

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 62-93

Е. К. Ещин

ДИНАМИКА СКРЕБКОВЫХ КОНВЕЙЕРОВ. ОБЗОР

Известно, что «...электрический привод как раз наиболее надежно обеспечивает и любую быстроходность и автоматическую связность механических операций на самом обширном поле труда» (план ГОЭЛРО¹ стр.11 - http://istmat.info/files/uploads/29115/plan_goelro_do_klad.pdf).

Однако в горном электроприводе для целого ряда ключевых машин проблема любой быстроходности и автоматической связности остается до сих пор не вполне решенной. К таким машинам относятся, например, забойные (лавные) скребковые конвейеры (СК).

Проблемы здесь известны. Например, еще в 2004 году Юргинский машиностроительный завод определил «**Технические проблемы машиностроения**, требующие срочного решения на основе научных разработок с целью обеспечения выпуска конкурентоспособной техники, не уступающей мировым аналогам». Там говорится, что «...Для повышения надежности работ лавных конвейеров, выпускаемых ООО «ПО «ЮРМАШ» необходимы взрывобезопасные частотные преобразователи мощностью до 500 кВт напряжением питания 1140В.»

Применение частотных преобразователей позволит:

- а) резко уменьшить выход из строя электродвигателей при раскатке загруженного конвейера;
- б) устранить возникновение пусковых токов электродвигателей, что приведет к отсутствию недопустимых просадок питающего напряжения;
- в) свести к минимуму порывы тяговых цепей конвейера;
- г) устанавливать необходимую скорость перемещения, как добытого угля, так и транспортируемых грузов.»

Конечно, эти пункты проблем (а, б, в, г) известны ранее. Эти пункты влекут за собой разработку систем управляемого (регулируемого) электропривода. При этом понятно, что для успешного решения задач управления режимами работы забойных машин необходимо аналитическое описание происходящих в них динамических процессов. Разумеется, динамические процессы должны рассматриваться

в совокупной электромеханической системе машин, связывая между собой ее параметры.

Если говорить о забойных скребковых конвейерах, то описание их динамического состояния и построение на этой основе системы управления на базе управляемого асинхронного электропривода будет зависеть от решаемой задачи (а, б, в, г). Например, - в) свести к минимуму порывы тяговых цепей конвейера. Этот пункт вызван констатированным неблагоприятным аварийности круглозвенных тяговых цепей скребковых конвейеров.

Имеющаяся неблагоприятная статистика аварийности цепей СК относится, в основном, к цепям калибров 18 x 64, 23 x 86 и временного периода 1970-1990 годов. В [3, 6] отмечается, что средние сроки службы круглозвенных цепей на конвейерах типа СП в то время составляли 5 — 8 месяцев. Преобладали порывы цепей, вызванные усталостными и фрикционными износами.

В настоящее время в шахтном скребковом конвейере КСЮ271 производства Юргинского машиностроительного завода используется цепь калибра 30 x 108. При этом нареканий на работу конвейера нет. Вот пример отзыва (<http://www.yumz.ru/product/mine/konvei/ksu271/>): 25.08.09 ОАО «Шахта «Алексиевская»: В ноябре 2007 года нам был поставлен скребковый конвейер КСЮ271.38Л производства Юргинского машиностроительного завода. С 19.01.2008 г. по 10.02.2009 г. конвейер отработал в лаве №410, затем с 20.04.2009г. перемонтирован в лаву №324 где и работает по настоящее время. В основном нареканий на работу при эксплуатации конвейера КСЮ271.38Л с нашей стороны нет, сервисное обслуживание производится качественно и в срок.

Компания Caterpillar (mining.cat.com) для высокопроизводительных забойных конвейеров использует цепи калибров 42 x 146. Линейка забойных СК производства Анжерского машиностроительного завода использует цепи калибров 26 x 92, 30 x 108, 34 x 126, 38 x 137, 42 x 146.

Факты последнего времени эксплуатации современных забойных конвейерных систем позволяют сделать вывод о том, что совершенствование конструкций, качества изготовления и обслуживания ликвидировало (или существенно уменьшило) проблему порывов тяговых цепей.

Тогда, естественно, возникает вопрос о внутренней динамике современных забойных скребко-

¹ Профессор Московского горного института В.С.Тулин установил, что автором этого текста является В.И.Ленин

вых конвейеров. В первую очередь, о нагрузках в тяговом органе – цепи (цепях).

Экспериментальные исследования 80-х годов [2] показали, что при движении звена цепи вокруг звездочек при вхождении вертикального звена цепи в контакт с зубьями звездочки и последующим движением его по окружности зацепления совместно с шестизубой звездочкой в тяговом органе возникают пиковые усилия (рис. 1, 2). В

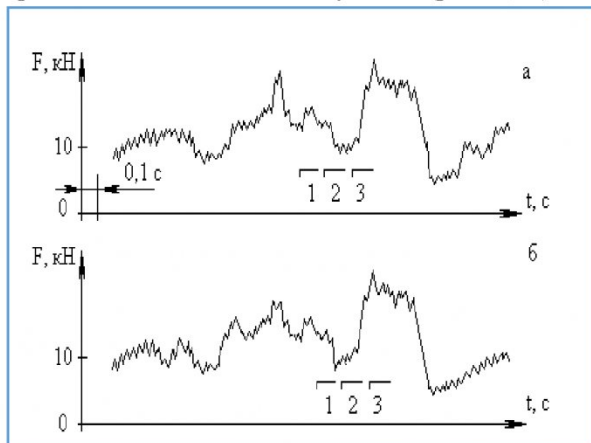


Рисунок 1 Характер нагрузок в звеньях цепи при попадании их на натяжные (а, б) звездочки [2]

[2] отмечается, что «...увеличение амплитуды динамических усилий на звездочке представляет собой реальный фактор снижения усталостной прочности рядовых и соединительных звеньев тягового органа и приводных звездочек».

Весьма вероятно, что это явление (резкий рост амплитуды усилия в тяговом органе) сохраняется в современных приводах. Однако, следует отметить, что компания Caterpillar разработала специальную звездочку GR для распределения нагрузки на три зуба, что обеспечивает максимальную контактную поверхность между звеньями конвейерной цепи и зубом звездочки во время работы.

Основное направление при разработке математических моделей электромеханического комплекса скребкового конвейера – переход от мате-

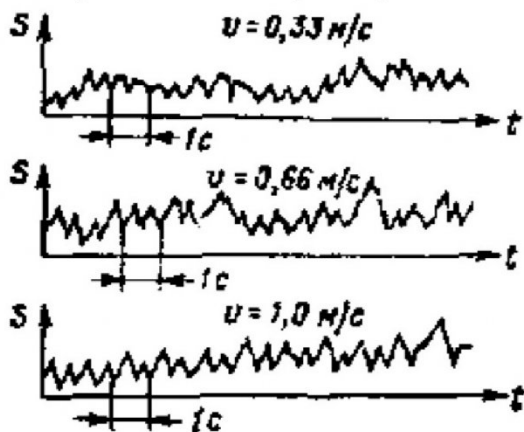


Рисунок 3 Осциллограммы тяговых сил (автоколебания) при разных скоростях движения

матических моделей тяговых органов на основе представления их в виде совокупности дифференциальных уравнений в частных производных [6] к конечно-элементным моделям, в которых движение каждого элемента описывается обыкновенным дифференциальным уравнением 2-го порядка [10 - 17]. В частности, в [10] 1975 год говорится – «Разобьем цепь на участки длиной $dx...$ », в [11] 1999 год «...для синтеза математической модели

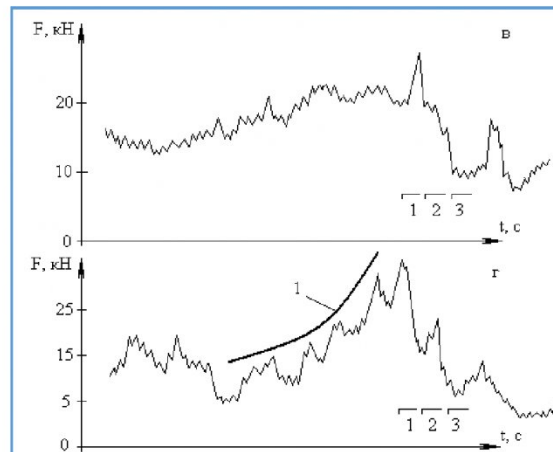


Рисунок 2 Характер нагрузок в звеньях цепи при попадании их на приводные (в, г) звездочки [2]

была выбрана дискретная модель упруго-пластического тела», в [9] 2008 год – «Для разработки математической модели конвейера использовано представление тягового органа с грузом в виде совокупности конечных элементов, обладающих упругими, диссипативными и инерционными свойствами», в [17] 2011 год, отмечается – «A dynamic model has been found ... based on **multi-body** system dynamic theory, which can be used of researching of the dynamic characteristic of scraper conveyor ...». В.

В своей основе предлагаемые модели едины. Различие состоит, например, в учете или не учете неравномерности движения цепи, вызываемой приводными звездочками. Другая (важная) особенность – учет или не учет влияния параметров электрических машин (асинхронных электродвигателей) в составе электроприводов конвейеров. Особенного внимания заслуживают ситуации, когда привод конвейеров многодвигательный с питанием электрических машин через протяженную кабельную сеть от источника питания соизмеримой мощности.

Оценка внутренней динамики скребковых конвейеров производится прямым или косвенным образом. Пример прямой оценки дан в [6, 1976 год], где приведены «...экспериментальные замеры динамических усилий в тяговых цепях конвейеров» (рис. 3).

Косвенным образом оценивается внутреннее динамическое состояние электромеханической системы скребкового конвейера в [15, 2014 год], где (рис. 4, 5) приводятся результаты компьютер-

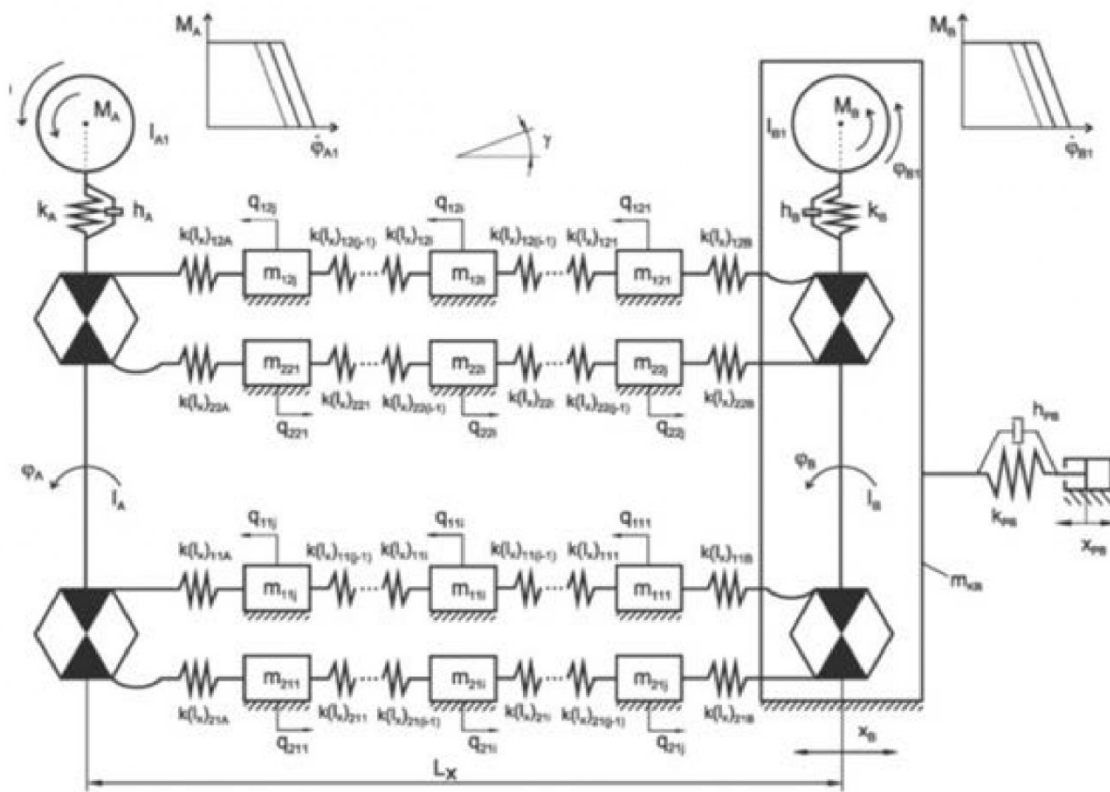


Fig. 1. Physical armored face conveyor model intended for examining load non-uniformity of drives

Рисунок 4 Расчетная схема модели скребкового конвейера по [15]

ного моделирования потребляемой мощности электроприводами скребкового конвейера длиной 250 м. с одним электродвигателем главного при-

стие звездочек приводного барабана с цепями и функции, аппроксимирующие механические характеристики асинхронных электродвигателей, питаемых от преобразователей частоты.

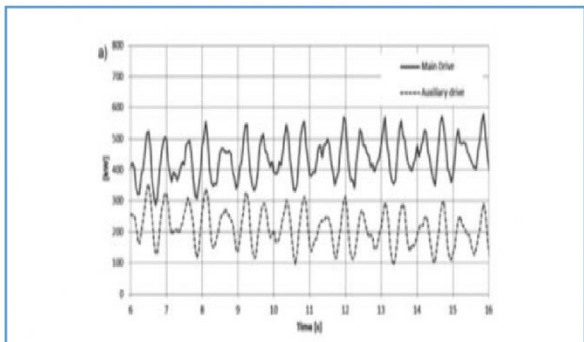


Рисунок 5 Изменение потребляемой мощности в установившемся режиме конвейера длиной 250 м. при значении относительного скольжения главного привода – 0.5%

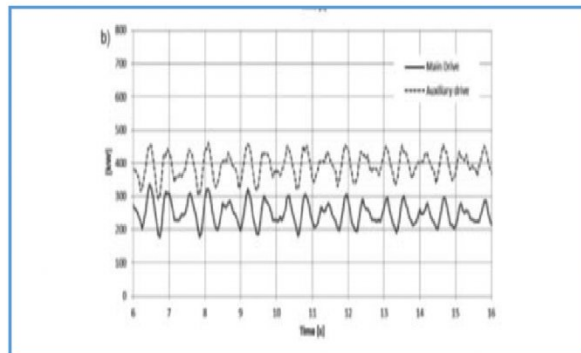


Рисунок 6 Изменение потребляемой мощности в установившемся режиме конвейера длиной 250 м. при значении относительного скольжения главного привода – 2.5%

вода и одним вспомогательного. Мощность двигателей – 325 кВт. Номинальный момент – 2035 Нм. Имеется две центральной цепи калибра 34x126 мм.

Движение модели описывается системой $(4j+5)$ нелинейных обыкновенных уравнений второго порядка (j – количество электродвигателей в приводе конвейера). В математическую модель добавлены функции, описывающие взаимодей-

Из рисунков (3,5,6) видно, что качественный характер внутреннего динамического состояния скребковых конвейеров по крайней мере с 70-х годов прошлого века не изменился.

Дополнительно можно отметить, что результаты моделирования в [15, 2014 год] (рис. 5, 6) качественно практически совпадают с экспериментальными результатами [8, 2011 год] (рис. 7, 8).

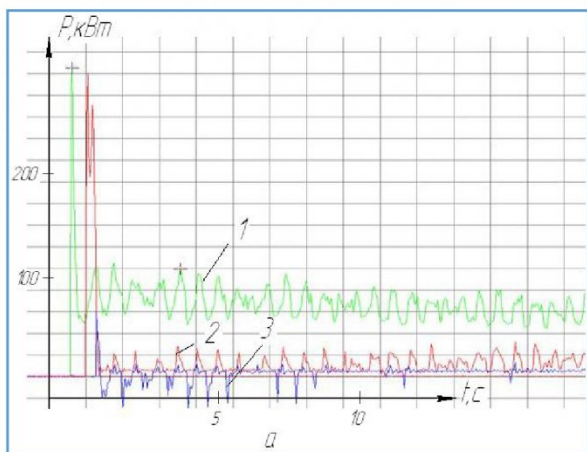


Рисунок 7 Осциллограммы мощности P электродвигателей трех приводного конвейера при пуске на низкую скорость (а) (1- хвостовой привод, 2, 3 – головные приводы, шахтный эксперимент) [8]

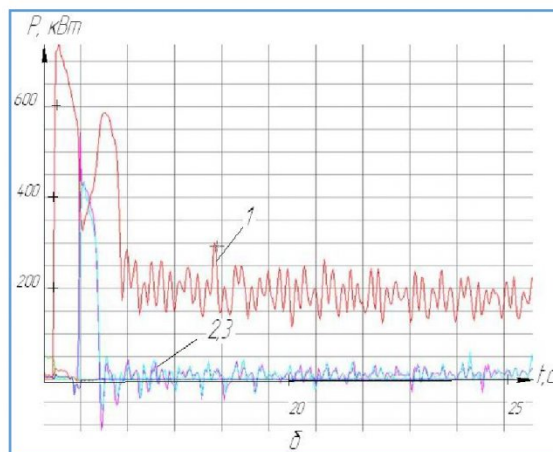


Рисунок 8 Осциллограммы мощности P электродвигателей трех приводного конвейера при переходе на высокую скорость (б) (1- хвостовой привод, 2, 3 – головные приводы, шахтный эксперимент) [8]

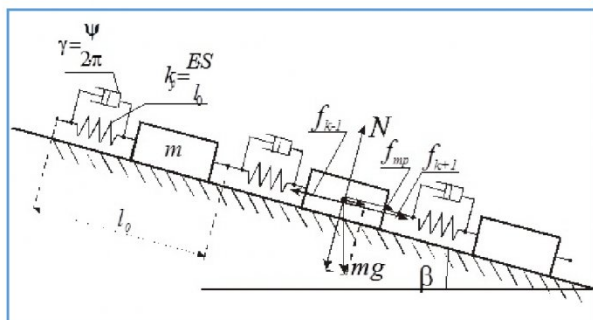


Рисунок 9 Дискретное представление рабочего органа конвейера [11]

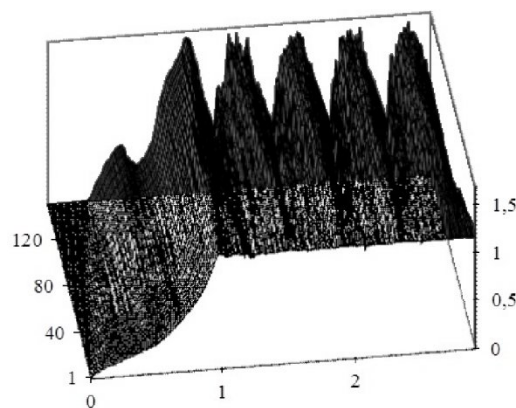


Рисунок 10 Изменения скорости рабочего органа скребкового конвейера по длине става [12].

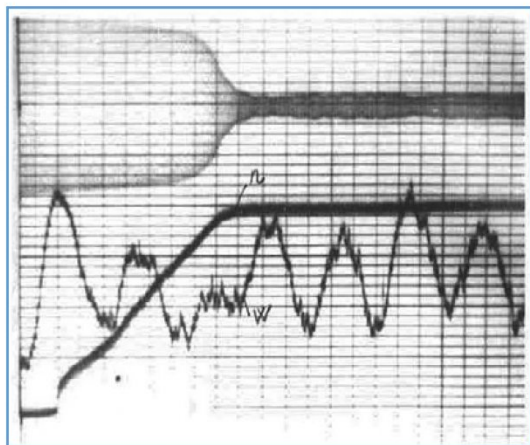


Рисунок 11 Экспериментальные зависимости изменения тока статора, скорости вращения АД и усилия в грузовой ветви рабочего органа конвейера СП-63 в момент пуска [10].

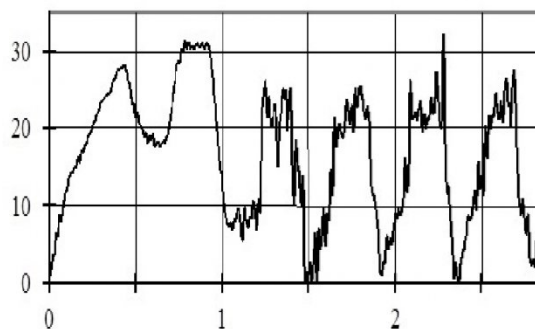


Рисунок 12 Расчетные диаграммы изменения усилия в грузовой ветви рабочего органа скребкового конвейера СП-63 в момент пуска [12]

Расчетная схема, аналогичная [15, 2014 год] для расчета усилий в тяговой цепи конвейера, была использована ранее в [11, 12, 1999 год] (рис. 9). Ее применение в расчетной практике компьютер-

ного моделирования показало приемлемую сходимость экспериментальных результатов с

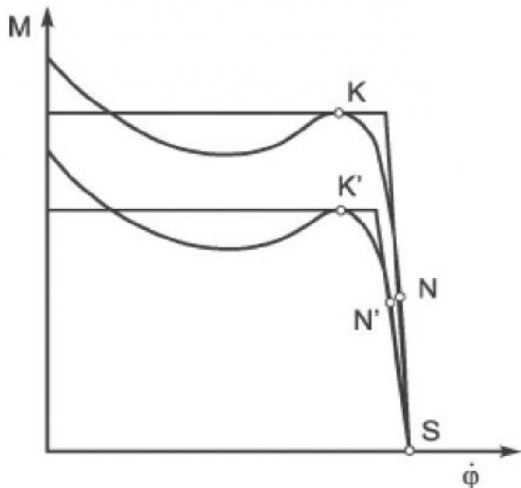


Рисунок 13 Actual and approximated mechanical characteristic of asynchronous motor (естественная и аппроксимированная характеристика асинхронного электродвигателя [15, 2014 год])

результатами моделирования (рис. 11, 12). Разница с результатами [15] заключается в не учете автором [11, 12] приводной звездочки, влияние которой видно на экспериментальных осциллограммах.

Существенным отличием расчетной практики по [11, 12, 1999 год] и [15, 2014 год] является разница в моделях электрической части электромеханической системы конвейера. В [15, 2014 год] использована аппроксимированная двумя прямыми статическая механическая характеристика асинхронного электродвигателя (см. рис. 13). В [11,12] расчеты производятся на основе [18] с учетом взаимовлияния асинхронных электродвигателей, находящихся в общей сети электропитания, параметров кабельной сети и источника питания.

В [9, 2008 год] использована расчетная схема по рис. 15, где тяговый орган также представлен совокупностью конечных элементов, состоящих из массы m и линейной упруго - диссипативной связи. Геометрия приводной звездочки не учитывается. Используется понятие – средний радиус приводной звезды.

Наиболее достоверные результаты по учету влияния приводной звездочки получены в [14, 2012

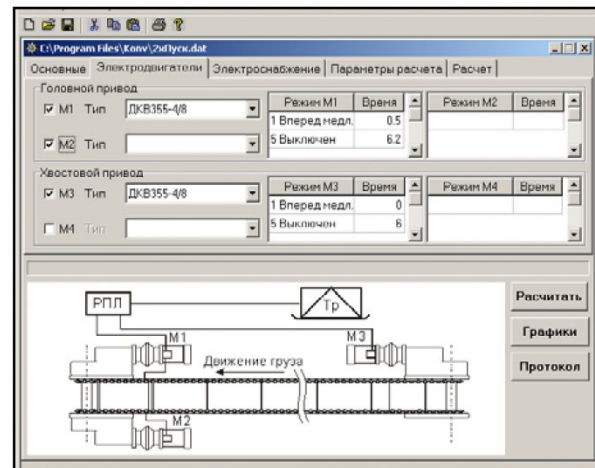


Рисунок 14 Реализация учета влияния количества электродвигателей, их взаимовлияния, влияния кабельной сети и источника питания [11, 12, 1999 год]

год] на основе использования наиболее подробной расчетной схемы по рис. 16, который представляет собой фрагмент приведенного в публикации рисунка (Fig. 1. Physical model of a longwall scraper conveyor with the sprocket drums marked). Расчетная схема по [14] включает в себя асинхронные электродвигатели, механические передаточные устройства (редукторы), гидромуфты, приводные звездочные барабаны, цепной тяговый орган, состоящий из двух цепей.

Результаты компьютерных экспериментов представлены на рис. 17. На этом же рисунке при-

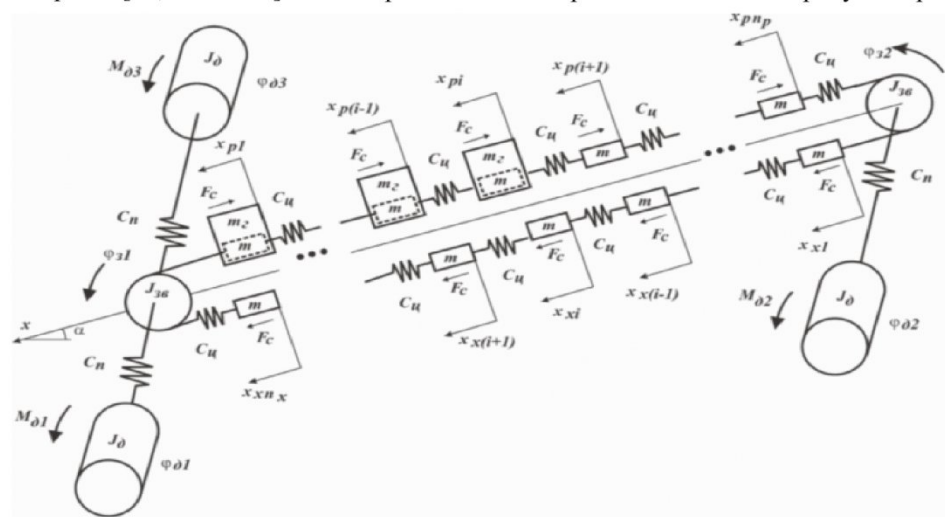


Рисунок 15 Динамическая схема трех приводного скребкового забойного конвейера [9, 2008 год]

веден характерный фрагмент экспериментальной осциллограммы усилия в тяговом органе скребкового конвейера СП-63 по [10]. Важно отметить качественное совпадение экспериментальных и расчетных результатов, полученных для различных конвейерных систем.

К настоящему времени выполнено значительное количество исследовательских работ (в списке

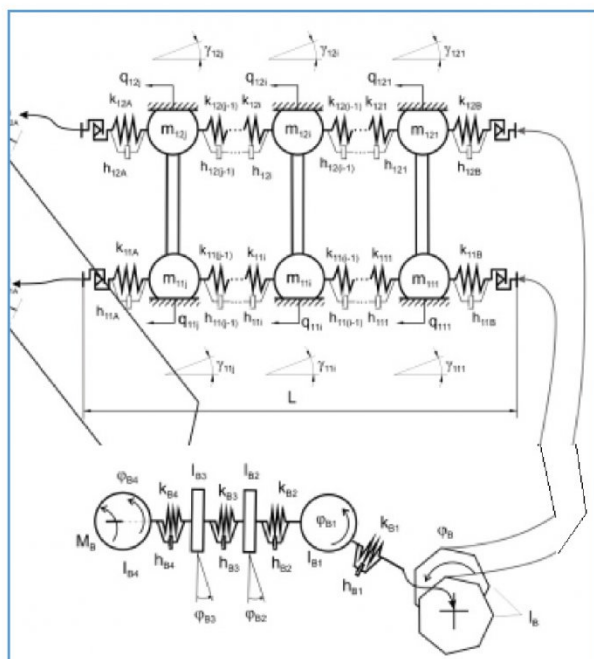


Рисунок 16 Фрагмент Fig. 1. Physical model of a longwall scraper conveyor with the sprocket drums marked [14]

литературы указаны только некоторые) по исследованию режимов работы забойных скребковых конвейеров.

Анализируя их, можно констатировать, что они с достаточной степенью достоверности описывают процессы, происходящие в электромеханических системах забойных скребковых конвейеров.

Можно констатировать, что независимо от конструктивных решений конвейеров прошлых лет до настоящего времени внутренняя динамика их электромеханических систем остается неудовлетворительной. Основной режим работы СК

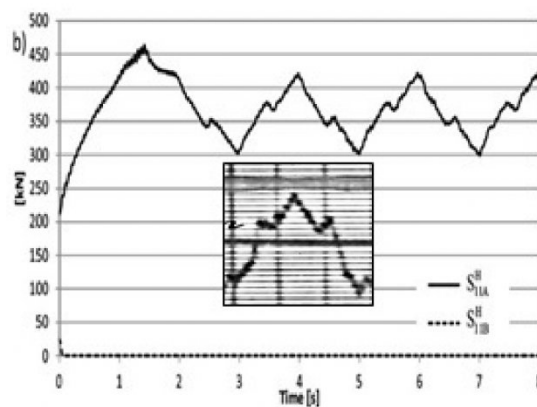


Рисунок 17 Влияние учета в математической модели приводной звездочки на характер изменения усилия в тяговом органе. Расчет в [14]. В центре – осциллограмма из [10].

продолжает сопровождаться присутствием в нагрузках тяговых органов периодических составляющих высокой амплитуды. Например, по [14] для СК длиной 350 м, с двумя двигателями приводов мощностью по 400 кВт, с двумя тяговыми цепями калибра 34 x 126, с погонной нагрузкой 300 kg/m при статической составляющей усилия в цепях ≈350 кН динамическая имеет амплитуду ≈125 кН.

Конечно, это сказывается на ресурсе СК, измеряемом в млн.тонн. транспортируемого полезного ископаемого. Например, СК СПЦ 230-11 имеет ресурс 3÷5 млн.тонн.

От 3 до 5 – очень большой диапазон. Естественно, он определяется условиями работы СК, но и усталостный износ механической части конвейера, а также повышенный уровень нагрева и вибро-механический износ изоляции электродви-

Таблица 1 Технические характеристики забойных СК производства Анжеромаш

Наименование	Анжера-26	Анжера-30	Анжера-34	Анжера-38	Анжера-42
Длина конвейера, м	до 230	до 350			
Производительность, т/час	до 720	до 1500	до 2500	до 3000	до 4000
Мощность редуктора, кВт	250	250; 400	400; 630	630	800
Тип электродвигателя	одно или двухскоростной; с частотным преобразователем				
Тип муфты	гидромуфта предохранительная; муфта эластичная				
Количество зубьев приводной звездочки	7; 8	7; 8	7; 8	7	7
Способ разгрузки	прямой; боковой; крестовой				
Тяговый орган:	скребковая цепь				
- калибр, мм	26x92	30x108	34x126	38x137 плоская	42x146 плоская
- количество тяговых цепей	2				
- разрушающая нагрузка, кН, не менее:					
- тяговой цепи	840 и выше	1130 и выше	1450 и выше	1810 и выше	2220 и выше
- соединительного звена	800 и выше	1100 и выше	1400 и выше	1640 и выше	2200 и выше
- скорость движения, м/с	0,8÷1,1	0,92÷1,52	1,04÷1,49	1,05 ÷ 1,42	1,15÷1,52
- ресурс, млн. тонн	до 5	до 8	до 12	до 15	до 20

гателей связаны с высоким уровнем динамической нагруженности электромеханических систем СК.

Естественно, в этих условиях ресурс определяется либо диапазоном ресурса, либо числовому значению ресурса предшествует приставка «до» (Таблица 1 http://angera.ru/prod_04.htm).

Стандартные функции электропривода СК, который снабжен преобразователем частоты (ПЧ) [20]:

- плавный запуск и регулирование частоты вращения приводного двигателя;
- автоматическое поддержание заданной производительности конвейера.

Вес выпускаемого преобразователя частоты – 1800 кг. Габариты 1850 x 750 x 1280. По меркам используемой горной техники – компактное устройство.

Конкурентом преобразователю частоты в составе электропривода СК по исполняемым функциям выступает интеллектуальная система приводов CST (Controlled Start Transmission) с вариантами исполнения - CST30, CST45, CST65, CST115.

Вес CST30 (500 кВт) составляет 3900 кг. Габариты 2280 x 900 x 960

В материалах [21] говорится, что эта система приводов обеспечивает запуск двигателя без нагрузки, плавный синхронизированный пуск и запуск под большой нагрузкой, а также распределение нагрузки между приводами и защиту от перегрузки. Дополнительно отмечается, что CST обеспечивает «идеальное снятие нагрузки на звездочке».

Заметим, что последнее возможно только при изменении мгновенных значений угловой скорости вращения приводной звездочки при сохранении ее среднего значения на заданном уровне. Следствие этого (рис. 18) - амплитуда динамических составляющих нагрузки с использованием CST существенно уменьшена по сравнению с результатами по рисункам 5÷8.

Вывод - системы CST обладают СВОЙСТВАМИ, не допускающими возникновения в электромеханических системах СК автоколебаний. Электроприводы СК с преобразователями

частоты должны обладать аналогичными СВОЙСТВАМИ, например, [19].

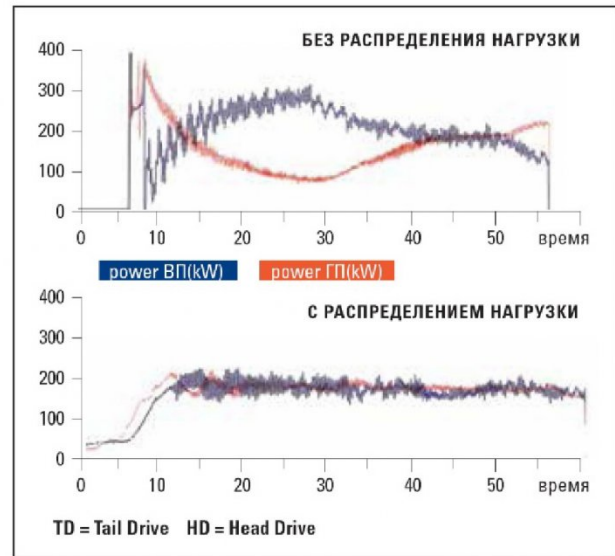


Рисунок 18 Характеристики распределения нагрузки системы приводов CST

В итоге можно констатировать, что современные забойные скребковые конвейеры:

- обладают значительным ресурсом работоспособности за счет изменения конструктивных параметров и улучшения качества их изготовления. Все это приводит к увеличению срока службы всех компонентов электромеханической системы при воздействии на нее динамических нагрузок (смещению кривой Велера вправо по оси абсцисс);
- остаются объектами, обладающими свойствами формирования собственного динамического (колебательного) характера нагрузок компонентов ЭМС (внутренняя динамика);
- единственным способом улучшения внутренней динамики ЭМС СК является введение управления их состоянием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Штокман И. Г., Ляховский С. И. Расчет тяговых цепей конвейеров на усталость // Приложение к сборнику «Горные машины». – №4. – 1978. – С.3-10.
2. Галкин Н. А. Усилия в звеньях тяговой цепи на звездочках скребкового конвейера // Изв. вузов. Горный журнал. - 1980. - № 3. - С. 76-79.
3. Спорыхин В. Я., Сноведский В. М. Эксплуатационные параметры тяговых цепей скребковых конвейеров // Уголь Украины. – 1983. – № 7. – С. 28-29.
4. Соснан А. Г. О динамических усилиях в скребковых цепях многоприводных конвейеров // Приложения к сборнику «Горные машины» №4, - 1985. – С.10-15.

5. Леусенко А. В. Нагрузки при транспортировании угля забойными скребковыми конвейерами с направляющими // Изв. вузов. Горный журнал. – 1987. - № 5. – С.47-49.
6. Чугреев Л.И. Динамика конвейеров с цепным тяговым органом. –М., Недра, 1976. 160 с.
7. Кондрахин В.П. Моделирование пусковых режимов скребкового конвейера типа КСД / Кондрахин. В.П., Борисенко В.Ф., Мельник А.А., Косарев В.В., Стадник. Н.И., Косарев И.В. // Наукові праці Донецького національного технічного університету, вип. 13 (123), Серія: гірничо-електромеханічна, Донецьк, 2007, с. 64-73.
8. Кондрахин В.П. Пусковые режимы трехприводных двухскоростных забойных конвейеров / Кондрахин В.П., Стадник Н.И. // Уголь Украины. - №5, 2011. - С. 45-48.
9. Кондрахин. В.П. Математическая модель для исследования нагрузок в двухскоростном многодвигательном приводе и тяговом органе скребкового забойного конвейера / Кондрахин. В.П., Мельник. А.А., Косарев. В.В., Стадник. Н.И., Косарев. И.В. // Наукові праці Донецького національного технічного університету, вип. 16 (142), Серія: гірничо-електромеханічна, Донецьк, 2008, С. 132-140.
10. Ещин Е.К. Исследование условий эффективного использования частотно - управляемого электропривода забойных машин с целью улучшения их динамики / дис...канд.техн.наук // Кемерово, 1975. 189 с.
11. Бандурин А.Н. Моделирование динамики рабочего органа скребкового конвейера. // Вестник Кузбасского государственного технического университета. - 1999. № 2. С. 46 - 49.
12. Бандурин А.Н. Моделирование электромеханических процессов скребкового конвейера. // Вестник Кузбасского государственного технического университета. - 1999. № 6. С. 30 - 32.
13. Осичев А.В. Оценка влияния приводной звездочки на динамические усилия в рабочем органе скребкового конвейера СР72 / Осичев А.В.,Ткаченко А.А. // Вісник КДПУ імені Михайла Остроградського. Випуск 4/2009 (57). Частина 1. С.10-13.
14. Marian Dolipski. Determination of dynamic loads of sprocket drum teeth and seats by means of a mathematical model of the longwall conveyor / Marian Dolipski, Eryk Remiorz, Piotr Sobota //Arch. Min. Sci., Vol. 57 (2012), No 4, p. 1101–1119.
15. Marian Dolipski. Dynamics of non-uniformity loads of AFC drives / Marian Dolipski, Eryk Remiorz, Piotr Sobota //Arch. Min. Sci., Vol. 59 (2014), No 1, p. 155–168.
16. G. Shi, J. Mao, and X. H. Wei, “Research on Dynamic Tension Control Theory for Heavy Scraper Conveyor,” in *Applied Mechanics and Materials*, 2010, vol. 34–35, pp. 1956–1960.
17. Z. Chunzhi and M. Guoying, “Dynamic modeling of scraper conveyor sprocket transmission system and simulation analysis,” in *2011 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, 2011, pp. 1390–1394.
18. Ещин Е.К. Теория предельных режимов работы горных машин // Томск: Изд-во Томского. ун-та, 1995. -232 с.
19. Ещин Е.К. Вариант частотного управления асинхронным электроприводом горных машин // Электротехника, -1996, №1. С.28-30.
20. Преобразователи частоты взрывозащищенные (<http://www.prombel.ru/ru/products/preobrazovateli-chastoty-vzryvozashchishchennye-0>) Дата обращения: 25/01/2015)
21. Интеллектуальная система приводов CST (<http://s7d2.scene7.com/is/content/Caterpillar/C10332020>) Дата обращения: 25/01/2015)

Автор статьи

Ещин Евгений Константинович,

докт.техн.наук, профессор каф. прикладных информационных технологий КузГТУ,
email: eke@kuzstu.ru

Поступило в редакцию 26.11.2014