

РОЗДІЛ «ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА. ЕЛЕКТРОТЕХНІКА»

УДК 62-83:621.771

САДОВОЙ А.В., д.т.н., професор
НАЗАРОВА Е.С.*, к.т.н., ст. преподаватель

Днепродзержинский государственный технический университет
*Запорожский национальный технический университет

СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ НАТЯЖЕНИЕМ КОНВЕЙЕРНОЙ ЛЕНТЫ

Введение. В ближайшей перспективе уголь останется основным отечественным топливно-энергетическим сырьем, гарантирующим энергетическую безопасность и экономическую независимость Украины, так как в выработке электроэнергии доля угля составляет 30%. В угольной отрасли в настоящее время имеется около 80 перспективных шахт с общей годовой производительностью около 85 млн. тонн. На этих шахтах сосредоточены основные запасы угля с благоприятными горно-геологическими условиями залегания пластов, поэтому повышение эффективности добычи угля является первостепенной отраслевой задачей [1].

По мере роста требований к динамическим и статическим показателям электромеханических систем (ЭМС), которые обеспечивают протекание сложных технологических процессов, все более существенным оказывается влияние различного рода дестабилизирующих факторов, обусловленных нелинейными характеристиками электрических машин, ограниченной жесткостью элементов кинематических цепей, влиянием окружающей среды и сложной природы технологических процессов на структуру и параметры электромеханических объектов управления [2].

Постановка задачи. Одним из наиболее распространенных факторов, влияющих на динамические характеристики электропривода, является наличие упругих кинематических передач между исполнительными механизмами и приводными двигателями, а также упругих связей между самими механизмами. К таким ЭМС относятся роторные экскаваторы, у которых редуктор привода навешен на вал рабочего органа, электродвигатель установлен на кронштейне редуктора, а хвостовик редуктора упруго подвешен к роторной стреле [3], а также ленточные конвейеры большой протяженности. К основным требованиям, предъявляемым к электроприводу конвейеров, относятся: ограничение динамических натяжений ленты, отсутствие пробуксовки ленты, при протяженных конвейерах с многодвигательными электроприводами необходимо также создание систем управления отдельными двигателями для перераспределения нагрузки между ними и обеспечения равномерности натяжения ленты по всей длине [4].

В связи с этим актуальным является решение научно-прикладной задачи повышения срока службы ленты конвейера путем оптимизации системы управления натяжением конвейерной ленты.

Результаты работы. Наиболее дорогим элементом ленточного конвейера является лента, поэтому при рассмотрении работы ленточных конвейеров необходимо обеспечить нормальную работу конвейерной ленты без сбегания её с барабанов и роликов, без задевания об опорные конструкции и без пробуксовки на барабанах.

В связи с указанными требованиями возникает необходимость управления натяжением ленты в зависимости от скорости вращения барабана смежного электропривода. Объектом управления является электропривод барабана. Кинематическая схема электропривода барабана конвейера с учетом взаимосвязи со смежным электроприводом через конвейерную ленту приведена на рис.1, где M_1 – приводной двигатель; ω_1, ω_2 – угловые скорости торцов шпинделя; φ_1, φ_2 – углы закручивания торцов шпинделя; ω_3 – угловая скорость барабана смежного электропривода; J_1 – момент инерции

ротора двигателя М1 и редуктора; J_2 – момент инерции барабана конвейера; M_{f1} , M_{f2} – моменты внешнего трения; M_{12} – упругий момент; C_{12} – жесткость упругого элемента «длинный вал»; C_{23} – жесткость конвейерной ленты; b_{12} – коэффициент внутреннего демпфирования; F_L – сила натяжения конвейерной ленты; L – расстояние между осями вращающихся механизмов; i_p – передаточное число редуктора; R_2 – радиус барабана конвейера; R_3 – радиус барабана смежного электропривода.

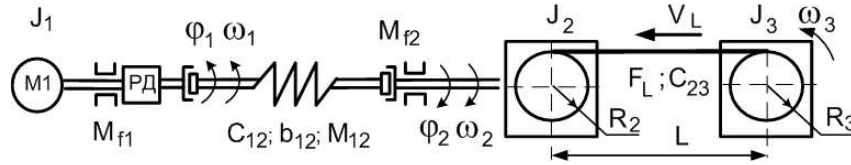


Рисунок 1 – Кинематическая схема электропривода барабана конвейера с лентой и смежным электроприводом

При составлении уравнений динамики двухмассовой системы с упругими связями первого рода принято, что демпфирование свободных колебаний осуществляется за счет сил внешнего вязкого трения, которые в первом приближении пропорциональны скоростям соответствующих масс.

Структурная схема взаимосвязанных электроприводов конвейера с упругими связями первого и второго рода, составленная на основании кинематической схемы, приведена на рис.2.

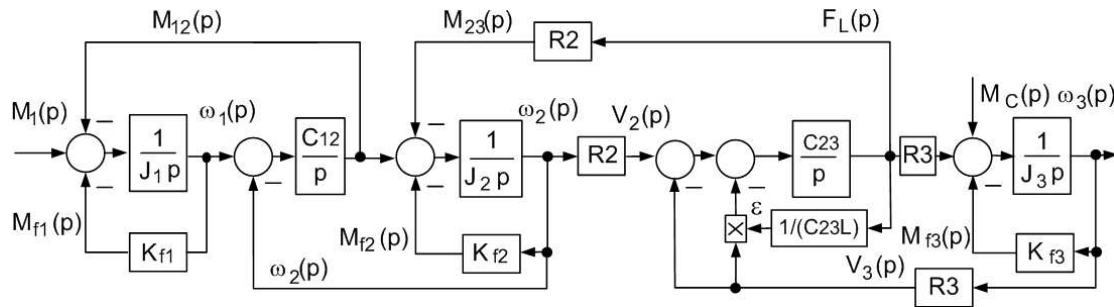


Рисунок 2 – Структурная схема взаимосвязанных электроприводов конвейера с упругими связями первого и второго рода

В соответствии с приведенной структурной схемой система уравнений динамики объекта управления в поэлементной форме имеет вид [4]:

$$\left\{ \begin{array}{l} pF_L = C_{23}R_2\omega_2 - C_{23}R_3\omega_3 - \frac{F_LR_3\omega_3}{L}; \\ p\omega_2 = \frac{1}{J_2}M_{12} + \frac{b_{12}(\omega_1 - \omega_2)}{J_2} - \frac{F_LR_2}{J_2} - \frac{k_{f2}\omega_2}{J_2}; \\ pM_{12} = C_{12}(\omega_1 - \omega_2); \\ p\omega_1 = \frac{1}{J_1 i_p} M_1 - \frac{1}{J_1} M_{12} - \frac{k_{f1}\omega_1}{J_1}; \\ pM_1 = \frac{C\Phi}{R_1 T_1} U_{d1} - \frac{1}{T_1} M_1 - \frac{(C\Phi)^2}{R_1 T_1 i_p} \omega_1; \\ pU_1 = \frac{k_B}{T_\mu} U_y - \frac{1}{T_\mu} U_1. \end{array} \right. \quad (1)$$

где k_B, T_μ – коэффициент усиления и постоянная времени управляемого преобразователя; U_1, U_y – напряжения на выходе и входе управляемого преобразователя питания двигателя М1.

Для облегчения обобщенного исследования упругодиссипативного объекта управления целесообразно осуществить направленное нормирование системы (1). В качестве базовых переменных приняты U_{\max} – максимальное напряжение управления преобразователем; ω_{\max} – скорость идеального холостого хода двигателя; M_{\max} – момент короткого замыкания двигателя при напряжении U_{\max} ; F_{\max} – технологически максимально допустимое натяжение ленты,

$$\omega_{\max} = \frac{U_{\max}}{C\Phi} i_p; M_{\max} = C\Phi \frac{U_{\max}}{R_d}; U_{\max} = k_B \cdot U_{y_{\max}}.$$

Тогда система уравнений (1) преобразуется к виду

$$p y_i = \sum_{k=1}^6 a_{ik} y_k + C + m_6 u, (i=1, \dots, 6), \quad (2)$$

где C – некоторая постоянная величина, которая для системы уравнений реального и желаемого движения имеет одинаковое значение;

$$\begin{aligned} y_1 &= \frac{F_c}{F_{\max}}; y_2 = \frac{\omega_2}{\omega_{\max}}; y_3 = \frac{M_{12}}{M_{\max}}; y_4 = \frac{\omega_1}{\omega_{\max}}; y_5 = \frac{M_1}{M_{\max}}; y_6 = \frac{U_1}{U_{\max}}; \\ a_{11} &= -\frac{R_3 \omega_3}{L}; a_{12} = C_{23} R_1 \frac{\omega_{\max}}{F_{\max}}; a_{21} = -\frac{R_2 F_{\max}}{J_2 \omega_{\max}}; a_{22} = -\left(\frac{b_{12}}{J_2} + \frac{k_{f2}}{J_2}\right); \\ a_{23} &= \frac{M_{\max}}{J_2 \omega_{\max}}; a_{24} = \frac{b_{12}}{J_2}; a_{32} = -\frac{C_{12} \omega_{\max}}{M_{\max}}; a_{34} = \frac{C_{12} \omega_{\max}}{M_{\max}}; a_{44} = -\frac{k_{f1}}{J_1}; \\ a_{45} &= \frac{M_{\max}}{J_1 \omega_{\max}}; a_{54} = -\frac{1}{T_1}; a_{55} = -\frac{1}{T_1}; a_{56} = \frac{1}{T_1}; a_{66} = -\frac{1}{T_\mu}; m_6 = \frac{1}{T_\mu}. \end{aligned} \quad (3)$$

Из множества траекторий движения системы (2) выделим невозмущенное движение под действием программного управления u^* как решение дифференциальных уравнений

$$p y_i^* = \sum_{k=1}^6 a_{ik} y_k^* + C + m_6 u^*, (i=1, \dots, 6). \quad (4)$$

Реальное движение объекта управления отличается от желаемого на величину отклонения

$$\eta_k = y_k - y_k^*, (k=1, \dots, 6). \quad (5)$$

Вычтя из системы (2) систему (4) с учетом обозначений (5), получим систему дифференциальных уравнений возмущенного движения

$$p \eta_i = \sum_{k=1}^6 a_{ik} \eta_k + m_6 U, (i=1, \dots, 6), \quad (6)$$

где $U = u - u^*$ – дополнительное стабилизирующее управление, представляющее собой отклонение реального управляющего воздействия u от программного u^* ; a_{ik}, m_6 – коэффициенты.

Для синтезируемой системы уравнений качество управления может быть задано функционалом Летова

$$I = \int_0^{\infty} (\sum_{i,k=0}^6 w_{ik} \eta_i \eta_k + cU^2) dt, w_{ik} = w_{ki}, \quad (7)$$

экстремальное значение которому на траекториях движения (6) доставляет оптимальное управление

$$U = -\text{sat} \frac{g}{m_6} \sum_{i=0}^6 v_{i6} \eta_i, \quad (8)$$

гарантируя при этом экспоненциальный характер управляемого движения регулируемой переменной $\eta_1 = -\exp\left(\frac{1}{g} t\right)$ при траектории невозмущенного движения $y_1^* = 1(t)$ и обеспечивая замкнутой системе астатические свойства за счет наличия в своем составе интегральной составляющей $\eta_0 = \frac{1}{p} \eta_1$.

Оптимальное управление (8) в развернутом виде [5]

$$U = -\text{sat} \frac{g}{m_6} (v_{06} \eta_0 + v_{16} \eta_1 + v_{26} \eta_2 + v_{36} \eta_3 + v_{46} \eta_4 + v_{56} \eta_5 + v_{66} \eta_6). \quad (9)$$

Коэффициентами алгоритма управления (9) являются коэффициенты функции Ляпунова

$$V = \sum_{i,k=0}^6 v_{ik} \eta_i \eta_k, v_{ik} = v_{ki}, \quad (10)$$

которые связаны между собой соотношениями

$$v_{ik} = \frac{v_{in} v_{kn}}{v_{nn}}, (i,k=0,1,2,\dots,6). \quad (11)$$

Коэффициенты (11) определяются соответственно минорами i -ых, k -ых и n -ых элементов 1-го столбца определителя коэффициентов системы (6) [2].

Следует отметить, что весовые коэффициенты функционала (7) однозначно связаны с коэффициентами функции Ляпунова (10) соотношениями

$$w_{ik} = \frac{m_6^2}{c} v_{i6} v_{k6} = g v_{i6} v_{k6}, i,k = 0,1,\dots,6. \quad (12)$$

Выполнив в алгоритме управления (9) замену координат возмущенного движения в силу системы дифференциальных уравнений (6) и перейдя от относительных значений переменных состояний к их именованным значениям, получим в окончательном виде алгоритм оптимального управления натяжением ленты конвейера

$$U_y = U_{y\max} \text{sat} \frac{g}{m_6} \left(\left(\frac{\gamma_{06}}{p} + \gamma_{16} \right) (F_L^* - F_L) - \gamma_{26} p F_L - \gamma_{36} p \omega_2 - \gamma_{46} (\omega_1 - \omega_2) - \gamma_{56} p \omega_1 - \gamma_{66} p I_1 \right). \quad (13)$$

Согласно (13) регулятор натяжения ленты будет иметь вид, показанный на рис.3.

В коэффициенты алгоритма оптимального управления натяжением ленты входит переменный технологический параметр – угловая скорость смежного электропривода ω_3 . Из анализа значений коэффициентов системы (1) видно, что скорость клетки ω_3 входит в состав двух коэффициентов, которые являются составляющими коэффициента

γ_{06} . Так як ці коефіцієнти рівнянь динаміки учащують в розрахунок коефіцієнтів функції Ляпунова, коефіцієнт γ_{06} розділений на дві складові: γ'_{06} – з урахунок і γ''_{06} – без урахунок змінної швидкості ω_3 .

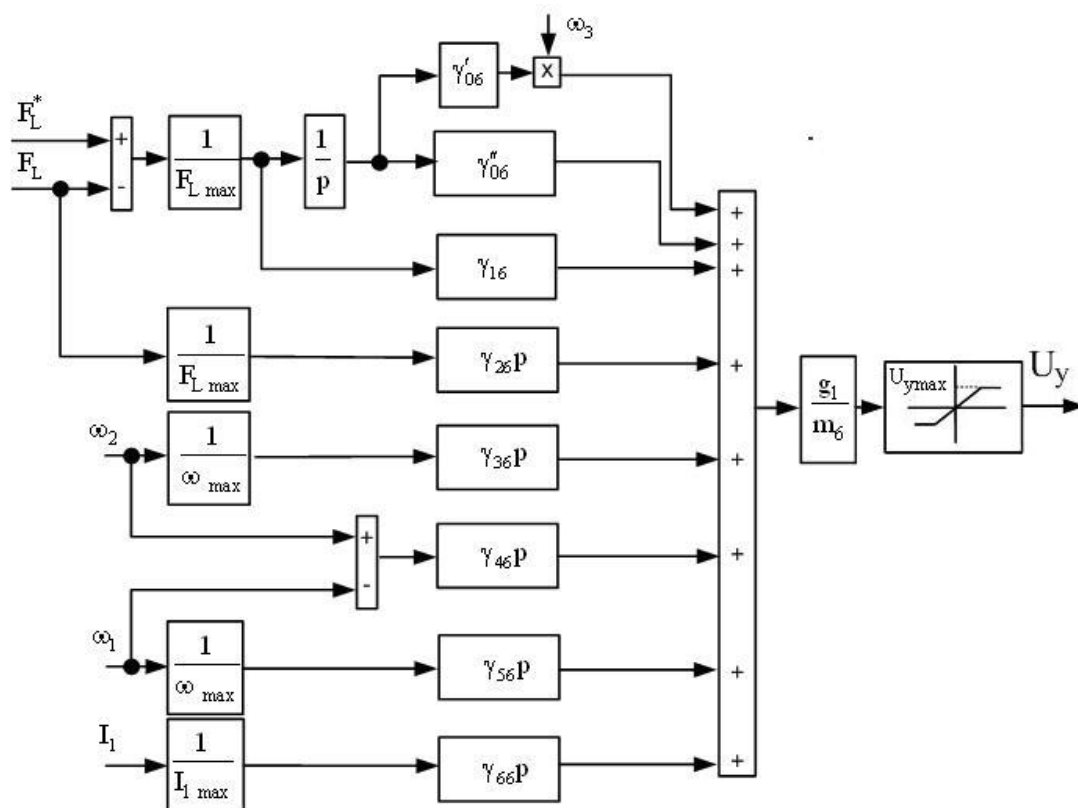
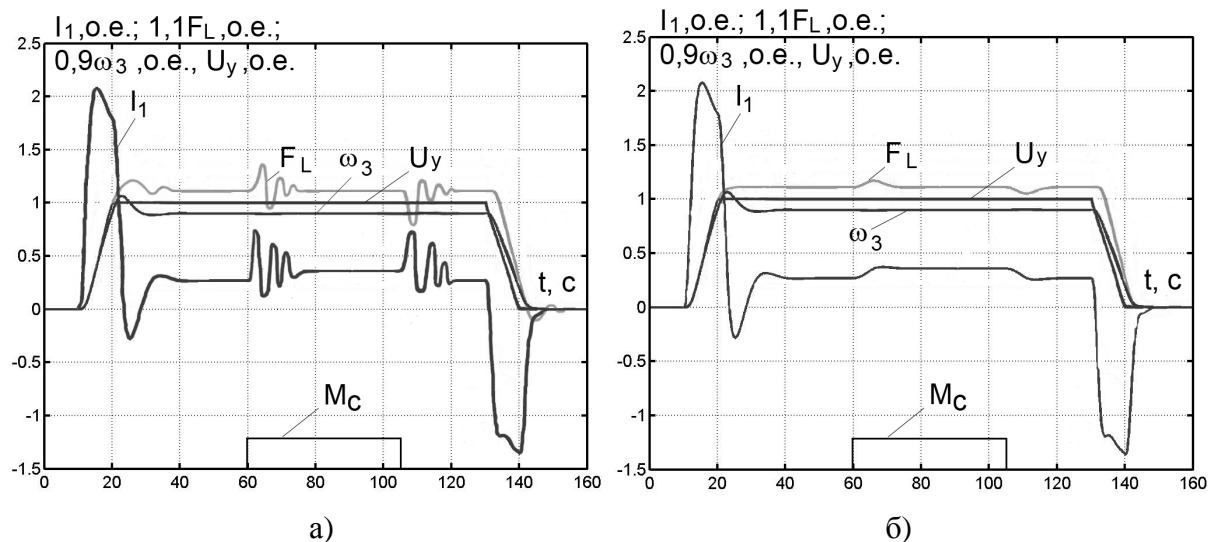


Рисунок 3 – Структурная схема регулятора скорости, реализующего алгоритм (13)

На рис.4, а показаны переходные процессы системы управления натяжением ленты конвейера, настроенной на модульный оптимум, а на рис.4, б показаны переходные процессы синтезированной системы управления натяжением ленты конвейера (F_L – натяжение ленты конвейера; ω_3 – угловая скорость смежного электропривода; I_1 – ток якорной цепи двигателя М1; U_y – напряжение на входе управляемого преобразователя питания двигателя М1). С момента времени 15 с до 20 с происходит установление необходимого для работы натяжения конвейерной ленты, с 20 с до 130 с – работа конвейера в установившемся режиме с постоянным натяжением ленты, с 130 с до 140 с снимается задание на натяжение. При этом задание по скорости электропривода барабана конвейера с 15 с до 20 с – разгон до рабочей скорости, 20 с - 130 с – работа при постоянной скорости, 130 с - 140 с – торможение до полной остановки конвейера.

Для исследования качества синтезированной системы оптимального управления взаимосвязанными электроприводами конвейера смоделировано внешнее возмущающее воздействие в виде наброса нагрузки, составляющей 30% от номинального момента двигателя барабана конвейера в интервале времени с 60 с до 105 с. При скачкообразном увеличении и последующем уменьшении нагрузки двигателя барабана на 30% от приложенного номинального момента динамическая ошибка стабилизации ленты не превысила 5%, в то время как на рис.4, а наблюдается колебательный процесс стабилизации натяжения ленты.



а) система настроена на модульный оптимум;
 б) синтезированная система управления натяжением ленты конвейера

Рисунок 4 – Переходные процессы системы управления натяжением ленты конвейера

Выводы. Разработанная система оптимального управления натяжением ленты конвейера за счет полной наблюдаемости объекта управления, учета влияния переменной угловой скорости смежного электропривода и упругих связей первого и второго рода обеспечивает отработку задающего воздействия без перерегулирования и компенсирует влияние упругостей шпинделя и ленты на динамические характеристики электропривода без увеличения времени переходного процесса с нулевой статической ошибкой.

Доказано, что учет переменных технологических параметров и упругих кинематических передач первого и второго рода при решении задачи аналитического конструирования оптимальных регуляторов позволяет получать алгоритмы оптимального управления натяжением ленты конвейера, весовые коэффициенты которых являются функциями переменных параметров, что обеспечивает необходимое качество управления и низкую чувствительность к ряду дестабилизирующих факторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бабиюк Г.В. Интенсификация производства на угольных шахтах / Г.В.Бабиюк, А.Н.Ермаков // Научный вестник НГУ. – 2010. – №1. – С.29-32.
2. Садовой А.В. Системы оптимального управления прецизионными электроприводами / А.В.Садовой, Б.В.Сухинин, Ю.В.Сохина. – К.: ИСИМО, 1996. – 298с.
3. Чудновский В.Ю. Исследование динамики и устойчивости главного привода роторных экскаваторов с упругой подвеской редуктора / В.Ю.Чудновский // Горное оборудование и электромеханика. – 2009. – №4. – С.45-49.
4. Черемушкина М.С. Совершенствование систем электропривода конвейерного транспорта / М.С.Черемушкина, А.Е.Козярук // Горное оборудование и электромеханика. – 2009. – №4. – С.23-27.
5. Садовой А.В. Система оптимального управления натяжением прокатываемой полосы стана холодной прокатки / А.В.Садовой, Р.С.Волянский, Е.С.Назарова // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – 2011. – Вып. 34. – С.122-130.

Поступила в редколлегию 21.01.2013.