

УДК 622.647

## ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИВОДА СКРЕБКОВОГО КОНВЕЙЕРА ТИПА КСД

Кондрахин В.П., докт. тех. наук., проф.

Донецкий национальный технический университет,

Косарев В.В., канд. техн. наук, Стадник Н.И., докт. тех. наук.,

Косарев И.В., Донгипроуглемаш

*Выполнены исследования упругих, инерционных и диссипативных свойств привода скребкового конвейера и предложена расчетная динамическая схема, позволяющая оценить максимальные нагрузки в редукторе.*

*The elastic, inertial and dissipative behaviour of the drag-chain conveyor driving gear is investigated. Analytical dynamical model is offered. The model allows calculate extreme loads in the driving gear.*

### **Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.**

До недавнего времени забойные скребковые конвейеры отечественного производства использовали электромеханический привод, который включал асинхронный односкоростной электродвигатель с короткозамкнутым ротором, гидромуфту и редуктор. За последние несколько лет по разработкам института «Донгипроуглемаш» освоены в производстве энерговооруженные (400-700 кВт) скребковые конвейеры типажного ряда КСД с ресурсом 2,5 – 5 млн. тонн горной массы, способные обеспечить переход на отработку пластов лавами длиной 250 – 350 м и протяженностью выемочных столбов 2 – 2,5 км [1, 2].

Основными отличительными особенностями привода этих конвейеров являются:

- оснащение малогабаритными приводными блоками на базе компактных унифицированных редукторов блочной конструкции с водяным охлаждением и расчетным ресурсом 20-25 тыс. часов;

- комплектация электродвигателями с водяным охлаждением мощностью 55/160, 65/200, 85/250, 115/350 кВт, обеспечивающими две скорости движения тяговой цепи и имеющими исполнение с торсионным валом повышенной податливости;

- исключение из конструкции привода ненадежных и требующих постоянного обслуживания гидравлических муфт, взамен кото-

рых привод может быть оснащен эластичной муфтой SET фирмы «Fasing».

В процессе освоения забойных скребковых конвейеров КСД26, КСД27 и КСД28 подтверждена их высокая эффективность и, в то же время, выявлены проблемы, связанные с затрудненным запуском загруженных конвейеров и, в некоторых случаях, недостаточной надежностью редукторов и электродвигателей. В определенной степени эти проблемы обусловлены недостаточной изученностью динамических характеристик приводов конвейеров типа КСД, что затрудняет разработку математических моделей формирования нагрузок, определение исходных данных для прочностных расчетов и структурно-параметрическую оптимизацию привода.

**Анализ исследований и публикаций.** Анализ динамических характеристик привода забойных скребковых конвейеров посвящено большое количество работ [3,4,5 и др.]. Однако объектом исследований в этих работах являются приводные блоки традиционной структуры. В связи с этим актуальной является задача исследования динамических свойств новых перспективных приводных блоков конвейеров типа КСД.

**Постановка задачи.** Задачей, решаемой в настоящей работе, является разработка расчетной динамической схемы привода современных скребковых конвейеров типа КСД с учетом упругих, диссипативных и инерционных характеристик редуктора и упруго-демпфирующих элементов, а также оценка на этой основе максимальных нагрузок, возникающих в приводе при внезапном стопорении приводных звездочек.

**Изложение материала и результаты.** Для решения поставленной задачи были проведены экспериментальные исследования натурного образца приводного блока конвейера КСД27 в составе комбинированный редуктор, эластичная муфта SET 200-90/140 фирмы «Fasing», торсионный вал (при использовании специального исполнения электродвигателя). Кинематическая схема редуктора привода конвейера КСД27 представлена на рис. 1. На рисунке принята следующая нумерация узлов и деталей, которая используется в дальнейшем при составлении расчетной схемы в качестве индексов при соответствующих динамических характеристиках: 1 – ротор электродвигателя; 2 – торсионный вал; 3 – упругая муфта; 4 – первый вал в сборе; 5 – вал храпового натяжного механизма в сборе; 6 – второй вал

в сборе; 7 – третий вал в сборе; 8 – четвертый вал; 9 – планетарная передача; 10 – вал приводной звезды в сборе.

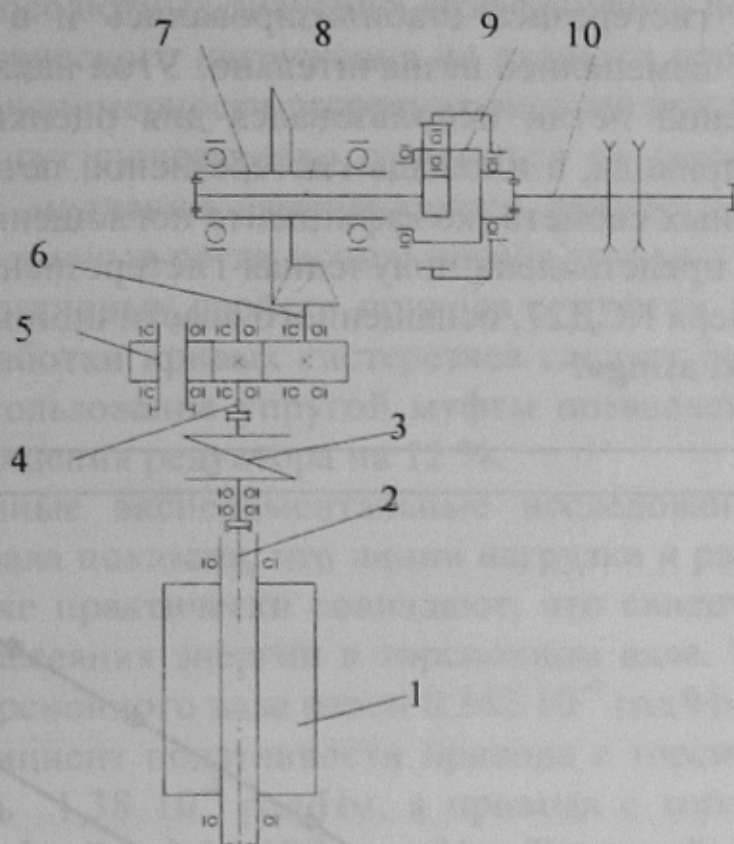


Рисунок 1. - Кинематическая схема редуктора конвейера КСД27

Методика предусматривала ступенчатое приложение нагрузки к рычагу, закрепленному к входному валу привода, при помощи грузов и регистрацию угла поворота рычага при застопоренном узле приводной звездочки. Максимальная нагрузка соответствовала пусковому моменту электродвигателя. После достижения максимального значения нагрузки производилось ее ступенчатое снижение. Податливость узла стопорения учитывалась путем регистрации упругих перемещений зуба звездочки в горизонтальном направлении индикатором часового типа.

Угол закручивания редуктора  $\Delta\varphi$ , приведенный к валу двигателя, определялся как разность угла поворота рычага и приведенного угла поворота застопоренной звездочки, который обусловлен податливостью стопорного устройства. Нагрузочный момент  $M$  определялся как произведение веса груза и рычага на замеренное расстояние от оси входного вала до линии действия силы тяжести системы «рычаг – груз». По результатам измерений строились графики зависимости

$M=f(\Delta\varphi)$  для случаев ступенчатого увеличения и ступенчатого снижения нагрузки.

После нескольких циклов нагружения полученные кривые конструкционного гистерезиса стабилизировались и в дальнейшем от опыта к опыту изменялись незначительно. Угол наклона средней линии гистерезисной петли использовался для оценки коэффициента податливости привода, а площадь гистерезисной петли – для оценки его диссипативных свойств (коэффициента поглощения).

На рис. 2 представлена полученная гистерезисная петля для редуктора конвейера КСД27, оснащенного эластичной муфтой SET 200-90/140 фирмы «Fasing».

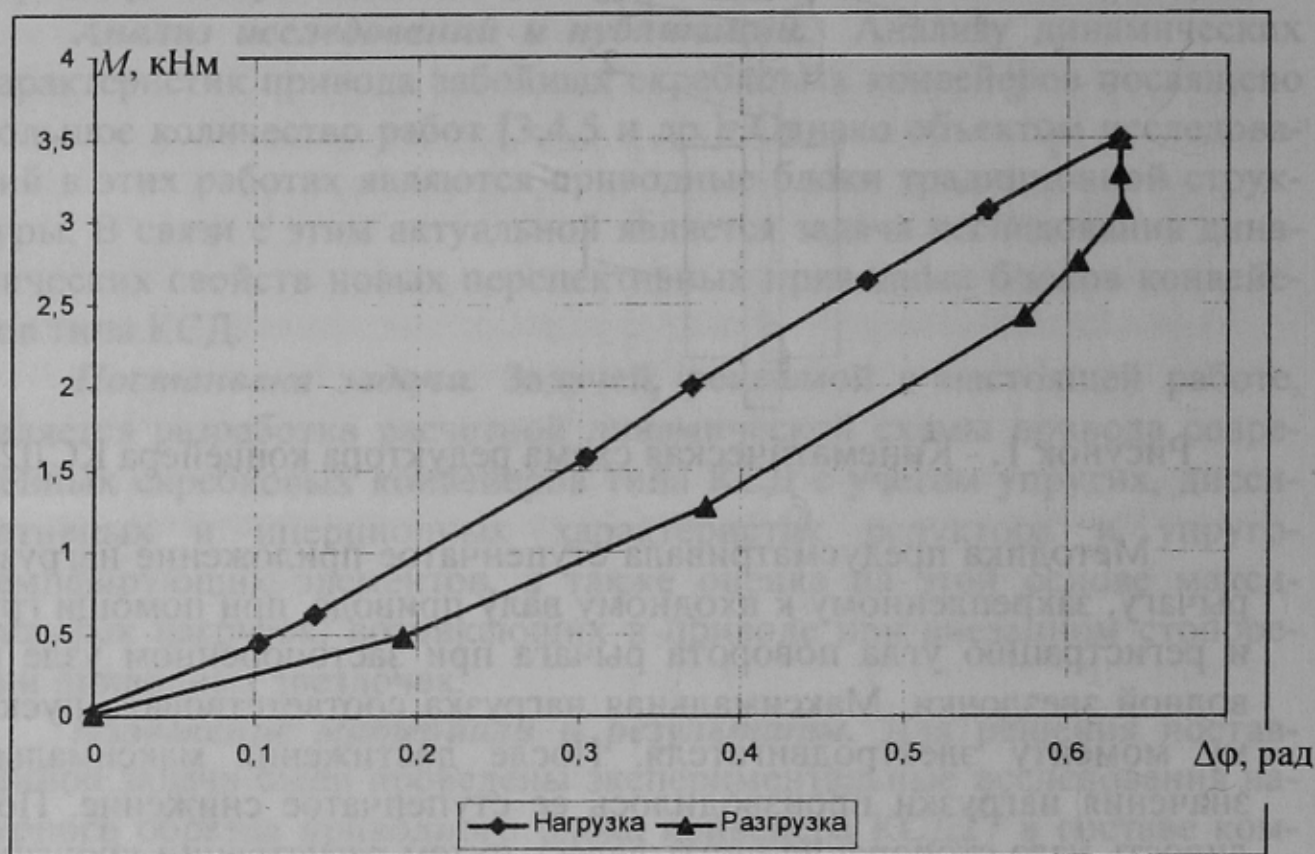


Рисунок 2. - График зависимости нагрузочного момента от угла закручивания входного вала редуктора конвейера КСД27 (с упругой муфтой, без торсионного вала ).

Путем сравнения гистерезисных петель, полученных для привода с упругой муфтой и без нее, установлено:

- при использовании упругой муфты приведенный к валу двигателя коэффициент податливости системы возрастает от  $e_p$   $1,04 \cdot 10^{-4}$  рад/Нм до  $(e_p + e_w) = 1,82 \cdot 10^{-4}$  рад/Нм то есть в 1,75 раза.

- возрастает площадь, описываемая гистерезисной петлей, что свидетельствует об увеличении рассеянной за цикл нагружения энергии.

Оценка абсолютных значений коэффициента поглощения по результатам статического нагружения не является достаточно корректной, так как закономерности рассеяния энергии при высокочастотных колебаниях могут существенно отличаться от закономерностей, полученных при медленно изменяющихся процессах. Поэтому полученные гистерезисные петли использованы только для сравнительной оценки диссипативных свойств привода с муфтой и без нее. Из результатов обработки кривых гистерезиса следует, что в первом приближении использование упругой муфты позволяет повысить коэффициент поглощения редуктора на 12 %.

Проведенные экспериментальные исследования податливости торсионного вала показали, что линии нагрузки и разгрузки на нагрузочном графике практически совпадают, что свидетельствует о низком уровне рассеяния энергии в торсионном вале. Коэффициент податливости торсионного вала равен  $0,342 \cdot 10^{-4}$  рад/Нм. Следовательно, общий коэффициент податливости привода с торсионным валом будет составлять  $1,38 \cdot 10^{-4}$  рад/Нм, а привода с торсионным валом и эластичной муфтой –  $2,16 \cdot 10^{-4}$  рад/Нм. Таким образом, использование для привода конвейера КСД27 электродвигателя с торсионным валом обеспечивает повышение податливости для привода без эластичной муфты на 33 %, а привода с эластичной муфтой – на 19 %. В целом, применение упругой муфты и электродвигателя с торсионным валом позволяет повысить коэффициент податливости привода конвейера более, чем в 2 раза.

Для сравнения приведем коэффициент податливости редуктора привода конвейера СП63М  $8,7 \cdot 10^{-4}$  рад/Нм [4], который оказывается более, чем в 8 раз выше, чем коэффициент податливости привода конвейера КСД27 без упругой муфты и торсионного вала, и более, чем в 4 раза выше коэффициента податливости привода конвейера КСД27 с упругой муфтой и торсионным валом.

Массовые моменты инерции элементов привода определялись из их твердотельных моделей на компьютере и приводились к ротору двигателя путем деления момента инерции детали или сборочной единицы на квадрат передаточного отношения до звена приведения. Результаты определения инерционных характеристик приведены в таблице 1. Номера в первой колонке соответствуют обозначениям по

рис. 1. Из таблицы следует, что доля момента инерции ротора двигателя в общем моменте инерции привода достигает 78 %, другими динамически значимыми инерционными элементами являются упругая муфта (12%) и валы 7 и 8 с коническим колесом (5%).

Таблица 1 – Массовые моменты инерции элементов привода, кгм<sup>2</sup>

Составной элемент	Момент инерции	Передаточное отношение	Приведенный момент инерции
Ротор(1,2)	5,04	1	5,04
Муфта (3)	0,783	1	0,783
Вал (4)	0,117	1	0,117
Вал (5)	0,285	1,39	0,148
Вал (6)	0,347	2,278	0,067
Вал (7,8)	11,1	5,84	0,323
Водило(9)	14,8	33,4	0,013
Вал звезды (10)	13,1	33,4	0,012

Для составления расчетной схемы необходимо знать долю податливости каждого из элементов в общей податливости привода. Для определения этой доли был выполнен расчет податливости составных элементов привода по методике [6]. Полученное общее расчетное значение коэффициента податливости привода примерно на 20 % меньше экспериментально полученного значения. Это обусловлено тем, что в расчете не учитывалась податливость корпусных деталей, подшипников и изгибная податливость валов.

Анализ результатов расчетного и экспериментального определения податливости показывает, что основными податливыми элементами редуктора (без учета торсионного вала и упругой муфты) являются вал 8 (28%), планетарная передача 9 (25%) и вал звезды 10 (46 %). С учетом полученных результатов построены расчетные динамические схемы привода конвейера КСД27 в линейной постановке, которые представлены на рис.3. Схема а) соответствует варианту привода без торсионного вала (ТВ) и упругой муфты (УМ), б) – с торсионным валом без упругой муфты, в) с торсионным валом и упругой муфтой; г) и д) - упрощенные универсальные расчетные схемы одного и двух приводов.

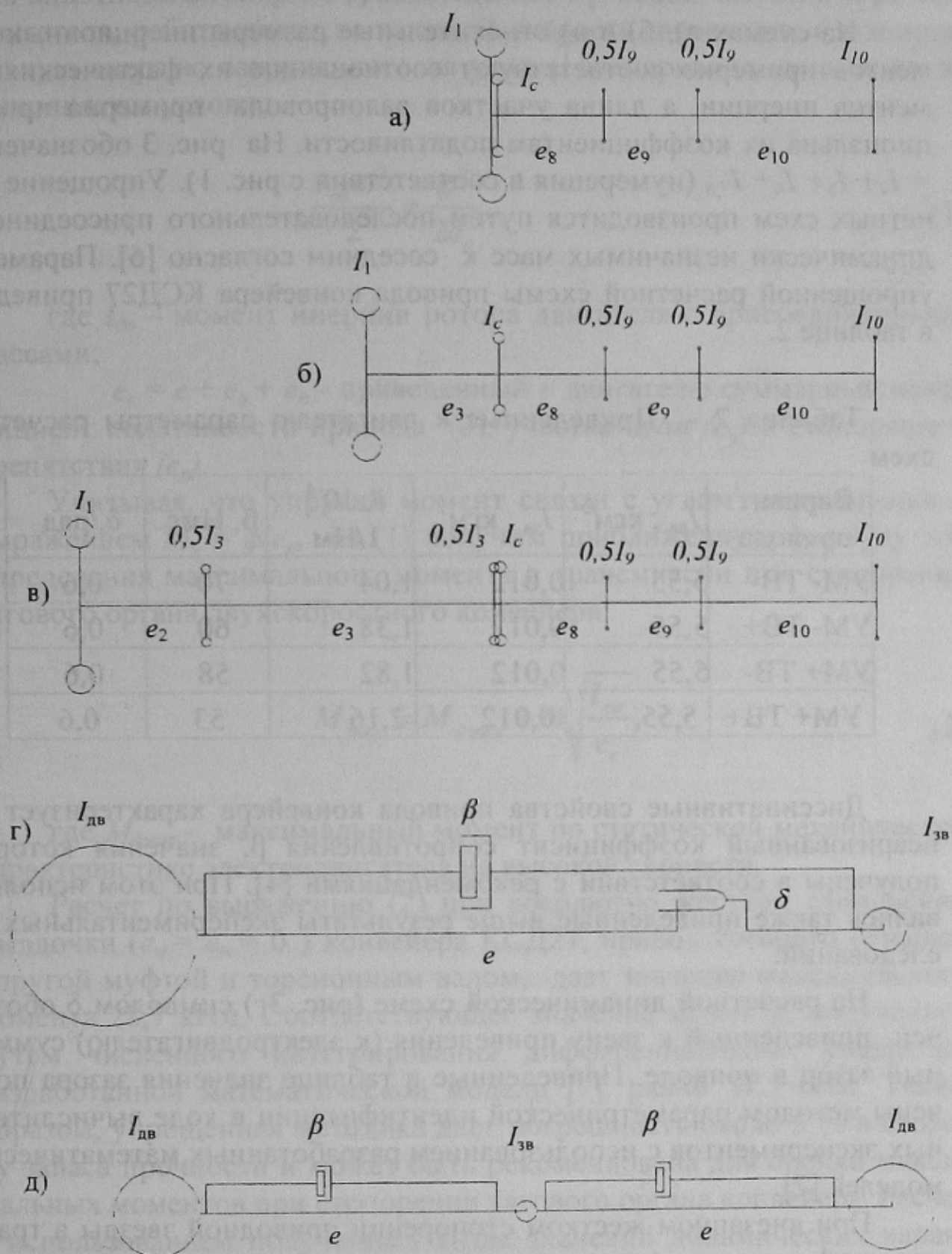


Рисунок 3 - Расчетные динамические схемы привода конвейера КСД27

На схемах а), б) и в) относительные размеры инерционных элементов примерно соответствуют соотношению их фактических моментов инерции, а длина участков валопровода примерно пропорциональна их коэффициентам податливости. На рис. 3 обозначено  $I_c = I_4 + I_5 + I_6 + I_{7,8}$  (нумерация в соответствии с рис. 1). Упрощение расчетных схем производится путем последовательного присоединения динамически незначимых масс к соседним согласно [6]. Параметры упрощенной расчетной схемы привода конвейера КСД27 приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Приведенные к двигателю параметры расчетных схем

Вариант привода	$I_{дв}$ , кгм <sup>2</sup>	$I_{зв}$ , кгм <sup>2</sup>	$e$ , 10 <sup>-4</sup> 1/Нм	$\beta$ , Нмс	$\delta$ , рад
УМ- ТВ-	5,55	0,012	1,04	70	0,6
УМ- ТВ+	5,55	0,012	1,38	60	0,6
УМ+ ТВ-	5,55	0,012	1,82	58	0,6
УМ+ ТВ+	5,55	0,012	2,16	53	0,6

Диссипативные свойства привода конвейера характеризует линейаризованный коэффициент сопротивления  $\beta$ , значения которого получены в соответствии с рекомендациями [4]. При этом использовались также приведенные выше результаты экспериментальных исследований.

На расчетной динамической схеме (рис. 3г) символом  $\delta$  обозначен приведенный к звену приведения (к электродвигателю) суммарный зазор в приводе. Приведенные в таблице значения зазора получены методом параметрической идентификации в ходе вычислительных экспериментов с использованием разработанных математических моделей [7].

При внезапном жестком стопорении приводной звезды в трансмиссии формируются экстренные нагрузки, которые могут в несколько раз превышать максимальный момент электродвигателя. С достаточной для практических расчетов точностью величину этих нагрузок можно получить, используя найденные значения динамических характеристик привода. Максимальная нагрузка возникает тогда, когда



вся кинетическая энергия вращающегося с угловой частотой  $\omega$  ротора двигателя, работающего на высокой скорости, переходит в потенциальную энергию закрученного на угол  $\varphi$  валопровода, то есть когда выполняется условие

$$\frac{I_{\text{об}} \omega^2}{2} = \frac{\varphi^2}{2e_c}, \quad (1)$$

где  $I_{\text{об}}$  – момент инерции ротора двигателя с присоединенными массами;

$e_c = e + e_u + e_n$  – приведенный к двигателю суммарный коэффициент податливости привода ( $e$ ), участка цепи ( $e_u$ ) и стопорящего препятствия ( $e_n$ ).

Учитывая, что упругий момент связан с углом закручивания  $\varphi$  выражением  $M_y = \varphi/e_c$ , из (1) получим приближенную формулу для определения максимального момента в трансмиссии при стопорении тягового органа двухскоростного конвейера:

$$M_{\text{max}} = M_{\text{стmax}} + \omega \sqrt{\frac{I_{\text{об}}}{e_c}}, \quad (2)$$

где  $M_{\text{стmax}}$  – максимальный момент по статической механической характеристике электродвигателя на высокой скорости.

Расчет по выражению (2) при абсолютно жестком стопорении звездочки ( $e_u = e_n = 0$ ) конвейера КСД27, привод которого оснащен упругой муфтой и торсионным валом, дает значение максимального момента 28,7 кНм. Соответствующее значение момента, полученное путем численного интегрирования дифференциальных уравнений разработанной математической модели [7], равно 27,5 кНм. Таким образом, упрощенная методика дает погрешность около 5 % в сторону запаса прочности и может быть рекомендована для оценки максимальных моментов при стопорении тягового органа конвейера. Расчет с использованием полученных выше значений динамических характеристик привода с различной структурой показывает, что применение только торсионного вала обеспечивает снижение максимального момента на 14%, применение только упругой муфты – в 1,3 раза, применение и муфты, и торсионного вала – в 1,39 раза.

**Выводы и направление дальнейших исследований.** В результате проведенных экспериментальных и аналитических исследований разработаны расчетные схемы приводов современных забойных скребковых конвейеров типа КСД. Определены динамические характеристики приводов на примере конвейера КСД27 с различными вариантами структуры. Применение упругой муфты и торсионного вала обеспечивает повышение коэффициента податливости привода конвейера КСД27 более, чем в 2 раза, а также коэффициента поглощения – не менее, чем на 12 %. За счет этого максимальная нагрузка в приводе, возникающая при абсолютно жестком стопорении приводной звезды, может быть снижена в 1,39 раза. Использование в составе привода электродвигателя с торсионным валом при отсутствии упругой муфты обеспечивает повышение податливости привода на 33%. За счет этого максимальная нагрузка в приводе снизится на 14 %.

При использовании предложенной методики следует иметь в виду, что на практике препятствие, вызывающее внезапное стопорение звезды, не может быть абсолютно жестким. Поэтому работу следует продолжить с целью определения величины податливости препятствий, вызвавшего стопорение цепи и опрокидывание электродвигателя. Достоверные данные о величине коэффициента податливости препятствия можно получить только путем натуральных экспериментальных исследований конвейера данного типа.

Список источников.

1. Скребковые конвейеры нового технического уровня. Андреев Г.В., Косарев И.В., Лелека И.Т., Довженко В.И. // Уголь Украины.-2003.№9.-С. 36-38.
2. Стадник Н.И., Сергеев А.В., Мезников А.В. Система управления и привод забойных скребковых конвейеров // Уголь Украины.-2003.№9.-С. 38-41.
3. Скребковые конвейеры. Справочник / Под ред. А.В. Леусенко. - М.: Недра, 1992. – 221с.
4. Чугреев Л.И. Динамика конвейеров с цепным тяговым органом.- М.: Недра, 1976.- 256с.
5. Корнеев С.В. Концепция адаптации забойных скребковых конвейеров // Наукові праці Донецького національного технічного університету, вип.99, Серія: гірничо-електромеханічна.- Донецьк: ДонНТУ.- 2005.- С.130-137.
6. Статистическая динамика горных машин / Докукин А.В., Красников Ю.Д., Хургии З.Я. – М.: Машиностроение, 1978. – 239 с.
7. Кондрахин В.П., Борисенко В.Ф., Мельник А.А., Косарев В.В., Стадник Н.И., Косарев И.В. Моделирование пусковых режимов двухдвигательного привода на базе двухскоростных асинхронных электродвигателей // Наукові праці Донецького національного технічного університету, вип.99, Серія: гірничо-електромеханічна.- Донецьк: ДонНТУ.- 2005.- С.104-110.