заключения (алгоритм Мамдани, Цукамото и др.), на основе составленной таблицы правил можно определить адаптивную среднюю позицию управляющего воздействия.

На втором уровне реализуется адаптивное трёхпозиционное регулирование температуры [3]. Адаптивная средняя позиция, вычисленная на первом уровне, уточняется и подстраивается под нагрузку объекта с определённым дискретным шагом определяемым так, чтобы подстройка под нагрузку объекта была обеспечена одним из пяти возможных дискретных управляющих воздействий, включая вычисленную позицию на первом уровне.

Результаты моделирования при скачкообразном изменении нагрузки (температуры внешней среды с 23 °C до 18 °C) и для значений влияющих факторов, равных $T_{з0}=7$ °C, $Q=7$ кг, представлены на рис. 3.

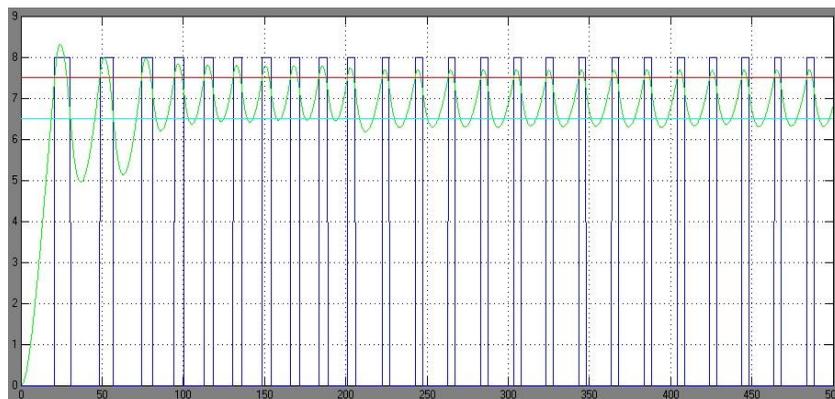


Рисунок 3 – Результаты моделирования процесса регулирования температуры в холодильной камере

Разработанный нечёткий адаптивный позиционный способ управления температурой в холодильнике «АТЛАНТ» позволит улучшить качество регулирования и, что более важно, снизить экономические затраты на энергопотребление по сравнению с обычным двухпозиционным с зоной неоднозначности способом регулирования.

Исследования выполнены при финансовой поддержке ФЦП «Разработка роботизированного комплекса для реализации полномасштабных аддитивных технологий инновационных материалов, композитов, конструкций и сооружений», соглашение № 14.577.21.0193 от 27.10.2015.

Список литературы:

1. Пат. 2514127 Российская Федерация, МПК G05B 19/00 (2006.01). Нечеткий адаптивный позиционный способ автоматического управления объектами с дискретными исполнительными устройствами / Магергут В. З., Жук С. А.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «БГТУ им. В. Г. Шухова». № 2013121183/08; заявл. 07.05.2013 ; опубл. 27.04.2014, бюл. № 12. 9 с.
2. Асаи К., Ватада Д., Иван С. и др. Прикладные нечеткие системы : пер. с япон. ; под ред. Т. Тэрано, К. Асаи, М. Сугэно. М.: Мир, 1993. 368 с.
3. Магергут В.З., Вент Д.П., Кацер И.А. Выбор промышленных регуляторов и расчёт их оптимальных настроек : монография. Белгород: Изд-во БГТУ, 2009. 239 с.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПСЕВДОЛИНЕЙНЫХ КОРРЕКТИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ В СИСТЕМЕ MATLAB

**Рыбин И. А.,
Рубанов В. Г., д-р техн. наук, проф.**
*Белгородский государственный технологический
университет им. В. Г. Шухова*

Параметрический синтез корректирующих устройств систем управления позволяет получить желаемое поведение регулируемой величины с точки зрения выбранного критерия оптимизации. В настоящее время имеется большое разнообразие методов оптимизации и программного обеспечения, реализующего эти методы. В дальнейшем исследовании использовалось приложение «Optimization» пакета прикладных программ Matlab (рис. 1).

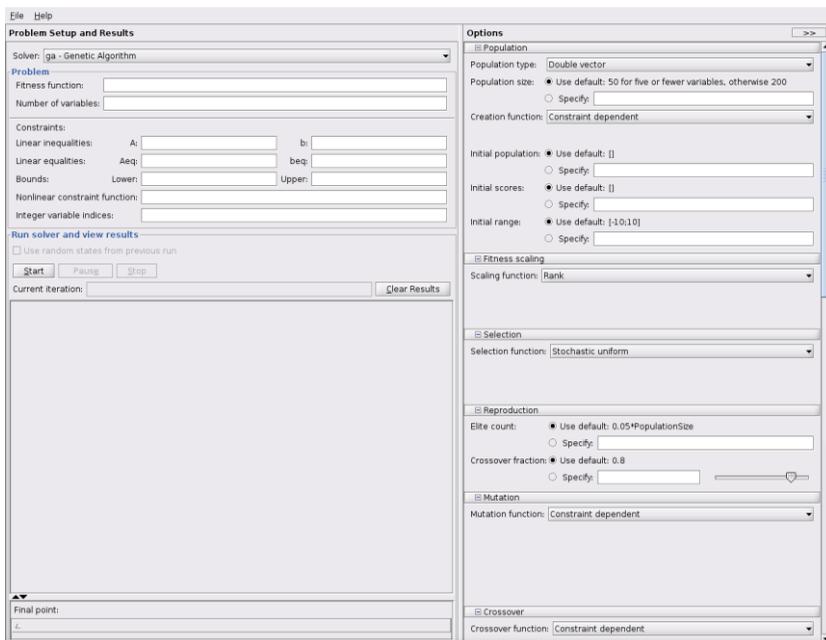


Рисунок 1 – Окно настроек параметров программы «Optimization» пакета Matlab

Целью исследования являлось нахождение параметров псевдолинейных корректирующих устройств системы управления боковым отклонением робота от заданной трассы. Вывод математической модели бокового движения робота, управляемого за счет разности скоростей вращения ведущих колес, приведен в [1], а компьютерная модель, разработанная в приложении Simulink пакета Matlab, представлена на рис. 2.

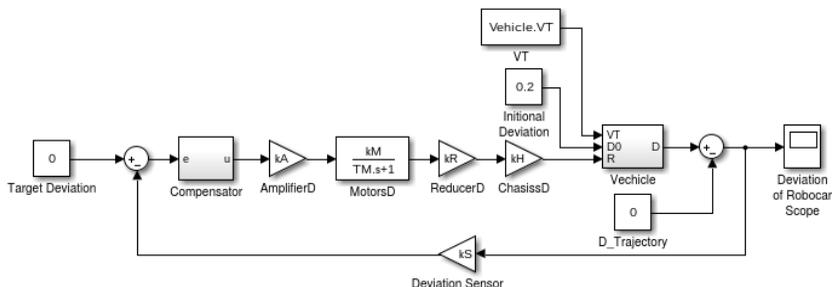


Рисунок 2 – Модель бокового движения мобильного робота в Simulink

Оценивать качество процесса управления можно на основании различных показателей, таких как, перерегулирование, время переходного процесса, статическая ошибка. И если последний из перечисленных показателей для рассматриваемой системы равен нулю, что является следствием наличия интегрирования при преобразовании разности скоростей ведущих колес в боковое отклонение, то первые два необходимо минимизировать. Таким образом, рассматривается задача многокритериальной оптимизации, где частными критериями являются минимум перерегулирования σ и минимум времени T_p переходного процесса.

Имеются различные способы сведения многокритериальной задачи оптимизации к однокритериальной задаче, среди которых был выбран максиминный критерий, суть которого изложена, например, в [2]. Целевая функция F была задана в виде:

$$F(\mathbf{X}) = \min_{j=1,2} S_j(\mathbf{X}),$$

где \mathbf{X} – вектор входных параметров (параметры корректирующего устройства); S_j – нормированный j -й ($j=1,2$) показатель качества. Нормированные показатели качества определяются по формулам:

$$S_1(\mathbf{X}) = \frac{\sigma_{\max} - \sigma}{\sigma_{\max}},$$

$$S_2(\mathbf{X}) = \frac{T_{p\max} - T_p}{T_{p\max}},$$

где σ_{\max} и $T_{p\max}$ – ограничения на максимально допустимое перерегулирование и время регулирования системы соответственно. В данной работе было положено, что после введения корректирующего устройства, показатели качества переходного процесса не должны ухудшиться, поэтому в качестве σ_{\max} и $T_{p\max}$ использованы перерегулирование и время регулирования до коррекции. Согласно максимумному критерию, целевую функцию F необходимо максимизировать, т. е. ставится задача нахождения

$$\max_{\mathbf{X} \in D_X} F(\mathbf{X}).$$

Для повышения качества переходного процесса системы управления боковым движением мобильного робота использованы псевдолинейные элементы с ослаблением амплитуды (рис. 3) и с фазовым опережением (рис. 4).

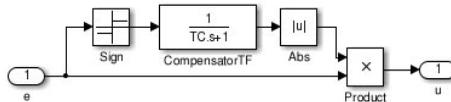


Рисунок 3 – Модель псевдолинейного корректирующего элемента с ослаблением амплитуды

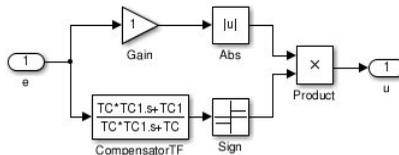


Рисунок 4 – Модель псевдолинейного корректирующего элемента с фазовым опережением

Для первого приведенного элемента входным параметром при оптимизации является значение TC , для второго – значения TC и $TC1$. Результаты оптимизации по методу генетических алгоритмов с настройками по умолчанию приложения «Optimization» приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Результаты оптимизации

Корректирующий элемент	Полученные параметры элемента	Показатели качества переходного процесса		Значение целевой функции
		$\sigma, \%$	$T_p, \text{с}$	
Без коррекции	—	67,648	7,350	0
Псевдолинейный с ослаблением амплитуды	$TC = 0,001942$	61,140	4,580	0,1011
Псевдолинейный с фазовым опережением	$TC = 0,402270$ $TCI = 0,057769$	19,026	2,670	0,6752

В ходе исследования выявлены следующие особенности, которые необходимо учитывать при оптимизации. Во-первых, необходимость задания ограничений на входные параметры, поскольку не во всех случаях возможно нахождения значения целевой функции ввиду получающегося неустойчивого движения системы. Во-вторых, большое время поиска оптимального решения, связанное с необходимостью моделирования переходного процесса системы для нахождения показателей качества управления на каждом шаге поиска. Тем не менее, использование имеющихся в системе Matlab методов оптимизации является универсальным способом нахождения параметров устройств управления.

Исследования выполнены при финансовой поддержке ФЦП «Разработка роботизированного комплекса для реализации полномасштабных аддитивных технологий инновационных материалов, композитов, конструкций и сооружений», соглашение № 14.577.21.0193 от 27.10.2015.

Список литературы:

1. Рубанов В. Г., Кижук А. С. Мобильные микропроцессорные системы автоматизации транспортно-складских операций. Мобильные робототехнические системы : монография. Белгород: Изд-во БГТУ им. В. Г. Шухова, 2011. 288 с.
2. Норенков И. П. Основы автоматизированного проектирования : учеб. для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. 336 с.

ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НА ПРИМЕРЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОТХОДЯЩИХ ГАЗОВ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ЦЕМЕНТНОЙ ПЕЧИ

**Степовой А.А., аспирант,
Бажанов А.Г., канд. техн. наук, доц.,
Рубанов В.Г., д-р техн. наук, проф.**
*Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова*

Вращающаяся печь для обжига цементного клинкера является основным и самым энергозатратным агрегатом в производстве цемента. Производительность таких печей и удельный расход топлива зависят не только от технологических и конструктивных характеристик, но и от режима работы, поддержание которого оказывает решающее влияние на получение продукции заданного качества, с предельно минимальным расходом энергетических ресурсов. Так как человеку сложно длительное время быть сконцентрированным на процессе из-за различных факторов, он может принимать ошибочные решения. Возникает задача построения советующей системы управления обученной с участием инженеров по обжигу и операторов, управляющих вращающейся печью. Одним из подходов к решению данной задачи является создание советующей системы.

Для определения оптимального времени и длительности управляющего воздействия дополним разрабатываемую систему алгоритмом прогнозирования значений ключевых переменных процесса. Прогнозирование временных рядов предполагает, что данные, полученные в прошлом, помогают объяснить значения в будущем. Для создания алгоритма прогнозирования был выбран аппарат нейронных сетей.

В данной статье речь пойдет о построении искусственной нейронной сети (ИНС) для прогнозирования значений температуры отходящих газов – $T_{ог}$ на основе её предыдущих значений. Разрабатываемую модель также можно применить в алгоритме сглаживания, описанном в [1].

Для получения прогноза на несколько шагов воспользуемся итеративным подходом. В этом случае прогноз строится поэтапно с

применением одной и той же нейронной сети: на следующем шаге прогноз используется как реальные исторические данные.

В общем случае нейронные сети могут представлять собой модели двух типов [2]: регрессионные и классификационные. Регрессионной называется модель, на выходе которой мы ожидаем получить конкретное число, рассматриваемое как решение задачи. Классификационная модель связана с получением от сети информации об отнесении объекта, описываемого входными данными, к одному из нескольких известных классов. Перед нами стоит задача получения модели первого типа. А именно, осуществить прогноз на n отсчетов времени вперед (1 отсчет – 1 минута), используя τ предыдущих значений. Для создания модели выберем горизонт прогноза n , равный 120 отсчетам. Чтобы обеспечить наилучшую точность модели, значение τ экспериментальным путем подобрано равным 160.

С целью получения математической модели статистические данные были сняты на предприятии ЗАО «Осколцемент» (г. Старый Оскол) за период 3 месяца. Объем выборки составил 40 000 точек.

Прежде чем начинать обучение нейронной сети необходимо провести обработку данных для ее обучения и тестирования (отсевание некорректных обучающих образцов, фильтрация, сглаживание временных рядов и т.д.), поскольку от этого во многом зависит скорость и качество ее обучения. Первое, что нужно учесть, это выбросы в данных. Редкие, но сильные события могут внести ложные зависимости. Исключим из имеющегося набора данных те значения, которые лежат вне интервала, заданного средним значением ± 3 стандартных отклонения (правило трех сигм). Далее для борьбы с импульсными шумами воспользуемся медианной фильтрацией. Для того чтобы выявить общую тенденцию изменения значений технологической величины в течение анализируемого интервала времени применим экспоненциальное сглаживание.

Следующим шагом является нормирование и центрирование данных, так как для многослойных персептронов и многих других моделей значения входных данных должны лежать в пределах $[-1;1]$. При известном диапазоне изменения входной переменной, например, $[x_{\min}, x_{\max}]$, целесообразно использовать простейший вид преобразования, выполняемый по формуле [3]:

$$p = \frac{(x - x_{\min})(b - a)}{(x_{\max} - x_{\min})} + a,$$

где $[a, b]$ – диапазон приемлемых входных сигналов; $[x_{\min}, x_{\max}]$ – диапазон изменения значений входной переменной x ; p – преобразованный входной сигнал, подаваемый на вход ИНС.

После всех вышеперечисленных действий выделим из имеющихся данных выборку из 10 000 (25%) последних значений (так называемое подтверждающее множество) для окончательной проверки работы нейронной сети, так как проверка качества обучения нейросети необходимо проводить на примерах, которые не участвовали в ее обучении.

Нейронные сети обучаются быстрее всего на наиболее непредсказуемых примерах из обучающей выборки [4], то есть на каждой итерации лучше всего выбирать наименее знакомый системе пример. Поэтому оставшиеся 30000 значений, которые будут использоваться для обучения и тестирования ИНС, необходимо перемешать, то есть поменять порядок следования векторов произвольным образом.

Выделяют два класса наиболее часто применяемых структур нейронных сетей. Это ИНС без обратных связей, так называемые “сети с однонаправленным распространением сигнала” (feedforward) и ИНС, в которых имеется обратная связь (рекуррентные нейронные сети). Отсутствие обратной связи гарантирует безусловную устойчивость сетей, в то же время введение обратных связей наряду с увеличением возможностей сети поднимает вопрос о динамической устойчивости сети. Для решаемой регрессионной задачи достаточно возможностей сети прямого распространения.

Наиболее популярной нейроархитектурой является многослойная сеть прямого распространения. Она состоит из нескольких слоев [5]: входного слоя, одного или нескольких скрытых слоев и выходного слоя, которые связаны между собой прямыми однонаправленными связями. Каждый из слоев, в свою очередь, состоит из искусственных нейронов, при этом выходы нейронов предыдущего слоя являются входами для нейронов последующего слоя.

После того как мы определились с общей структурой нашей сети, необходимо выбрать следующие параметры: количество входных и выходных нейронов, скрытых слоев, нейронов в скрытых слоях, а также вид функций активации нейронов. Количество входных нейронов сети должно совпадать с количеством входных параметров, число которых, в данном случае, равно 160. Количество нейронов выходного слоя должно совпадать с количеством выходных параметров (в нашем случае

1). Четких критериев выбора количества скрытых слоев до сих пор нет, но считается, что конфигурация с количеством скрытых слоев, превышающих 2, вряд ли оправдана, а в большинстве приложений НС с одним скрытым слоем оказывается вполне достаточной.

После того, как число скрытых слоев определено, необходимо определить число нейронов в них. С одной стороны, слишком малое количество скрытых нейронов приводит к недостаточной способности сети к обобщению. В то же время слишком большое количество нейронов может привести к так называемому «переобучению» сети, когда она выдает хорошие результаты на примерах, входящих в обучающую выборку, но практически не работает на других примерах.

Экспериментальным путем было установлено, что нейронная сеть с одним скрытым слоем и 160 нейронами в нем показывает наилучшие результаты при решении поставленной задачи. После выбора структуры сети и ее параметров необходимо произвести обучение сети. В качестве алгоритма обучения был выбран алгоритм Флетчера – Ривса. Количество эпох обучения было подобрано экспериментальным путем в количестве 60. После получения значений с выхода НС необходимо произвести действия, обратные нормировке.

Результат тестирования обобщающей способности нейронной сети на новых для нее данных (на подтверждающем множестве) в виде среднего абсолютного отклонения (MAD) в зависимости от глубины прогноза приведен на рис. 1.

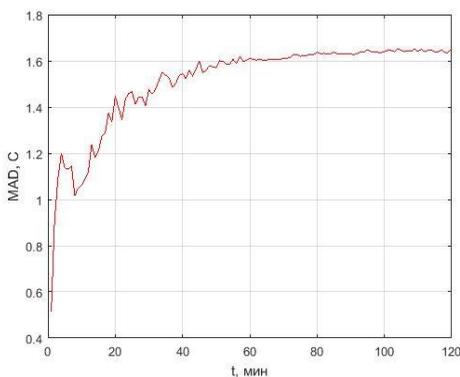


Рисунок 1 – Среднее абсолютное отклонение (MAD)

Пример прогноза $T_{ог}$ с помощью построенной модели приведен на рис. 2.

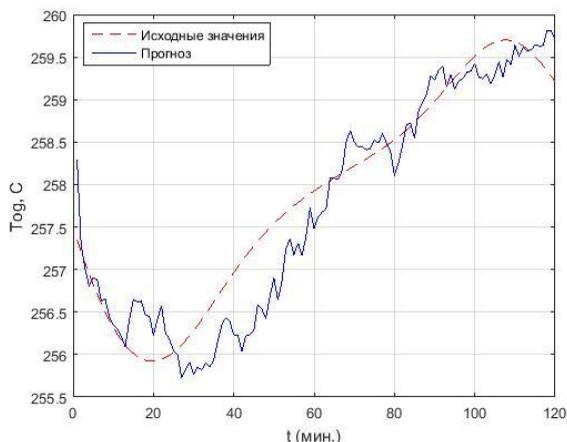


Рисунок 2 – Пример прогноза

Проведенные эксперименты показывают, что нейронные сети могут быть успешно использованы для прогнозирования временных рядов.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Белгородской области в рамках проекта №14-41-08016 «р_офи_м» и в рамках выполнения проекта ПСР №А -5/15.

Список литературы:

1. Степовой А.А., Магергут В.З. Сглаживание и прогнозирование входных данных для советующей системы управления вращающейся цементной печью//Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2015. №6. С. 222 – 226.
2. Галушкин А.И. Нейронные сети: основы теории. М.: Горячая линия – Телеком. 2015. 496 с.
3. Комарцова Л.Г., Максимов А.В. Нейрокомпьютеры: Учеб. пособие для вузов. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2004. 400 с.
4. LeCun, Y. Scaling learning algorithms towards AI / Y. LeCun, Y. Bengio – MIT Press. 2007. С 1 – 41.
5. Лю Б. Теория и практика неопределенного программирования / Б. Лю; Пер. с англ. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний. 2005. 416 с.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИЛОВОЙ ЦЕПИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ РАЗМЕРНОЙ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Ямковая М.А., канд. техн. наук, доц.
*Донбасский государственный технический
университет*
Шадрин С.В.
*Государственное унитарное предприятие
«Лугансквода»*

Предложена математическая модель силовой цепи электротехнического комплекса для электрохимической обработки с учетом его электрических, гидравлических и геометрических параметров.

Ключевые слова: электрохимическая обработка, электротехнический комплекс, межэлектродный промежуток, нелинейное сопротивление, электролит.

Постановка проблемы и ее связь с научными и техническими задачами.

В настоящее время в промышленности и бытовой технике среди электрических двигателей наибольшее распространение получили асинхронные с короткозамкнутым ротором. Это связано прежде всего с их дешевизной (по сравнению с другими электродвигателями), простотой и надежностью. Однако сейчас у нас цены на алюминий установлены на уровне мировых, что приводит к удорожанию двигателей.

В этих условиях становится актуальной задача ремонта асинхронных двигателей. Если раньше, во времена СССР, часто ремонт двигателя стоил больше, чем его изготовления, то сейчас выгоднее восстанавливать ротора. Поскольку практически все предприятия по производству электрических машин были основаны до 1991 года, в них отсутствуют цеха для восстановления роторов, что приводит к убыткам, поскольку дефектные двигатели приходится выбрасывать.

Обрыв стержней в роторе - дефект, который встречается очень часто. Эксплуатация двигателя даже при одном-двух оборванных стержнях приводит к дальнейшему выходу из строя других стержней и отказе двигателя в работе.

Короткозамкнутая обмотка ротора представляет собой залитые в пазы из электротехнической стали (покрытые специальной пленкой) алюминиевые стержни сложной конфигурации. Эти стержни соединены между собой кольцами из того же алюминия, вылитыми вместе с ними за один цикл литья.

После того, как продиагностирован обрыв конкретного стержня в роторе, возникает задача по его удалению. Теоретически удаления стержней возможно несколькими способами: выплавлением алюминия из пазов при нагревании до температуры 700°C ; химическим травлением щелочным раствором, высверливанием и фрезерованием паза.

К сожалению, оказалось, что все эти способы нельзя применить на практике. Поэтому в нашем университете было предложено для решения этой задачи использовать размерную электрохимическую обработку (РЭО) [1]. Сущность метода заключается в получении на месте стержня отверстия, которое повторяет по форме и размерам сам паз.

Размерная электрохимическая обработка используется для электропроводных материалов. К ее преимуществам относятся возможность получения длинных и узких отверстий сложной конфигурации, высокий класс точности, отсутствие остаточных напряжений и т.д.

Но при всех достоинствах электрохимическая обработка имеет некоторые недостатки, и повышенное энергопотребление – наиболее существенный из них. Поэтому в задачи оптимизации систем управления РЭО входит не только повышение точности обработки, но и снижение энергозатрат. Для этого необходимо разработать адекватную модель силовой цепи электротехнического комплекса [2].

Для синтеза энергосберегающей системы управления процессом электрохимической обработки надо получить математическое описание объекта управления, в качестве которого выступает межэлектродный промежуток.

Анализ исследований и публикаций.

Существующие математические модели межэлектродного промежутка получены при довольно сильных допущениях и не учитывают влияние некоторых существенных факторов.

Очень важным параметром процесса РЭО является плотность тока. Очевидно, что для повышения производительности процесса электрохимической обработки желательно поддерживать плотность

рабочего тока на предельном уровне. Интуитивно понятно, что пороговое значение плотности тока должно зависеть от электрических параметров (напряженности электрического поля), параметров электролита (его вязкости и расходы, а также начальной концентрации электролита) и геометрических параметров (размеров катод-инструмента и межэлектродного промежутка). Но, к сожалению, в существующей литературе отсутствуют количественные зависимости между этими величинами.

К тому же в существующих моделях силовой цепи делается, на наш взгляд, весьма сильное предположение о постоянстве электропроводности электролита и его сопротивления независимо от скорости электролита и рабочего тока; не учитывается режим течения электролита и т.д. [3].

Постановка задачи.

Для проектирования системы управления комплексом для электрохимической обработки металлов, обеспечивающей высокую производительность, точность и низкое энергопотребление, необходимо иметь математическую модель объекта управления, то есть силовой цепи комплекса.

Основные результаты исследований.

К силовой цепи электротехнического комплекса для электрохимической обработки относятся источник питания, соединительные провода, трансформатор, столбик электролита в катод-инструменте, межэлектродный промежуток и анод.

Блок питания будем считать безинерционным. Тогда его передаточная функция определяется как сопротивление источника питания:

$$W_{ин} = (0.2 - 0.3) U_{кл} / I_{ном}, \quad (1)$$

где $U_{кл}$ – классификационная напряжение, $I_{ном}$ – номинальный рабочий ток источника питания.

Трансформатор является форсирующим звеном

$$W_{мп} = R_{мп} \left(\frac{L_{мп}}{R_{мп}} p + I \right) \quad (2)$$

где $R_{мп}$ и $L_{мп}$ – полное активное сопротивление трансформатора, приведенное к его первичной обмотке, и его индуктивность соответственно.

$$R_{мп} = R_1 + R_2 (w_1 / w_2); \quad L_{мп} = X_{мп} / (2\pi f),$$

где R_1 и R_2 – активное сопротивление первичной и вторичной обмотки соответственно; w_1 и w_2 – число витков этих обмоток; X_{np} – индуктивное сопротивление трансформатора; f – частота сети.

Соединительные провода, строго говоря, описываются как форсирующе-колебательное звено, т.к. они обладают активным сопротивлением, индуктивностью между двумя проводами [4] и емкостью:

$$W_{np} = \frac{R_{np} \left(\frac{L_{np}}{R_{np}} p + I \right)}{p^2 C_{np} L_{np} + p C_{np} R_{np} + I},$$

где L_{np} – индуктивность двухпроводной линии, C_{np} – емкость между двумя проводниками:

$$L_{np} = \frac{\mu_0 I}{\pi} \left[\ln \left(\frac{D}{R} \right) + \frac{\mu}{4} \right], \quad C_{np} = \frac{\pi \varepsilon \varepsilon_0 l}{\ln \left(\frac{D}{R} \right)},$$

где I – сила тока, D – расстояние между проводниками, R – радиус проводов, μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, ε – диэлектрическая проницаемость.

Столбик электролита в катод-инструменте имеет активное сопротивление и емкость [4], и представляет собой инерционное звено с передаточной функцией

$$W_{cm} = \frac{R_{cm}}{p C_{cm} R_{cm} + I} \quad (4)$$

причем сопротивление столбика электролита в катод-инструменте, как показано в [4],

$$R_{cm} = \frac{I}{\chi^2 4 K' / K},$$

где χ – электропроводность электролита, зависящая от рабочего тока, K' и K – связанные эллиптические интегралы первого рода, аргумент которых

$$k = \frac{1 - \frac{R^2}{D^2}}{1 + \frac{R^2}{D^2}}.$$

где R – внутренний радиус катод-инструмента, D – внешний радиус катод-инструмента.

Для определения емкости электролита в катод-инструменте есть выражение, приведенное в [4]:

$$C_{cm} = \frac{2\pi h \epsilon \epsilon_0}{\text{Arsh}\left(\frac{h}{R}\right) - \sqrt{\frac{R^2}{h^2} + 1} + \frac{R}{h}}.$$

В то время как структурные схемы трансформатора и источника питания известны, схема замещения межэлектродного промежутка требует изучения и улучшения. В существующей литературе приведены упрощенные схемы, которые не учитывают целый ряд весьма существенных факторов, одним из главных является течение электролита в между электродном промежутке [5].

Наиболее существенным недостатком всех известных нам математических моделей, является, на наш взгляд, весьма сильное предположение, что электропроводность электролита и предельный ток считают постоянными независимо от скорости электролита и величины рабочего тока.

Для более точного определения зависимости предельного тока от гидравлических, геометрических и электрических параметров в [2] предложен следующий подход: сначала нужно найти поле скоростей электролита в между электродном промежутке из решения уравнения Навье-Стокса, затем с использованием найденного распределения скорости решить уравнение диффузии для получения поля концентрации электролита согласно с

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \vec{v} \text{grad} C = D \nabla^2 C,$$

где C – концентрация электролита, v – скорость электролита, D – коэффициент диффузии, t – время.

Далее определена предельная плотность тока, текущего в межэлектродном промежутке, согласно выражению

$$j_{пред} = D \text{grad} C + \frac{DmF\vec{E}}{RT} C,$$

где m – валентность ионов электролита, R – газовая постоянная, T – температура электролита по Кельвину, F – постоянная Фарадея, \vec{E} – напряженность электрического поля в межэлектродном промежутке.

По найденным значениям плотности тока при заданной концентрации электролита и напряженности электрического поля определяются составляющие полного эффективного сопротивления межэлектродного промежутка:

$$Z_0 = \frac{RT}{F^2 D_1 D_2 m_1 m_2}; \quad (7)$$

$$Z_1 = \frac{RT(m_1 + m_2)}{F m_1 m_2 (i_{пред} - i)}; \quad (8)$$

$$Z_2 = \frac{2RT}{Fi}, \quad (9)$$

где $i_{пред}$ – предельный ток, i – рабочий ток.

Для определения предельного рабочего тока использовано точное решение уравнения Навье-Стокса для осесимметричного течения вблизи критической точки [6]. В результате для осевой и радиальной скорости электролита получены следующие выражения:

$$w = 2 \left(\frac{Q}{2\pi r_k^2 d} \right)^{\frac{b+1}{2}} \gamma^{\frac{b-1}{2}} g z^b e^{\int \sqrt{\frac{Q}{2\pi r_k^2 d}} dz}; \quad v = \frac{Q}{2\pi r_k^2 d} r \left(1 - e^{-\sqrt{\frac{Q}{\pi r_k d T}} z} \right) \quad (10)$$

где $T=0.7$, Q – расход электролита, r_k – радиус катод-инструмента, d – межэлектродный промежуток, $a = \frac{Q}{2\pi r_k d}$, $g = 0.2358$, $b = 1.807$, $G = 0.0466$.

Выражение для осевой скорости электролита используется для определения распределения его концентрации, а по величине радиальной скорости проверяется предположение о том, что диффузионный пограничный слой достаточно мал по сравнению с поверхностью анода.

Распределение концентрации электролита определяется решением уравнения диффузии (5).

Запишем выражение для предельной плотности тока, учитывая распределение концентрации электролита, согласно (6):

$$j_{np\partial} = Da_1 e^{\frac{1}{D} \int_0^{\infty} w(z) dz} + \frac{DmF\bar{E}}{RT} a_1 e^{\frac{1}{D} \int_0^{\infty} w(z) dz} z ,$$

в этом выражении $w(z)$ определяется по выражению (8).

В нашем случае предельный ток в неподвижном электролите равен 0.44 А, а для подвижного электролита предельный ток равен 10.58 А (на практике ток был равен 9-10 А).

По найденным значениям предельного тока найдем полное эффективное сопротивление межэлектродного промежутка, состоящий из омического сопротивления (7), диффузионного (8) и миграционного (9) сопротивлений.

Приведем зависимость полного сопротивления межэлектродного промежутка от рабочего тока (рис.1) (характеристика рассчитана в относительных единицах). Как видно характеристика полного сопротивления имеет U-образный вид, что объясняется преобладанием на различных стадиях электрохимической реакции диффузионного или миграционного перенапряжения и сопротивления соответственно. Наличие падающего участка на характеристике может привести к возникновению неустойчивости процесса обработки, то есть к колебаниям тока. Это объясняется частое возникновение режима короткого замыкания на практике.

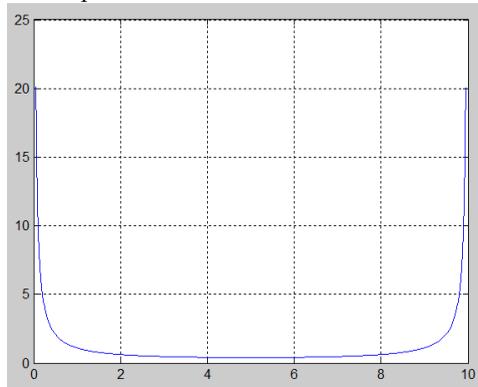


Рисунок 1 – Зависимость полного сопротивления межэлектродного промежутка от рабочего тока в относительных единицах

Удельная емкость межэлектродного зазора составляет 16-20 мкФ/см².

Его эквивалентная индуктивность определяется в зависимости от типа источника питания по времени установления нестационарного электрохимического процесса. Впервые вопрос нестационарных явлений в гетерогенных процессах было подробно изучено А.Н. Соколовым, затем В.Г. Левичем [5]. При этом использовано допущение о постоянстве во времени скорости течения электролита. Будем считать, что переходный процесс заканчивается за 3 постоянных времени, тогда

при питании от источника напряжения $T_u = \frac{I}{3} \sqrt{\frac{\gamma}{\pi D v^3}}$, а при питании

от источника тока $T_u = \left(\frac{nF}{2j}\right)^2 \pi D C_0$.

Индуктивность $L_{заз}$ определяется как постоянная времени, разделенная на $R_{заз}$. Надо помнить, что полное активное сопротивление межэлектродного промежутка является суммой омического, диффузионного и миграционного сопротивлений (7-9).

Таким образом, межэлектродный промежуток является форсирующе-колебательным звеном с передаточной функцией

$$W_{заз} = \frac{R_{заз} \left(\frac{L_{заз}}{R_{заз}} p + 1 \right)}{p^2 C_{заз} L_{заз} + p C_{заз} R_{заз} + 1} \quad (11)$$

Наличие в передаточной функции межэлектродного промежутка форсирующего звена придает ему определенные упреждающие свойства, т.к. в систему вводится кроме самой величины и ее производная, то есть тенденция к ее изменению. Это подтверждает адекватность математической модели межэлектродного промежутка, который, как известно из практики [3], имеет свойство саморегулируемости.

Получим передаточную функцию анода. В нашем случае он представляет собой ротор асинхронного короткозамкнутого двигателя, каждый стержень которого активное сопротивление и индуктивность. Поскольку переходное сопротивление на границе стержень-пакет значительно больше сопротивления стержня, можно считать, что рабочий ток течет только по обрабатываемом стержню.

Индуктивность проводника, который лежит в открытом пазу с параллельными стенками и окружен стальным массивом с бесконечно большой магнитной проницаемостью, определяется по формуле Рота [7]:

$$L_a = -\frac{2ab}{\pi^2 cdI} \sum_h \sum_k \frac{B_{h,k}}{(h-1)(2k-1)} \left\{ \left(\sin(h-1) \frac{\pi a_1'}{a} - \sin(h-1) \frac{\pi a_1}{a} \right) \right\},$$

где $B_{h,k}$ - коэффициенты двойного ряда Фурье, a и b - геометрические размеры паза.

Активное сопротивление анода R_a определяется по известной формуле.

Значит, анод представляет собой инерционное звено с передаточной функцией

$$W_a = R_a \left(\frac{L_a}{R_a p + I} \right). \quad (12)$$

Согласно приведенным выше зависимостям можно рассчитать параметры структурной схемы силовой цепи электротехнического комплекса для электрохимической обработки. По результатам подсчета, как и следовало ожидать, оказалось, что индуктивностью и емкостью соединительных проводов можно пренебречь, другие же величины обязательно должны быть учтены.

Тогда, после некоторых преобразований, можно получить передаточную функцию силовой цепи электротехнического комплекса в следующем виде:

$$W = \frac{I}{R_E + R_{заз}} \frac{T_{заз} p + I}{\frac{T_{заз} L_E}{R_E + R_{заз}} p^2 + T p + I}, \quad (13)$$

$$\text{где } R_E = R_{ин} + R_{мп} + R_{ан} + R_{нр} + R_{ст}, \quad L_E = L_{мп} + L_{ан},$$

$$T = \frac{T_{заз} R_E + L_E + L_{заз}}{R_E + R_{заз}}, \quad T_{заз} = C_{заз} R_{заз}.$$

Таким образом силовая цепь описывается последовательным соединением нелинейных форсирующего и двух инерционных звеньев, так коэффициент демпфирования всегда (при рабочих значениях тока) больше единицы.

Необходимо учитывать, что постоянными можно считать только активные сопротивления источника питания, проводов и

трансформатора (как и его индуктивность). Сопротивление же электролита, емкость столба электролита и индуктивность межэлектродного промежутка и анода зависят от величины рабочего тока и являются нелинейными. Сопротивление анода меняется при его растворении.

Таким образом, нами впервые получена структурная схема силового цепи электротехнического комплекса для электрохимической обработки, которая учитывает индуктивность и емкость межэлектродного промежутка, параметры столбика электролита в катод-инструменте и их зависимости от рабочего тока, нелинейный характер которых, как несложно показать, может привести при питании комплекса от источника ЭДС к возникновению колебаний тока и прекращению процесса обработки (которое довольно часто и происходит на практике). Предложенная математическая модель позволяет объяснить это явление.

Из передаточной функции силовой цепи (13) можно получить следующее выражение для рабочего тока (числовые коэффициенты получены с учетом постоянных величин)

$$pI = \frac{0.87I^2 + (3.59 - 0.87I_{npед} - U)I + (U - 7.17)I_{npед}}{L(I_{npед} - I)}. \quad (14)$$

Его решение в неявной форме

$$pI = \frac{0.87I^2 + (3.59 - 0.87I_{npед} - U)I + (U - 7.17)I_{npед}}{L(I_{npед} - I)}.$$

На рис. 2 это решение представлено графически.

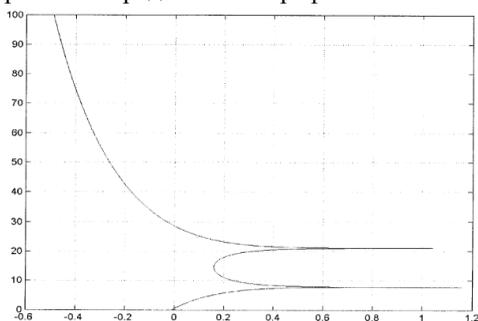


Рисунок 2 – Зависимость рабочего тока от времени

Как видно на рис. 2 при некоторых значениях времени возможны два, три или четыре различных значения тока. На наш взгляд, наличие двух точек бифуркации и неоднозначность значений тока может привести к его колебаниям, причем если ток будет стремиться к значениям большим предельно допустимого (в нашем случае 10 А), возникнет короткое замыкание. Как известно, это явление действительно возникает на практике.

Такая неоднозначность решений возникает из-за нелинейной зависимости сопротивления межэлектродного промежутка от тока. Неучет предыдущими исследованиями этой зависимости и неоднозначности (в известной нам литературе сопротивление электролита в межэлектродном промежутке вообще считается постоянным и независимым от силы тока) не позволял объяснить возникновения режима короткого замыкания и, соответственно, принять меры по его предотвращению.

На рис.3 приведена зависимость тока от времени, полученная в предположении постоянства сопротивления. Как видно, она полностью повторяет нижнюю ветвь характеристики на рис. 2, но не позволяет получить еще две ее ветви и предусмотреть возможность неустойчивости рабочего тока.

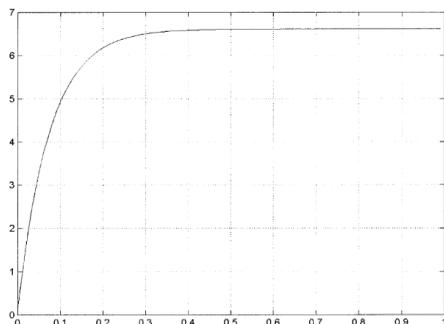


Рисунок 3 – Зависимость рабочего тока от времени при допущении о постоянстве сопротивления

Таким образом, полученную математическую модель силовой цепи электротехнического комплекса для размерной электрохимической обработки можно признать адекватной, поскольку ее использование позволяет правильно теоретически рассчитать значение рабочего тока; теоретически объяснить свойство саморегулируемости межэлектродного промежутка (наличием производной в законе

регулирования); теоретически обосновать возможность возникновения режима короткого замыкания (за счет нелинейной U-образной зависимости полного сопротивления межэлектродного промежутка от рабочего тока, падающая ветвь которой может привести к неустойчивости процесса).

Выводы.

В статье осуществлено теоретическое обобщение и решение актуальной научно-технической задачи создания математической модели силовой цепи электротехнического комплекса для размерной электрохимической обработки.

Суть выполненных исследований заключается в теоретическом объяснении свойства саморегулируемости межэлектродного промежутка и возможности возникновения режима короткого замыкания, а также в теоретическом расчете рабочего тока комплекса в зависимости от его электрических, геометрических и гидравлических параметров.

Наиболее существенные научные и прикладные результаты, выводы и рекомендации заключаются в следующем:

1. Впервые предложены зависимости полного сопротивления межэлектродного промежутка от электрических, гидравлических и геометрических параметров. Установлена U-образную зависимость сопротивления от рабочего тока, что приводит к его неустойчивости, то есть впервые теоретически объяснено частое возникновение режима короткого замыкания при электрохимической обработке.

2. Впервые приведены зависимости для учета нелинейного сопротивления столба электролита в катод-инструменте.

3. Впервые учтены индуктивности межэлектродного промежутка и анода, что позволило создать более точную математическую модель комплекса.

4. Впервые предложена математическая модель силовой цепи электротехнического комплекса для электрохимической обработки металлов и сплавов, которая позволяет

- Правильного теоретически рассчитать значение рабочего тока;
- Теоретически объяснить свойство саморегулируемости межэлектродного промежутка (наличие производной в законе регулирования).

Список литературы:

1. Пат. 77041 Україна, МПК H02K 15/00, H02K 15/08. Спосіб відновлення литих короткозамкнених обмоток роторів / Заблодський М.М., Заблодська Т.П., Шадрін С.В.,; заявник і патентовласник Донбаський державний технічний університет. - № 77041; заявл. 29.06.2004 ; опубл. 16.10.2006, Бюл. № 10.
2. Шадрин С.В., Ямковая М.А. Обоснование и выбор источника питания для комплекса электрохимической обработки металлов //Технічна електродинаміка. 2004. № 5. С. 68-74.
3. Орлов В.Ф. Электрохимическое формообразование. М.: Машиностроение, 1990.
4. Бухгольц Г. Расчет электрических и магнитных полей. М.: Изд-во иностранной литературы, 1961.
5. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика. М.: Изд-во Академии наук СССР, 1952.
6. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974.
7. Бинс К. Анализ и расчет электрических и магнитных полей. М.: Энергия, 1970.