

УДК 621.313.333

В.В. Поцепаев (канд. тех. наук, доц.), Ю.Б. Шмидт
Донецкий национальный технический университет, г. Красноармейск
кафедра автоматики и телекоммуникаций
E-mail: potsepaev56@mail.ru; j.shmidt@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРСИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ВСТРОЕННОЙ СИСТЕМОЙ ПОДАЧИ С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ТОРМОЗАМИ СКОЛЬЖЕНИЯ ОЧИСТНЫХ КОМБАЙНОВ

Проведенные экспериментальные и теоретические исследования двухприводной бесцепной системы подачи с электромагнитными тормозами скольжения очистных комбайнов определили целесообразность встречного включения приводов. Это позволяет скомпенсировать высокودинамичные пусковые моменты приводов и обеспечить полную управляемость скоростью подачи комбайна при больших углах падения пласта. Обладая такими преимуществами, как высокая надежность, дешевизна и отсутствие дополнительного кабеля управления, привода с электромагнитными тормозами скольжения имеют существенную инерционность, связанную с большой индуктивностью обмотки управления, что снижает быстродействие системы стабилизации нагрузки привода исполнительных органов комбайна. Быстродействие приводов может быть существенно повышено путем форсирования переходных процессов тока управления за счет повышенных управляющих напряжений на обмотках управления тормозов. 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, реализующей форсирование переходных процессов разгона и торможения системы подачи комбайна.

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

Общая постановка проблемы. Одной из встроенных систем подачи, используемых для перемещения современных очистных комбайнов, является система с двумя идентичными приводами, в которых в качестве вариатора скорости подачи используется управляемый электромагнитный тормоз скольжения (ЭТС).

Результаты экспериментальных и теоретических исследований двухприводной бесцепной системы подачи с электромагнитными тормозами скольжения определили целесообразность встречного включения приводов. Это позволяет скомпенсировать высокودинамичные пусковые моменты приводов и обеспечить полную управляемость скоростью подачи комбайна при больших углах падения пласта [1]. Помимо этого такая система имеет преимущества, такие как высокая надежность, дешевизна, отсутствие дополнительного кабеля управления и относительно простую защиту от утечек [2 – 4]. Однако привода с электромагнитными тормозами скольжения имеют существенную инерционность по управлению, связанную с большой индуктивностью обмотки управления ЭТС, что ограничивает быстродействие системы стабилизации нагрузки привода исполнительных органов комбайна. Вследствие этого была поставлена цель создания и исследования системы автоматического управления встроенной бесцепной системой подачи (БСП), обеспечивающей форсирование переходных процессов разгона и торможения приводов с ЭТС.

Постановка задач исследования. Указанная цель работы предполагает решить следующие задачи:

– разработать математическую модель двуприводной БСП с ЭТС с встречным включением приводов, в которую входит математическая модель управляемого выпрямителя с ограничением максимального тока управления;

– на основании модели 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 [2]. Передний по направлению движения комбайна привод – движущий создает тяговое усилие в направлении подачи. Задний привод – тормозящий создает тормозное усилие, если скорость комбайна превышает заданное значение. Быстродействие приводов может быть существенно повышено путем форсирования переходных процессов тока управления за счет повышенных управляющих напряжений на обмотках управления тормозов. Структурная схема САУ БСП с ЭМТ показана на рис. 1.

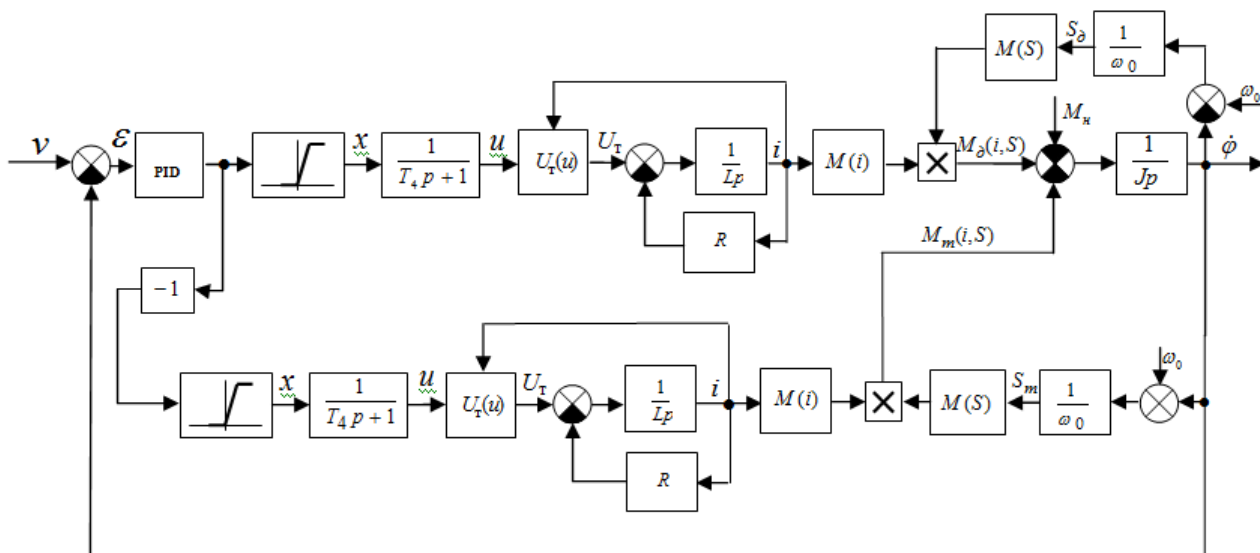


Рисунок 1 – Структурная схема САУ БСП при встречном включении приводов подачи

Приведенная схема показывает, что САУ является системой стабилизации скорости с PID законом управления. Из приведенной структуры следует, 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 ускоряет переходный процесс торможения БСП.

Кинематическая схема планетарного дифференциального редуктора в рассматриваемой структуре приводов системы подачи не учитывается. Привода включены по схеме асинхронный двигатель – электромагнитная муфта скольжения с последующей редукцией угловой скорости, соответствующей диапазону скоростей комбайна (0 – 5) м/мин. Такое упрощение модели вполне обосновано, поскольку после запуска асинхронного двигателя, который моделируется постоянной угловой скоростью ω_0 , работа привода с тормозом скольжения идентична приводу с муфтой [6, 10, 11].

Математическая модель, описывающая предложенную структуру САУ, представлена следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} J\ddot{\phi} = M_{\delta} - M_m - M_n; \\ M_{\delta} = M_m \arctg^2(ai_{\delta})(\sqrt[4]{S_{\delta}}), \quad S_{\delta} \in [0, 1]; \\ M_m = M_m \arctg^2(ai_m)(\sqrt[4]{S_m}), \quad S_m > 1; \\ M_n = (F_z + F_T - F_c)r; \\ U_T = iR + L(i)\dot{i}, \quad L(i) = \frac{L_0}{R(1 + (ai)^2)}, \\ U_T = \frac{U_m}{\pi} (1 - \cos \frac{u}{u_e} (\pi - \arccos(\frac{\pi i_m R}{U_m} - 1))); \\ U_T = \begin{cases} 4U_T, i \leq i_m \\ U_T, i > i_m; \end{cases} \\ W(p)_{PID} = 1 + T_2 p + \frac{1}{T_3 p}; \\ \varepsilon = v - \dot{\phi}; \\ T_4 \dot{u} = x - u, \quad x = \begin{cases} k_x w, 0 < w < u_e/k_x, \\ u_e, w \geq u_e/k_x, \\ 0, w \leq 0, \end{cases} \end{array} \right.$$

В модели приняты следующие обозначения:

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

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

M_{δ} – момент движущего привода, действующий в направлении движения комбайна [1, 8];

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

i_{δ}, i_m – ток управления в обмотке тормоза соответственно движущего и тормозящего привода;

S_{δ}, S_m – скольжение тормоза соответственно движущего и тормозящего привода;

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

F_z – 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;

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. Выражение $U_T = \begin{cases} 4U_T, i \leq i_m; \\ U_T, i > i_m \end{cases}$ реализует форсирование

нарастания тока в обмотке управления ЭТС. В исследовании принята учетверенная кратность увеличения U_T , что определяется предполагаемой аппаратурной реализацией управляемого

выпрямителя. Кратность увеличения U_T может быть изменена с соответствующим изменением времени переходных процессов;

R – активное сопротивление обмотки управления тормоза;

$L(i)$ – зависимость индуктивности обмотки от тока управления, связанная с насыщением магнитопровода ЭТС [5, 6, 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_g – верхний уровень ограничения управляющего сигнала;

i_m – максимально допустимое среднее значение тока в обмотке управления;

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

$W(p)_{PID}$ – передаточная функция PID регулятора;

w – сигнал на выходе PID регулятора;

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.

Результаты исследования разгона комбайна с БСП для форсированного и нефорсированного управления приведены на рис. 2. Математическая модель САУ БСП реализована в среде моделирования Simulink и показана на рис. 3.

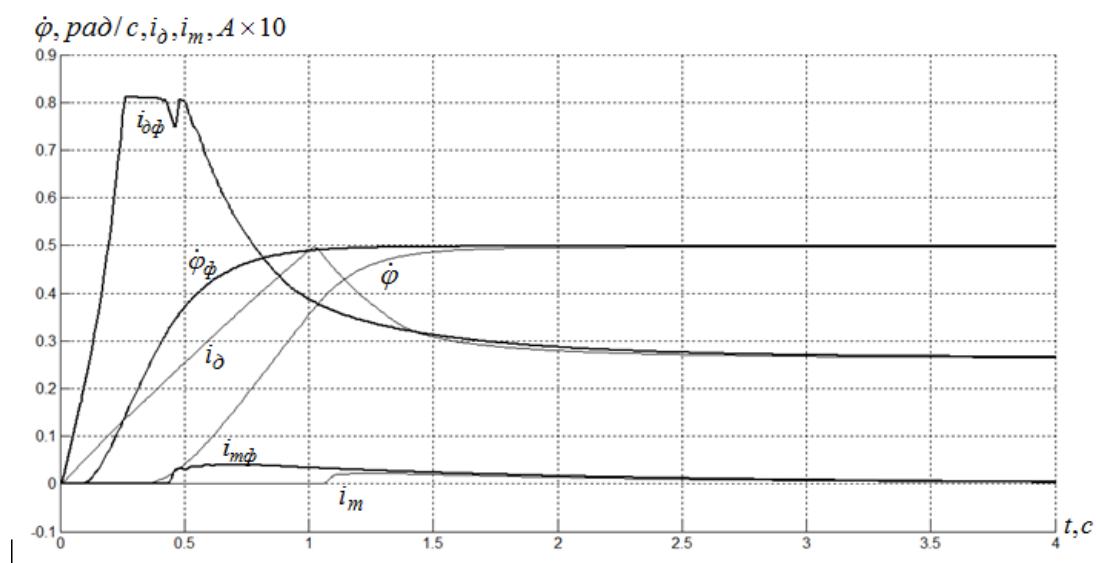


Рисунок 2 – Разгон комбайна при форсированном и нефорсированном управлении

В этом модельном эксперименте САУ БСП обрабатывает скачек задающего воздействия по скорости до установившегося значения 0,5 рад/с, что соответствует скорости подачи комбайна $\approx 3,3$ м/мин. Момент нагрузки на приводном колесе движущего привода составляет 15000 Нм или ≈ 110000 Н тягового усилия, что является типичным для рабочего режима комбайна. Как следует из рисунка, время переходного процесса угловой скорости до значения 0,9 от установившегося в нефорсированном режиме составляет 1,22с, в форсированном – 0,69с. Разность в 0,53с или снижение времени на 48% свидетельствует о существенном повышении быстродействия системы при форсированном управлении.

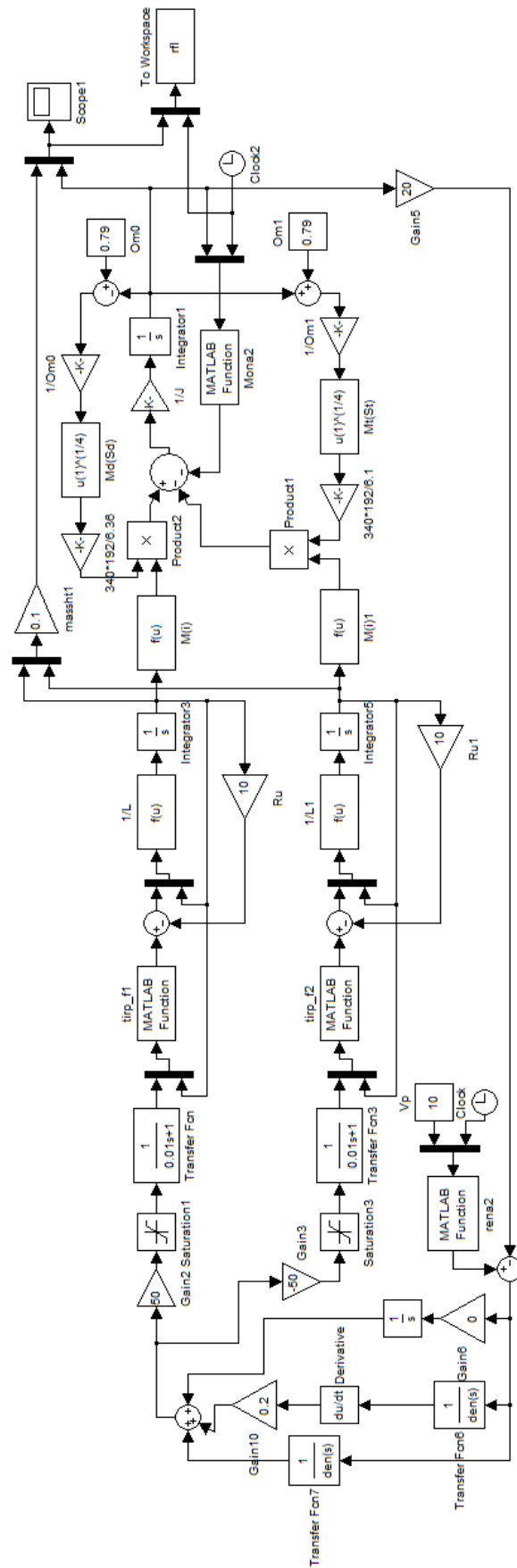


Рисунок 3 – Реализация математической модели САУ БСП в среде Simulink

Результаты исследований характеристик переходных процессов изменения угловой скорости БСП и, следовательно, скорости подачи комбайна и токов i_{∂} , i_m в обмотках управления ЭТС движущего и тормозящего приводов при форсированном и нефорсированном управлении САУ БСП приведены на рисунке 4. Здесь при установившемся значении угловой скорости 0,3 рад/с, соответствующей скорости подачи 2 м/мин, начиная с четвертой секунды, САУ отработывает скачек задающего воздействия по скорости с выходом на установившийся режим 0,5 рад/с, что соответствует скорости подачи 3,3 м/мин. Длительность переходного процесса угловой скорости на уровне 0,9 от установившегося значения в нефорсированном режиме составляет 0,6 с в форсированном – 0,44 с, что на 27% меньше.

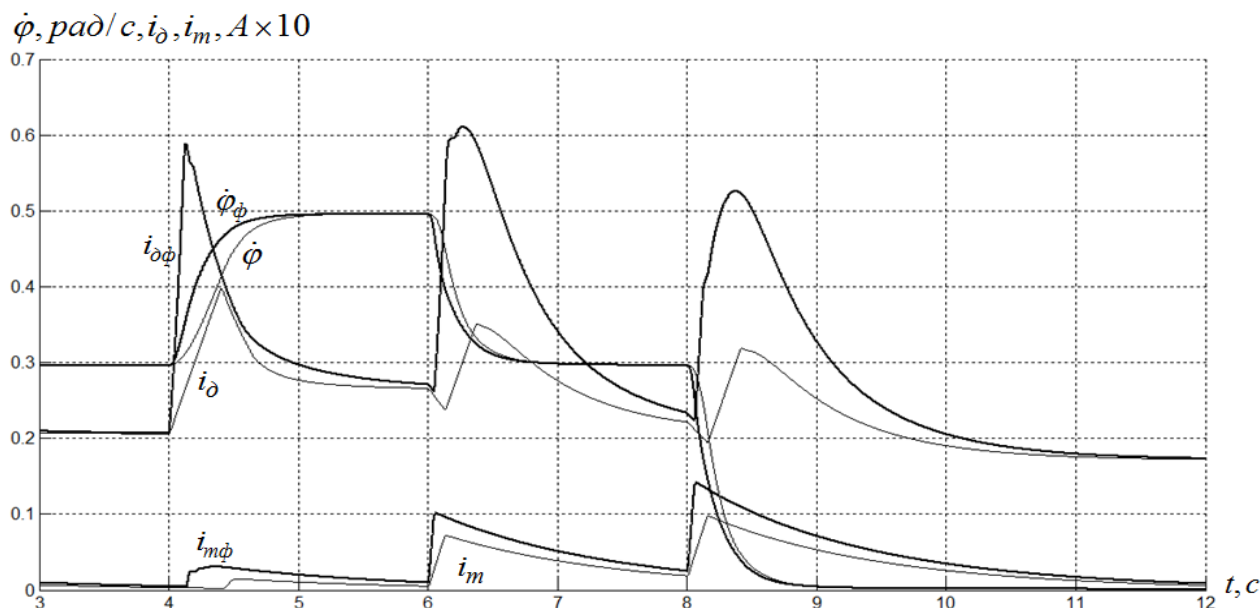


Рисунок 4 – Переходные процессы угловой скорости и токов при форсированном и нефорсированном управлении БСП

Начиная с шестой секунды, САУ отработывает снижение угловой скорости до предыдущего установившегося значения 0,3 рад/с. И в этом режиме имеет место снижение времени переходного процесса за счет более быстрого роста тока и, следовательно, момента тормозящего привода в форсированном режиме по сравнению с нефорсированным. В момент времени 8с устанавливается нулевое управляющее воздействие по скорости. Поведение системы при форсированном и нефорсированном управлении подобно рассмотренному выше, хотя сокращение времени переходного процесса менее существенно.

Реакция системы на ударное возмущение по нагрузке для форсированного и нефорсированного режимов приведена на рис. 5. После выхода на установившийся режим с нагрузкой 10000Н в момент времени 4с момент нагрузки скачком увеличивается до 15000Н, а на 6с нагрузка возвращается снова к 10000Н.

Как видно из рис. 5, перерегулирование по угловой скорости в переходных процессах отработки ударной нагрузки как при ее увеличении, так и при снижении существенно отличается в пользу форсированного режима управления. Начиная с момента времени 8 с, САУ отработывает нулевое задающее воздействие по скорости подачи. Снижение скорости от 0,4 до 0,04 рад/с происходит за время $\approx 0,45$ с, что вполне приемлемо для работы регулятора нагрузки привода исполнительных органов, так как асинхронный двигатель привода исполнительных органов имеет большее время опрокидывания.

Следует отметить, что снижение угловой скорости БСП при ударной нагрузке, как это имеет место при нефорсированном режиме на рисунке 5, может быть предпочтительным,

поскольку снижение скорости предохраняет элементы трансмиссии от ударных нагрузок.

Приведенные графики показывают, что система имеет хороший статизм в обоих режимах управления. В форсированном режиме статизм равен 99,7%.

Безусловно, снижение времени переходных процессов может быть получено путем включения дополнительных резисторов в обмотку управления тормоза, однако при этом нужно будет обеспечивать их охлаждение, что потребует существенных изменений конструкции блока управления БСП.

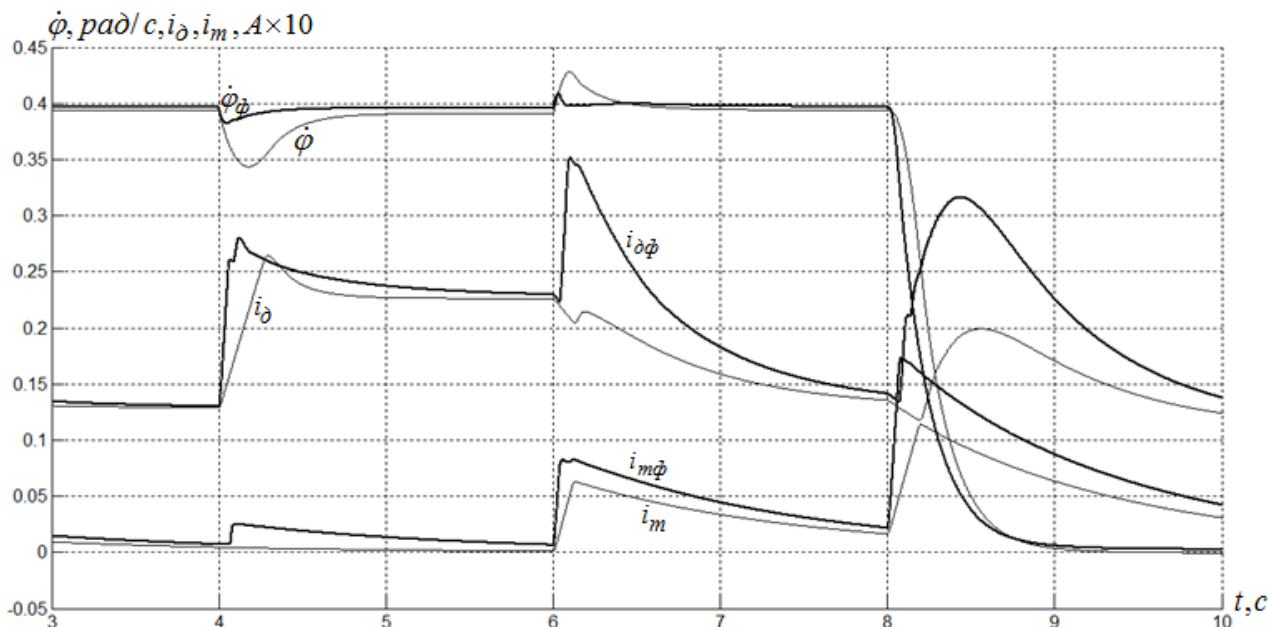


Рисунок 5 – Реакция САУ на ударные нагрузки

Выводы.

1. Предложенный режим форсирования тока в обмотках управления электромагнитных тормозов скольжения в сочетании со встречным включением приводов обеспечивает существенное улучшение динамических характеристик САУ БСП и делает возможным качественное управление нагрузкой привода исполнительных органов 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, что позволит уменьшить количество опрокидываний двигателя привода исполнительных органов, повысить среднюю скорость подачи и в итоге производительность комбайна.

Список использованной литературы

1. Поцепаев, В.В. Исследование САУ встроенной системой подачи с электромагнитными тормозами скольжения очистных комбайнов /В.В. Поцепаев, А.А. Воропаева // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Обчислювальна техніка та автоматизація». – Красноармійськ, 2015. – Випуск 1 (28).– С. 63 – 71.
2. Машины и оборудование шахт и рудников: Комбайн очистной К85 [Электронный ресурс]: Mining-media. – Режим доступа: http://www.tinref.ru/000_uchebniki/01790gornoe_delo/013_spr_mashini_i_oborudovanie_dla_shaht_i_rudnikov/053.htm. – Дата доступа: март 2016. – Загл. с экрана.
3. НТБ Горная промышленность: Опыт плюс кооперация. Создание отечественного очи-

- стного комбайна K600 для отработки пластов средней мощности [Электронный ресурс]: Mining-media. – Режим доступа: <http://www.mining-media.ru/ru/article/podzemmash/944-opyt-plyus-kooperatsiya-sozdanie-otechestvennogo-ochistnogo-kombajna-k600-dlya-otrabotki-plastov-srednej-moshchnosti>. – Дата доступа: март 2016. – Загл. с экрана.
4. Серов, Л.А. Устройства управления и системы регулирования угледобывающих машин / Л.А. Серов – М.: Недра, 1995. – 167 с.
 5. Ковальчук А.Н. Протокол заводских испытаний блока вынесенной системы подачи БПВСП за 24.08.2006 г. / А.Н. Ковальчук – ОАО «ХМЗ «Свет шахтера», г. Харьков. 2006. – 5с.
 6. Щетинин Т.А. Электромагнитные муфты скольжения / Т.А. Щетинин – М.: Энергоатомиздат, 1985.– 272 с.
 7. Поцепаев, В.В. Исследование динамики и выбор рациональных параметров вынесенного привода подачи очистных комбайнов: автореф. дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук: спец. 05.05.06 «Горные машины» / Поцепаев Валерий Валерьевич; Институт горного дела им. А.А. Скочинского (ИГД им. А.А. Скочинского). – Москва, 1986. – 14 с.
 8. 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.
 9. 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. – Донецк 2012. – Вип. 22 (200). – С. 6 – 10.
 10. 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. – Киев, 1988. – Вып. 52. – С. 62 – 65.
 11. Санченко, А.П. 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 в г. Донецке 26-28 апреля 2007 г. – Донецк: ДонНТУ, 2007. – С. 17-18.

References

1. Potsepaev, V.V. and Voropaeva, A.A. (2015), “Automatic stabilization of the rate of feed rendered with an electromagnetic brake slip for mining machine”, *Naukovi praci Donec'kogo nacional'nogo tehnicnogo universytetu. Serija: “Obchysljuval'na tehnika ta avtomatyzacija”*, vol. 22, no 200, pp. 6-10.
2. “Machinery and equipment of mines. «Shearer K85»”, [Online], available at: http://www.tinref.ru/000_uchebniki/01790gornoe_delo/013_spr_mashini_i_oborudovanie_dla_shaht_i_rudnikov/053.htm (Accessed 12 March 2015).
3. Miningmedia (2015), “STL Mining Industry. «Experience and cooperation. Domestic Shearer K600 for Working Layers of Average Power Creating»”, [Online], available at: <http://www.mining-media.ru/ru/article/podzemmash/944-opyt-plyus-kooperatsiya-sozdanie-otechestvennogo-ochistnogo-kombajna-k600-dlya-otrabotki-plastov-srednej-moshchnosti> (Accessed 17 March 2015).
4. Serov, L.A. (1995), *Ustroystva upravleniya i sistemyi regulirovaniya ugledobyivayuschih mashin* [Control and regulation system of coal mining machinery], Nedra, Moscow, Russian Federation.

5. 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.
6. Schetinin, T.A. (1985), *Elektromagnitnyie muftyi skolzheniya* [Electromagnetic clutch slip], Energoatomizdat, Moscow, Russian Federation.
7. 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, Russian Federation.
8. 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.
9. 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 tehnicnogo universytetu. Serija: "Obchysljuval'na tehnika ta avtomatyzacija"*, vol. 22, no 200, pp. 6-10.
10. Dubinin, S.V. and Sydorenko, I.T. (1988) "Electromagnetic clutches slip in drives of mining machines using", *Gornaya elektromehanika i avtomatika: Resp.mezhved. nauch.-tehn. sb.*, no 52, pp. 62-65.
11. 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:
26.04.2016 г.

Рецензент:
д-р. техн. наук, доц. Вовна А.В.

В.В. Поцєпєв, Ю.Б. Шмідт.

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

Дослідження форсованого управління вбудованою системою подачі з електромагнітними гальмами ковзання очисних комбайнів. Проведені експериментальні і теоретичні дослідження двоприводної безцепної системи подачі з електромагнітними гальмами ковзання очисних комбайнів визначили доцільність зустрічного включення приводів. Це дозволяє компенсувати високодинамічні пускові моменти приводів і забезпечити повну керованість швидкістю подачі комбайна при великих кутах падіння пласта. Маючи переваги, такі як висока надійність, дешевизна і відсутність додаткового кабелю управління, приводи з електромагнітними гальмами ковзання мають істотну інерційність, пов'язану з великою індуктивністю обмотки управління, що знижує швидкодію системи стабілізації навантаження приводу виконавчих органів комбайна. Швидкодія приводів може бути істотно підвищена шляхом форсування перехідних процесів струму управління за рахунок підвищених керуючих напруг на обмотках управління гальм. Розроблена математична модель двоприводної системи подачі, що враховує статичні і динамічні характеристики сучасних приводів з керованими електромагнітними гальмами для гірничих машин. На її основі виконано структурний і параметричний синтез системи автоматичного управління швидкістю подачі, що реалізує форсування перехідних процесів розгону і гальмування системи подачі комбайна.
Ключові слова: система автоматичного управління, привід подачі, електромагнітний гальмо ковзання, математична модель, перехідні процеси, форсування, очисний комбайн.

V.V. Potsepaev, J.B. Shmidt.

Donetsk National Technical University

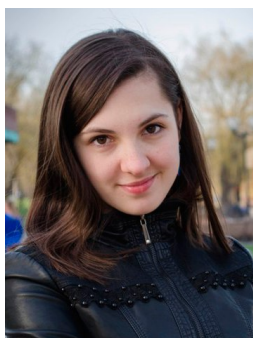
Investigation of the forced automatic control by embedded feed system with electromagnetic brakes of the shearer. One of the built-in feed systems used to move the modern shearers, is a system with two identical drives in which as the variator of the feed rate the electromagnetic brake slip is used. The experimental and theoretical studies of shearer chainless feed system with two drives based on electromagnetic slip brakes determine the feasibility of an oncoming connection of the drives. This allows compensating for highly dynamic starting torques of the drives and ensures full control of shearer speed at a high angle of incidence of the coal seam. With advantages such as high reliability, low cost and no additional control cables, drives with electromagnetic slip brakes have significant inertia, associated with large inductance of control coil, which reduces the speed of the control system by load stabilization of executive bodies of shearer. The speed of the drive transition can be significantly improved by speeding up of the transition processes of the control current through the increase of control voltage on the brake control windings. A mathematical model of the embedded feed system with two actuators, taking into account the static and dynamic characteristics of modern drives with controlled electromagnetic brakes for mining machines was developed. On its basis we made structural and parametric synthesis of an automatic control system of feed rate control, which implements the acceleration of the transitions of acceleration and deceleration of the shearer feed system. The mathematical model is implemented in Simulink modeling environment. Modeling of the main transition processes in the system of automatic control of feed shearer speed for forced and unforced control mode was performed. We also considered transients in the system arising from impact loads. The proposed regime of forcing current in the windings of the control of electromagnetic slip brakes in conjunction with two opposing connected drives provides a significant improvement in the dynamic characteristics of the control system by speed and enables quality control of load drive executive bodies of the shearer. The developed control system provides stability, acceleration and quality of transition of the feed rate in a given speed range of the shearer.

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



Поцепаев Валерий Валерьевич, Украина, окончил Донецкий национальный технический университет (ДПИ), 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.



Шмидт Юлия Борисовна, Украина, окончила Донецкий национальный технический университет, инженер кафедры автоматизации и телекоммуникаций, ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет» (пл. Шибанкова, 2, г. Красноармейск, 85300, Украина).

Основное направление научной деятельности – методы исследования и оптимизации систем автоматического управления.