

Краткие сообщения

УДК 621.365.5

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ИНДУКТОРОВ

Л.С. Зимин, А.С. Егиазарян

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Рассматриваются возможности повышения точности расчета мощных индукторов прямоугольной формы, предназначенных для нагрева слябов из алюминиевых сплавов перед прокаткой. В этом случае в связи с внушительными габаритами установки и сложностью системы электроснабжения и электрооборудования цена ошибки может быть очень дорогой. Поэтому целесообразно, не пренебрегая аналитическими и численными методами расчета, применять физическое моделирование. Показываются возможности моделирования индукционных установок промышленной частоты на частоте 2500 Гц, что позволяет резко уменьшить габариты установки с сохранением особенностей электротехнических, энергетических и тепловых процессов. Также в случае физического моделирования естественным образом учитываются температурные зависимости индуктора и нагреваемого сляба.

Ключевые слова: физическое моделирование, геометрическое подобие, коэффициент приведения.

В настоящее время имеется несколько методик расчета прямоугольных индукторов [1–3], использующих в основном представление системы «индуктор – заготовка» в виде воздушного трансформатора. Если для холостого индуктора расчет по указанным методикам дает довольно точные результаты, то расчет загруженного индуктора может привести к весьма значительным ошибкам. Причин здесь в основном две: первая, расчетного характера, заключается в том, что не найдено надежных формул для определения коэффициента взаимной индукции индуктора и загрузки при различных размерах и взаимоположениях. Этот коэффициент определяет коэффициент приведения параметров вторичного контура к первичному, без чего невозможно рассчитать полное сопротивление системы «индуктор – заготовка».

Вторая причина заключается в трудности выбора расчетного удельного электросопротивления загрузки, например, алюминиевых сплавов [4], т. к. характер зависимости их от температуры известен не для всех сплавов. В результате проведенных экспериментов установлено, что величина ρ в процессе нагрева до 450–500 °С изменяется примерно в два раза, но как это отражается на полном сопротивлении системы, можно определить, лишь зная коэффициент приведения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 15-08-03053).

Лев Сергеевич Зимин (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

Александра Сергеевна Егиазарян (к.т.н.), доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

Приведенные доводы позволяют заключить, что аналитический расчет может быть использован лишь в качестве прикидочного. Для точного расчета мощных индукционных нагревательных установок (ИНУ), предназначенных, например, для нагрева слэбов весом до 3–4 т, когда затраты на изготовление весьма велики, необходим более надежный метод расчета. В качестве такого может быть использован метод физического моделирования на основе геометрического подобия, когда

$$(\ell_m/\ell_o)^2 = f_o/f_m, \quad (1)$$

где ℓ_m , ℓ_o , f_m , f_o – соответственно размеры и частота тока модельного и оригинального индукторов.

При моделировании мощных индукторов промышленной частоты использовалась частота 2500 Гц, что позволило проводить эксперименты на модели, имеющей размеры в 7,07 раз меньше, чем оригинальный индуктор.

Результаты экспериментов на индукторе натуральных размеров (табл. 1) показывают вполне достаточную точность моделирования. Сравнение производилось при включении половины длины индуктора по однофазной схеме, т. к. трехфазную нагрузку смоделировать невозможно. При этом, естественно, коэффициент пересчета параметров, приведенных к одному витку, был не 7,07, а 3,53 с некоторыми отклонениями. Так, например, при пересчете полных сопротивлений из-за несоответствия соотношений между длиной и размерами поперечного сечения модели и натуре он будет несколько выше (3,7), а для активного сопротивления витков индуктора – несколько ниже (3,2).

Определяющим параметром при моделировании является коэффициент активной мощности:

$$K = P_n (w/U)^2, \quad (2)$$

где P_n , U , w – полная активная мощность, напряжение и число витков индуктора.

Пересчитав этот коэффициент к натуре, можно, зная необходимую мощность ИНУ (P_n), рассчитать основной проектный параметр – напряжение на виток:

$$(U_n/w_n)^2 = P_n/K. \quad (3)$$

Физическое моделирование дает возможность наиболее точно определить основной параметр проектирования – коэффициент приведения, который определяется по выражению

$$\alpha = (I_3/I_n w_n)^2, \quad (4)$$

где I_3 , I_n – токи в заготовке и индукторе.

Измерить ток в заготовке на модели возможно с помощью пояса Роговского, который продевается в отверстие, просверленное по центру заготовки (слитка). Слиток в данном эксперименте состоял из целой части длиной 275 мм и 10 пластин толщиной по 10 мм каждая.

Минимальная величина α , равная 0,58, была получена при длине слитка 275 мм; при увеличении длины с помощью пластин α возрастает.

Кроме исследования электрических параметров физическая модель может использоваться для моделирования температурных полей. В этом случае необходимо обеспечить постоянство критерия Фурье (Fo). Основной трудностью при моделировании температурных полей является обеспечение подобия тепловых потерь, а также регистрация температуры во времени. При моделировании на частоте 2500 Гц мощных ИНУ, работающих на промышленной частоте, время нагрева для соблюдения подобия должно быть в 50 раз меньше натурального, кото-

рое для промышленных слябов составляет 40–50 мин. Поэтому время моделирования должно составлять порядка одной минуты.

С помощью физического моделирования экспериментально был определен к.п.д. ИНУ, который можно представить как

$$\eta = P_3/P_{II}, \quad (5)$$

где P_3 , P_{II} – соответственно поперечные периметры заготовки и индуктора, причем у индуктора – внутренний, а у заготовки – внешний.

Последнее выражение было проверено при опытно-промышленной эксплуатации натуральных ИНУ (см. табл. 1). Из приведенных данных видно, что производительность нагрева и к.п.д. в основном определяются заполнением индуктора загрузкой (слябом).

Например, как видно из п.п. 6 и 10 табл. 1, практически при одинаковом полном весе загрузки производительность, а соответственно, и к.п.д. в п. 10 значительно выше, т. к. в этом случае гораздо больше общее поперечное сечение загруженных слябов.

Опытно-промышленный нагрев слябов проводился в индукторах, параметры которых показаны в табл. 2.

При измерении мощности многофазных индукторов получается неравномерное распределение ее по секциям. Однако это чисто электрический эффект, т. к. интенсивность нагрева частей сляба, находящихся в разных секциях, одинакова.

Таблица 1

**Влияние заполнения индуктора на производительность
(индуктор 0,42×1,9×1,15 м³)**

| № | Алюминиевый сляб, мм | Вес | т/час | № | Алюминиевый сляб, мм | Вес | т/час |
|---|----------------------|-----|-------|----|---------------------------|------|-------|
| 1 | 280×1070×815 | 598 | 0,25 | 6 | 280×1400×1070 | 1064 | 0,57 |
| 2 | 280×900×1070 | 660 | 0,323 | 7 | (225×830×950)×2 | 866 | 0,585 |
| 3 | 280×1070×1150 | 844 | 0,38 | 8 | (225×830×1070)×2 | 1000 | 0,635 |
| 4 | 280×1070×1100 | 807 | 0,405 | 9 | (280×710×1070)×2 | 1042 | 0,69 |
| 5 | (225×830×650)×2 | 592 | 0,48 | 10 | 280×730×1070+280×900×1070 | 1200 | 0,805 |

Таблица 2

Параметры системы «индуктор – металл»

| № | Сплав | Сляб, мм | z, Ом | z ₁ , Ом | г, Ом | г ₁ , Ом |
|---|-------|---------------|--------|---------------------|---------------|---------------------|
| 1 | А1 | 280×1240×1100 | 0,224 | 0,345 | 0,0243 | 0,0175 |
| 2 | А1 | 280×1540×1100 | 0,197 | 0,345 | 0,0279 | 0,0175 |
| 3 | А1 | 280×1700×1100 | 0,187 | 0,345 | 0,0283 | 0,0175 |
| 4 | АМг6 | 280×1240×1300 | 0,161 | 0,218 | 0,025–0,029 | 0,0126 |
| 5 | АВ | 280×1540×1300 | 0,136 | 0,218 | 0,0266–0,0324 | 0,0126 |
| 6 | А1 | 280×1240×1000 | 0,0266 | 0,043 | | |
| 7 | А1 | 280×1240×400 | 0,028 | 0,043 | | |

В табл. 2 даны полные и активные сопротивления пустого (z_1 , $г_1$) и загруженного индуктора (z , $г$). Экспериментальные значения этих сопротивлений хорошо сходятся с расчетными, где коэффициент приведения получен методом физического моделирования. Параметры индукторов на промышленной частоте имеют хорошую сходимость со своими моделями.

Результаты приведенных исследований показывают, что физическое моделирование повышает эффективность проектирования систем индукционного нагрева металла под деформацию [5].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Егиазарян А.С. Возможные подходы к проектированию индукторов // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2015. – №1 (45). – С. 194–198.
2. Егиазарян А.С., Зимин Л.С. Аналитические исследования при индукционном нагреве // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2009. – № 1 (23). – С. 152–159.
3. Зимин Л.С., Бузановский Я.И., Федотов М.Е. К аналитическому расчету индукторов // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2005. – № 37. – С. 44–47.
4. Зимин Л.С., Бузановский Я.И., Федотов М.Е. Особенности индукционного нагрева алюминиевых сплавов // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2004. – № 24. – С. 159–163.
5. Егиазарян А.С., Зимин Л.С. Повышение эффективности индукционного нагрева металла под деформацию // Индукционный нагрев: научно-технический журнал. – № 22. – СПб.: КОМЛИЗ-ПОЛИГРАФИЯ, 2012. – С. 41–43.

Статья поступила в редакцию 8 июня 2016 г.

RECTANGULAR INDUCTORS DESIGN

L.S. Zimin, A.S. Yeghiazaryan

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

The possibility of improving the accuracy of the calculation of a powerful inductor of rectangular shape, for heating slabs of aluminum alloys before rolling is considered taking into account the installation size and electricity system complexity and equipment. The failure cost may be very high. Therefore, without neglecting the analytical and numerical calculation methods, it is advisable to use the physical modeling. The simulation possibility of induction units of industrial frequency on physical models with a frequency of 2500 Hz is shown. This allows to reduce considerably the dimensions of the unit, without changes the characteristics of energy and thermal processes. Also in the case of physical simulation the temperature dependences parameters of the inductor and the heated slab are naturally taken into the consideration.

Keywords: *physical modeling, geometric similarity, the coefficient of adjustment.*

*Lev S. Zimin (Dr. Sci. (Techn.)), Professor .
Alexandra S. Yeghiazaryan (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.*

УДК 517.958

ЦИФРОВАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ИНДУКЦИОННЫМ НАГРЕВОМ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ СЛИТКОВ

С.А. Колпащиков

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244
E-mail: sKolpaschikov@mail.ru

Осуществлен синтез и исследование замкнутой системы управления по виду желаемого переходного процесса. Объектом управления выступает процесс индукционного нагрева, желаемая характеристика системы – оптимальная по быстродействию.

Ключевые слова: цифровой регулятор, индукционный нагрев, форма переходного процесса.

В качестве объекта управления рассматривается широко изученный [1, 2] процесс индукционного нагрева металлических изделий цилиндрической формы с сосредоточенным управляющим воздействием по мощности внутреннего тепловыделения. Данный процесс в линейном приближении описывается бесконечной системой дифференциальных уравнений для временных мод разложения температурного поля в ряд по собственным функциям радиальной координаты [2].

Известно решение задачи оптимального по быстродействию управления для данного объекта в классе программных управлений [2, 3]. Структура такого решения представляет собой бесконечное число параллельно соединенных типовых апериодических звеньев. На практике моделирование такой системы проводят усеченной структурой с ограниченным числом звеньев. Обоснование количества используемых звеньев также рассмотрено в работах [2, 3].

Объектом исследования выступает математическая модель процесса индукционного нагрева, приведенная в работе [3]. Модель усечена до 11 звеньев. На рис. 1 приведены графики изменения температуры в центре (1) и на поверхности (2) заготовки при оптимальном по быстродействию программном двухинтервальном управлении.

Далее решена задача синтеза замкнутой системы управления, обеспечивающей заданный вид переходной характеристики. В качестве желаемого вида переходной характеристики выбран график изменения температуры на поверхности заготовки при оптимальном по быстродействию программном управлении.

Синтез такого регулятора рассмотрен в работах [4, 5] и заключается в модификации апериодического регулятора [6] путем введения дополнительных фиктивных нулей и полюсов в передаточную функцию объекта управления. В работах [4, 5] предлагается методика расчета дополнительных нулей

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ №№ 14-08-00446, 15-08-04209, 15-08-01347.

Сергей Александрович Колпащиков (к.т.н.), доцент кафедры «Автоматика и управление в технических системах».

и полюсов исходя из вида желаемой переходной характеристики и точности ее отработки.

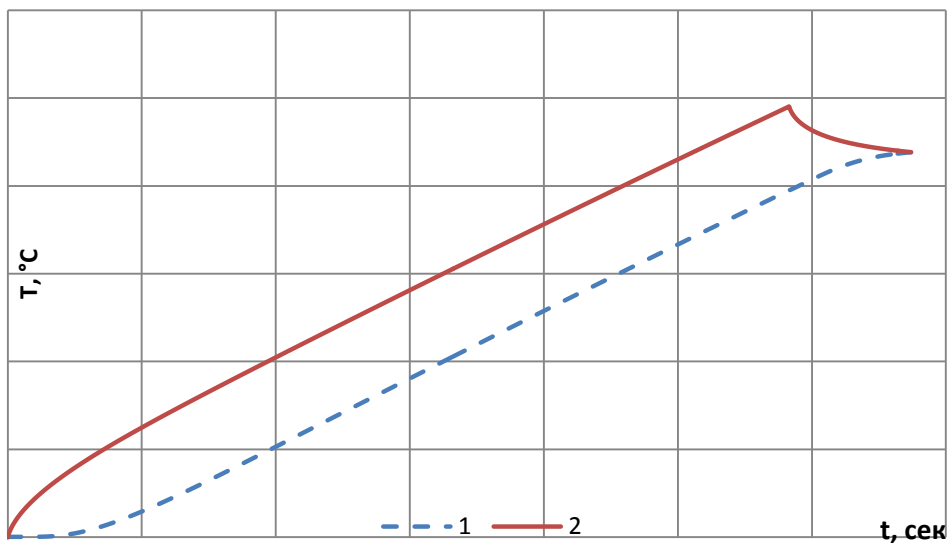


Рис. 1. Графики изменения температуры в центре (1) и на поверхности (2) заготовки при оптимальном по быстродействию программном двухинтервальном управлении

Для синтеза регулятора от непрерывной усеченной модели необходимо перейти к дискретной форме описания объекта управления. Регулятор замкнутой системы рассчитывается согласно формуле

$$G_p(z) = \frac{q_0 A(z) \prod_{i=1}^n (1 - z_i z^{-1})}{1 - q_0 B(z) \prod_{i=1}^n (1 - z_i z^{-1})}, \quad (1)$$

где $\prod_{i=1}^n (1 - z_i z^{-1})$ – корректирующий полином, $B(z)$ и $A(z)$ – полиномы соответственно числителя и знаменателя дискретной передаточной функции объекта управления, q_0 – величина, обратная сумме коэффициентов полинома B .

Корректирующий полином формируется на основе желаемой переходной характеристики системы из соотношения

$$\prod_{i=1}^n (1 - z_i z^{-1}) = \frac{\Delta Y(z)}{q_0 B(z)}, \quad (2)$$

где $\Delta Y(z)$ – первая разность желаемого переходного процесса.

Согласно [4, 5] для достижения требуемой точности отработки желаемой характеристики при делении полиномов в отрицательных степенях необходимо дополнить первую разность желаемого переходного процесса нулями, соответствующими установившемуся процессу. Количество дополнительных нулей определяется экспериментально путем моделирования синтезированной системы.

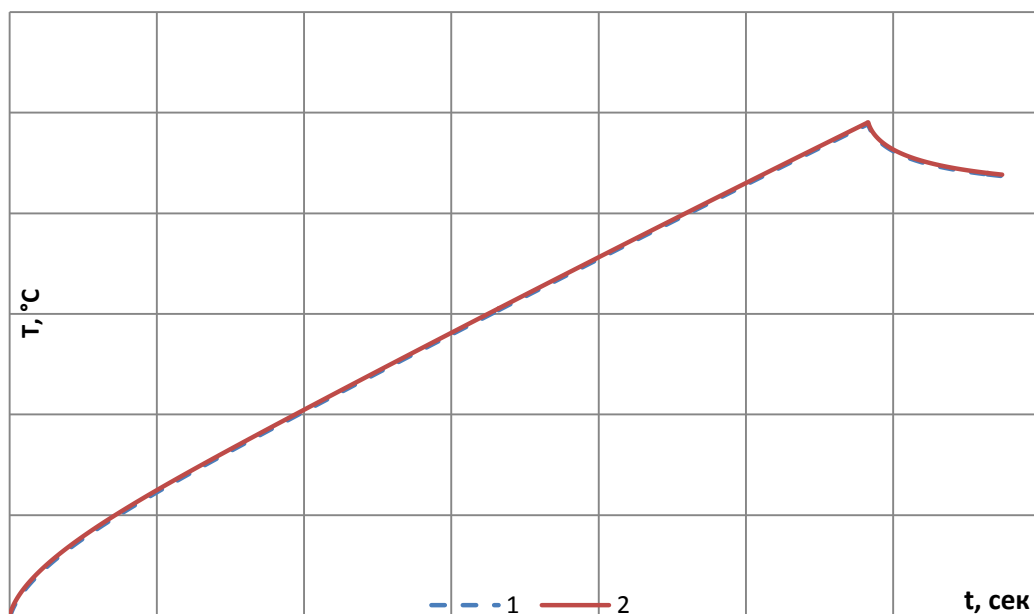


Рис. 2. Графики переходных процессов в синтезированной системе (1) и системе оптимального программного управления (2)



Рис. 3. График изменения управляющего воздействия в синтезированной системе (1) и системе оптимального программного управления (2)

Переходные процессы в синтезированной системе (1) и системе оптимального программного управления (2) представлены на рис. 2 и практически совпадают. На рис. 3 представлены графики изменения управляющего воздействия в синтезированной системе (1) и системе оптимального программного управления

(2). Из приведенных графиков видно, что синтезированная замкнутая система ведет себя аналогично оптимальной по быстродействию системе программного управления.

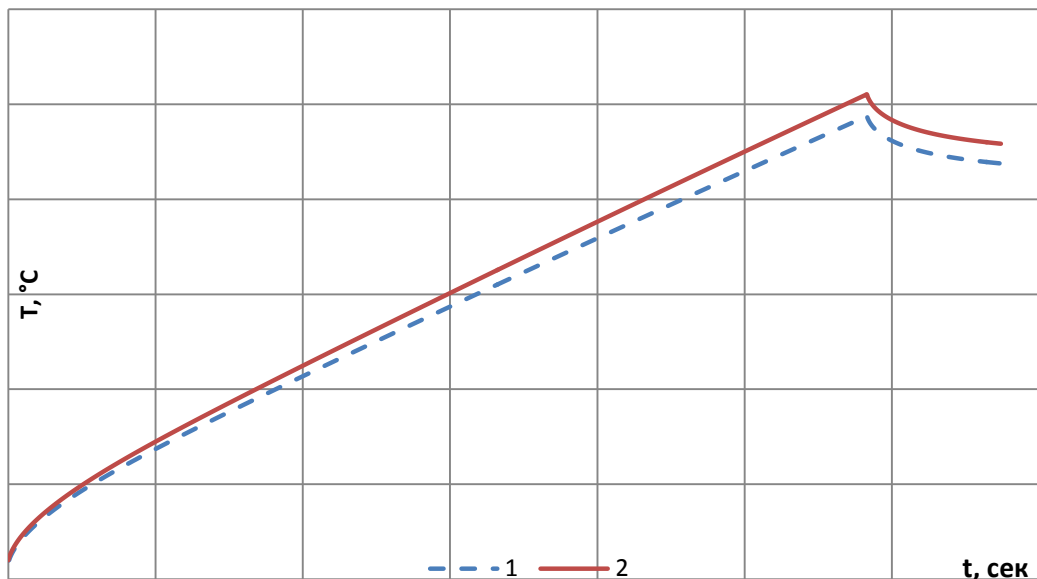


Рис. 4. Графики переходных процессов в синтезированной системе (1) и системе оптимального программного управления (2) при изменении температуры заготовки на $20\text{ }^{\circ}\text{C}$



Рис. 5. График изменения управляющего воздействия в синтезированной системе (1) и системе оптимального программного управления (2) при изменении температуры заготовки на $20\text{ }^{\circ}\text{C}$

Анализ результатов моделирования синтезированной системы при нанесении возмущения начальной температурой заготовки показал, что система отрабатывает возмущающее воздействие, переводя объект управления в заданное состояние, тогда как система программного управления перегревает заготовку на величину возмущения (рис. 4).

Форма управляющего воздействия и время переключения интервалов при этом не изменяются, но меняется величина управляющего воздействия на первом интервале (рис. 5).

Синтезированная замкнутая система может использоваться для управления индукционным нагревом в случае, когда начальная температура заготовки варьируется в определенном диапазоне. Замкнутая система должна быть синтезирована по переходному процессу, оптимальному для нижней границы диапазона допустимых начальных температур заготовки. В этом случае во всем диапазоне возмущений система будет обеспечивать нагрев до заданной температуры за одинаковое время.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рапопорт Э.Я., Плишивцева Ю.Э. Оптимальное управление температурными режимами индукционного нагрева. – М.: Наука, 2012. – 309 с.
2. Рапопорт Э.Я. Оптимальное управление системами с распределенными параметрами – М.: Высшая школа, 2009. – 677 с.
3. Левин И.С. Моделирование оптимальной по быстродействию системы управления процессом индукционного нагрева в условиях интервальной неопределенности характеристик объекта // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2013. – № 3 (39). – С. 167–174.
4. Колпашников С.А. Автоматизация и контроль технологического процесса наложения изоляции кабелей связи с парной структурой: автореф. дис. ... канд. техн. наук / СамГТУ. – Самара: СамГТУ, 2004. – 20 с.
5. Чотковский Б.К. Методы и системы оптимального управления технологическими процессами производства кабелей связи: Монография. – М.: Машиностроение, 2009. – 190 с.
6. Изерман Р. Цифровые системы управления: Пер. с англ. – М.: Мир, 1984.

Статья поступила в редакцию 10 апреля 2016 г.

DIGITAL CONTROL SYSTEM OF INDUCTION HEATING PROCESSES OF CYLINDRICAL BILLETS

S.A. Kolpashchikov

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya str., Samara, 443100, Russian Federation

This paper presents the synthesis of the time-optimal closed loop system to control the process of induction heating based on the shape of transient process. The shape of transient process is obtained from time-optimal program control.

Keywords: digital control, induction heating, shape of transient process.

УДК 544.015

ПРОГРАММА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ БИНАРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДЛЯ УРАВНЕНИЙ СОСТОЯНИЯ

С.Б. Коньгин

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Рассмотрены вопросы модернизации ранее разработанного программного продукта, позволяющего анализировать адекватность моделей, используемых для расчета свойств газовых и жидких сред. В результате модернизации появляется возможность анализа адекватности моделирования фазовых равновесий в газожидкостных системах и поиска оптимальных значений параметров бинарного взаимодействия между компонентами. Данная программа может помочь разработчику технологического процесса выбрать уравнения состояния и определить значения бинарных коэффициентов для каждого конкретного случая. В качестве примера приведены результаты сравнительного анализа результатов моделирования фазового равновесия в системе «метан – пентан» с помощью уравнения Пенга – Робинсона со справочными данными.

Ключевые слова: свойства газов и жидкостей, фазовые равновесия, уравнения состояния.

Проведение расчетов различных процессов и аппаратов нефтегазовой и химической промышленности зачастую связано с использованием различных кубических уравнений состояния вещества [1–5]. Они позволяют проводить расчет фазовых равновесий и определять объемы и составы паровой и жидкой фаз.

Для повышения точности прогнозирования составов фаз в многокомпонентных системах используются параметры бинарного взаимодействия k_{ij} , которые участвуют в усреднении свойств. Так, например, для уравнения Пенга – Робинсона параметры перекрестного взаимодействия $(a\alpha)_{ij}$ определяются по формуле [1]

$$(a\alpha)_{ij} = (1 - k_{ij}) \sqrt{(a\alpha)_i (a\alpha)_j},$$

где $(a\alpha)_i$, $(a\alpha)_j$ – константы уравнения для чистых веществ.

Значения параметров бинарного взаимодействия k_{ij} определяются эмпирическим путем. В настоящее время существует большое количество справочных данных по значениям указанных параметров [1–3].

Однако зачастую специалисту целесообразно иметь в своем распоряжении программный продукт, который бы позволял провести сравнение результатов моделирования фазового равновесия с экспериментальными данными и при необходимости подобрать оптимальные значения k_{ij} , обеспечивающие их наилучшее согласование.

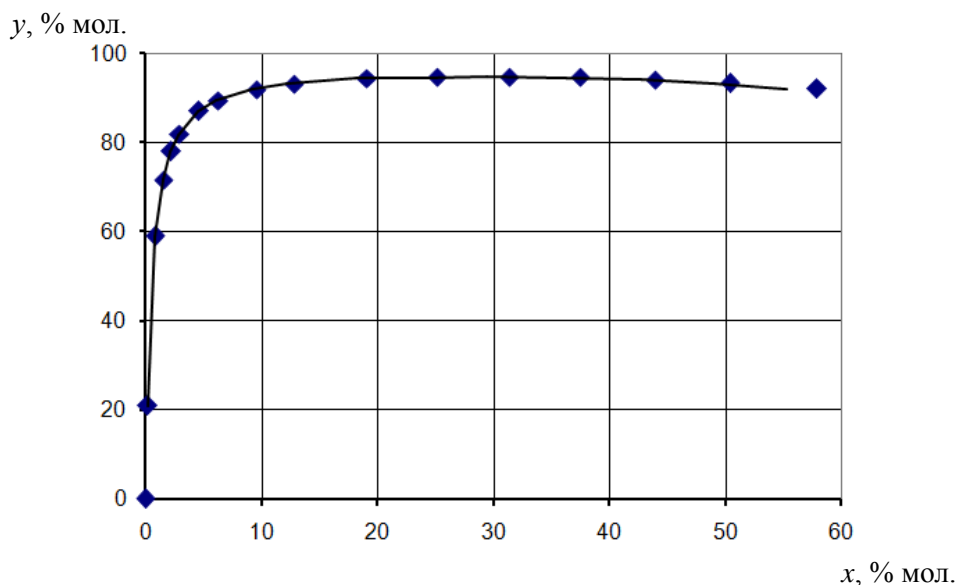
Ранее был описан программный продукт для проверки адекватности расчетных моделей, используемых для прогнозирования свойств газов и жидкостей [6]. В рамках настоящей статьи представлено расширение возможностей указанной

Сергей Борисович Коньгин (д.т.н., доц.), заведующий кафедрой «Машины и оборудование нефтегазовых и химических производств».

программы, позволяющее проводить сравнение теоретических и экспериментальных составов фаз и оптимизировать значения параметров бинарного взаимодействия k_{ij} .

**Сравнение экспериментальных данных [1] и результатов моделирования
для системы «метан – пентан»**

| $x_{Э}$, % МОЛ. | $y_{Э}$, % МОЛ. | $t_{Э}$, °С | $p_{Э}$, АТМ | t_P , °С | x_P , % МОЛ. |
|------------------|------------------|--------------|---------------|------------|----------------|
| 0,15 | 20,9 | 37,8 | 1,36 | 38,0 | 0,15 |
| 0,84 | 58,9 | 37,8 | 2,72 | 38,3 | 0,82 |
| 1,54 | 71,6 | 37,8 | 4,08 | 38,6 | 1,49 |
| 2,20 | 78,0 | 37,8 | 5,44 | 38,9 | 2,15 |
| 2,90 | 81,8 | 37,8 | 6,80 | 39,2 | 2,81 |
| 4,58 | 87,0 | 37,8 | 10,2 | 39,8 | 4,44 |
| 6,26 | 89,4 | 37,8 | 13,6 | 40,8 | 6,03 |
| 9,58 | 91,9 | 37,8 | 20,4 | 41,8 | 9,16 |
| 12,8 | 93,2 | 37,8 | 27,1 | 42,0 | 12,2 |
| 19,1 | 94,3 | 37,8 | 40,8 | 42,8 | 18,2 |
| 25,1 | 94,6 | 37,8 | 54,3 | 43,7 | 23,8 |
| 31,4 | 94,7 | 37,8 | 68,0 | 43,4 | 29,4 |
| 37,5 | 94,6 | 37,8 | 85,0 | 42,2 | 36,2 |
| 43,9 | 94,1 | 37,8 | 102,0 | 41,8 | 42,7 |
| 50,4 | 93,3 | 37,8 | 119,0 | 41,5 | 49,0 |



Фазовая диаграмма парожидкостного равновесия в системе «метан – пентан»
(точки – экспериментальные данные [7], линии – результаты моделирования)

В качестве примера работы программы представлены результаты моделирования с помощью уравнения состояния Пенга – Робинсона газожидкостного равновесия для системы «метан – пентан», экспериментальные данные для которой имеются в справочной литературе [7] (см. таблицу и рисунок).

Моделирование проводилось в следующем порядке:

– для каждой точки в качестве исходных данных задавались состав пара и давление в системе, соответствующие результатам эксперимента [7];

– производилось определение расчетного значения температуры начала конденсации пара;

– для указанных значений температуры и давления определялся состав жидкой фазы.

Результаты сравнения приведены в таблице и на рисунке. Здесь через x и y обозначены мольные доли метана в жидкой и паровой фазах соответственно. Линия соответствует результатам расчетов с помощью уравнения состояния Пенга – Робинсона, точки – экспериментальным данным [7]. Анализируя расхождения между расчетом и экспериментом данных таблицы, пользователь программы может оптимизировать значение параметров бинарного взаимодействия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Уэйлес С. Фазовые равновесия в химической технологии. Т. 1. – М.: Мир, 1987. – 304 с.
2. Гуревич Г.Р., Брусиловский А.И. Справочное пособие по расчету фазового состояния и свойств газоконденсатных смесей. – М.: Недра, 1984. – 264 с.
3. Термодинамика равновесия жидкость – пар / Под ред. А.Г. Морачевского. – Л.: Химия, 1989. – 344 с.
4. Коныгин С.Б., Крючков Д.А. Моделирование и расчет процессов и аппаратов (МиР ПиА). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015613176.
5. Коныгин С.Б. Модификация алгоритма определения доли отгона при расчете газожидкостного равновесия // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2015. – № 4(48). – С. 135–139.
6. Коныгин С.Б. Программа для проверки адекватности расчетных моделей, используемых для прогнозирования свойств газов и жидкостей // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2016. – № 2(50). – С. 208–210.
7. Коган В.Б., Фридман В.М., Кафаров В.В. Равновесие между паром и жидкостью: Справ. пособие. Кн. 1. – М.–Л.: Наука, 1966. – 646 с.

Статья поступила в редакцию 23 июня 2016 г.

SOFTWARE FOR EQUATION OF STATE BINARY COEFFICIENTS OPTIMIZATION

S.B. Konygin

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya str., Samara, 443100, Russian Federation

This paper is devoted to modernization software that allows check the correctness of gas and liquid properties models. After modernization this software can compare calculated phases compositions with available experimental data and find the optimal binary coefficients values. This software can help the process developers to choose equation of state and binary coefficients in each specific case. Also this paper contains a comparison example of calculated and experimental compositions in "methane – pentane" system.

Keywords: *gas and liquid properties, phase equilibrium, equation of state.*

Sergey B. Konygin (Dr. Sci. (Techn.)), Head of Department.

УДК 681.5:621.315

СИСТЕМА КОМБИНИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ДАВЛЕНИЕМ В ЭКСТРУДЕРЕ ПРИ НАЛОЖЕНИИ ПОЛИМЕРНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ПРОВОДНЫХ КАБЕЛЕЙ СВЯЗИ

Ю.В. Митрошин

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Разработана автоматическая система комбинированного управления давлением в экструдере при наложении полимерной изоляции проводных кабелей связи. Система обеспечивает стабилизацию давления расплава полимера в формирующем инструменте экструдера путем компенсации основного возмущающего воздействия, вызываемого конструктивными особенностями экструдеров, – пульсирующего градиента давления расплава полимера на выходе экструдера. Тем самым обеспечивается стабильность мгновенной производительности экструдера и диаметра изоляции кабельной жилы.

Ключевые слова: *кабели связи, экструзия, расплав полимера, давление, комбинированное управление.*

Отличительной чертой работы шнековых экструдеров при изолировании проводных кабелей является наличие возмущающего воздействия – пульсирующего градиента давления расплава полимера в формирующем инструменте (кабельной головке) экструдера, вызванного вращением шнека, что обуславливает гармонические изменения мгновенной объемной производительности экструдера и, соответственно, периодические нерегулярности диаметра изоляции кабельной заготовки [1–4]. Используемые в настоящее время на практике конструктивные методы для уменьшения описываемого эффекта путем увеличения отношения длины шнека к его диаметру или применение специально спроектированных насадок на торцевую часть шнека принципиально не решают проблемы.

Как отмечалось в [5], основными проблемами при автоматизации технологического процесса изолирования проводных кабелей связи являются:

- недостаточная точность стабилизации температуры расплава полимера в выходной зоне экструдера;
- отсутствие управления температурой воды в охлаждающих ваннах;
- отсутствие регулирования пульсирующего градиента давления в формирующем инструменте, что приводит к гармоническим нерегулярностям диаметра изолированной кабельной жилы вследствие циклических колебаний производительности экструдера.

С той поры только первая задача получила достойное решение. Была разработана система распределенного управления температурой расплава полимера в зоне дозирования одночервячного экструдера, позволившая гарантировать точность регулирования температуры не хуже $\pm 0,5$ °С (0,3 % от заданного значения) [6].

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект 15-08-04209-а).

Юрий Владимирович Митрошин, аспирант.

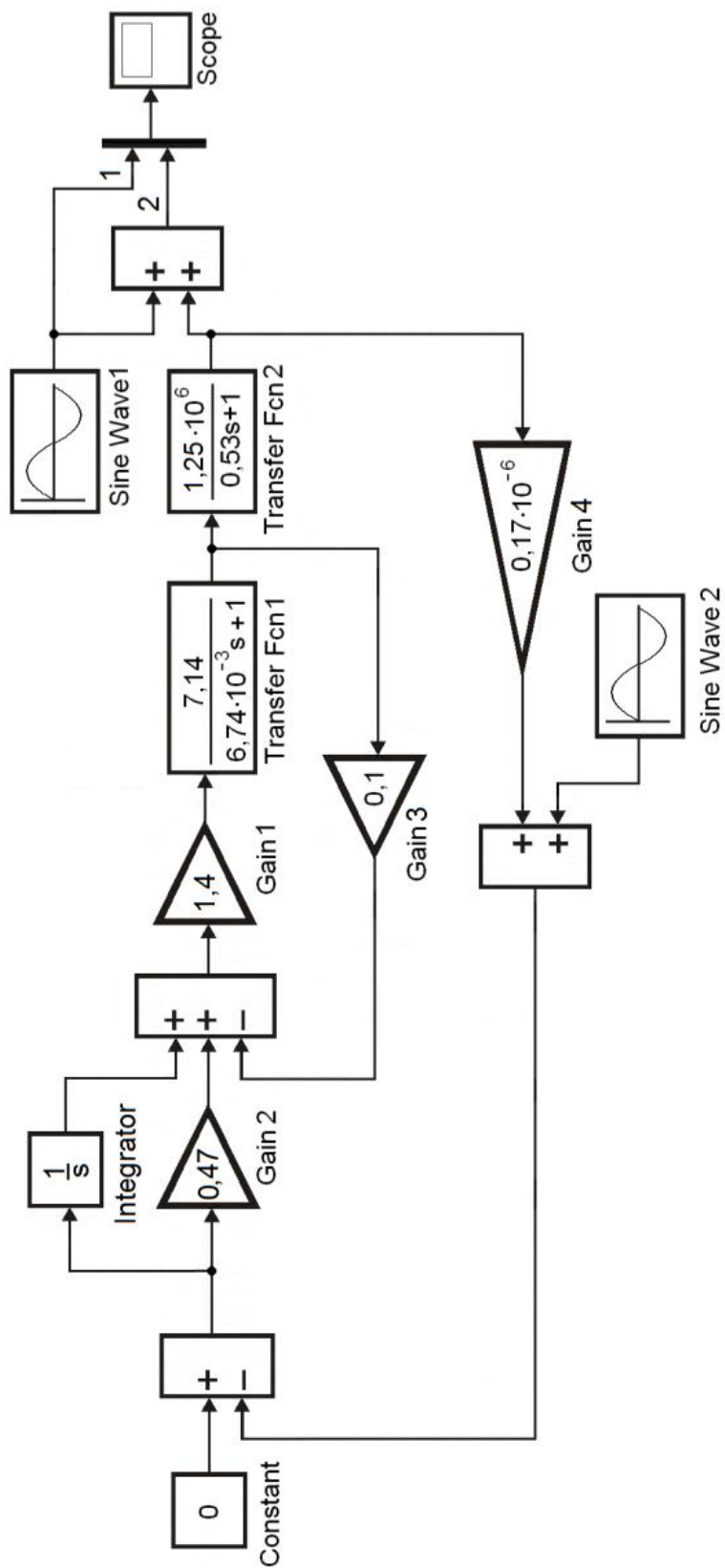


Рис. 1. Модель системы комбинированного управления давлением в кабельной головке шнекового экструдера в Matlab/Simulink

Для обеспечения стабильной производительности экструдера, которая может оцениваться по его объемной производительности либо по удельной весовой производительности (массе изоляции на единицу длины кабельной жилы), необходимо в ходе наложения изоляции поддерживать постоянным давление расплава полимера в формирующем инструменте пресса [7].

В [7] отмечается, что при регулировании наложения изоляции проводных кабелей связи по сравнению с традиционным регулированием числа оборотов шнека для поддержания постоянства производительности экструдера регулирование рабочего давления имеет существенное преимущество.

В [1] показано, как параметры пульсирующего градиента давления расплава полимера в формирующем инструменте могут быть определены экспериментально.

Целью настоящей работы была разработка системы комбинированного управления давлением в кабельной головке экструдера, обеспечивающей стабилизацию мгновенной объемной производительности экструдера и тем самым регулярность диаметра изоляции, накладываемой на медный проводник.

Модель системы комбинированного управления давлением в кабельной головке шнекового экструдера в Matlab/Simulink приведена на рис. 1.

На рис. 2 показана реакция системы на единичное управляющее воздействие при наличии аддитивного нерегулируемого возмущения на выходе.

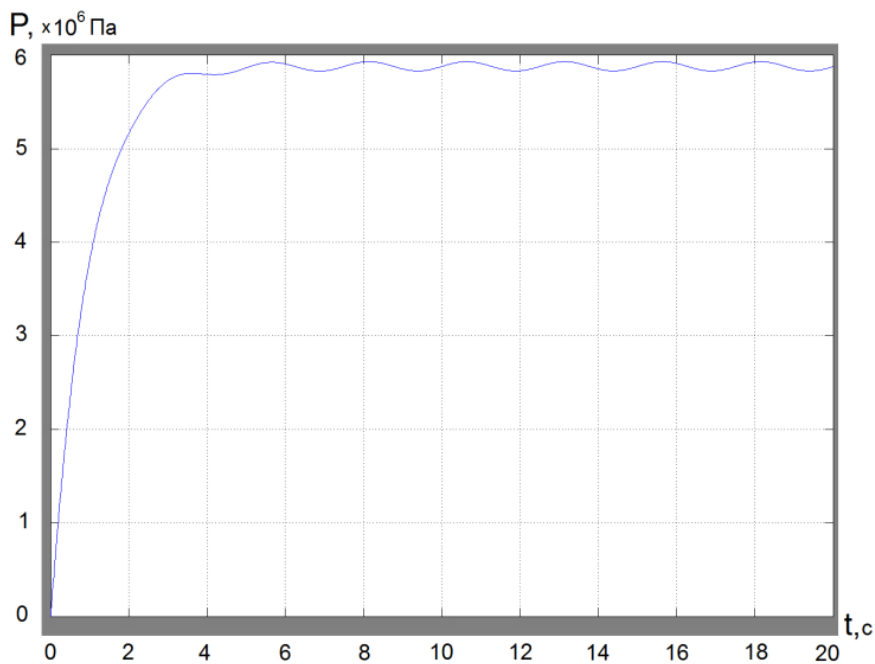


Рис. 2. Реакция системы на единичное управляющее воздействие при наличии аддитивного нерегулируемого возмущения на выходе

На рис. 3 продемонстрирована эффективность разработанной системы управления давлением расплава полимера.

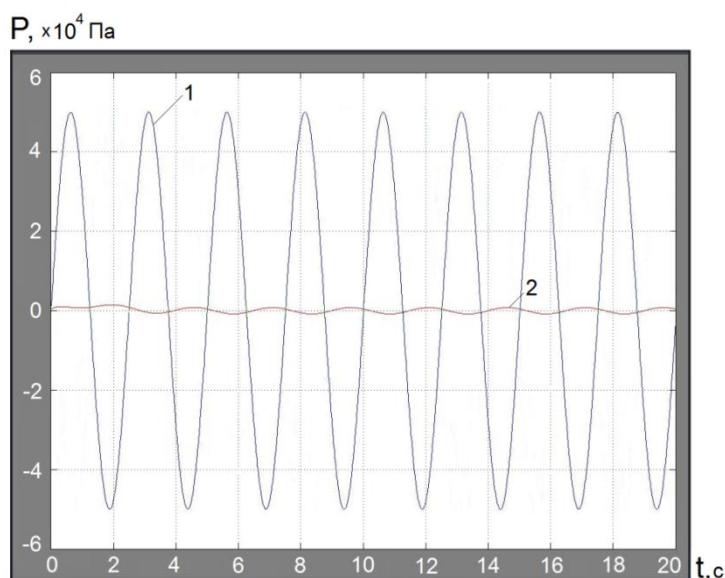


Рис. 3. Эффективность работы системы стабилизации давления в кабельной головке шнекового экструдера: 1 – возмущающее воздействие; 2 – стабилизированное давление

На рис. 4 показана реакция системы на единичное управляющее воздействие с учетом компенсации возмущения.

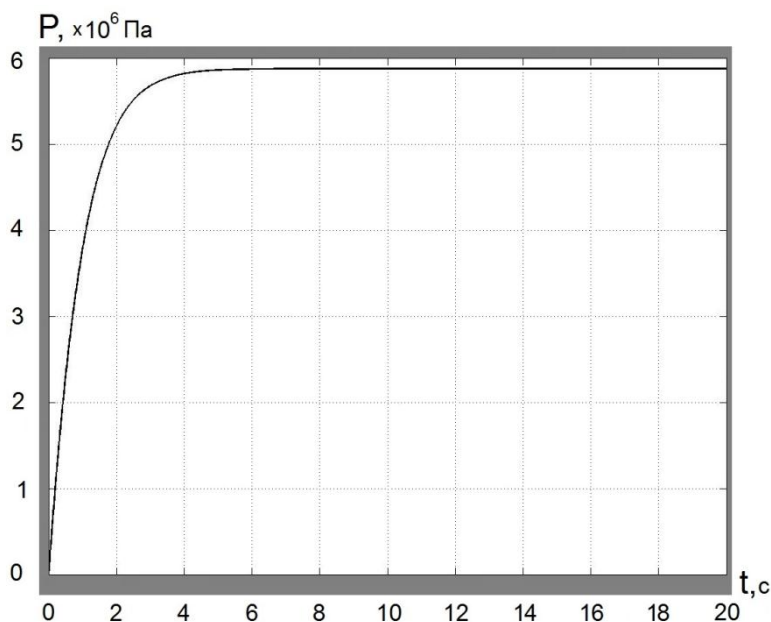


Рис. 4. Реакция системы на единичное управляющее воздействие с учетом компенсации возмущения

При работе системы комбинированного управления давлением амплитуда его пульсаций в кабельной головке уменьшается в 62,5 раза ($0,8 \cdot 10^3$ Па вместо $5 \cdot 10^4$ Па). Соответственно, уменьшаются пульсации мгновенной производительности экструдера и нерегулярности диаметра изоляции жилы кабеля.

На технологической операции наложения сплошной изоляции на медный

проводник основным параметром качества, влияющим на нестабильность эксплуатационных характеристик кабеля, является диаметр изолированной жилы [8].

Таким образом, разработанная система комбинированного управления давлением в кабельной головке экструдера обеспечивает стабилизацию его мгновенной объемной производительности в процессе изолирования проводных кабелей связи и, соответственно, повышение регулярности диаметра изолированной жилы кабеля, что в конечном итоге обеспечивает гарантированное достижение заданного эксплуатационного параметра качества изготавливаемого кабеля.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Marinov S., Steller R.* Erfassung der Sohmelzeströmung in Extrusionsdüsen bei pulsierendem Druckgradienten. – *Plaste und Kautschuk*, 1985, Bd. 32, № 9, s. 346–349.
2. *Митрошин В.Н.* Регулирование давления расплава полимера в зоне дозирования одночервячного экструдера при пульсирующем градиенте давления // *Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки.* – 2011. – № 1 (29). – С. 39–44.
3. *Митрошин В.Н., Митрошин Ю.В., Кулешиова Д.И.* Использование системного подхода при автоматизации многооперационных технологических процессов производства кабелей связи // Информационные, измерительные и управляющие системы (ИИУС-2012): Материалы III Международной научно-технической конференции (Самара, 29–31 мая 2012 г.). – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2012. – С. 43–48.
4. *Митрошин В.Н., Кулешиова Д.И.* Разработка системы управления процессом изолирования кабелей связи, обеспечивающей достижение требуемого эксплуатационного качества продукции // *Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки.* – 2015. – № 1(45). – С. 71–77.
5. *Paton C.* Dynamic size control in an extrusion line. – *Wire Industry*, 1972, December, p. 992–994.
6. *Нечаев А.С., Митрошин В.Н.* Структурное и численное моделирование распределенного управления температурой расплава полимера в зоне дозирования одночервячного экструдера // *Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки.* – 2013. – № 2 (38). – С. 26–32.
7. *Reiner T., Bohmann J.* Prozessorgeregeltes ummanteln elektrischer Leiter. – *Drahtwelt*, 1986, Jg.72, № 5, s. 138–141.
8. *Митрошин В.Н.* Автоматизация технологических процессов производства кабелей связи. – М.: Машиностроение-1, 2006. – 140 с.

Статья поступила в редакцию 9 июня 2016 г.

PRESSURE COMBINED CONTROL SYSTEM IN AN EXTRUDER AT IMPOSING POLYMERIC INSULATION

Y.V. Mitroshin

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya str., Samara, 443100, Russian Federation

Automatic control pressure system in the extruder was developed applying for the process of polymer insulation of wired communication cables. The system provides a polymer melt pressure stabilization in the forming extruder tool by compensating the main disturbance caused by extruder design features – a pulsating pressure gradient of polymer melt at the outlet of the extruder. This ensures the stability of the instant productivity of the extruder and the diameter of insulation of the cable core.

Keywords: communication cables, extrusion, a polymer melt, pressure, combined control.

УДК 621.9.014

АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ШЛИФОВАНИЯ ПРИ МАССОВОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

В.Г. Щетинин

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: schetinin_v@mail.ru

Рассматриваются вопросы синтеза алгоритмов управления металлообрабатывающими станками при массовом производстве на примере управления технологическим процессом врезного шлифования. Показана необходимость учета стохастического характера ряда параметров процесса при наличии ограничений на фазовые координаты по качественным показателям. Проанализированы предельные возможности различных классов алгоритмов. Рассмотрены вопросы синтеза алгоритмов для технологических процессов обработки ответственных деталей и введения функций штрафа для оптимизации параметров с учетом снижения надежности. Оценен выигрыш в производительности при применении таких алгоритмов.

Ключевые слова: шлифование, массовое производство, алгоритмы управления, ограничения на фазовые координаты.

Операция шлифования является одной из финишных в технологических процессах изготовления ряда ответственных изделий массового производства. К таким можно отнести детали подшипников качения, валы и штоки различных механизмов, детали буровых долот и прочее. Это обуславливает, с одной стороны, высокие требования к качеству технологического процесса и систем, его обеспечивающих, а с другой – обеспечение высокого качества и производительности при массовом производстве с минимальным количеством контрольных и диагностических процедур. Задачи алгоритмизации технологического процесса шлифования рассматриваются в ряде работ отечественных и зарубежных авторов [1–3, 6]. Подробно описаны основные факторы, участвующие в формировании требований к составляющим вектора выходных координат процесса для обеспечения заданного комплекса качественных показателей обработанных деталей. Разработаны технические средства для реализации алгоритмов управления различных видов [2, 3, 7–9]. Однако рассмотренные меры относятся к решению задачи алгоритмизации применительно к одной реализации и не учитывают некоторых важных особенностей технологического процесса шлифования. В то же время при массовом производстве имеют место значительные вариации параметров математической модели процесса как объекта управления. К таким в первую очередь относятся вариации режущих свойств инструмента (абразивного круга) и конечная глубина ожогового слоя, формируемого во время чистового этапа обработки [1]. Для бездефектной обработки требуется оценка вышеупомянутых факторов и, как следствие, оперативная коррекция параметров алгоритмов управления [4, 9].

Владимир Георгиевич Щетинин (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Автоматика и управление в технических системах».

Выходом из сложившейся ситуации является применение алгоритмов, учитывающих статистическую информацию о случайных факторах. Для детерминированного варианта, реализуемого на станках – автоматах и полуавтоматах, не допускающих оперативной коррекции параметров управления, это возможно при выборе параметров дискретных [8] или комбинированных (дискретных на черновом участке и непрерывном на чистовом) с учетом чувствительности формируемых ими ансамблей траекторий к параметрам законов распределения случайных составляющих [9].

Особый случай представляет задача синтеза управления для процессов обработки ответственных деталей, где требуется обеспечить минимальную вероятность брака. В этом случае параметры управления определяются в ходе решения задачи оптимального управления, минимизирующей целевой функционал, который включает функцию штрафа, учитывающую затраты на предотвращение или устранение возможных аварийных ситуаций.

Решение сформулированных выше задач обеспечивается системой, включающей, помимо высококачественной системы управления приводами шлифовального станка, дополнительный контур идентификации, обеспечивающий определение текущих параметров математической модели станка и по коротким выборкам – расчет вероятностных характеристик. Для идентификации области ограничений по ожогам возможно использовать хорошо себя зарекомендовавшие устройства неразрушающего контроля (например, вихретоковые) [9]. Объем контрольных выборок (периодичность контроля) определяется по известным методикам статистических испытаний.

Результаты опытно-промышленных испытаний показали возможность существенного повышения производительности (до 10...15 %) и сокращения в 2...5 раз количества забракованных изделий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Михелькевич В.Н.* Автоматическое управление шлифованием. – М.: Машиностроение, 1975. – 304 с.
2. *Новиков В.Ю., Гореликов В.Я.* Адаптивное управление врезным шлифованием с дискретной подачей // Станки и инструмент. – 1981. – № 9. – С. 17–18.
3. *Соломенцев Ю.М., Митрофанов В.Г., Протопопов С.П., Рыбкин И.М., Тимирязев В.А.* Адаптивное управление технологическими процессами (на металлорежущих станках). – М.: Машиностроение, 1980. – 536 с.
4. *Солонин И.С.* Математическая статистика в технологии машиностроения. – М.: Машиностроение, 1972. – 216 с.
5. *Эльянов В.Д.* Совершенствование методики расчета режимов шлифования // СТИН. – 1993. – № 1. – С. 21–26.
6. *Lundholm T., Yngen M., Lindstorm B.* Advanced process monitoring – a major step to wards adaptive control // Robotics and Computer Integrated Manufacturing. – 1988. – v. 4. – № 3/4. – p. 413–421.
7. *Карнеева Е.В.* Совершенствование средств активного многопараметрового контроля для системы мониторинга шлифовальной обработки деталей подшипников: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06 / Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2004. – 20 с.
8. *Щетинин В.Г.* Качество управления процессом врезного шлифования при использовании кусочно-постоянных алгоритмов // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2012. – № 2 (34). – С. 229–232.
9. *Щетинин В.Г.* Алгоритмизация процесса врезного шлифования при случайном характере параметров математической модели станка и области ограничений на фазовые координаты // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2013. – № 2 (38). – С. 229–233.

Статья поступила в редакцию 10 апреля 2016 г.

ALGORITHMS FOR CONTROL OF GRINDING TECHNOLOGICAL PROCESS IN MASS PRODUCTION

V.G. Schetinin

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya str., Samara, 443100, Russian Federation

E-mail: schetinin_v@mail.ru

The questions of synthesis of control algorithms for metal-processing machines under the condition of mass-production are studied. As an example, consider the technological process of plunge-cut grinding. The necessity of consideration of stochastic parameters of process under the restrictions on phase coordinates by quality factors is shown. The limit abilities of different algorithms' classes are analyzed. The problems of algorithm synthesis for technological processes of operating essential parts are considered and penalty function for parameter optimization the conditions of decreasing of durability is introduced. The problem of profit of efficiency under the usage of such algorithms is studied.

Keywords: grinding, mass production, control algorithms, phase coordinates restrictions.

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

Представленная в журнал работа **должна обязательно содержать новые научные результаты**, нигде ранее не публиковавшиеся и не представленные к публикации в других изданиях.

В журнале предполагается публикация статей объемом до 10 страниц (включая рисунки и таблицы), а также кратких сообщений по соответствующим разделам (объем 3-4 стр. вместе с рисунками и таблицами).

В приоритетном порядке будут рассматриваться материалы докторских и кандидатских диссертаций. Аспирантские работы рекомендуется представлять в форме кратких сообщений.

Требования к оформлению статей находятся на сайте университета

<http://vestnik-teh.samgtu.ru>

К статье прилагаются:

- экспертное заключение;
- авторская справка;
- лицензионный договор передачи авторского права на публикацию;
- направление от организации (если авторы не работают в СамГТУ).

Статьи, не удовлетворяющие указанным правилам оформления, будут возвращены авторам без рассмотрения.

Статьи и краткие сообщения передаются ответственному секретарю серии «Технические науки» И.Г. Минаковой (443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244. СамГТУ. Корп. 8, комн. 519).

Справки по телефонам:

337 07 00 – Эдгар Яковлевич Рапопорт

337 03 42 – Ирина Григорьевна Минакова

E-mail: vest_teh@samgtu.ru

Редколлегия журнала