

6. Solovey O. I. Netraditsiyni ta ponovlyuvalni dzherela energii / O. I. Solovey, Yu. G. Lega, V. P. Rozen, O. O. Sitnik, A. V. Chernyavsky, G. V. Kurbasa / for zag. Ed. O. I. Solovey. - Cherkasy: Species. Cherkassy State Technological University, 2007. - 484 p.

Стаття надійшла до редакції 16.07.2014 р.

УДК 62-529

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

ОПТИМИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОНИЗИРОВАННЫМ ВЕНТИЛЬНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ ШАХТНОЙ ПОДЪЕМНОЙ УСТАНОВКИ МЕТОДОМ БЕЛЛМАНА – ЛЯПУНОВА

A. V. Toropov, L. V. Toropova (National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»)

CONTROL OPTIMIZATION FOR ASYNCHRONIZED SWITCHED MOTOR OF MINE HOIST PLANT USING BELLMAN – LYAPUNOV METHOD

В статье рассматривается задача синтеза нелинейного регулятора скорости асинхронизированного вентильного двигателя. Для нахождения оптимального закона управления, использован метод Беллмана - Ляпунова с использованием концепции метода «погружения». Осуществлено моделирование и произведен сравнительный анализ электропривода со стандартным ПИ - регулятором, а также с синтезированным оптимальным регулятором.

Ключевые слова: асинхронизированный вентильный двигатель, оптимизация управления, шахтная подъемная установка, метод Беллмана – Ляпунова, минимизация динамической ошибки.

У статті розглядається задача синтезу нелінійного регулятора швидкості асинхронізованого вентильного двигуна. Для знаходження оптимального закону управління, використаний метод Беллмана - Ляпунова з використанням концепції методу «занурення». Здійснено моделювання та зроблений порівняльний аналіз електропривода зі стандартним ПІ - регулятором, а також з синтезованим оптимальним регулятором.

Ключові слова: асинхронізований вентильний двигун, оптимізація управління, шахтна підйомна установка, метод Беллмана – Ляпунова, мінімізація динамічної помилки.

The problem of synthesis of nonlinear speed controller asynchronous switched motor is considered. To find the optimal control law by, the method of Bellman - Lyapunov by concept of "immersion" is used. Modeling and comparative analysis of the system with the standard PI - controller, as well as the synthesized regulators are made.

Keywords: Asynchronous switched motor, optimization of control, mine hoist plant, Bellman - Lyapunov method, minimizing the dynamic error

Введение. В настоящее время электропривода шахтных подъемных установок (ШПУ) Украины устарели и являются крайне неэффективными как с точки зрения энергосбережения, так и качества регулировочных характеристик. Для сверхбольших мощностей свыше 1МВт эксплуатируются машины постоянного тока, управляемые от тиристорных преобразователей, а для мощностей от 500кВт до 1МВт находят применение асинхронные двигатели с фазным ротором (АДФР) с регулированием скорости за счет добавочного сопротивления ротора [1,2]. Именно для таких шахтных подъемных установок и возникла задача модернизации, отказа от реостатных систем регулирования и перехода к системам электропривода на базе тиристорных и IGBT-транзисторов. Первым шагом стал перевод АДФР в режим машины двойного питания для рекуперации энергии скольжения обратно в электросеть. При этом обмотки статора подключались напрямую к сети, а обмотки ротора – через неуправляемый выпрямитель и тиристорный инвертор [3].

Следующим шагом, в связи с общим удешевлением полупроводниковых комплектующих, стало использование двух преобразователей частоты со стороны статора и ротора. Преобразователь со стороны статора формирует низкочастотное поле возбуждения, а другой преобразователь управляет током ротора и, следовательно, и моментом асинхронного электродвигателя. При этом скорость вращения вала электрической машины определяется разностью частот вращения полей статора и ротора и не зависит от нагрузки. АДФР, работающий от двух преобразователей частоты в таком режиме, получил название асинхронизированного вентильного двигателя (АВД) [4].

Особенностью и существенным недостатком такой системы электропривода является то, что преобразователь частоты со стороны статора формирует поток возбуждения и ограничивает моментобразующую составляющую тока ротора ниже номинального значения. Это приводит к появлению существенной нелинейности в контуре регулирования момента электродвигателя. В старых системах управления задача компенсации влияния нелинейности решалась адаптацией токового контура. Однако, такие системы управления не обеспечивали высокого быстродействия токового контура, что приводило к колебаниям момента электродвигателя и необходимости затягивания времени разгона и торможения [5]. Таким образом, решение задачи синтеза регулятора, обеспечивающего высокое быстродействие системы электропривода шахтной подъемной установки на базе АВД, является актуальной.

Целью работы является синтез системы управления асинхронизированным вентильным двигателем, обеспечивающей минимум динамической ошибки при регулировании и минимум энергетических затрат на управление.

Результаты исследования. Одним из подходов для синтеза регулятора с учетом существенных нелинейностей в контуре регулирования является применение метода Беллмана – Ляпунова. При этом решается задача

находження некоторого оптимального решения, обеспечивающего достижения минимума функционала качества. Для электроприводов подъемных установок таким критерием качества является минимум энергетических потерь на управление при условии достижения минимума динамической ошибки по координатам привода [6]. Сразу следует отметить, что при построении системы подчиненного регулирования используется стандартный ПИ – регулятор моментобразующей составляющей тока ротора. Необходимый характер переходного процесса обеспечивается дополнительными составляющими регулятора скорости, синтезируемого методом Беллмана – Ляпунова. С учетом этих факторов структурная схема системы управления асинхронизированным вентильным двигателем имеет вид, изображенный на рис. 1.

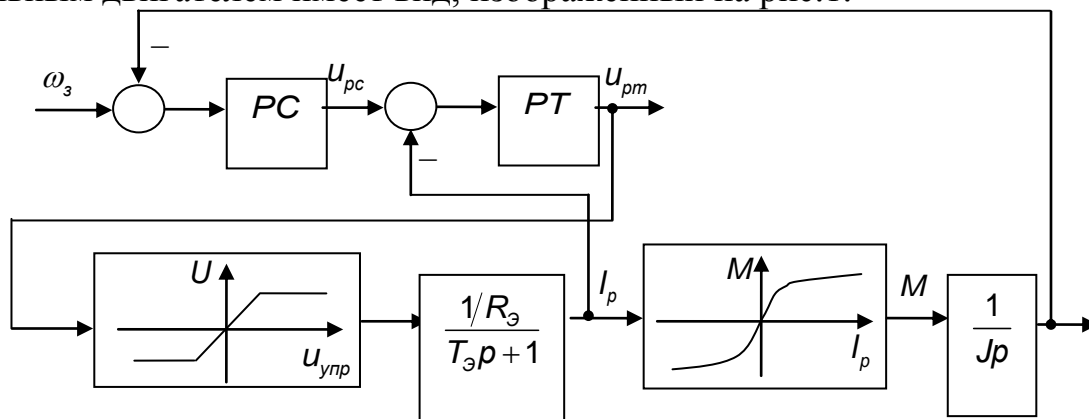


Рис. 1. Структурная схема системы управления асинхронизированным вентильным двигателем с постоянной составляющей поля возбуждения:

PC - регулятор скорости; PT - регулятор тока; I_p - ток ротора; R_ε - эквивалентное сопротивление ротора; T_ε - постоянная времени обмоток ротора.

Нелинейная зависимость $U(u_{нр})$ определяет ограничение на выходе преобразователя частоты, а $M(I_\varepsilon)$ - нелинейную зависимость момента от тока ротора.

Метод Беллмана – Ляпунова обладает высокой вычислительной эффективностью и позволяет одновременно решить обратную задачу динамики и исследовать устойчивость синтезированной системы. Наличие двух нелинейностей для системы объекта третьего порядка существенно усложняет процедуру синтеза. При неудачном выборе допустимых ограничений на переменные состояния процедура коррекции регулятора под изменяющиеся параметры объекта будет крайне затруднительно и, фактически, после определенного периода эксплуатации, потребуется заново провести перерасчет параметров регулятора. Поэтому решим задачу синтеза оптимального регулятора методом Беллмана – Ляпунова с использованием концепции метода «погружения». При этом задача синтеза оптимального регулятора исходной нелинейной системы раскладывается на несколько линейных задач. В работах [7,8] для нелинейностей типа «ограничение» предлагается разделение фазового

пространства на две области. Запишем модель исследуемого объекта в виде системы дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned}\dot{\omega} &= \frac{1}{J}(M - M_c); M = f_1(I_p); \dot{I}_p = -\frac{1}{T_p}I_p + \frac{R_{\text{э}}}{T_{\text{э}}}U; \\ U &= f_2(u_{pm}); u_{pm} = (K_{pm} + \frac{1}{T_{pm}p})(u_{pc} - I_p).\end{aligned}\quad (1)$$

Осуществим мгновенную линеаризацию нелинейных зависимостей методом «секущих». При этом нелинейные зависимости $M = f_1(I_p)$ и $U = f_2(u_{pm})$ заменяются прямыми, коэффициент которых является функцией аргумента $M = K_1(I_p) \cdot I_p$, $U = K_2(u_{pm}) \cdot u_{pm}$. Система дифференциальных уравнений переписывается в виде:

$$\begin{aligned}\dot{\omega} &= \frac{1}{J}(M - M_c); M = K_1(I_p) \cdot I_p; \dot{I}_p = -\frac{1}{T_p}I_p + \frac{R_{\text{э}}}{T_{\text{э}}}U; \\ U &= K_2(u_{pm}) \cdot u_{pm}; u_{pm} = (K_{pm} + \frac{1}{T_{pm}p})(u_{pc} - I_p).\end{aligned}\quad (2)$$

Сведем полученную систему дифференциальных уравнений к нормальной форме Коши и преобразуем последнее уравнение к следующему виду:

$$\dot{u}_{pm} = K_{pm}p u_{pc} + \frac{1}{T_{pm}}u_{pc} - K_{pm}(-\frac{1}{T_p}I_p + \frac{R_{\text{э}}}{T_{\text{э}}}K_2(u_{pm}) \cdot u_{pm}) - \frac{1}{T_{pm}}I_p.\quad (3)$$

Слагаемое pu_{pc} является производной от управляющего воздействия на выходе регулятора скорости и не позволяет записать уравнение в нормальной форме Коши. Осуществим замену этой переменной новой переменной управления, например u_{op} , получим:

$$\dot{u}_{pc} = u_{op}.\quad (4)$$

С учетом получено выражения запишем систему линеаризованных дифференциальных уравнений в нормальной форме Коши:

$$\begin{aligned}\dot{\omega} &= \frac{1}{J}(K_1(I_p) \cdot I_p - M_c); \dot{I}_p = -\frac{1}{T_p}I_p + \frac{R_{\text{э}}}{T_{\text{э}}}K_2(u_{pm}) \cdot u_{pm}; \\ \dot{u}_{pm} &= K_{pm}u_{op} + \frac{1}{T_{pm}}u_{pc} - K_{pm}(-\frac{1}{T_p}I_p + \frac{R_{\text{э}}}{T_{\text{э}}}K_2(u_{pm}) \cdot u_{pm}) - \frac{1}{T_{pm}}I_p; \dot{u}_{pc} = u_{op}.\end{aligned}\quad (5)$$

Для полученного объекта с учетом новой управляющей переменной ω , I_p , u_{pm} , u_{pc} - являются регулируемыми координатами, а u_{op} - управляющим воздействием.

Для обеспечения наилучшего управления с точки зрения обеспечения решения обратной задачи динамики обеспечим в течение всего процесса регулирования функционал качества:

$$\min_{u_{op}} \int_0^{\infty} (q_1 \omega^2 + q_2 I_p^2 + q_3 u_{pm}^2 + q_4 u_{pc}^2 + ru_{op}^2) \rightarrow 0.\quad (6)$$

Данный функционал качества обеспечивает минимум динамической ошибки по координатам объекта и минимум энергетических затрат на управляющее воздействие. Осуществим переход от переменных, описывающих координаты привода к переменным состояния, получим: $x_1 = \omega$, $x_2 = I_p$, $x_3 = u_{pm}$, $x_4 = u_{pc}$, $u = u_{op}$. Для полученной системы линеаризованных дифференциальных уравнений и выбранного функционала качества запишем функциональное уравнение Беллмана:

$$\begin{aligned} \min_{u_{op}} [q_1 x_1^2 + q_2 x_2^2 + q_3 x_3^2 + q_4 x_4^2 + ru^2 + \frac{\partial S}{\partial x_1} (\frac{1}{J} K_1(x_2) \cdot x_2) + \\ + \frac{\partial S}{\partial x_2} (-\frac{1}{T_\Omega} x_2 + \frac{R_\Omega}{T_\Omega} K_2(u_{pm}) \cdot x_3) + \\ + \frac{\partial S}{\partial x_3} (K_{pm} u + \frac{1}{T_{pm}} x_4 - K_{pm} (-\frac{1}{T_\Omega} x_2 + \frac{R_\Omega}{T_\Omega} K_2(x_3) \cdot x_3) - \frac{1}{T_{pm}} x_2) + \frac{\partial S}{\partial x_4} u]. \end{aligned} \quad (7)$$

Запишем управляющее воздействие в явном виде:

$$u = -\frac{1}{2r} \left(\frac{\partial S}{\partial x_3} \cdot K_{pm} + \frac{\partial S}{\partial x_4} \right). \quad (8)$$

Осуществим замыкание системы по управляющему воздействию, получим уравнение Гамильтона – Якоби – Беллмана в явном виде:

$$\begin{aligned} q_1 x_1^2 + q_2 x_2^2 + q_3 x_3^2 + q_4 x_4^2 + ru^2 + \frac{1}{J} K_1(x_2) \frac{\partial S}{\partial x_1} x_2 - \frac{1}{T_\Omega} \frac{\partial S}{\partial x_2} x_2 + \frac{R_\Omega}{T_\Omega} K_2(x_3) \frac{\partial S}{\partial x_2} x_3 - \\ - \frac{K_{pm}^2}{2r} \left(\frac{\partial S}{\partial x_3} \right)^2 + \left(\frac{K_{pm}}{2rT_{pm}} - \frac{1}{T_\Omega} \frac{K_{pm}^2}{2r} \right) \frac{\partial S}{\partial x_3} x_2 + \frac{K_{pm} R_\Omega}{2r T_\Omega} K_2(x_3) \frac{\partial S}{\partial x_3} x_3 + \\ + \frac{K_{pm}}{2rT_{pm}} \frac{\partial S}{\partial x_3} x_4 - \frac{K_{pm}}{r} \frac{\partial S}{\partial x_4} \frac{\partial S}{\partial x_3} - \frac{1}{2r} \left(\frac{\partial S}{\partial x_4} \right)^2 = 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Решение уравнения будем искать в виде квадратичной формы для функции Беллмана S . При этом осуществим решение в отдельности для областей фазового пространства при малых отклонениях переменных состояния и при больших отклонениях. Область малых отклонений будет условно называть областью «в малом», а больших отклонений – «в большом». Коэффициенты «мгновенной» линеаризации для этих областей запишутся K_{1M} , K_{2M} , $K_{1Б}$, $K_{2Б}$.

Подставляя S в полученные уравнения для различных областей фазового пространства и, выделяя коэффициенты при одинаковых степенях, получим систему уравнений Риккати [9]. Управляющее воздействие после определения коэффициентов K_j запишется:

$$u_M = -\left(\frac{K_{pm} K_{13} + K_{14}}{r}\right) x_1 - \left(\frac{K_{pm} K_{23} + K_{24}}{r}\right) x_2 - \left(\frac{K_{pm} K_{33} + K_{34}}{r}\right) x_3 - \left(\frac{K_{pm} K_{34} + K_{44}}{r}\right) x_4; \quad (10)$$

$$u_B = -\left(\frac{K_{pm} K'_{13} + K'_{14}}{r}\right) x_1 - \left(\frac{K_{pm} K'_{23} + K'_{24}}{r}\right) x_2 - \left(\frac{K_{pm} K'_{33} + K'_{34}}{r}\right) x_3 - \left(\frac{K_{pm} K'_{34} + K'_{44}}{r}\right) x_4. \quad (11)$$

Полагаем новыми управлениями вариации коэффициентов регулятора, то есть $u_b = u_M + \Delta u$. В этом уравнении вариация управления имеет вид:

$$\Delta u = -\Delta K_1 x_1 - \Delta K_2 x_2 - \Delta K_3 x_3 - \Delta K_4 x_4. \quad (12)$$

Функционал качества выберем в виде модифицированного квадратичного критерия минимум динамической ошибки с учетом ограничения на управляющее воздействие. Этот критерий качества при этом совпадает с критерием обобщенной работы Красовского [10]:

$$\int_0^{\infty} \left(\sum_{i=1}^4 (q_i x_i^2 + r_i \Delta K_i^2 + \Delta K_{iоп}^2) \right) \rightarrow \min, \text{ где } i = \overline{1,4}. \quad (13)$$

Функциональное уравнение Беллмана с учетом введения новых вариаций управления запишется:

$$\begin{aligned} \min_{\Delta K_i} [& q_1 x_1^2 + q_2 x_2^2 + q_3 x_3^2 + q_4 x_4^2 + r_1 \Delta K_1^2 + r_2 \Delta K_2^2 + r_3 \Delta K_3^2 + r_4 \Delta K_4^2 + \Delta K_{1оп}^2 + \\ & + \Delta K_{2оп}^2 + \Delta K_{3оп}^2 + \Delta K_{4оп}^2 + \frac{1}{J} K_{1б} \frac{\partial S'}{\partial x_1} x_2 + \\ & + \frac{\partial S'}{\partial x_2} \left(-\frac{1}{T_3} x_2 + \frac{R_3}{T_3} K_{2б} x_3 \right) + \frac{\partial S'}{\partial x_3} (K_{рм} (u_M - \Delta K_1 x_1 - \Delta K_2 x_2 - \Delta K_3 x_3 - \Delta K_4 x_4) + \\ & + \frac{1}{T_{рм}} x_4 - K_{рм} \left(-\frac{1}{T_3} x_2 + \frac{R_3}{T_3} K_{2б} x_3 \right) - \frac{1}{T_{рм}} x_2) + \\ & + \frac{\partial S'}{\partial x_4} (u_M - \Delta K_1 x_1 - \Delta K_2 x_2 - \Delta K_3 x_3 - \Delta K_4 x_4)] = 0. \end{aligned} \quad (14)$$

Реализуем процедуру экстремизации каждого из новых управлений, после чего запишем управляющие воздействия в явном виде:

$$\Delta K_i = \frac{1}{2r_i} \left(K_{рм} \frac{\partial S}{\partial x_3} x_i + \frac{\partial S}{\partial x_4} x_i \right), \text{ где } i = \overline{1,4}. \quad (15)$$

Подставляем полученные управления (15) в (14), получаем модифицированное уравнение Гамильтона – Якоби – Беллмана:

$$\begin{aligned} q_1 x_1^2 + q_2 x_2^2 + q_3 x_3^2 + q_4 x_4^2 + \frac{1}{J} K_{1б} \frac{\partial S'}{\partial x_1} x_2 + \frac{\partial S'}{\partial x_2} \left(-\frac{1}{T_3} x_2 + \frac{R_3}{T_3} K_{2б} x_3 \right) + \\ + \frac{\partial S'}{\partial x_3} \left(\frac{1}{T_{рм}} x_4 - K_{рм} \left(-\frac{1}{T_3} x_2 + \frac{R_3}{T_3} K_{2б} x_3 \right) - \frac{1}{T_{рм}} x_2 \right) - \\ - ((K_1 x_1 + K_2 x_2 + K_3 x_3 + K_4 x_4) \left(K_{рм} \frac{\partial S'}{\partial x_3} + \frac{\partial S'}{\partial x_4} \right)) = 0. \end{aligned} \quad (16)$$

Решение этого уравнения ищется в виде квадратичной формы, при этом поиск решения сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений. Принимаем функцию Беллмана в виде квадратичной формы. Проводим процедуру экстремизации и подставляем полученные выражения в модифицированное уравнение Гамильтона – Якоби – Беллмана:

$$\begin{aligned}
 & q_1 x_1^2 + q_2 x_2^2 + q_3 x_3^2 + q_4 x_4^2 + \frac{1}{J} K_{15} (2M_{11} x_1 + 2M_{12} x_2 + 2M_{13} x_3 + 2M_{14} x_4) x_2 + \\
 & + (2M_{12} x_1 + 2M_{22} x_2 + 2M_{23} x_3 + 2M_{24} x_4) \left(-\frac{1}{T_3} x_2 + \frac{R_3}{T_3} K_{25} x_3 \right) + \\
 & + (2M_{13} x_1 + 2M_{23} x_2 + 2M_{33} x_3 + 2M_{34} x_4) \left(\frac{1}{T_{pm}} x_4 - K_{pm} \left(-\frac{1}{T_3} x_2 + \frac{R_3}{T_3} K_{25} x_3 \right) - \right. \\
 & \left. - \frac{1}{T_{pm}} x_2 \right) - ((K_1 x_1 + K_2 x_2 + K_3 x_3 + K_4 x_4) (K_{pm} (2M_{13} x_1 + 2M_{23} x_2 + 2M_{33} x_3 + \\
 & + 2M_{34} x_4) + (2M_{14} x_1 + 2M_{24} x_2 + 2M_{34} x_3 + 2M_{44} x_4))) = 0.
 \end{aligned} \quad (17)$$

Собираем коэффициенты перед одинаковыми степенями $x_i x_j$ и получим систему алгебраических уравнений. Решая ее, находим коэффициенты M_{ij} , подставляем их в уравнение регулятора скорости АД и получим:

$$u = -K_1 x_1 - K_2 x_2 - K_3 x_3 - K_4 x_4 - \left(\frac{1}{r_1} x_1^2 + \frac{1}{r_2} x_2^2 + \frac{1}{r_3} x_3^2 + \frac{1}{r_4} x_4^2 \right). \quad (18)$$

$$\cdot (K_{pm} M_{13} x_1 + K_{pm} M_{23} x_2 + K_{pm} M_{33} x_3 + K_{pm} M_{34} x_4 + M_{14} x_1 + M_{24} x_2 + M_{34} x_3 + M_{44} x_4).$$

Полученный алгоритм управления содержит составляющие x_1, x_2, x_3, x_4 , являющиеся переменными состояниями исследуемого объекта и физически определяют отклонение выходных переменных от заданных значений. Реализация полученного алгоритма управления возможна за счет реализации задатчика интенсивности четвертого порядка. При этом для электропривода шахтной подъемной установки, работающего в режиме стабилизации скорости, обеспечивается ограничение скорости, ускорения и рывка.

Исследование переходных процессов с синтезированным регулятором удобно проводить методом цифрового моделирования с помощью программного обеспечения MATLAB и его приложения Simulink. При использовании внутреннего ПИ – регулятора скорости имеется перерегулирование по выходной координате порядка 20%. Снижение величины перерегулирования возможно за счет уменьшения пропорциональной составляющей, однако это приведет к существенному затягиванию переходного процесса. В случае использования нелинейного регулятора перерегулирование не превышает 2,5%, а время регулирования уменьшается вдвое.

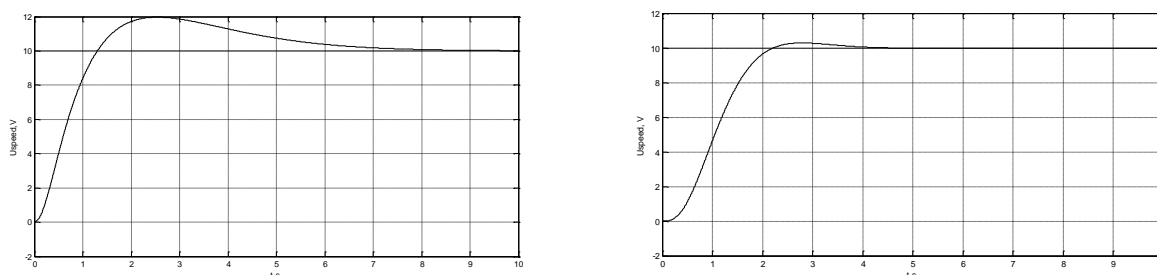


Рис. 2. График изменения выходной скорости редуктора при пуске асинхронизированного вентильного двигателя при использовании ПИ – регулятора (слева) и синтезированного нелинейного регулятора (справа).

Выводы

Применение метода Беллмана – Ляпунова с использованием концепции метода «погружения» позволяет решить задачу аналитического конструирования для системы электропривода с несколькими существенными нелинейностями. Дальнейшее развитие метода оптимизации работы ШПУ с асинхронизированными вентильными двигателями возможно за счет учета нелинейностей и инерционности исполнительного механизма.

Список использованных источников

1. Киричок Ю.Г., Чермалых В.М. Привод шахтных подъемных установок большой мощности. – М.: Недра, 1972. – 336 с.
2. Чермалых В.М., Родькин Д.И., Каневский В.В. Системы электропривода и автоматики рудничных стационарных машин и установок. – М.: Недра, 1976. – 398с.
3. Гальперин И.Я., Бежок В.Р. Модернизация электропривода и автоматизация шахтных подъемных установок. – М.: Недра, 1984. – 220 с.
4. Сонин Ю.П. Асинхронизированный вентильный двигатель / Ю.П. Сонин, И.В. Гуляев. - Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 1998. – 68 с.
5. Poddar G. Direct torque and frequency control of double-inverter-fed slip-ring induction motor drive / G.Poddar, V.T.Ranganatham//IEEE Transactions on industrial electronics. - 2004, vol.51, NO.6. – p.1329-1337.
6. Беллман Р. Методы вычислений: Избранные главы //Автоматика и телемеханика, 1993, №8, с.3-39, №9, с.3-51, №10, с.3-43.
7. Kudin V.F., Kolacny J. Synthesis of suboptimal nonlinear regulator by immersion method. //J. Electrical engineering. - Bratislava, Slovakia , 1998, Vol.49, NO 1-2, pp 11-15.
8. Кудин В.Ф. Инвариантное нелинейное управление электроприводом подачи системы стабилизации усилия резания металлорежущего станка по методу Айзекса – Беллмана //В.Ф.Кудин, А.В. Торопов // Технічна електродинаміка, - 2007. - №1 – с.35-39.
9. Летов А.М. Динамика полета и управление - М. : Наука, 1969. – 359с.
10. Справочник по теории автоматического управления / под ред. А. А. Красовского. - М. : Наука. Гл.ред. физ.-мат. лит-ры, 1987.- 712 с.

Статья поступила в редакцию 03.11.2014 г.