УДК 62-83:621.3.07 DOI: 10.21440/0536-1028-2018-6-127-134

АВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПЕСКОВЫМ НАСОСОМ

УГОЛЬНИКОВ А. В.[1], ЩЕКЛЕИНА И. Л.[1]
[1]Уральский государственный горный университет
(Россия, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30)

Введение. *На обогатительных фабриках с мокрым обогащением руд заключительным этапом процесса обогащения является процесс обезвоживания. Данный процесс состоит из двух стадий – сгущения и фильтрации. Технологическая схема процесса обезвоживания содержит цепи сгустителя и цепи вакуум-фильтров. Существующие технологические схемы обезвоживания на обогатительных фабриках при традиционных способах обезвоживания не обеспечивают требуемую влажность железорудного концентрата. Для эффективного осуществления процессов обезвоживания, таких как сгущение и фильтрация, необходимо стабилизировать плотность пульпы (песков) на выходе сгустителя в диапазоне 55–60 % содержания твердого компонента.*
Методы исследования. *Данная задача решается путем использования частотно-регулируемого электропривода пескового насоса, а именно путем изменения скорости вращения ротора электрического двигателя насоса, при этом изменяется производительность пескового насоса, т. е. регулируется расход пульпы, а значит и содержание твердого компонента в пульпе.*
Результаты. *В данной статье осуществлен выбор насосов, электрических двигателей и преобразователей частоты с векторным управлением. Для реализации данной схемы управления производительностью пескового насоса рассчитаны параметры канала регулирования скорости и передаточные функции.*
Вывод. *Экспериментальные исследования подтвердили, что с помощью автоматической схемы можно эффективно управлять плотностью песков сгустителя путем регулирования частоты вращения двигателя пескового насоса.*

Ключевые слова: *обезвоживание; стабилизация; содержание твердого; пульпа; концентрат; насос; двигатель; частотно-регулируемый привод; функциональная схема; векторное управление; микроконтроллер.*

Введение. На фабриках с мокрым обогащением магнетитовых руд заключительным является процесс обезвоживания, состоящий из стадий сгущения и фильтрации. Технологическая схема секции обезвоживания содержит последовательное соединение в цепь сгустителя и группы вакуум-фильтров.

В результате сгущения на сгустителях получают осветленную воду (чистый или замутненный слив) и сгущенный (плотный) продукт – пески. Сгущенный продукт подвергается дальнейшей переработке – фильтрации на вакуум-фильтрах. Влажность полученного железорудного концентрата не должна превышать 9,8 %. Достижению данного результата способствует стабилизация содержания твердого в песках в диапазоне 55–60 % [1]. Это позволяет улучшить выходные показатели процесса фильтрации: обеспечить требуемую влажность концентрата и повысить удельную производительность фильтров.

Для стабилизации содержания твердого в песках сгустителя можно использовать систему автоматического управления электроприводом (СУЭП) пескового

насоса, предназначенного для перекачивания песков по трубопроводу на вакуум-фильтры.

Постановка задачи. Учитывая производительность секции обезвоживания Качканарского горно-обогатительного комбината «Ванадий», к установке предлагаются два насоса типа ГрАТ 350/40/II-1.6, которые поставляются с электродвигателями АМН 315 МА4 и преобразователями частоты VLT Automation Drive FC 300 с векторным управлением (производство фирмы Danfoss, Дания) [2]. Реализация законов векторного управления обеспечивает наилучшие динамические и статические показатели системы управления [3, 4].

Если под скалярным управлением скорости в асинхронном двигателе понимается такое управление, при котором в качестве переменных в системе используются эффективные значения напряжений, токов и потокосцеплений, а сами эти величины считаются величинами скалярными, то в основе векторного управления лежит представление об этих величинах как о пространственных векторах. Можно также отметить, что скалярное управление базируется на зависимостях, лежащих в основе схемы замещения асинхронного двигателя (АД), а векторное управление – на соответствующих структурных схемах.

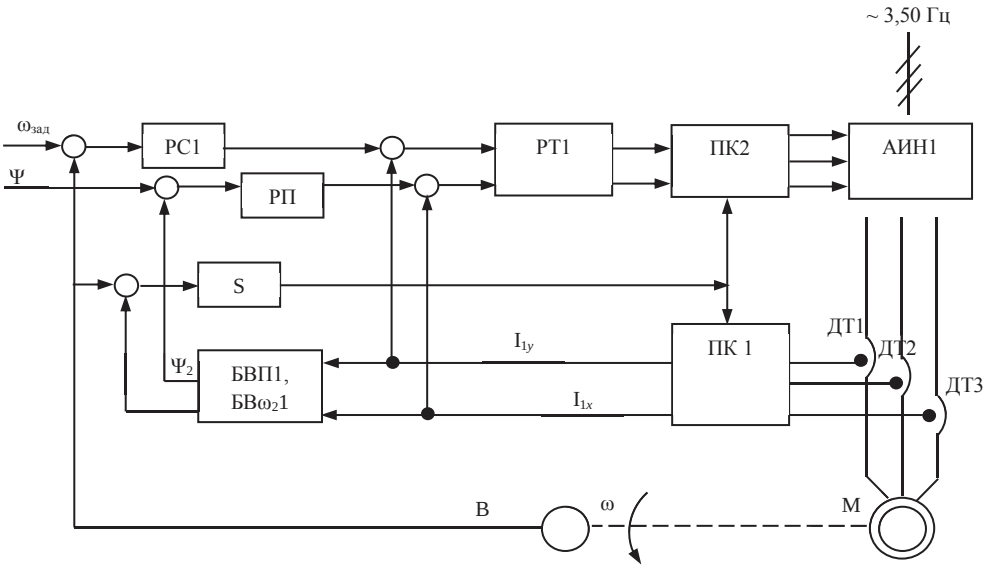

Рис. 1. Функциональная схема системы векторного управления частотным электроприводом по закону Ψ_2 = const с измерением и синхронизацией скоростей электродвигателей
Fig. 1. Functional scheme of a frequency-controlled electric drive vector control system according the law Ψ_2 = const with electric drives velocities measurement and synchronization

Система имеет два канала управления: модулем вектора потокосцепления ротора и угловой скоростью ротора. Двухканальная система управления дает возможность осуществить независимое регулирование модуля вектора потокосцепления ротора и скорости ротора при сохранении прямой пропорциональности между моментом на валу двигателя и составной силы статора, которая находится в квадратуре с волной потокосцепления ротора [5].

Системы векторного управления по закону Ψ_2 = const, где Ψ – вектор потокосцепления ротора, строятся аналогично системам подчиненного управления электродвигателями постоянного тока, что увеличивает быстродействие и значительно повышает надежность электроприводов. В современных частотных

электроприводах с векторным управлением потокосцепление и скорость вычисляют с достаточной точностью при помощи контроллеров по алгоритмам, основанным на различных косвенных методах.

Методика решения поставленной задачи. В данном конкретном случае необходимо обеспечить синхронизацию двух двигателей насосов, каждый из которых питается от собственного преобразователя. Для этого необходимо предусмотреть в схеме измерение скорости двигателей, а также блок синхронизации,

Результаты расчета параметров
Parameters calculation results

Параметр	Формула для расчета, значение
Электромеханическая постоянная времени привода	$T_m = \frac{J_\Sigma \omega_0}{M_п} = 0,2$ с
Электромагнитная постоянная времени двигателя	$T_m = \frac{1}{2\pi f} = 0,0032$ с
Номинальная частота АИН	$f_н = 50$ Гц
Минимальная частота АИН	$f_{\min} = \frac{f_н}{D_1} = 0,25$ Гц
Максимальное значение сигнала задания напряжения	$U_{з\,\max} = 10$ В
Максимальное значение сигнала на выходе регулятора частоты	$U_{р.ч.ном} = 10$ В
Минимальное значение сигнала задания напряжения	$U_{з.н\,\min} = \frac{U_{з.н\,\max}}{D_1} = 0,05$ В
Минимальное значение сигнала на выходе регулятора частоты	$U_{р.ч\,\min} = \frac{U_{р.ч.ном}}{D_1} = 0,05$ В
Статический коэффициент передачи АИН по напряжению	$\frac{U_н}{U_{з\,\max}} = 38$
Постоянная времени АИН	$T_и = 0,0033$ с
Активное сопротивление сетевого фильтра	$R_ф = 30 \cdot 10^{-2}$ Ом
Емкость фильтра	$C_ф = 200 \cdot 10^{-6}$ Ф
Максимальное значение сигнала на выходе датчика скорости	$U_{с\,\max} = 10$ В
Максимальное значение сигнала задания скорости	$U_{з.с\,\max} = 10$ В
Номинальное значение сигнала задания скорости	$U_{з.с.ном} = 10$ В
Минимальное значение сигнала задания скорости	$U_{з.с\,\min} = \frac{U_{з.с\,ном}}{D_1} = 0,05$ В

при помощи которого осуществляется определение рассогласования скоростей вращения приводных двигателей. Блок синхронизации формирует корректирующий сигнал, который складывается с сигналами на входах регуляторов скорости систем управления преобразователей каждого двигателя с разными знаками, чем достигается торможение обгоняющего и разгон отстающего двигателя до исчезновения рассогласования в скоростях пары приводных двигателей.

Функциональная схема системы векторного управления частотным электроприводом приведена на рис. 1.

На функциональной схеме обозначено: АИН1 – автономный инвертор напряжения с ШИМ-преобразователем (широтно-импульсной модуляции); М – двигатели; ДТ1 … ДТ3 – датчики тока статора двигателя; РС1 – регулятор скорости; РП – регулятор потокосцепления; РТ1 – регулятор токов; ПК1 – преобразователь трехфазной системы координат в ортогональную двухфазную *x–y*; ПК2 – преобразователь ортогональной системы координат *x–y* в трехфазную; БВП1 – блок вычисления потокосцепления; БВ$\omega_2$1 – блок вычисления скольжения; В – датчики скорости; ω – скорость вращения ротора; $\omega_{зад}$ – заданная скорость вращения ротора; *S* – скольжение.

Токи статора в трех фазах измеряются датчиками тока ДТ1 … ДТ3 и в координатном преобразователе ПК1 преобразуются в двухфазные, при этом определяются проекции тока статора на оси *x* и *y*.

Система управления скоростью построена по двухканальному подчиненному принципу регулирования. Подчиненными контурами управления являются контур регулирования тока I_{1y} и контур регулирования тока I_{1x}, при этом система управления обеспечивает стабилизацию заданного значения потокосцепления Ψ_2 и регулирование момента.

Расчет параметров аналоговой системы управления производится с целью последующей параметризации цифровой системы управления.

Благодаря высокой разрешающей способности импульсных средств измерения технологических параметров электропривода, высокой разрядности и частоте генераторов синхроимпульсов современных микропроцессоров погрешность параметризации управляющих контроллеров приводов не превышает 1 %. Эта погрешность легко устраняется в процессе отладки системы управления [6–8].

Исходными данными для расчета передаточных функций элементов схемы системы управления являются технические и механические характеристики двигателя.

Результаты расчета параметров канала регулирования приведены в таблице.

Передаточная функция электрической части асинхронного двигателя

$$W_э^{(s)} = \frac{k_{d1}}{T_э p + 1} = \frac{7,9}{0,02p + 1},$$

где $T_э$ – электромагнитная постоянная двигателя, $T_э = (2\pi f_k)^{-1} = 0,02$; k_{d1} – статический коэффициент передачи электрической части двигателя, $k_{d1} = M_н/(\omega_0 - \omega_н) = 7,9$.

Передаточная функция механической части асинхронного двигателя

$$W_m^{(s)} = \frac{1}{J_\Sigma p} = \frac{1}{1,6s},$$

где – J_Σ суммарный момент инерции.

Передаточная функция регулятора скорости

$$W_{р.с}^{(s)} = k_{р.с},$$

где $k_{р.с}$ – статический коэффициент передачи регулятора скорости, $k_{р.с} = 0,04$.

Передаточная функция инвертора по каналу регулирования частоты

$$W_m^{(s)} = \frac{k_и}{T_и p + 1} = \frac{38}{0,0033p + 1},$$

где $k_и$ – статический коэффициент передачи инвертора по каналу управления частоты;

$$k_и = \frac{f_и}{U_{расч.ном}} = 20;$$

$$U_{расч.ном} = \frac{U_{з\,max}}{f_{max}} = 2,5 \text{ В};$$

$T_и$ – некомпенсированная постоянная времени инвертора, $T_и = 0,0033$ с.

Передаточная функция сглаживающего фильтра

$$W_ф^{(s)} = \frac{1}{T_ф + 1} = \frac{1}{6 \cdot 10^{-5} s + 1},$$

где $T_ф$ – постоянная времени сглаживающего фильтра; $T_ф = R_ф C_ф = 6 \cdot 10^{-5}$ с.

Передаточная функция ПИ-регулятора скорости

$$W_{р.с}^{(s)} = k_{р.с} = 3,3.$$

Передаточная функция датчика скорости

$$W_{DC}^{(s)} = k_с = 0,0956,$$

где $k_с$ – коэффициент обратной связи по скорости.

В статическом режиме замкнутая система контура регулирования скорости (частоты) при номинальном сигнале задания скорости системой автоматического регулирования (САР) должна обеспечить номинальную скорость.

Коэффициент обратной связи по скорости

$$k_с = \frac{U_{с\,max}}{\omega_{max}} = 0,008,$$

где $\omega_{max} = 314$ об/мин.

Передаточная функция П-регулятора напряжения

$$W_{р.н} = \frac{1 + T_М^{(s)}}{T_и s} = 0,182.$$

Передаточная функция асинхронного электродвигателя АМН по каналу регулирования напряжения

$$W_{ТП}^{(s)} = \frac{k_и}{\tau s + 1} = \frac{0,131}{0,0033s + 1},$$

где $k_и$ – статический коэффициент АИН по каналу управления напряжением, $k_и = f/U_{ном} = 0,131$.

Передаточная функция задатчика интенсивности

$$W_{\text{з.и}}^{(s)} = \frac{1}{T_{\text{з.и}} s} = \frac{1}{1,05s},$$

где $T_{\text{з.и}}$ – постоянная времени интегрирования задатчика интенсивности, с.

Параметризация цифровой системы управления производится с клавиатуры монитора после предварительного определения параметров передаточных функций структурной схемы системы управления электроприводом [9–12].

Выводы. При реализации микропроцессорной системы стабилизации плотности песков плотномер, встроенный в трубопровод отвода пульпы со сгустителя, подает сигнал на микроконтроллер. В свою очередь, работу микроконтроллера регламентирует задатчик (поддержание заданной плотности). Микроконтроллер обрабатывает сигнал с датчика плотности и дает команду преобразователю изменить частоту вращения электродвигателя пескового насоса, что позволяет поддерживать плотность пульпы в заданном значении.

Экспериментальные исследования подтвердили возможность с помощью автоматической системы эффективно управлять плотностью песков сгустителя путем регулирования частоты вращения двигателя пескового насоса. Установлено, что при увеличении скорости вращения приводного двигателя пескового насоса от 0 до 985 об/мин расход сгущенного продукта изменялся от 0 до максимальной величины – 350 м^3/ч.

При этом увеличение расхода сгущенного продукта ведет к снижению содержания твердого в песках и, соответственно, в питании вакуум-фильтров. При изменении скорости вращения от 560 до 915 об/мин плотность песков сгустителя изменялась от 63,4 % до 47,8 % содержания твердого, плотность питания вакуум-фильтров изменялась при этом от 64,5 до 51 %, а влажность концентрата – от 8,98 до 10,4 %. Удельная нагрузка достигала максимального значения при содержании твердого 62–64 %.

Таким образом, использование системы автоматического управления электроприводом пескового насоса позволяет решить технологическую задачу стабилизации плотности песков сгустителя на таком уровне, чтобы влажность концентрата не выходила за максимально допустимые пределы, а удельная нагрузка была максимальной в каждый момент времени.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Щеклеина И. Л. Исследование и разработка системы автоматического управления процессами обезвоживания железорудного концентрата: дис. … канд. техн. наук. Свердловск, 1986. 254 с.

2. Лезнов Б. С. Частотно-регулируемый электропривод насосных установок. М.: Машиностроение, 2013. 176 с.

3. Соколовский Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: учебник для вузов. М.: Академия, 2012. 272 с.

4. Панкратов В. В. Векторное управление асинхронными электроприводами: учеб. пособие. Новосибирск: НГТУ, 1999. 66 с.

5. Виноградов А. Б. Векторное управление электроприводами переменного тока. Иваново: ИГЭУ, 2008. 98 с.

6. Шрейнер Р. Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. Екатеринбург: УРО РАН, 2000. 654 с.

7. Фираго Б. И. Регулируемые электроприводы переменного тока. Минск: Техноперспектива, 2006. 363 с.

8. Фролов Ю. М., Шемякин В. П. Регулируемый асинхронный электропривод. М.: Лань, 2016. 464 с.

9. Glauce De Souza, Darci Odloak, Antonio C. Zanin. Real time optimization (RTO) with model predictive control (MPC) // Computer Aided Chemical Engineering. 2009. Vol. 27. P. 1365–1370.

10. Danielle Dougherty, Doug Cooper. A practical multiple model adaptive strategy for single-loop MPC original research // Control Engineering Practice. 2003. Vol. 11. Issue 2. P. 141–159.

11. Feuiillete D., Amet J. P. Introduction du SPC (Statistical process control) sur le train a bandes de Sollac Florange // Rev. Met. 1988, 85. Vol. 4. P. 325–330.
12. Bolognani S., Peretti L., Zigliotto M., Bertotto E. Commissioning of electromecanical confession models for high-dynamic PMSM drives. IEEE Trans. Ind. Electron. Vol. 57. No. 3. 2010. P. 1925–1936.

Поступила в редакцию 28 марта 2018 года

Угольников А. В., Щеклеина И. Л. Автоматическая система управления песковым насосом // Известия вузов. Горный журнал. 2018. № 6. С. 127–134.

Сведения об авторах:

Угольников Александр Владимирович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электротехники Уральского государственного горного университета. E-mail: gmf.et@m.ursmu.ru
Щеклеина Ирина Леонтьевна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электротехники Уральского государственного горного университета. E-mail: gmf.et@m.ursmu.ru

SAND PUMP AUTOMATIC CONTROL SYSTEM

Ugol'nikov A. V.[1], Shchekleina I. L.[1]
[1] Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia.

Introduction. In wet ore processing plants, the final step in the enrichment process is the dewatering process. This process consists of two stages: thickening and filtration. The technological scheme of the dehydration process contains the chains of the thickener and the chains of the vacuum filters. The existing technological schemes of dehydration in the processing plants, with traditional methods of dehydration do not provide the required moisture content of iron ore concentrate. For effective dehydration processes, such as thickening and filtration, it is necessary to stabilize the density of the pulp (sand) at the output of the thickener in the range of 55–60 % of the solid content.
Research methodology. This problem is solved by using a frequency-controlled electric drive of the sand pump, to be more exact, by changing pump electric motor rotor speed, the performance of the sand pump changes, i.e. the pulp flow rate is regulated and, thereby, the content of the solid component in the pulp.
Results. In this article the choice of pumps, electric motors and frequency converters with vector control is carried out. For the implementation of this sand pump performance control system, the speed control channel parameters and transfer functions are calculated.
Conclusion. Experimental studies have confirmed that with the help of an automatic system it is possible to effectively control the sand thickener density by adjusting the sand pump engine speed.
Key words: dehydration; stabilization; solids content; pulp; concentrate; pump; motor; variable frequency drive; functional diagram; vector control; microcontroller.

DOI: 10.21440/0536-1028-2018-6-127-134

REFERENCES

1. Shchekleina I. L. *Issledovanie i razrabotka sistemy avtomaticheskogo upravleniia protsessami obezvozhivaniia zhelezorudnogo kontsentrata: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Research and development of iron ore concentrate dewatering processes automated control system. Cand. Eng. sci. diss.]. Sverdlovsk, 1986. 254 p.
2. Leznov B. S. *Chastotno-reguliruemyi elektroprivod nasosnykh ustanovok* [Pump installations variable frequency drive]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2013. 176 p.
3. Sokolovskii G. G. *Elektroprivody peremennogo toka s chastotnym regulirovaniem: uchebnik dlia vuzov* [School book for the institutions of higher education “AC drives with frequency regulation”]. Moscow, Akademiia Publ., 2012. 272 p.
4. Pankratov V. V. *Vektornoe upravlenie asinkhronnymi elektroprivodami: ucheb. posobie* [School book “Vector control of asynchronous electric drives”]. Novosibirsk, NSTU Publ., 1999. 66p.
5. Vinogradov A. B. *Vektornoe upravlenie elektroprivodami peremennogo toka* [AC drives vector control]. Ivanovo, IGEU Publ., 2008. 98 p.
6. Shreiner R. T. *Matematicheskoe modelirovanie elektroprivodov peremennogo toka s poluprovodnikovymi preobrazovateliami chastoty* [Mathematical modeling of AC electric drives with semiconductor frequency converters]. Ekaterinburg, UB RAS Publ., 2000. 654 p.
7. Firago B. I. *Reguliruemye elektroprivody peremennogo toka* [Regulated electric drives of alternating current]. Minsk, Tekhnoperspektiva Publ., 2006. 363 p.
8. Frolov Iu. M., Shemiakin V. P. *Reguliruemyi asinkhronnyi elektroprivod* [Adjustable asynchronous electric drive]. Moscow, Lan' Publ., 2016. 464 p.
9. Glauce De Souza, Darci Odloak, Antonio C. Zanin. Real time optimization (RTO) with model predictive control (MPC). *Computer Aided Chemical Engineering*, 2009, vol. 27, pp. 1365–1370.
10. Danielle Dougherty, Doug Cooper. A practical multiple model adaptive strategy for single-loop MPC original research. *Control Engineering Practice*, 2003, vol. 11, issue 2, pp. 141–159.
11. Feuiillete D., Amet J. P. Introduction du SPC (Statistical process control) sur le train a bandes de Sollac Florange. *Rev. Met.*, 1988, 85, vol. 4, pp. 325–330.

12. Bolognani S., Peretti L., Zigliotto M., Bertotto E. Commissioning of electromecanical confession models for high-dynamic PMSM drives. *IEEE Trans. Ind. Electron*, vol. 57, no. 3, 2010, pp. 1925–1936.

Information about authors

Ugol'nikov Aleksandr Vladimirovich – Candidate of Engineering sciences, Associate professor, Head of the Department of Electric Engineering, Ural State Mining University. E-mail: gmf.et@m.ursmu.ru
Shchekleina Irina Leont'evna – Candidate of Engineering sciences, Associate professor, associate professor of the Department of Electric Engineering, Ural State Mining University. E-mail: gmf.et@m.ursmu.ru