



УДК 622.062, 621.3.078, 62-57

## Управление динамической нагруженностью забойных скребковых конвейеров

**Е.К.ЕЩИН***Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф.Горбачева, Кемерово, Россия*

Рассмотрена задача управления динамической нагруженностью забойных скребковых конвейеров (СК) и зафиксировано неудовлетворительное состояние нагруженности механических и электрических компонентов СК. Обозначена возможность возникновения автоколебательного характера нагруженности всей системы из-за особенностей движения тяговой цепи по рештачному ставу СК. Отмечено свойство системы – циклический характер нагружения цепи при движении, вызывающий обменные процессы энергией между механическими и электродвигательными компонентами конвейера (при использовании головного и хвостового электроприводов) через общую кабельную сеть системы электроснабжения СК. Высокий уровень динамической нагруженности электромеханической системы вызывает проблему ликвидации порождающего его автоколебательного режима работы СК, решить которую предлагается путем изменения угловых скоростей вращения приводных звездочек СК. Угловые скорости можно изменять путем применения частотного управления асинхронными электродвигателями. Установлена эффективность задания частоты токов статоров электродвигателей головного и хвостового приводов конвейера пропорционально частоте вращения их роторов для ликвидации автоколебательных режимов работы в основном эксплуатационном режиме. Рассмотрена возможность снижения пусковых ударных значений электромагнитных моментов электродвигателей. Результаты расчетов режимов пуска и ликвидации автоколебательного режима работы представлены на примере забойного скребкового конвейера Анжера-34. Сопоставлены результаты расчетов режимов пуска и основного эксплуатационного транспортирования угля в неуправляемом режиме работы и после введения управления, на основе которых сделан вывод о целесообразности использования активного управления динамической нагруженностью СК.

**Ключевые слова:** забойный скребковый конвейер; динамическая нагруженность; электропривод; асинхронный электродвигатель; частотное управление

**Как цитировать эту статью:** Ещин Е.К. Управление динамической нагруженностью забойных скребковых конвейеров // Записки Горного института. 2019. Т. 239. С. 570-575. DOI: 10.31897/PMI.2019.5.570

**Введение.** Известно, что забойный скребковый конвейер (СК) представляет собой совершенно необычный объект. Его главная особенность в том, что исполнительный орган представлен в виде замкнутых протяженных круглозвенных тяговых цепей со скребками. Именно тяговая цепь привлекает внимание множества исследователей из-за открытого в 30-х годах XIX века В.Альбертом (Wilhelm Albert) [11] явления, названного усталостью (fatigue) металлов. В.Альберт сконструировал машину для испытания конвейерных цепей, используемых в то время на шахтах Клаусталь в Германии, и установил, что усталость не связана со случайными перегрузками, но зависит от нагрузки и числа повторений ее циклов. О дальнейшем внимании к проблеме усталости металлов в различных областях науки можно судить по тому факту, что в [17] указано большое количество библиографических ссылок (к 1996 г. – 554).

Циклы нагрузок конвейерных цепей традиционно объясняются тем, что при скольжении звеньев цепи по металлической поверхности (рештакам) они преодолевают силу сопротивления движению – силу трения скольжения. Эта сила имеет нелинейный характер изменения своего значения в зависимости от скорости [4, с. 312, 317; 6, с. 290, 297]. Данное обстоятельство, с точки зрения теории технического управления, означает введение в систему нелинейного звена, что обеспечивает возможность возникновения в системе автоколебательного режима работы, т.е. циклического характера нагружения или, по И.В.Крагельскому, возникновения механических релаксационных колебаний, а по Я.Г.Пановко – релаксационных фрикционных автоколебаний. Эти колебания возникают при рассмотрении тяговой цепи конвейера как упруго пластического тела, способного запасать, отдавать и рассеивать энергию и при наличии ее источника. Это объяснение явления превалирует до сих пор [15].

Экспериментальные исследования [8, 10] состояния тяговых цепей скребковых конвейеров уже давно подтвердили существование в них высокого уровня динамической составляющей усилия и установили, что циклический характер нагружения цепи при движении – ее свойство.

Оно вызывает обменные процессы энергией между механическими компонентами конвейера и электродвигательными (при использовании головного (приводного) и хвостового (концевого) электроприводов) через общую кабельную сеть системы электроснабжения (СЭС) СК. Электромеханическая система (ЭМС) СК представляет собой объект, обладающий внутренними обратными связями по емкостным компонентам механической системы (цепной тяговый орган) и емкостным компонентам электромеханической системы (асинхронные электродвигатели с короткозамкнутыми роторами (АД), кабельная сеть системы электроснабжения). Здесь под емкостными компонентами понимаются те, что могут запасать и отдавать энергию.

Ситуация, с точки зрения динамической нагруженности всей электромеханической системы СК, крайне неудовлетворительна и ведет к появлению многочисленных работ по ее улучшению. Предлагаемая публикация – одна из них.

**Постановка проблемы.** Высокий уровень динамической нагруженности электромеханической системы СК естественным образом порождает проблему ликвидации вызывающего его автоколебательного режима работы. Решают ее по-разному. Например, в [3] отмечено, что введение в состав редуктора электропривода СК механической интеллектуальной системы приводов CST (Controlled Start Transmission) обеспечивает идеальное снятие нагрузки на звездочке (в практике с 1995 г.). Понятно, что это достигается за счет изменения (как реакции на изменение нагрузки) входящей в состав CST жесткости многодисковой муфты сцепления, что, в свою очередь, изменяет величину момента сопротивления (упругого момента трансмиссии) и мгновенной скорости приводной звездочки СК. В результате система управления CST придает СК свойства, не допускающие возникновения в электромеханической системе СК автоколебаний.

Другое направление [2,12] базируется на введении в систему электроснабжения электродвигателей СК дополнительных электрических преобразователей энергии, например, частотных преобразователей, и управлении с их помощью состоянием электродвигателей СК, в частности, величинами их электромагнитных моментов. Электромагнитные моменты электродвигателей – источники силовых управляющих воздействий на механическую часть СК. О необходимости работы в этом направлении сказано в [9]: «Для повышения надежности работ лавных конвейеров, выпускаемых ООО «ПО «ЮРМАШ», необходимы взрывобезопасные частотные преобразователи».

Возможно подавление автоколебательных скользящих движений (stick-slip motion) в механических движущихся системах с помощью внешнего управляемого вибрационного воздействия (active vibration control) [16].

Ликвидировать автоколебательный режим работы ЭМС СК можно путем введения управления его состоянием, физически – изменением (вариант CST) мгновенных значений угловых скоростей вращения приводных звездочек редукторов СК. Поэтому, по аналогии с принципами CST, рассмотрим проблему ликвидации автоколебательного режима работы электромеханической системы СК путем изменения угловых скоростей вращения приводных звездочек, но путем управления состоянием асинхронных электродвигателей головного и хвостового приводов.

**Методология.** Рассмотрим решение задачи на примере электроприводов скребкового конвейера Анжера-34 (А34), допускающих работу с частотными преобразователями. Возможный вариант схемы электроснабжения электродвигателей конвейера приведен на рис.1. Здесь используется забойный СК с длиной става 220 м, тяговая цепь калибра 34×126 с разрушающим усилием 1450 кН. Электродвигатели получают питание через кабельные линии (КГЭШ 3×95) с длинами 90 м (головной привод СК) и 310 м (хвостовой привод СК) от общего источника TN 6-PO2.1 (1200/6-1,2). Общность электроснабжения означает, что, во-первых, в этих условиях электродвигатели будут работать с разными уровнями питающего напряжения, а во-вторых, при изменяющейся на их валах нагрузке появляется электрический контур для обмена электрической энергией между двигателями по их статорным цепям. Используются двигатели АД ДКВ355LB4 с параметрами: номинальная амплитуда питающего напряжения  $U = 1612$  В (действующее значение – 1140 В); синхронная угловая скорость вращения поля статора  $\omega_n = 314$  рад/с; активные и реактивные сопротивления обмоток статора и ротора  $R_s = 0,054$  Ом,  $R_r = 0,083$  Ом,  $X_s = 0,183$  Ом,  $X_r = 0,287$  Ом, индуктивное сопротивление цепи намагничивания  $X_m = 10,8$  Ом, число пар полюсов  $P = 2$ ; величина момента инерции ротора  $J = 4,69$  кг·м<sup>2</sup>, мощность каждого АД равна 315 кВт.

Динамическая модель цепного тягового органа синтезирована на основе наиболее распространенного принципа – представления тягового органа совокупностью элементарных динами-

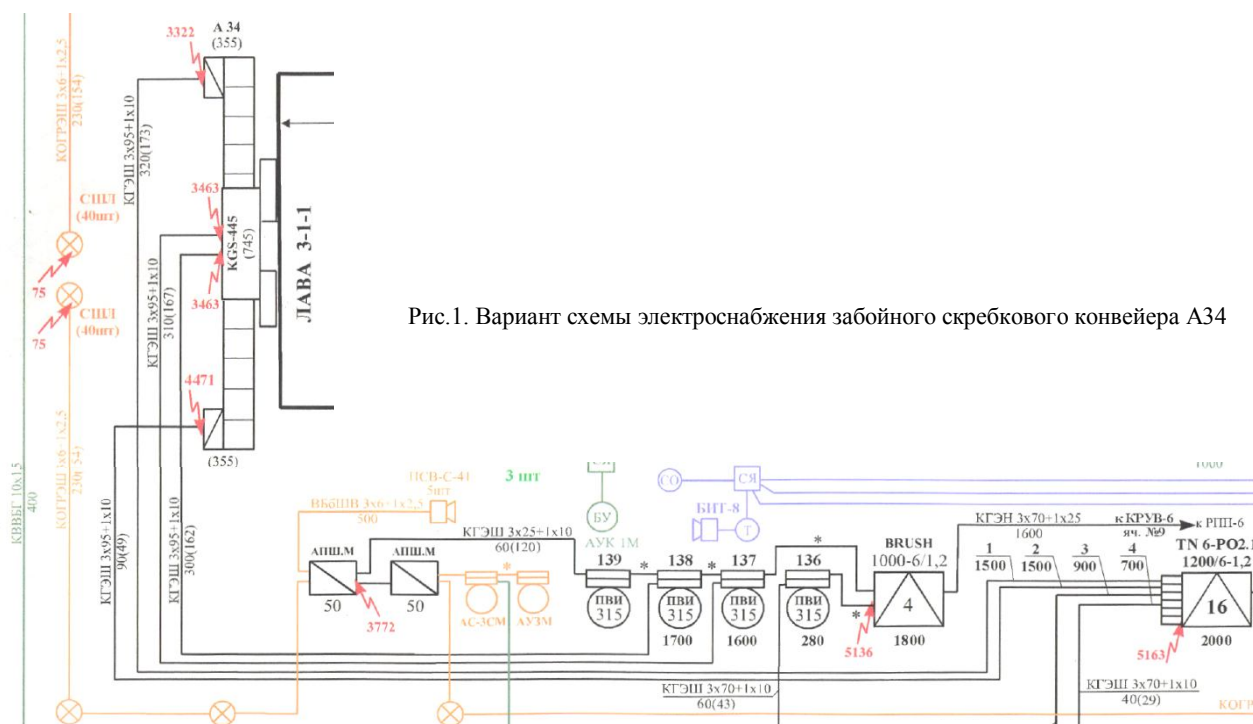


Рис.1. Вариант схемы электроснабжения забойного скребкового конвейера А34

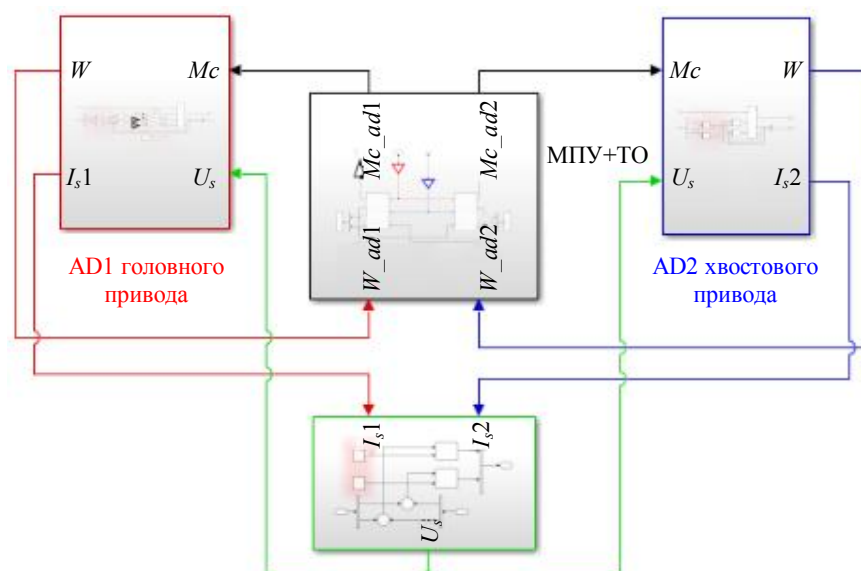


Рис.2. Укрупненная Simulink-модель ЭМС СК

$W$  ( $W_{ad1}$ ,  $W_{ad2}$ ) – угловые скорости вращения головного (AD1), хвостового (AD2) приводов СК;  $Mc$  ( $Mc_{ad1}$ ,  $Mc_{ad2}$ ) – моменты сопротивления на валах AD1, AD2;  $I_{s1}$ ,  $I_{s2}$  – токи AD1, AD2;  $U_s$  – напряжение на входных участках питающих кабелей AD1, AD2; МПУ – механические передаточные устройства (редукторы) головного и хвостового приводов СК; ТО – тяговый орган

ческих звеньев [1, 5, 13, 14, 18]. Укрупненная модель электромеханической системы СК по рис.1 реализована в графической среде имитационного моделирования Matlab Simulink (рис.2). Результаты моделирования режимов пуска электроприводов хвостового и головного приводов, а также рабочего режима транспортирования груза (неуправляемого и управляемого режимов) представлены на рис.3. Пуск организован последовательным включением электродвигателей хвостового, а затем головного приводов.

**Обсуждение.** Пуск электромеханической системы СК происходит при пониженном напряжении на статоре хвостового АД, получающего питание через протяженный участок кабельной сети длиной 320 м (рис.1). При этом максимальная потеря амплитуды напряжения  $U_s$  составляет

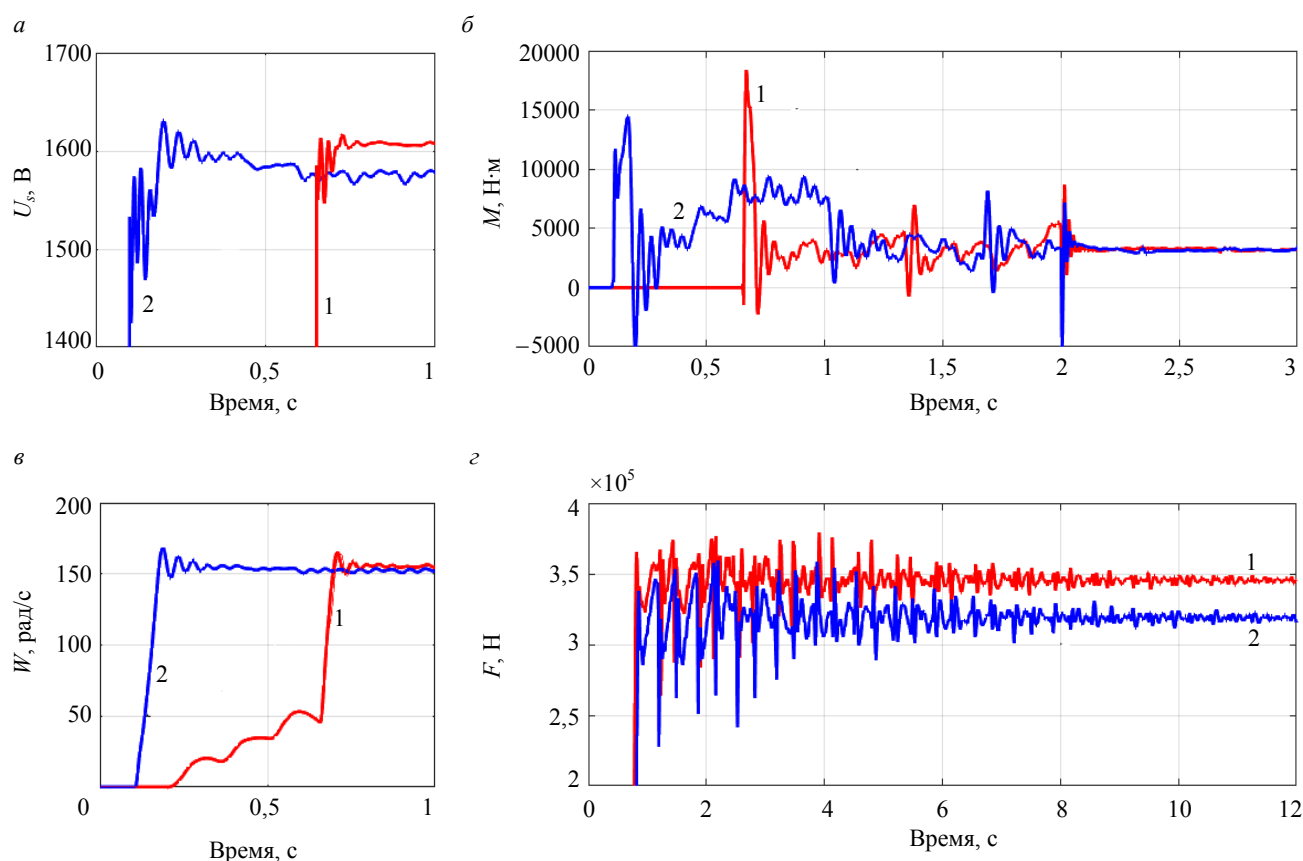


Рис.3. Динамика управления состоянием СК – фрагменты: а – изменение амплитуд питающих напряжений при пусках головного приводов (1) и хвостового (2) СК; б – изменение электромагнитных моментов электродвигателей СК при пуске с подавлением ударных моментов и при переходе (2-я с) к управлению с подавлением автоколебательного режима работы; в – изменение угловых скоростей вращения  $W$  электродвигателей головного (1) и хвостового (2) приводов при их последовательном пуске; г – изменение усилий в участках тяговой цепи – грузовой (1) и холостой (2) при ликвидации автоколебательного режима работы

12 % ( $\approx 190$  В) в диапазоне времени 0-1 с от номинального значения (см. рис.3, а). Двигатель головного привода запускается в более комфортных условиях – на менее протяженном участке кабельной сети (90 м) и, что самое главное, он включается в работу, когда его ротор уже раскручен двигателем хвостового привода (см. рис.3, в, фрагмент  $W$ ) до  $\approx 50$  рад/с. Результат пуска при раскрученном роторе – исключение ударных значений электромагнитных моментов, которые наблюдаются при пуске хвостового АД и достигают двукратных максимальных значений по статической механической характеристике. Исключить пусковые ударные значения электромагнитного момента хвостового АД возможно по [7], где предлагается предварительно подавать на двигатель полную величину питающего напряжения в виде импульса длительностью 0,0033 с (при частоте питающего напряжения в 50 Гц), перевода АД в режим динамического (магнитного) торможения на такое же время и последующей подаче напряжения питания.

Основная задача управления состоянием СК – ликвидация автоколебательного режима работы ЭМС СК – применительно к АД может быть основана на стабилизации их электромагнитных моментов. Стабилизация моментов АД (обеспечение мягкой механической характеристики) при изменяющихся моментах сопротивления на их валах состоит в работе АД с изменяющейся угловой скоростью вращения их роторов. Это означает, что при работе СК в основном эксплуатационном режиме будут изменяться угловые скорости приводных звездочек головного и хвостового приводов. При частотном варианте управления АД происходит работа электродвигателя с задаваемой величиной абсолютного скольжения  $\alpha = \alpha_p + \beta$ , где  $\alpha$  – относительная частота тока статора;  $\alpha_p$  – относительная частота вращения ротора;  $\beta$  – абсолютное скольжение. При постоянной величине  $\beta$  обеспечивается идеально мягкая механическая характеристика АД, это значит, что во всех управляемых режимах работы двигателя, вплоть до опрокидывания, необходимо вы-



полнение условия  $\beta = \text{const}$ , т.е. обеспечение линейной зависимости  $\alpha = \alpha_p + \beta$ , которая в области рабочих скоростей с достаточной степенью точности аппроксимируется также линейной зависимостью, но проходящей через начало координатной системы  $\alpha$ ,  $\alpha_p$ , т.е.  $\alpha = k\alpha_p$ , где  $k$  находится из условия  $\alpha = 1$ ,  $\alpha_p = \alpha_{pn}$ , где  $\alpha_{pn}$  – начальное относительное значение угловой скорости вращения ротора при частоте тока в статоре равной номинальной. При этом реализуется вариант квазиоптимальной стабилизации электромагнитного момента.

Использование такого варианта управления привлекает простотой реализации, поскольку система управления динамическим состоянием электропривода в этом режиме практически отсутствует. Значение управляющего воздействия (пропорционального  $\alpha$ ) формируется дискретным датчиком скорости и передается непосредственно на преобразовательное устройство без какой-либо дополнительной обработки, где и вычисляется задаваемое значение частоты. Однако следует учесть, что если при этом изменять динамическую составляющую амплитуды напряжения АД в соответствии с частотой тока статора (что физически маловероятно), то возникнет потеря устойчивости двигателя, который в зависимости от величины коэффициента  $k$  может или опрокинуться, или «пойти вразнос». Это объясняется тем, что в данном варианте система оказывается замкнутой положительной обратной связью по скорости. Но если изменять напряжение только по условиям насыщения магнитной цепи АД или технологической необходимости, например, для изменения скорости движения тягового органа СК, то построенная таким образом система управления состоянием электропривода будет абсолютно устойчива [2].

На рис.3, б в диапазоне времени 0-3 с показан переход от неуправляемого режима работы АД к управляемому  $M$  по правилу регулирования частоты тока статора АД  $\alpha = k\alpha_p$ . Включение управляемого режима происходит в момент времени 2 с. В рассматриваемом расчетном варианте модели СК происходит практическая стабилизация значений электромагнитных моментов АД головного и хвостового приводов СК. Обработка данных расчетов показала, что диапазон колебаний электромагнитных моментов для временного интервала 10-12 с составляет  $\Delta M \approx 40 \text{ Н}\cdot\text{м}$  ( $M_{\min} \approx 3140 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ,  $M_{\max} \approx 3180 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ) для АД головного привода и практически такую же величину – для АД хвостового привода, т.е.  $\approx 1,3 \%$  от среднего значения. Усилия в тяговом органе (у головного привода) изменяются при этом в диапазоне  $\Delta F = 14 \text{ кН}$  ( $F_{\min} \approx 418 \text{ кН}$ ,  $F_{\max} \approx 432 \text{ кН}$ ), т.е.  $\approx 3,3 \%$ . Для сравнения – в неуправляемом режиме работы такие же диапазоны:  $\Delta M \approx 5700 \text{ Н}\cdot\text{м}$  ( $M_{\min} \approx 1100 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ,  $M_{\max} \approx 6800 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ) для АД головного и хвостового привода, т.е. около  $\approx 162 \%$ ;  $\Delta F = 2010 \text{ кН}$  ( $F_{\min} \approx 3520 \text{ кН}$ ,  $F_{\max} \approx 5530 \text{ кН}$ ) –  $45 \%$ .

Практическая квазистабильность значений электромагнитных моментов и выравнивание их нагрузок происходит примерно за 0,5 с, а практическая стабилизация усилий в тяговой цепи – примерно за 8 с из-за значительных инерционных масс тяговой цепи и перемещаемого груза (см. рис.3, з) на 8-12 с. Три условно горизонтальные линии – усилия в участках тяговой цепи у головного привода, в середине конвейерного става и у хвостового привода). Для оценки эффективности управления здесь же приведены изменения этих моментов и усилий в тяговой цепи в неуправляемом режиме работы.

**Заключение.** Несмотря на значительный рост качества и надежности забойных СК последнего поколения, они остаются объектами с неудовлетворительным состоянием внутренней динамической нагруженности всей электромеханической системы. С перспективным увеличением длин ставов СК происходит рост динамических составляющих усилий в тяговых цепях СК и амплитуд пульсаций электромагнитных моментов и токов АД, а также усилий в тяговом органе и редукторах приводов СК. Работа АД происходит при постоянно изменяющейся амплитуде питающего напряжения и разным ее уровнем АД головного и хвостового приводов.

Значительное снижение динамической нагруженности ЭМС СК возможно обеспечить за счет организации пусков электродвигателей приводов СК с подавлением ударных электромагнитных моментов и ликвидации автоколебательных режимов работы системы путем введения управляемых изменений скоростей вращения приводных звездочек цепи СК. Последнее реализуется при управлении электродвигателями приводов с квазиоптимальной стабилизацией их электромагнитных моментов.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Бандурин А.Н. Моделирование электромеханических процессов скребкового конвейера // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 1999. № 6. С. 30-32.
2. Ещин Е.К. Вариант частотного управления асинхронным электроприводом горных машин // Электротехника. 1996. № 1. С. 28-30.
3. Интеллектуальная система приводов CST // URL: <http://s7d2.scene7.com/is/content/Caterpillar/C10332020> (дата обращения: 10.12.2018)
4. Крагельский И.В. Трение и износ. М.: Машиностроение, 1968. 480 с.
5. Математическая модель для исследования нагрузок в двухскоростном многодвигательном приводе и тяговом органе скребкового забойного конвейера / В.П.Кондрахин, А.А.Мельник, В.В.Косарев, Н.И.Стадник, И.В.Косарев // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія гірничо-електромеханічна. 2008. Вип. 16(142). С. 132-140.
6. Пановко Я.Г. Основы прикладной теории колебаний и удара. Л.: Машиностроение, 1976. 320 с.
7. Патент № 2235410 РФ. Способ пуска асинхронного электродвигателя / Е.К.Ещин, И.А.Соколов, В.Г.Каширских, В.Л.Иванов, Д.В.Соколов. Оpubл. 27.08.2004. Бюл. № 24.
8. Соснан А. Г. О динамических усилиях в скребковых цепях многоприводных конвейеров // Приложение к сборнику «Горные машины». 1985. № 4. С. 10-15.
9. Технические проблемы машиностроения, требующие срочного решения на основе научных разработок с целью обеспечения выпуска конкурентоспособной техники, не уступающей мировым аналогам // URL: <http://auto-ally.ru/informatika/5256/index.html> (дата обращения: 10.12.2018).
10. Чугреев Л.И. Динамика конвейеров с цепным тяговым органом. М.: Недра, 1976. 160 с.
11. Albert W.A.J. Über Treibseile am Harz: Archive für Mineralogie Geognosie Bergbau und Hüttenkunde. 1838. Vol. 10. P. 215-234.
12. Broadfoot A.R. New Control Strategies for Longwall Armored Face Conveyors / A.R.Broadfoot, R.E.Betz // IEEE Transactions on Industry Applications. 1998. Vol. 34. Iss. 2. P. 387-394.
13. Chunzhi Z. Dynamic modeling of scraper conveyor sprocket transmission system and simulation analysis / Z.Chunzhi, M.Guoying // IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. 2011. Beijing, China. P. 1390-1394.
14. Dolipski M. Dynamics of non-uniformity loads of AFC drives / M.Dolipski, E.Remiorz, P.Sobota // Arch. Min. Sci. 2014. Vol. 59. № 1. P. 155-168.
15. Karachevtseva I. The Cyclic Loading as a Result of the Stick-Slip Motion / I.Karachevtseva, A.Dyskin, E.Pasternak // Advanced Materials Research. 2014. Vol. 891-892. P. 878-883.
16. Neubauer M. Control of Stick-Slip Vibrations / M.Neubauer, C.-C.Neuber, K.Popp // Solid Mechanics and its Applications. 2005. Vol. 130. P. 223-232.
17. Schlitz W. A history of fatigue // Engineering Fracture Mechanics. 1996. Vol. 54. Iss. 2. P. 263-300.
18. Shi J.G. Research on Dynamic Tension Control Theory for Heavy Scraper Conveyor / J.G.Shi, J.Mao, X.H.Wei // Applied Mechanics and Materials. 2010. Vol. 34-35. P. 1956-1960.

**Автор Е.К.Ещин**, д-р техн. наук, профессор, [eke\\_kuzstu@mail.ru](mailto:eke_kuzstu@mail.ru) (Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф.Горбачева, Кемерово, Россия).

Статья поступила в редакцию 20.12.2018.

Статья принята к публикации 27.05.2019.