

УДК 621.313.333

В.В. Поцепаяев (канд. техн. наук, доц.), А.А. Воропаева (канд. техн. наук)

Донецкий национальный технический университет, г. Красноармейск

кафедра автоматики и телекоммуникаций

E-mail: potsepaev56@mail.ru; voropaeva_anna@meta.ua

ИССЛЕДОВАНИЕ САУ ВСТРОЕННОЙ СИСТЕМОЙ ПОДАЧИ С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ТОРМОЗАМИ СКОЛЬЖЕНИЯ ОЧИСТНЫХ КОМБАЙНОВ

Результаты экспериментальных исследований приводов подачи с электромагнитным тормозом скольжения определили их встречное включение в двухприводной бесцепной системе подачи очистных комбайнов. Это позволяет скомпенсировать высокодинамичные пусковые моменты и обеспечить высокую управляемость скоростью подачи комбайна на пластах с большими углами наклона. Разработана математическая модель двухприводной системы подачи, учитывающая статические и динамические характеристики современных приводов с управляемыми электромагнитными тормозами для горных машин. На ее основе выполнен структурный и параметрический синтез системы автоматического управления скоростью подачи.

Ключевые слова: система автоматического управления, электромагнитный тормоз скольжения, очистной комбайн, привод подачи, пусковой момент, математическая модель, переходные процессы.

Общая постановка проблемы. Эксплуатация вынесенных и встроенных бесцепных систем подачи очистных комбайнов, а также приводов забойных конвейеров на основе электромагнитных муфт (ЭМС) и тормозов скольжения (ЭТС) показала их высокую функциональность [1 – 4]. Для современных комбайнов и конвейеров был создан новый более мощный асинхронный электропривод с управляемым электромагнитным тормозом скольжения. Вследствие этого возникла проблема создания и исследования системы автоматического управления встроенной бесцепной системой подачи (БСП) на основе новых приводов с электромагнитными тормозами для получения наилучших динамических характеристик и управляемости во всех режимах работы.

Постановка задач исследования. Указанная цель работы предполагает анализ экспериментальных исследований, разработку математической модели двухприводной БСП с ЭТС, на основании которой выполнить структурный и параметрический синтез системы автоматического управления.

Решение задач и результаты исследований. Каждый из приводов БСП представляет собой асинхронный электродвигатель, соединенный через дифференциальный планетарный редуктор с ЭТС.

Стандовые исследования пуска привода на заторможенный выходной вал при отсутствии тока в обмотке управления тормоза показали [4] возникновение переходного процесса вращающего момента выходного вала привода с амплитудой 0,8 от номинального, что показано на рисунке 1. Это связано с инерционностью раскручивающегося индуктора тормоза, которая с учетом передаточного отношения дифференциального планетарного редуктора вызывает высокодинамичный переходный процесс. Такой переходный процесс приводит к скачку корпуса комбайна, который усиливается скатывающей силой при движении комбайна под уклон при наклоне пласта.

Другой проблемой является потеря управления скоростью подачи при движении ком-

байна под уклон при таких углах наклона пласта, когда скатывающая сила превышает силу трения в опорах комбайна. В таком режиме движение комбайна продолжается при отсутствии тягового усилия в направлении подачи, что делает невозможным регулирование нагрузки привода исполнительных органов.

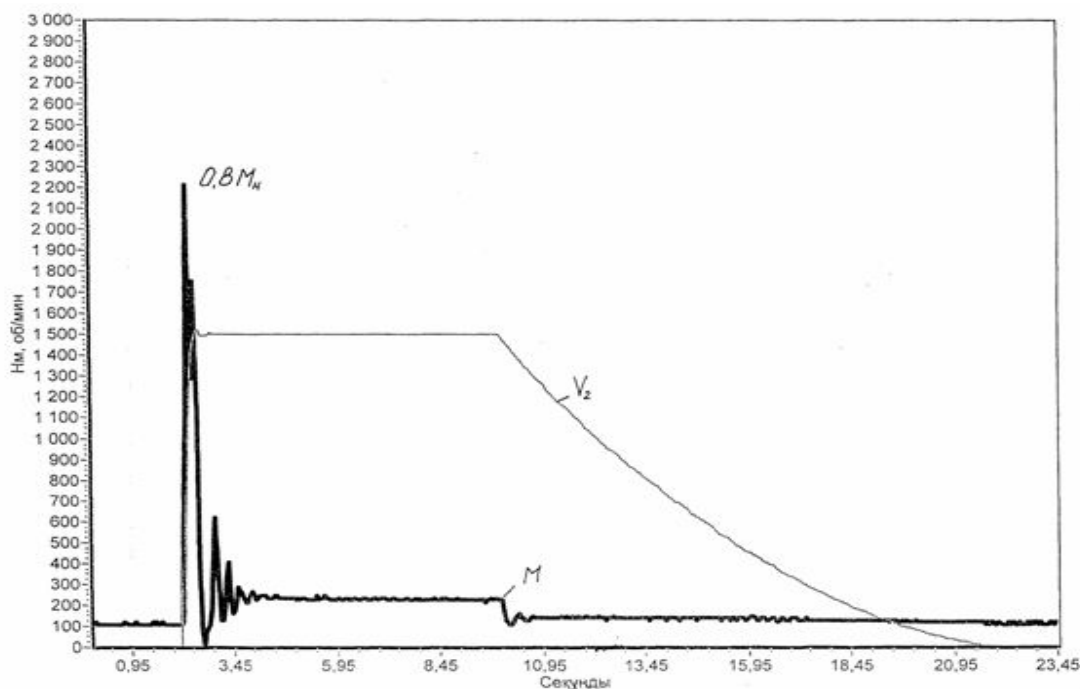


Рисунок 1 –Переходный процесс пуска привода на заторможенный выходной вал
 M – вращающий момент на выходном валу; V_2 – скорость вращения двигателя

Устранить влияние пускового момента привода и обеспечить полную управляемость скоростью подачи независимо от наклона машинной дороги на холостом ходу и в рабочем режиме комбайна позволяет встречное включение приводов. При такой схеме включения направленные встречно пусковые моменты приводов будут скомпенсированы, а привод, создающий усилие, направленное против направления подачи, обеспечит торможение за время ограниченное только быстродействием приводов.

Математическая модель, описывающая предложенную схему включения приводов БСП, представлена ниже. В модели приняты следующие обозначения:

$\dot{\varphi}$ – угловая скорость привода подачи;

J – суммарный момент инерции приводов, приведенный к приводным колесам;

M_{∂} – момент движущего привода, действующий в направлении движения комбайна [6 – 8];

M_T – момент тормозящего привода, действующий в направлении противоположном движению комбайна;

i_{∂} – ток управления в обмотке тормоза движущего привода;

i_m – ток управления в обмотке тормоза тормозящего привода;

S_{∂} – скольжение тормоза движущего привода;

S_m – скольжение тормоза тормозящего привода;

M_H – момент нагрузки приводов [7,8,9];

F_2 – суммарная горизонтальная составляющая сил реакции забоя на исполнительных органах комбайна [8];

F_T – сила трения в опорах комбайна [7];

$F_c = P \sin \alpha$ – скатывающая сила, обусловленная углом наклона пласта α , P – вес комбайна;

$$\left\{ \begin{array}{l} J\ddot{\varphi} = M_\partial - M_m - M_H; \\ M_\partial = M_M \arctg^2(ai_\partial) \sqrt[4]{S_\partial}, \quad S_\partial \in [0, 1]; \\ M_m = M_M \arctg^2(ai_m) \sqrt[4]{S_m}, \quad S_m > 1; \\ M_H = (F_c + F_T - F_c)r; \\ U_T = iR + L(i)\dot{i}, \quad L(i) = \frac{L_0}{R(1+(ai)^2)}, \\ U_T = \frac{U_m}{\pi} \left(1 - \cos \frac{u}{u_\varepsilon} \left(\pi - \arccos \left(\frac{\pi i_m R}{U_m} - 1 \right) \right) \right); \\ T_1 \dot{y} = \dot{\varphi} - y; \\ T_3 \dot{w} = k_{ud} \left(\frac{T_2}{T_1} (\dot{\varphi} - y) + y \right) - w; \\ \varepsilon = v - w; \\ T_4 \dot{u} = x - u, \quad x = \begin{cases} k_x \varepsilon, & 0 < \varepsilon < u_\varepsilon / k_x, \\ u_\varepsilon, & \varepsilon \geq u_\varepsilon / k_x, \\ 0, & \varepsilon \leq 0. \end{cases} \end{array} \right.$$

r – радиус приводного колеса;

U_T – напряжение на выходе управляемого выпрямителя, питающего обмотку управления ЭТС.

Модель управляемого выпрямителя представлена статической регулировочной характеристикой, что вполне оправданно значительной электромагнитной инерционностью обмотки управления тормоза. В модели приняты следующие обозначения:

R – активное сопротивление обмотки управления тормоза;

$L(i)$ – зависимость индуктивности обмотки от тока управления, связанная с насыщением магнитопровода ЭТС [7];

L_0 – индуктивность обмотки управления при ненасыщенном магнитопроводе ЭТС;

U_m – амплитуда сетевого напряжения;

u – управляющий сигнал на выходе контура стабилизации угловой скорости;

u_ε – верхний уровень ограничения управляющего сигнала;

i_m – максимально допустимое среднее значение тока в обмотке управления;

y – сигнал датчика угловой скорости;

w – скорректированный интегро-дифференцирующим звеном сигнал обратной связи;

ε – сигнал рассогласования между заданной скоростью подачи v и сигналом обратной связи.

Заметим, что для тормозящего привода рассогласование ε инвертируется. Таким образом, тормозящий привод работает только при превышении скоростью подачи заданной скорости.

Постоянные времени T_1 и T_4 определяются моделями соответственно датчика скорости

и тиристорного выпрямителя.

T_2 и T_3 – постоянные времени корректирующего интегро – дифференцирующего звена;

u - сигнал на входе фазосдвигающего устройства управляемого выпрямителя;

k_x – коэффициент усиления нелинейных звеньев x на линейном участке.

Заметим, что для движущего и тормозящего приводов коэффициенты k_x могут отличаться.

Структурная схема, соответствующая математической модели, приведена на рисунке 2. Заметим, что контуром стабилизации скорости движущего привода обрабатывается только положительное рассогласование по скорости, а контуром стабилизации скорости тормозящего привода – отрицательное.

Таким образом, тормозящий привод практически не нагружает движущий, а только улучшает качество переходных процессов изменения скорости БСП.

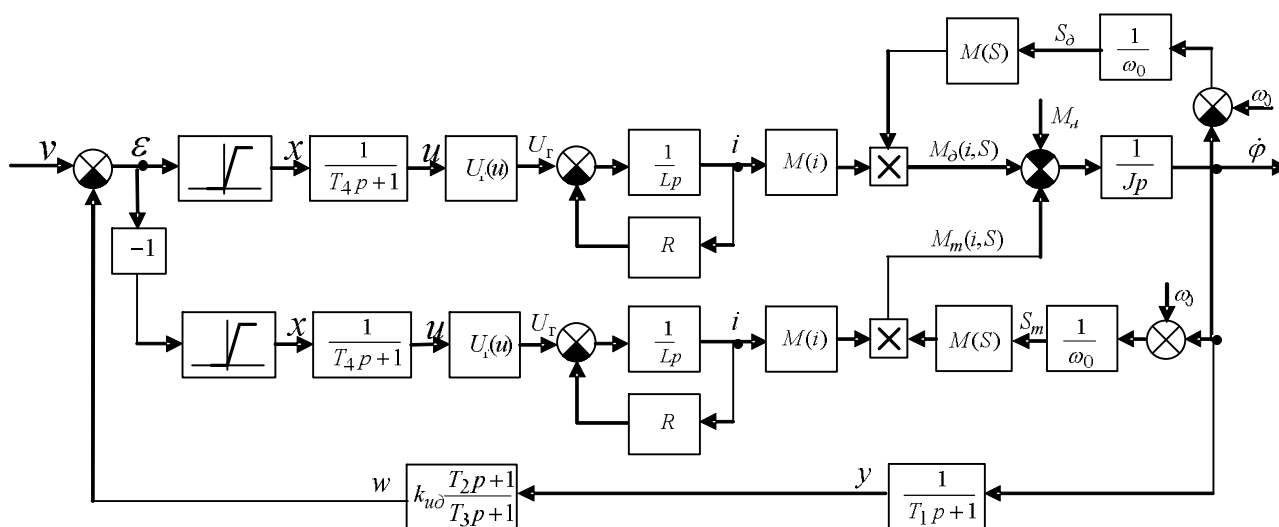


Рисунок 2 – Структурная схема САУ БСП при встречном включении приводов подачи

Результаты исследований качества переходных процессов изменения угловой скорости приводных колес комбайна ($\dot{\varphi}$ – регулируемый параметр) и токов i_d , i_m в обмотках управления ЭТС движущего и тормозящего приводов БСП приведены на рисунках 4 и 5. Для БСП с двумя включенными встречно приводами и одним приводом выполнены идентичные модельные эксперименты.

Интервал времени 0...2 секунды – разгон привода и выход на установившийся режим при номинальном моменте нагрузки 10000 Нм, что соответствует тяговому усилию ≈ 91000 Н до угловой скорости 0.74 рад/с, соответствующей скорости подачи комбайна ≈ 5 м/мин.

Переходный процесс разгона с одним приводом и двумя приводами идентичен, поскольку в обоих случаях выполняется одним приводом.

Со второй секунды – реакция на ступенчатое изменение задающего воздействия по угловой скорости с 0.74 рад/с до 0, соответствующая заданной остановке комбайна. В системе с двумя встречными приводами (рис. 4) переходный процесс снижения угловой скорости до полной остановки длится 0.67 с, в системе с одним работающим приводом – 2 с (рис. 5).

Начиная с 5 секунды показана отработка системой скачка момента нагрузки с 10000 Нм до отрицательного -2000 Нм, что соответствует движению комбайна под уклон с углом $\approx 20^\circ$. Отрицательный момент нагрузки вполне качественно обрабатывается БСП с встречно включенными приводами (см. рис. 4).

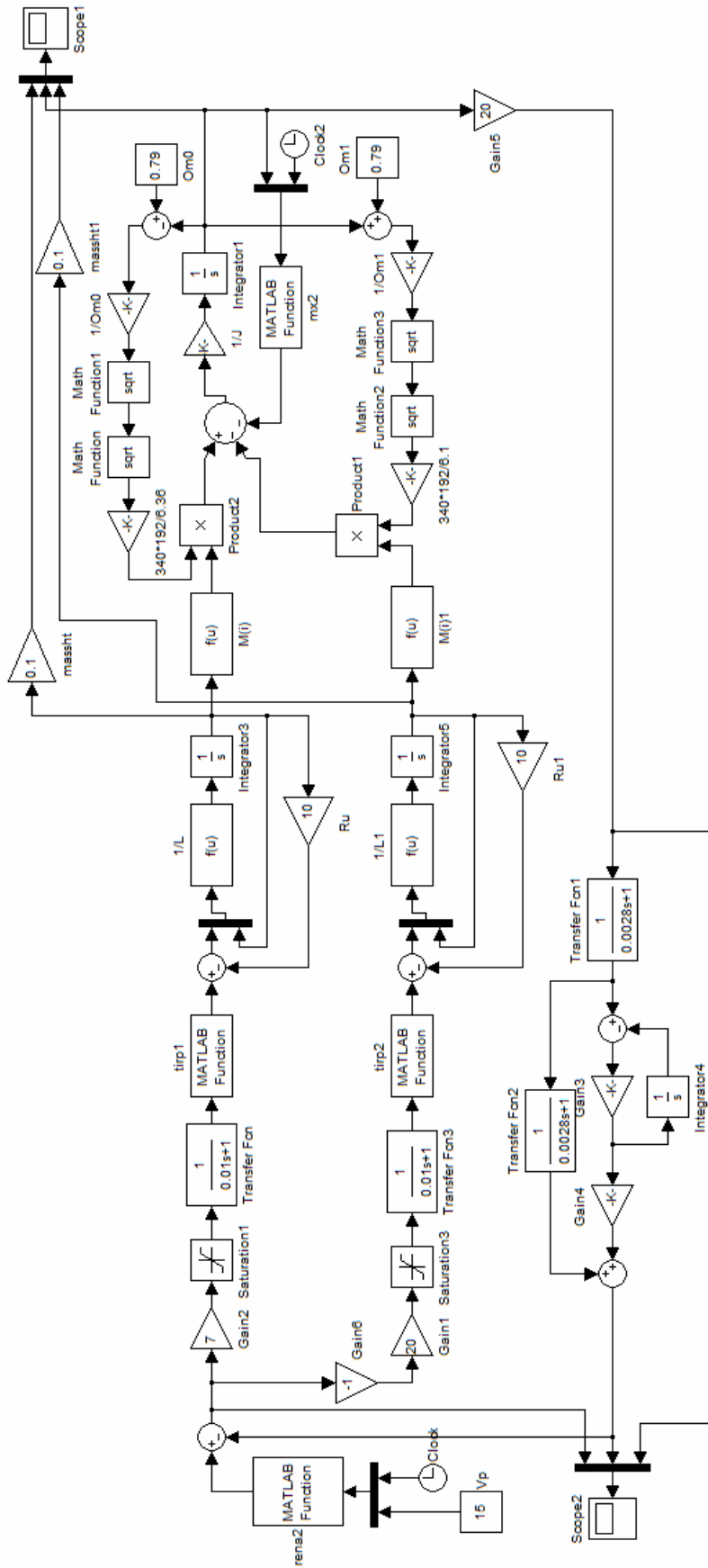


Рисунок 3 – Реализация математической модели в Simulink

В системе с одним приводом начинается неуправляемый рост угловой скорости и, следовательно, скорости подачи комбайна, что показано на рисунке 5. В этом случае работа системы стабилизации нагрузки привода исполнительных органов комбайна становится невозможной. Комбайн становится неуправляемым и фиксация нулевой скорости подачи невозможна без дополнительного тормозного устройства.

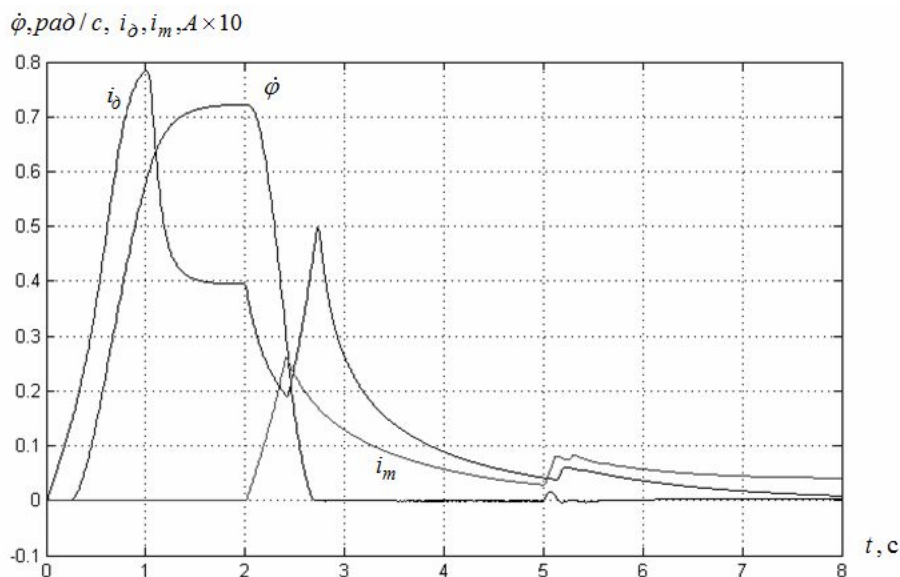


Рисунок 4 – Переходные процессы САУ БСП с включенными встречно приводами

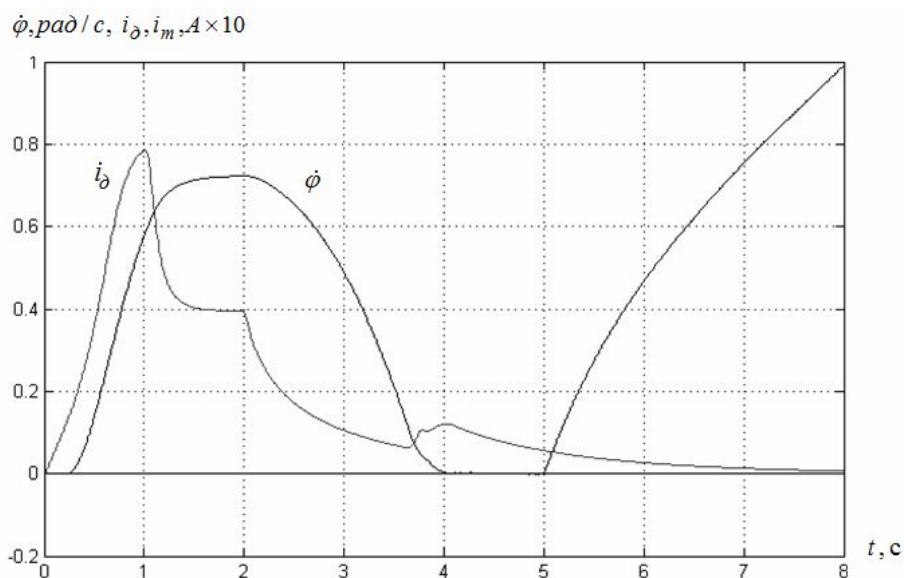


Рисунок 5 – Переходные процессы САУ БСП с одним приводом

Выводы.

1. Предложенная схема встречного включения приводов БСП обеспечивает компенсацию пускового момента и возможность управления скоростью подачи при углах наклона пласта, заданных техническими условиями эксплуатации комбайна.

2. Разработана математическая модель и структура САУ БСП с электромагнитными управляемыми тормозами, выполнен ее параметрический синтез.

3. Разработанная САУ БСП обеспечивает устойчивость, ускорение и качество переходных процессов управления скоростью подачи комбайна в заданном диапазоне скоростей.

Список использованной литературы

1. Машины и оборудование шахт и рудников [Электронный ресурс]: Комбайн очистной К85. – Режим доступа: http://www.tinref.ru/000_uchebniki/01790gornoe_delo/013_spr_mashini_i_oborudovanie_dla_shaht_i_rudnikov/053.htm. – Дата доступа 12.03.2015. – Загл. с экрана.
2. НТБ Горная промышленность [Электронный ресурс]: Опыт плюс кооперация. Создание отечественного очистного комбайна К600 для отработки пластов средней мощности. – Режим доступа: <http://www.mining-media.ru/ru/article/podzem mash/944-opyt-plyus-kooperatsiya-sozdanie-otechestvennogo-ochistnogo-kombajna-k600-dlya-otrabotki-plastov-srednej-moshchnosti>. – Дата доступа 17.03.2015. – Загл. с экрана.
3. Серов Л.А. Устройства управления и системы регулирования угледобывающих машин / Л.А. Серов. – М.: Недра, 1995. – 167 с.
4. Ковальчук А.Н. Протокол заводских испытаний блока вынесенной системы подачи БПВСР за 24.08.2006 г. / А.Н. Ковальчук. – ОАО «ХМЗ «Свет шахтера», Харьков. 2006. – 5 с.
5. Щетинин Т.А. Электромагнитные муфты скольжения. / Т.А. Щетинин. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 272 с.
6. Поцепаев В.В. Исследование динамики и выбор рациональных параметров вынесенного привода подачи очистных комбайнов: автореф. дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. / Поцепаев Валерий Валериевич. – М.: ИГД им. А.А. Скочинского, 1986. – 14 с.
7. Поцепаев В.В. Алгоритмический метод моделирования нагрузок на роторных исполнительных органах машин / П.П. Поцепаев // Materialy IV mezinarodni vedecko-prakticka konference “Veda a vznik – 2008/2009” Dil 16. Tehnicke vedy: Praha. Publishing house “Education and science”. – 104 с.
8. Дубинин С.В. Система автоматической стабилизации скорости вынесенного привода подачи с электромагнитным тормозом скольжения для горных машин / С.В. Дубинин, В.В. Поцепаев // Наукові праці ДонНТУ. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація. – 2012. – Вип. 22 (200). – С. 6 – 10.
9. Дубинин С.В. Применение электромагнитных муфт скольжения в приводах горных машин / С.В. Дубинин, И.Т. Сидоренко // Горная электромеханика и автоматика: Респ. межвед. науч.-техн. сб. – К.: Техника. 1988. – Вып. 52. – С. 62 – 65.
10. Дубинин С.В. Исследование автоматизированной двухприводной вынесенной системы подачи очистного комбайна и определение ее оптимальных параметров / А.П. Санченко, С.В. Дубинин // Автоматизация технологических объектов и процессов. Поиск молодых Сборник научных статей VII Международной научно-технической конференции аспирантов и студентов. – Донецк: ДонНТУ, 2007 – С.: 17– 18.

References

1. Machinery and equipment of mines. «Cleaning Combine K85», available at: http://www.tinref.ru/000_uchebniki/01790gornoe_delo/013_spr_mashini_i_oborudovanie_dla_shaht_i_rudnikov/053.htm (Accessed March 12, 2015).
2. STL Mining Industry. «Experience and cooperation. Domestic Shearer K600 for Working Layers of Average Power Creating», available at: <http://www.mining-media.ru/ru/article/podzem mash/944-opyt-plyus-kooperatsiya-sozdanie-otechestvennogo-ochistnogo-kombajna-k600-dlya-otrabotki-plastov-srednej-moshchnosti> (Accessed March 17, 2015).
3. Serov, L.A., (1995), *Ustroystva upravleniya i sistemyi regulirovaniya ugledobyivayuschih mashin* [Control and regulation system of coal mining machinery], Nedra, Moscow, Russia.
4. Kovalchuk, A.N., (2006), *Protokol zavodskih ispytaniy bloka vyinesennoy sistemyi podachi BPVSP za 24.08.2006 g.* [Factory Test Protocol Unit Imposition Supply System BPVSP for

- 24.08.2006], Kharkiv, Ukraine.
5. Schetinin, T.A. (1985), *Elektromagnitnyie muftyi skolzheniya* [Electromagnetic clutch slip], Energoatomizdat, Moscow, Russia.
 6. Potsepaev, V.V., (1986), Dynamics Researching and Rational Parameters of Rendered Feed Drive Shearers Selection, Abstract of Ph.D. dissertation, A.A. Skochinsky Institute of Mining, Moscow, Russia.
 7. Potsepaev, V.V., (2009), "Algorithmic modeling method loads on the rotor bodies isnitelnyh machines" *Materialy IV mezinarodni vedecko-prakticka konfference "Veda a vznik – 2008/2009" Dil 16. Tehnicke vedy* [IV international scientific-practical konfference "Science and formation - 2008/2009"], Praha, 2009, 104 pp.
 8. Potsepaev, V.V., (2012), "Automatic stabilization of the rate of feed rendered with an electromagnetic brake slip for mining machine", *Naukovi praci Donec'kogo nacional'nogo tehnic'nogo universytetu. Serija: "Obchysljuval'na tehnika ta avtomatyzacija"*, vol. 22, no 200, pp. 6-10.
 9. Dubinin, S.V. and Sydorenko I.T., (1988) "Electromagnetic clutches slip in drives of mining machines using", *Gornaya elektromehnika i avtomatika: Resp.mezhved. nauch.-tehn. sb.*, no 52, pp. 62-65.
 10. Sanchenko, A.P. and Dubinin S.V., (2007) "Automated imposition of supply shearer and the determination of its optimal parameters" *Avtomatizatsiya tehnologicheskikh ob'ektov i protsesov. Poisk molodyih*. [Automation of technological objects and processes. Search young], Donetsk, 2007, pp. 17-18.

Поступила в редакцію:
03.04.2015

Рецензент:
д-р техн. наук, проф. С.В. Подкопаєв

V.V. Potsepaev, A.A. Voropaeva.

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

Дослідження САУ вбудованою системою подачі з електромагнітними гальмами ковзання очисних комбайнів. Результати експериментальних досліджень приводів подачі з електромагнітним гальмом ковзання визначили їх зустрічне включення в двоприводній безцепній системі подачі очисних комбайнів. Це дозволяє компенсувати високодинамічні пускові моменти і забезпечити високу керованість швидкістю подачі комбайна на пластах з великими кутами нахилу. Розроблено математичну модель двоприводної системи подачі з електромагнітними гальмами ковзання, що враховує характеристики сучасних приводів з електромагнітними гальмами для гірничих машин. На її основі виконаний структурний і параметричний синтез системи автоматичного управління швидкістю подачі.

Ключові слова: система автоматичного управління, електромагнітне гальмо ковзання, очисний комбайн, привід подачі, пусковий момент, математична модель, перехідні процеси.

V.V. Potsepaev, A.A. Voropaeva.

Donetsk National Technical University

Investigation of automatic control system of the embedded feed system with electromagnetic brakes of the slip of a shearer. Exploitation of remote and embedded chainless systems of feed shearers based on electromagnetic clutches and brakes slip (EBS) has shown excellent performance and reliability. For modern shearers and belts new more powerful asynchronous electric drive with controlled electromagnetic brake slip was created. As a result, a problem of creation and study of automatic control system of embedded chainless feed system (EFS) based on the new drive with EBS was formulated. This goal of the work involves the analysis of experimental studies, the development of a mathematical model of EFS with two drives, structural and parametric synthesis of

automatic control system is made on the basis of the formulated model. Benchmark studies of the drive output shaft inhibited in the absence of current in the coil brake control showed the occurrence of transient torque output shaft with amplitude of 0.8 from the nominal. Such a transition process leads to a jump of the frame of the shearer. Another problem is the loss of control of the feed rate when moving the shearer downhill at such angles of the slope of the formation when the rolling force exceeds the force of friction in the bearings of the shearer. Inclusion of a counter-drive allows to eliminate the effect of the starting torque of the drive and ensure complete control feed rate, regardless of the inclination of the road machine at idle and in operation mode of the shearer. In such a scheme counter starting torques of drives will be compensated, and the drive which creates a force directed against the direction of feed, provides braking during time limited only by the speed of drives. In accordance with the purpose of the work the mathematical model of two drives feed system with the included counter drives was developed structural and parametric synthesis of automatic control EFS was conducted. For EFS with two working counter drives and one separate drive the identical model experiments were conducted. In a system with two opposing drives transient decrease in angular velocity to standstill lasts 0.67 seconds, in the system with one working drive it lasts 2 seconds. The system processes the negative torque jump satisfactory by the EFS with counter drive. Uncontrolled growth of angular speed is observed in the system with a single drive. The proposed scheme of oncoming inclusion of drives of EFS provides compensation of starting torque and the ability to control the feed rate of the shearer with tilt angles of the formation which are specified in the technical operating conditions of the shearer. A mathematical model and structure of the EFS with EBS was developed. The developed system provides stability and quality of transient processes of shearer flow rate control.

Keywords: Keywords: automatic control system, electromagnetic brake slip, shearer, feed drive, starting torque, mathematical model, transients.



Поцпаев Валерий Валерьевич, Украина, окончил Донецкий национальный технический университет, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедры автоматизации и телекоммуникаций, ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет» (пл. Шибанкова, 2, г. Красноармейск, 85300, Украина). Основное направление научной деятельности – методы исследования, моделирования и оптимизации динамических систем, системы автоматического управления.



Воропаева Анна Александровна, Украина, окончила Донецкий национальный технический университет, канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизации и телекоммуникаций, ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет» (пл. Шибанкова, 2, г. Красноармейск, 85300, Украина). Основное направление научной деятельности – методы исследования и оптимизации беспроводных телекоммуникационных сетей.