

energii i upravljaemye jenergomexanicheskie sistemy: tr. III Mezhdunar. nauch.-tehn. konf. – Ekaterinburg: UGTU-UPI, 2007. – S. 77–80.

2. Mugalimov R.G., Kosmatov V.I., Mugalimova A.R. Metod i algoritm proektirovanija kompensirovannogo jenergosberegajushhego asinhronnogo dvigatelja // Sb. mat-lov V Mezhdunar. (XVI Vseros.) nauch. konf., 18–21 sentjabrja 2007 g. – SPb., 2007. – S. 281–284.

3. Mugalimov R.G., Mugalimova A.R., Mugalimova M.R. Perspektivy primenenija asinhronnyh dvigatelej s individualnoj kompensaciej reaktivnoj moshhnosti v

4. Mishyn V.I. Kaplun V.V. Chuyenko R.M. ta in. Kompensovani asynkhronni mashyny // monohrafiya. – K.: KNUTD, 2012. – 221 s.

5. Popovych O.M. Matematychna model dlya doslidzhennya rezhymiv asynkhronnykh mashyn elektromekhanotronnykh system//Tekhn. elektrodynamika. – 2010. – N 4. – S. 25 – 32.

6. Popovych O.M. Matematychna model asynkhronnoyi mashyny elektromekhanotronnoyi systemy dlya imitatsiynoho ta strukturnoho modelyuvannya // Pr. In-tu elektrodynamiky NAN Ukrayiny: Zb. nauk. prats'. – 2010. – Vyp.25. – S.89 – 97.

7. Popovych O.M., Holovan I.V. Vyznachennya parametriv zastupnoyi skhemy asynkhronnoho dvyhuna ta yikh neliniynykh zalezhnostey za rezultatamy pol'ovoho analizu// Pr. In-tu elektrodynamiky NAN Ukrayiny: Zb. nauk. prats'. – 2012. – Vyp.31. – S.38 – 48.

Стаття надійшла до редакції 23.05.2014 р.

УДК 62-529

А. В. Торопов, к.т.н., Л. В. Торопова, асп.(НТУУ «КПІ»)

**ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ
РОТОРНОГО КОЛЕСА НА БАЗЕ ПЛК С ПРИМЕНЕНИЕМ
КОНЦЕПЦИИ МЕТОДА ПИРСОНА**

A. V. Toropov, Ph.D, L. V. Toropova, postgraduate (NTUU «KPI»)

**IMPLEMENTATION OF PLC-BASED OPTIMAL CONTROL SYSTEM
OF ROTOR WHEEL MOTORS WITH THE CONCEPT OF PEARSON
METHOD**

Рассмотрена возможность реализации оптимального управления электродвигателем роторного колеса при использовании программируемых логических контроллеров. Выбран функционал качества, при котором обеспечивается высокое качество регулирования скорости и существенно упрощается процедура аналитического конструирования. Синтезирован закон оптимального управления методом динамического программирования с

использованием концепции метода Пирсона. Произведен анализ выполнения теоремы Котельникова – Шеннона при использовании программируемого логического контроллера и реализации в нем полученного закона управления.

Ключевые слова: программируемый логический контроллер, метод Пирсона, оптимальное управление, теорема Котельникова – Шеннона, функция Беллмана.

Розглянуто можливість реалізації оптимального керування електродвигуном роторного колеса при використанні програмованих логічних контролерів. Вибрано функціонал якості, при якому забезпечується висока якість регулювання швидкості і суттєво спрощується процедура аналітичного конструювання. Синтезовано закон оптимального керування методом динамічного програмування з використанням концепції методу Пірсона. Зроблено аналіз виконання теореми Котельникова - Шеннона при використанні програмованого логічного контролера і реалізації в ньому отриманого закону управління.

Ключові слова: програмований логічний контролер, метод Пірсона, оптимальне керування, теорема Котельникова - Шеннона, функція Беллмана.

The possibility of implementing the optimal control by rotor wheel motors using programmable logic controllers is considered. Functional of quality, which ensures high quality control and a greatly simplified procedure for analytical design, is selected. Optimal control law by dynamic programming method using the concept of Pearson is synthesized. The analysis of the implementation of the Kotelnikov-Shannon theorem by using a programmable logic controller and realization of obtained control law is produced.

Keywords: PLC, Pearson method, optimal control, Kotelnikov-Shannon theorem, the Bellman function.

Введение. Развитие силовой электроники привело к возможности полупроводниковых преобразователей большой мощности для управления двигателями переменного тока горнодобывающих предприятий. В то же время большинство таких преобразователей, выпускаемые ведущими фирмами-производителями предназначены для решения простейших приводных задач, например, управления насосами, вентиляторами, конвейерами горизонтальной транспортировки. При этом реализация замкнутого контура регулирования технологического процесса осуществляется с помощью программного ПИД (пропорционально-интегрально дифференциальный) – регулятора самого преобразователя частоты. Время обновления сигнала на выходе функционального блока ПИД - регулирования достаточно велико и не позволяет реализовать полноценную обратную связь по скорости вращения вала двигателя [1]. В приводах средней и большой мощностей для повышения точности регулирования скорости вала двигателя экономически допустимым является применение программируемых логических контроллеров (ПЛК) со встроенным блоком обработки частотного сигнала энкодера. Работоспособность такой системы будет осуществляться при выполнении условия теоремы Котельникова – Шеннона, при котором [2]:

$$T_0 < 1/(2\omega_m), \text{ где:} \quad (1)$$

T_0 – такт квантування корректирующего устройства, а в нашем случае программируемого логического контроллера; $\omega_{ин}$ – частота полосы пропускания непрерывной части системы.

Еще одним преимуществом предложенного подхода является то, что при программировании ПЛК инженером по автоматизации легко может быть реализован более сложный закон управления, обеспечивающий значительное улучшение качества регулирования. Так, одним из перспективных направлений в электроприводе является применение оптимальных регуляторов, синтезируемых методом динамического программирования [3]. Недостатком такого подхода является то, что при наличии существенных нелинейностей, не подлежащих линеаризации, значительно усложняется не только процедура синтеза регуляторов, а также и их программная реализация, вследствие большого числа составляющих закона управления [4].

Одним из вариантов решения существующего недостатка, в особенности при наличии ПЛК в контуре регулирования, является применение метода Пирсона, при котором осуществляется пересчет коэффициента усиления нелинейности на каждом такте квантования, а затем находятся коэффициенты оптимальной матрицы усиления для линеаризованной модели объекта [5].

Цель и задача исследования. Целью исследования является анализ возможности реализации оптимального управления двигателем на базе ПЛК с применением концепции метода Пирсона.

Результаты исследования. Структурная схема системы «преобразователь частоты – асинхронный двигатель» с внешним ПЛК имеет вид, изображенный на рис.1. При этом используется модель асинхронного двигателя на основе линеаризованной механической характеристики [6].

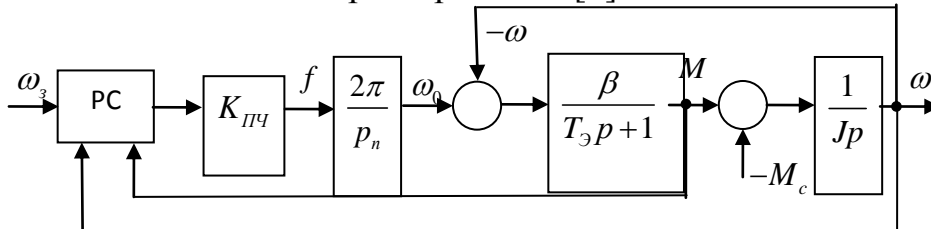


Рис.1. Структурная схема системы «преобразователь частоты – асинхронный двигатель» с внешним ПЛК.

На рис.1 введены следующие обозначения: ω , ω_s – текущее и заданное значение скорости вращения вала двигателя; J – момент инерции двигателя; M – момент двигателя; β – жесткость линеаризованной механической характеристики двигателя; T_s – электромагнитная постоянная времени; p_n – число пар полюсов двигателя; $K_{пч}$ – коэффициент преобразователя частоты; РС – регулятор скорости.

Представим математическую модель объекта в форме дифференциальных уравнений Коши:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= a_1 x_2; \\ \dot{x}_2 &= -a_2 x_1 - a_3 x_2 + b \cdot \text{sat}(\sigma), \end{aligned} \quad \text{где:} \quad (2)$$

$x_1 = \omega$; $x_2 = \varepsilon$; $a_1 = J^{-1}$; $a_2 = T_9^{-1}$; $a_3 = \beta \cdot T_9^{-1}$; $b = \beta \cdot K'_{ПЧ} \cdot T_9^{-1}$; $\text{sat}(\sigma)$ - ограничение на выходе регулятора скорости; σ - управляющее воздействие.

В виде минимизируемого функционала качества выбираем критерий обобщенной работы А.А. Красовского, отвечающего минимуму энергетических затрат на управление и минимуму динамической ошибки [7]:

$$\min_u J = \int_0^{\infty} \left[\sum_{i=1}^3 q_i x_i^2 + r \sigma^2 + \sigma_{opt}^2 \right] dt, \quad \text{где:} \quad (3)$$

q_i, r - весовые коэффициенты, определяющие ограничения на переменные состояния и управляющее воздействие; σ_{opt} - оптимальное управление.

Составляющая σ_{opt}^2 не оказывает существенного влияния на качество регулирования, однако позволяет существенно упростить процедуру синтеза оптимального регулятора и перейти от системы квадратичных уравнений Риккати к системе линейных алгебраических уравнений [8].

Далее осуществляется «мгновенная» линеаризация нелинейности типа «ограничение», при этом нелинейность заменяется прямой к коэффициентом усиления, зависящим от аргумента функции:

$$\text{sat}(\sigma) = K(\sigma) \cdot \sigma, \quad \text{где:} \quad (4)$$

$K(\sigma)$ - коэффициент мгновенной линеаризации.

Функциональное уравнение Беллмана для системы дифференциальных уравнений (2) и критерия обобщенной работы (3) с учетом выражения (4) имеет вид:

$$q_1 x_1^2 + q_2 x_2^2 + \frac{\partial S}{\partial x_1} (a_1 x_2) + \frac{\partial S}{\partial x_2} (-a_2 x_1 - a_3 x_2 + b K(\sigma) \sigma) = 0, \quad \text{где:} \quad (5)$$

S - функция Беллмана.

Реализуя процедуру поиска экстремума, получим закон оптимального управления в явном виде:

$$\sigma = \frac{-b K(\sigma)}{2r} \frac{\partial S}{\partial x_2}. \quad (6)$$

Подставляя (6) в (5) осуществляем замыкание системы и получаем модифицированное уравнение Гамильтона – Якоби – Беллмана:

$$q_1 x_1^2 + q_2 x_2^2 + \frac{\partial S}{\partial x_1} (a_1 x_2) + \frac{\partial S}{\partial x_2} (-a_2 x_1 - a_3 x_2) = 0. \quad (7)$$

Решение уравнения ищется в виде квадратичной формы:

$$S = \frac{1}{2} \sum_{ij=1}^2 K_{ij} x_i x_j \quad (8)$$

Подставляя (8) в (7) и, приравнявая коэффициенты при одинаковых степенях переменных состояния, получим систему линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{aligned}
 \alpha_1 - a_2 K_{12} &= 0; \\
 \alpha_2 + a_1 K_{12} - a_3 K_{22} &= 0; \\
 a_1 K_{11} - a_2 K_{22} - a_3 K_{12} &= 0.
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

В явном виде выражения для коэффициентов функции Беллмана запишутся:

$$\begin{aligned}
 K_{12} &= \frac{\alpha_1}{a_2}; \\
 K_{22} &= \frac{\alpha_2 + a_1 K_{12}}{a_3}; \\
 K_{11} &= \frac{a_2 K_{22} + a_3 K_{12}}{a_1}.
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

Закон управления, пересчитываемый в каждом цикле ПЛК, имеет вид:

$$\sigma = \frac{-bK(\sigma)}{2r} \left(\frac{\alpha_1}{a_2} x_1 + \frac{\alpha_2 + a_1 \cdot \alpha_1 / a_2}{a_3} x_2 \right).
 \tag{11}$$

Помимо этого, в ПЛК реализуется задатчик необходимого профиля движения относительно которого осуществляется вычисление заданных значений переменных x_1 , x_2 , реализованный в едином функциональном блоке.

При применении контроллеров с быстродействующей периферией, например, DRIVE PLC производства компании Lenze расчет и передача управляющего сигнала не превысит 1мс (минимальный цикл ПЛК) [9].

В то же время для двигателей большой мощности, например 500кВт, при частоте полосы пропускания равной 1 рад/с и более требование теоремы Котельникова – Шеннона выполняется с запасом.

Выводы

В работе предложен подход по реализации систем управления электродвигателем роторного колеса, обеспечивающих повышенную точность стабилизации выходных координат. Стоимость предложенной схемы электропривода не требует больших финансовых затрат и может быть реализована на базе общепромышленного программируемого логического контроллера. Вычислительная мощность контроллера должна обеспечивать возможность пересчета коэффициентов регулятора в зависимости от «мгновенного» коэффициента усиления разомкнутой системы. Дальнейшее развитие предложенного подхода возможно за счет использования квадратичного функционала качества и решения в контроллере задачи нахождения матрицы Риккати, позволяющих получить более точное решение задачи оптимального управления.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Medium Voltage Variable Frequency Drives MVW-01. [Elektronyy resurs]. – Rezhym dostupu: <http://www.weg.net/uk/Products-Services/Drives/Variable-Frequency-Drives/Medium-Voltage-Variable-Frequency-Drives-MVW-01>.
2. Gostev V. I. Sistemy upravlenija s cifrovymi reguljatorami: Spravochnik. - K.: Tehnika, 1990.—280 s.
3. Ju. Tu. Sovremennaja teorija upravlenija. – M.:Mashinostroenie, 1971. – 472s.
4. Kudin V.F., Toropov A.V. Sintez nelinejnogo suboptimal'nogo reguljatora sledjashhego jelektroprivoda s sinhronnym dvigatelem// Tehnichna elektrodinamika, 2006. №1. –s.45-48.
5. Pearson J. D. Approximation Methods in optimal control. Sub-optimal control. // J.Electronics and control. Vol. 13, No20, 1962. - R. 453-467.
6. Obobshhennaja jelektromehaničeskaja sistema s linearizovannoju mehanicheskoju harakteristikoju. [Elektronyy resurs]. – Rezhym dostupu: http://servomotors.ru/documentation/open-loop_system/7.html
7. Spravochnik po teorii avtomatičeskogo upravlenija / pod red. A. A. Krasovskogo. M. : Nauka. Gl.red. fiz.-mat. lit-ry, 1987.- 712 s.
8. Letov A.M. Dinamika poleta i upravlenie/A. M. Letov. - M. : Nauka, 1969. – 359s.
9. Programmable logical controller Lenze Drive PLC, Access mode. [Elektronyy resurs]. – Rezhym dostupu: http://www.lenze.org.ua/?inc=inverters/01_inv/01i_Drive_PLC

Статья поступила в редакцию 21.05.2014 г.

УДК 620.91: 697.7

Е. С. Шипика, магистр (ДонНТУ), Е. Л. Завьялова к.т.н., доц. (ДонНТУ)

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ
ДЛЯ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ КОММУНАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ**

H. S. Shipika, undergraduate (DonNTU), H. L. Zavialova Ph.D, assoc. prof. (DonNTU)

**IMPROVING THE TECHNOLOGY OF GEOTHERMAL ENERGY FOR
HEATING UTILITY PROJECTS**

Запропоновано спосіб використання геотермальної енергії для теплопостачання комунальних об'єктів в умовах Донбасу, в якому за рахунок розміщення ґрунтового колектора всередині шару суміші, теплопровідність якої вище, ніж теплопровідність