

6. **И.Флорек** Современные направления развития магнитного обогащения минерального сырья и материалов / **Флорек И.** // Обогащение руд, №1, 1992.
7. **Кармазин В.И., Кармазин В.В.** Магнитные методы обогащения руд / **Кармазин В.И., Кармазин В.В.** // М., Недра, 1984.
8. **Кармазин В.И.** Обогащение руд черных металлов / **Кармазин В.И.** // М., Недра, 1982.
9. **Кармазин В.И., Кармазин В.В.** Магнитные методы обогащения / **Кармазин В.И., Кармазин В.В.** // М., Недра, 1978.
10. **Лазаренко Е.К., Гершойг Ю.Г., Бучинская Н.И.** и др. Минералогия Криворожского бассейна / **Е.К. Лазаренко, Ю.Г. Гершойг, Н.И. Бучинская** // Киев: Наукова думка, 1977 – 544 с.
11. Permroll Separator Eerrous Wheel Separator: Проспекты/ Bateman Equipment Inc, 1987.
12. **A.M. Turkenich.** A novel method for improvement of quality of a magnetite concentrate // Magnetic end Electrical Separation. – 2001. – Vol. 10, №4. – P. 207–208.
13. **Grosh A.G., Daughney V.F.** High-Tension Separation of Wabush Mines Canadian Mining and Metallurgical Bulletin, 1967, vol.60, № 667.

Рукопис подано до редакції 14.04.15

УДК 622.788: 004.032.26

А.С. КУЗЬМЕНКО, ст. преподаватель, М.Л. БАРАНОВСКАЯ, канд. техн. наук, доц.
Криворожский национальный университет

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ЧАШЕВЫМ ОКОМКОВАТЕЛЕМ

Чашевый окомкователь является сложной, с точки зрения автоматического управления, машиной. Большое количество входящих (влажность шихты, скорость вращения чаши, угол наклона чаши, расход шихты и воды в чашу), исходящих (диаметр, прочность и влажность окатыша) параметров и внешних воздействий (температура и влажность воздуха, содержание железа в шихте) зависят друг от друга не линейно и в некоторых случаях не явно, что создает большие трудности при управлении чашевым окомкователем. Определению подходящей системы автоматического управления чашевым окомкователем посвящена серия работ, включая эту. В данной работе обоснован выбор направления поиска подходящей системы управления. Для этого составлена математическая модель одноконтурной системы управления приводом вращения чаши чашевого окомкователя. В модели для сравнения автоматических систем управления использована классический ПИД регулятор и однослойная нейронная сеть обученная по алгоритму «дельта-правила». Произведено сравнение систем управления при разных входящих воздействиях. Определены основные параметры переходных процессов (время первого согласования t_y , перерегулирование σ , время переходного процесса $t_{\text{ин}}$) и найдены коэффициенты ошибок позиционирования c_0 , скорости c_1 и ускорения c_2 для каждого типа системы управления. Показаны закономерности, по которым найдены соответствующие коэффициенты ошибок. Для наглядности работы разных систем управления приведены графики ошибок c_0 , c_1 и c_2 .

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. При производстве окатышей технологический процесс окомкования не является энергоемким. Но качество подготовки окатышей существенно повышает энергопотребление на стадии обжига. На процесс окомкования в чашевом окомкователе влияют много факторов, среди которых: содержание железа в шихте, основность шихты, крупность шихты, расход шихты в чашу, угол наклона чаши, скорость вращения чаши, влажность шихты. Своевременное реагирование при управлении чашевым окомкователем на отклонение параметров значительно повысит качество сырых окатышей, что в дальнейшем приведет к сокращению энергозатрат на производство окатышей в целом [1,2].

Анализ исследований и публикаций. При повышении требований к качеству готового продукта управление агрегатами без автоматизированных систем невозможно [10]. Эффективное управление может быть достигнуто при использовании многоуровневых систем автоматизации с применением средств вычислительной техники - автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) [11]. В этом направлении существует много научных работ как по исследованию всего технологического процесса фабрик окомкования [3,4,5,6,12], так и по процессам подготовки исходного сырья (добавок) и формирования (дозирования) шихты для производства сырых и готовых окатышей [7,8,9,14].

Постановка задачи. Определить возможность и целесообразность использования классических и гибридных нейронных сетей для управления чашевым окомкователем.

Изложение материала и результаты. В качестве анализа объекта управления, в теории автоматического управления, принято использовать дифференциальные уравнения. Они описывают свойства системы и позволяют оценить поведение при изменении входных параметров.

Различают два основных режима работы системы автоматического управления:

установившийся режим работы, при котором составляющие вектора состояния системы не зависят от времени их измерения;

динамический режим работы, при котором составляющие вектора состояния системы являются функциями времени.

Как установившийся, так и динамический режимы работы линейной системы могут существовать, если подавать на систему сигналы, изменяющиеся во времени. Разница состоит в том, что в переходном процессе само воздействие или некоторые его производные содержат ступенчатые изменения. В течении некоторого времени после ступенчатого изменения величины или ее производной, в системе происходит переходный процесс, а после его окончания система работает в установившемся режиме до появления новых воздействий или изменений в структуре системы.

Одним из основных требований, предъявляемых к системам управления, является обеспечение необходимой точности во всех режимах работы. В установившемся режиме работы системы управления качество ее работы может быть оценено по статической характеристике системы.

Важной характеристикой САК является зависимость между значением управляющего параметра и величиной внешнего воздействия. По виду зависимости между значением управляющего воздействия и внешними воздействиями системы делят на статические и астатические.

Систему называют статической применительно к внешнему воздействию, если при воздействии, стремящемся со временем достичь некоторого значения, ошибка также стремится достичь устойчивого значения. Поэтому статическая система автоматического управления не может обеспечить постоянство управляемого параметра при переменной нагрузке.

Система автоматического управления называется астатической, если при постоянном входном воздействии ошибка управления стремится к нулю независимо от величины воздействия. Если понятие статическая система является абсолютным, то понятие астатическая САУ справедливо только в отношении определенного компонента вектора исходного состояния системы. Астатические системы автоматического управления характеризуются разным порядком астатизма в зависимости от числа интегрирующих звеньев в разомкнутом контуре.

Одним из основных требований к системе автоматического управления частотным окомкователем является обеспечение необходимой точности работы во всех режимах. В установившемся режиме работы САУ качество ее работы можно оценить по статической характеристике системы и коэффициентам ошибок [13]. Для каждого контролируемого параметра работы частотного окомкователя можно определить коэффициент ошибки, разложив в ряд Тейлора передаточную функцию $F_e(s)$ по ошибке, которая обусловлена воздействием

$$F_e(s) = \frac{E(s)}{X(s)} = F_e(0) + \frac{F_e'(s)|_{s=0}}{1!} s + \frac{F_e''(s)|_{s=0}}{2!} s^2 + \dots = c_0 + c_1 s + \frac{c_2}{2} s^2 + \dots \quad (1)$$

где c_0 - коэффициент ошибки положения; c_1 - коэффициент ошибки скорости; c_2 - коэффициент ошибки ускорения.

Исходя из (1), поведение ошибки регулирования во времени может быть представлено рядом [13]

$$e(t) = c_0 x(t) + c_1 x'(t) + c_2 x''(t)/2 + \dots \quad (2)$$

Если исходить из выражения (2), то при заданной максимальной ошибке управления e_m с использованием принципа равных воздействий коэффициенты находят [13]:

X_m - максимально допустимое отклонение сигнала задания для системы управления частотным окомкователем, при котором обеспечивается необходимая точность: $X_m < e_m / (3c_0)$;

$\max(dx/dt)$ - максимальная скорость изменения сигнала задания: $\max(dx/dt) < e_m / (3c_1)$;

$\max(d^2x/dt^2)$ - максимально допустимое ускорение сигнала: $\max(d^2x/dt^2) < 2 e_m / (3c_2)$.

Таким образом, коэффициенты c_0 , c_1 и c_2 определяют точность и быстродействие системы. Значения ошибок указывают на порядок астатизма системы. В случае статичной системы ошибка c_0 будет иметь значение, отличное от нуля. Для системы с первым порядком астатизма ошибка c_0 будет равняться нулю, а ошибки высших порядков будут иметь не нулевые значения. Физический смысл ошибок для нашей системы электропривода чаши будет следующим: c_0 – ошибка по скорости вращения чаши, а c_1 – ошибка по ускорению чаши.

Модель системы управления по одному управляющему воздействию, скорости вращения чаши окомкователя, для нахождения коэффициентов c_0 , c_1 и c_2 показана на рис. 1.

Переключатели Switch1 и Switch2 отвечают за форму сигнала задания. При постоянном сигнале задания график переходного процесса по скорости показан на рис 2а. Действительно, при t стремящегося к ∞ по окончании переходного процесса входной сигнал $x(t)=1$, а его производные $x'(t)=0$ и $x''(t)=0$. Поэтому, исходя из (2) имеем $e(t)=c_0$. Для данного сигнала управления коэффициент c_0 равен 0.

Для определения коэффициента ошибки по скорости c_1 сделаем замену входного сигнала со ступенчатого (Step) на линейно-возрастающий (Ramp) согласно зависимости $x(t) = l_0(t) \cdot t$, где $l_0(t)$ – одиночная ступенчатая функция Хэвисайда.

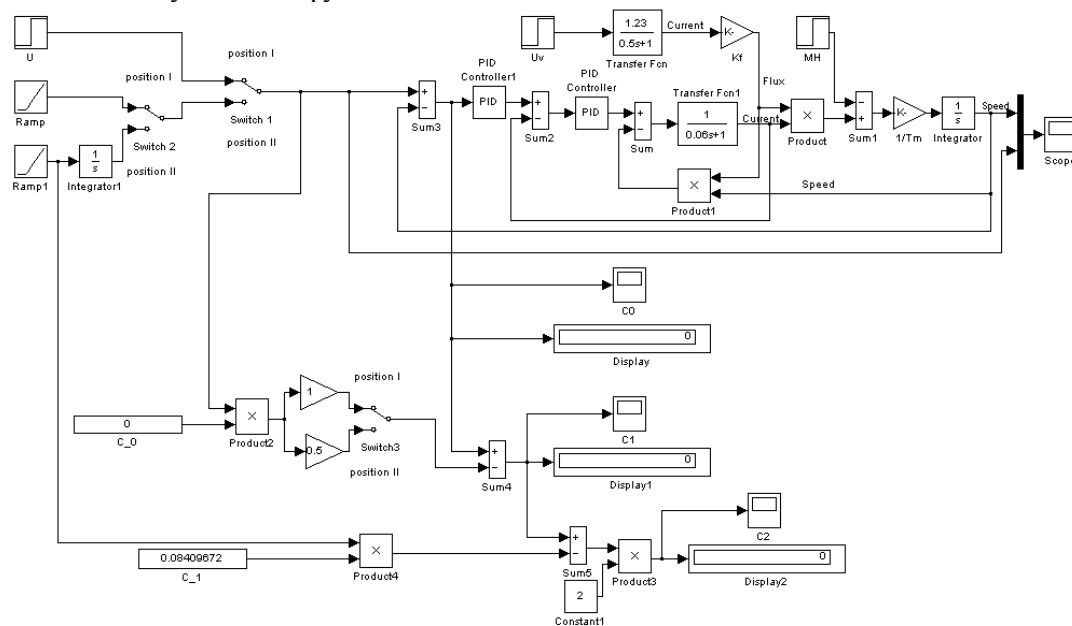


Рис. 1. Модель для нахождения коэффициентов c_0 , c_1 и c_2 с использованием классических ПИД-регуляторов

По окончании переходного процесса $x'(t) = 1$, $x''(t)=0$, учитывая (2), получаем [13]

$$e(t) = c_0 l_0(t) \cdot t + c_1, \quad (3)$$

тогда

$$c_1 = e(t) - c_0 l_0(t) \cdot t. \quad (4)$$

Определение коэффициента ошибки по ускорению c_2 выполним следующим образом: на исследуемую САУ подадим сигнал параболической формы: $x(t)=l_0(t) \cdot t^2/2$. По окончании переходного процесса производные примут следующие значения: $x'(t)=t$, $x''(t)=1$, а старшие производные степени k для всех $k>2$ будут равняться нулю $x^{(k)}(t)=0$. Таким образом, в установившемся режиме выражение (2) для ошибки примет следующий вид

$$e(t) = c_0 t^2/2 + c_1 l_0(t) \cdot t + c_2/2 + \dots \quad (5)$$

Отсюда находим [13] значение c_2

$$c_2 = 2(e(t) - c_0 t^2/2 - c_1 l_0(t) \cdot t) \quad (6)$$

Для нахождения коэффициента ошибки c_1 и c_2 в нашей схеме необходимо переключатели сигналов задания переключить соответственно Switch1 в положение II и Switch23 в положение

1. При этом значение коэффициента ошибки $c_1=0,084$, а $c_2=0,0236$, что видно по соответствующим графикам на рис. 2б и рис. 2в.

Анализируя переходные процессы, опишем их основные параметры: время первого согласования $t_y=0,133$ с, перерегулирование $\sigma=55,7\%$ и время переходного процесса $t_{\text{пп}}=2$ с.

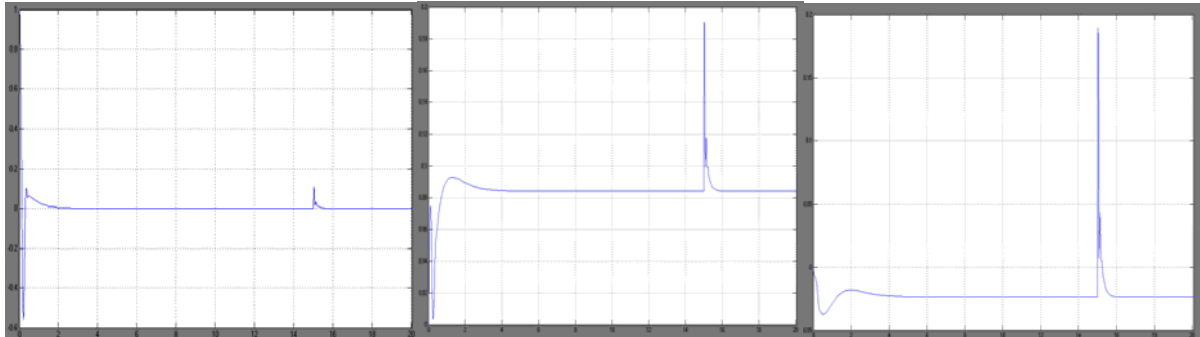


Рис 2. Переходные процессы для ошибки c_0 , c_1 и c_2 при управлении скоростью вращения чаши с помощью ПИД регуляторов

При рассмотрении работы системы управления по одному каналу - скорости вращения чаши, в модели электропривода вместо ПИД регулятора будет присутствовать классическая нейронная сеть, обученная по самому простому алгоритму - дельта-правилу.

Оставим без изменений модель электропривода вращения чаши окомкователя для проведения сравнительного анализа, определения точности ее работы и сравнения ранее полученных результатов.

Результаты проведения моделирования следующие:

коэффициент ошибки по позиционированию принимает значение $c_0=1,69e^{-6}$, что сопоставимо с погрешностью моделирования, поэтому ее можно считать равной нулю (рис. 3а);

коэффициент ошибки по скорости $c_1=0,1$ (рис. 3б);

коэффициент ошибки по ускорению $c_2=0,1621$ (рис. 3в).

Переходный процесс для системы управления на основе нейронной сети характеризуется следующими параметрами: время первого согласования $t_y=0,125$ с, перерегулирование $\sigma=21\%$ и время переходного процесса $t_{\text{пп}}=2$ с.

Таким образом, коэффициенты ошибок системы управления характеризуют ее точность и быстродействие при любом типе сигнала, что позволяет определять динамические ошибки управления и использовать их при обучении сети в реальном времени.

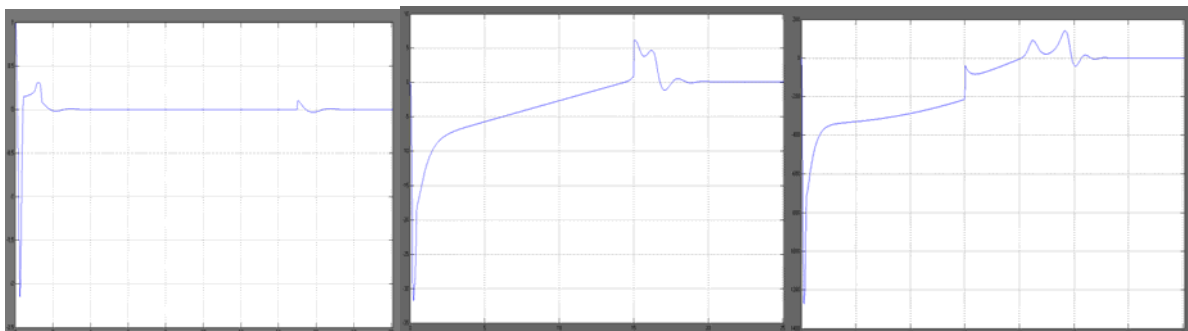


Рис 3. Переходные процессы для ошибки c_0 , c_1 и c_2 при управлении скоростью вращения чаши с помощью нейронной сети

Выводы и направление дальнейших исследований. Анализируя работу двух рассмотренных систем управления с использованием разных регуляторов по найденным значениям ошибок, видно, что более качественно работает система управления с использованием нейронной сети. Качество переходных процессов так же лучше во втором варианте.

Удобное определение коэффициентов ошибок регулирования c_0 , c_1 и c_2 в реальном времени позволяет использовать их при онлайн обучении нейронной сети.

Дальнейшие исследования будут направлены на создание способа обучения нейронной сети на основе коэффициентов ошибок регулирования c_0 , c_1 и c_2 . Сравнение качества регулирования с использованием разных алгоритмов обучения даст возможность определиться с наилучшей конфигурацией нейронной сети и алгоритмом обучения.

Список литературы

1. **Шокін В.П., Кузьменко А.С.** Засоби підвищення ефективності роботи чашевого огрудкувача // Вісник Криворізького національного університету. – Кривий Ріг. –2013.-№34. –С.53-56.
2. **Таравский М.Ф., Шумилов К.А., Трухин Г.М.** и др. Исследование процесса окомкования железорудной шихты и разработка алгоритма его управления в автоматическом режиме// Автоматизация виробничих процесів. - 1997. - № 2. - С. 58 - 65.
3. **Федоровский Н.В.** Автоматическое управление технологическими процессами окускования сыпучих материалов. - К.: Техніка, 1976. - 223 с.
4. **Дементьева Е.М.** Метод и этапы построения математического описания технологических процессов производства окатышей при разработке АСУ ТП фабрики окомкования// Научные основы построения АСУ ТП окускования сыпучих материалов. - К.: Наукова думка, 1980. - С.38 - 57.
5. **Богаенко И.Н., Бурляй И.Ю., Грабовский Г.Г., Рюмшин Н.А., Таравский М.Ф., Шумилов К.А.** Разработка и проектирование АСУ ТП фабрик окомкования горно-обогатительных комбинатов. - К.: НВК "КИА", 2002. - 228 с.
6. **Федоровский Н.В.** Принцип построения АСУ ТП на агломерационных и окомковательных фабриках// Проблемы автоматизации процессов окускования сыпучих материалов. – М.: ЦНИИТЭИприборостроения, 1985. - С.4 -5.
7. **Журавлев Ф.М., Малышева Т.Я.** Окатыши из концентратов железистых кварцитов. - М.: Металлургия, 1991. - 127 с.
8. **Игнатов Н.В., Сулименко Е.И., Иващенко В.П.** и др. Перспектива производства окускованного металлургического сырья горно-металлургического комплекса "Криворожсталь"// Теория и практика металлургии. - 2001. - № 4. - С.10 - 13.
9. **Сидоренко В.Д., Таравский М.Ф., Коваленко Е.Н., Евдокимов П.И.** Управляющее логическое устройство для загрузки бункеров // Разработка систем автоматизации окускования железных руд и концентратов. - К.: Институт автоматизации, 1978. - С.58 - 64.
10. **Tischner G, Uhlig I.** Steuerung von Ghargen prozessen // ATP 41. – 1999. - №4. – P. 20-29.
11. **Uhlig R. Und Bruns M.** Automatisierung von Chargenprozessen // R. Oldenbourg Verlag, 1995.
12. **Peter Both, Oliver Berender, Gerhard Kleeman, Michael Schlaak** Modellgestützte Processführung Chem //Ing.-Teclin.-2000.-72, № 4. - с.48-49.
13. **Федосов Б.Т.** Об оценке качества линейных САР с использованием программ моделирования. - http://model.exponenta.ru/bt/bt_0004.html, Рудный, Казахстан, 2003.
14. **Shchokin V.** Automatization of agglomerative production on the base of application of Neuro - Fuzzy controlling systems of the bottom level / Vadym Shchokin, Viktoriia Tkachuk // Metallurgical and Mining Industry. – 2014. –№ 6. –

Рукопис поступила в редакцию 14.04.15