

## ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОМОДУЛЬНОГО ДИСКОВОГО ТОРМОЗА НА ДИНАМИЧЕСКИЕ УСИЛИЯ В ГОЛОВНЫХ КАНАТАХ ПОДЪЕМНОЙ УСТАНОВКИ.

Дворников В.И., докт. техн. наук, проф., Донбасская государственная академия строительства и архитектуры,  
Трибухин В.А. инж., научно-исследовательский институт горной механики им. М.М.Федорова.

*Исследована зависимость динамики процесса предохранительного торможения шахтных многоканатных подъемных машин от характеристик многомодульного дискового тормоза.*

*This paper investigates the interconnection between dynamics for preventive braking process of mine multi-tope hoisting machines and characteristics of multi-module disc brake.*

При воздействии на орган навивки подъемной машины тормозного момента возникают динамические колебания усилий в канатах, которые формируют динамические нагрузки в других элементах подъемной установки. Амплитудные значения нагрузок могут достигать критических величин, при которых возможно возникновение аварийных режимов. В этой связи актуальной является задача синтеза тормозных воздействий, обеспечивающих минимизацию динамических колебаний усилий в элементах подъемной установки при предохранительном торможении. Возможности такого синтеза существенно возросли с появлением быстродействующих многомодульных дисковых тормозных устройств.

Поставленная задача решается методом математического моделирования. При ее решении использована математическая модель динамического состояния подъемного комплекса как электромеханической многосвязной системы [1]. Эта модель реализована на ПЭВМ в форме пакета прикладных программ, позволяющих проводить численное моделирование стационарных и переходных процессов, возникающих в системе, как во время нормальной работы, так и при возникновении ряда аварийных режимов. Модель наиболее полно учитывает широкий круг физических процессов, свойственных многоканатной подъемной установке и позволяет учитывать их взаимосвязь и влияние друг на друга. Программа позволяет вести вычисле-

ния и выводит на печать в виде таблиц и графиков параметры, необходимые для анализа исследуемого процесса.

Основными параметрами для оценки амплитуд динамических колебаний усилий в элементах установки приняты:

$S_{12}$  - отношение полного усилия в сбегаящей ветви головных канатов к полному усилию в набегающей ветви;

$K_{10}, K_{20}$  - отношения усилий в верхних сечениях головных канатов к их квазидинамическим значениям;

#### Влияние интенсивности нарастания тормозного усилия

Усилие, создаваемое дисковым тормозом, может быть описано следующей аналитической зависимостью

$$F(t) = \sum_{i=1}^{i=n} F_{yi} (1 - e^{-\frac{t-t_i}{c_i}}) \sigma(t-t_i), \quad (1)$$

где:  $F_{yi}$  - установившееся значение тормозного усилия, создаваемого  $i$ -тым тормозным модулем;

$e$  - основание натурального логарифма;

$t$  - текущее значение времени;

$t_i$  - промежуток времени от разрыва цепи защиты до начала нарастания тормозного усилия  $i$ -го модуля;

$C_i$  - постоянная времени тормозного модуля;

$\sigma(t-t_i)$  - единичная функция Хэвисайда.

По данным экспериментальных исследований [2] постоянная времени тормозных модулей отечественных дисковых тормозов равна  $0,1$  с, время холостого хода  $0,2$  с. Эти величины использовались при расчетах. Изменение интенсивности нарастания тормозного усилия производилось путем варьирования  $t_i$  таким образом, чтобы промежутки времени  $\Delta t$  между срабатываниями модулей были равными. Для исследования реакции системы на практически мгновенное приложение тормозного усилия моделирование производилось дополнительно при  $\Delta t=0$  и  $Ct=0,001$  с.

Учитывая экспоненциальный закон изменения усилия, создаваемого каждым модулем, время нарастания усилия, создаваемого всеми модулями  $T_n$ , исчислялось от момента его появления до достижения 95% величины заданного установившегося значения. Далее представлены результаты моделирования процесса предохранительного торможения многоканатной подъемной установки главного угольного подъема шахты "Красноармейская-Западная" №1, оборудо-

ванной подъемной машиной ЦШ-5х4. Расчеты произведены при следующих исходных данных:

- массы подъемных сосудов:  $m_1=25820$  кг,  $m_2=25820$  кг,
- масса полезного груза в скипе 25000 кг,
- приведенная масса сборки главного вала 25000 кг,
- приведенная масса блока отклоняющих шкивов 4111 кг,
- приведенная масса ротора электродвигателя 9600 кг,
- суммарная погонная масса 4 головных канатов 33,6 кг/м,
- суммарная погонная масса 3 хвостовых канатов 34,65 кг/м,
- высота подъема 712 м,
- максимальная скорость подъема 12 м/с,
- максимальная величина тормозного усилия 500 кН.

В качестве иллюстрации ниже представлены графики двух вариантов моделирования процесса предохранительного торможения в режиме перегона порожних сосудов при их местонахождении на расстоянии 100 м от крайних положений, отличающиеся временем нарастания тормозного усилия  $T_n$  (см. Рис1 и 2).

На графиках приняты следующие обозначения:

- $F_T, F_E$  - тормозное и электродинамическое усилия;
- $S1, S2$  - полные усилия в верхних сечениях головных канатов;
- $S1o, S2o$  - квазидинамические усилия в верхних сечениях канатов;
- $V, W$  - скорость и ускорение органа навивки канатов;
- $V_o, W_o$  - квазидинамические скорость и ускорение;

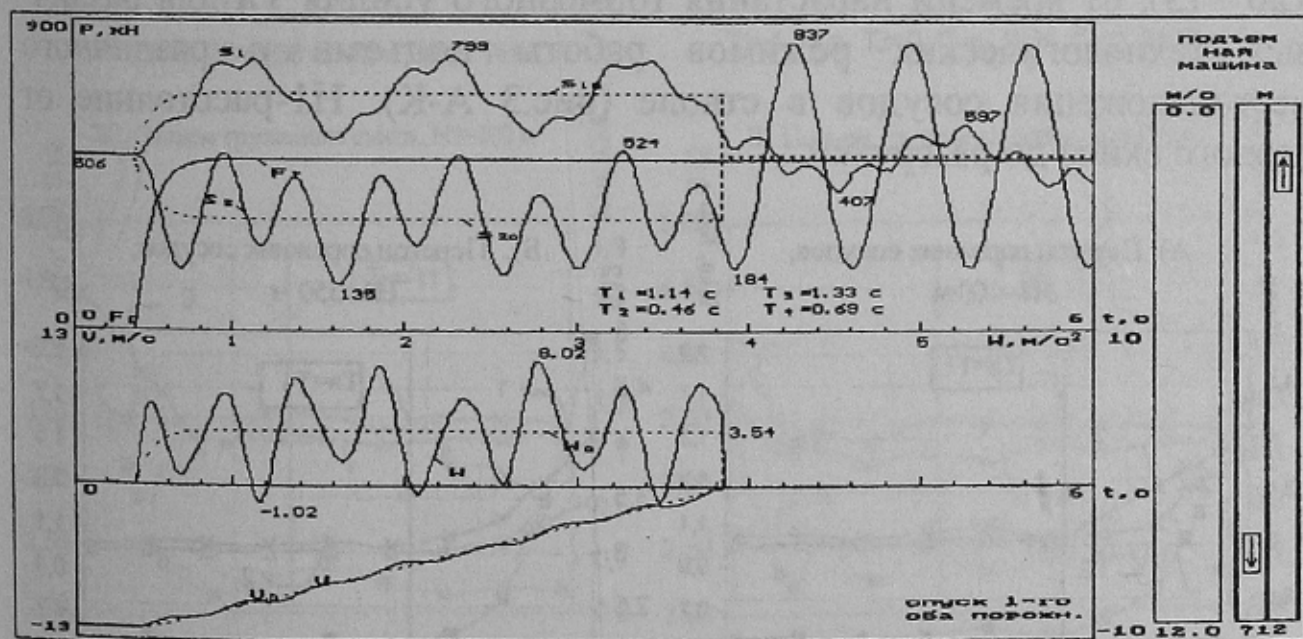


Рисунок 1 - Графики процесса предохранительного торможения в режиме перегона порожних сосудов.  $\Delta t=0$  с.  $T_n=0,3$  с.

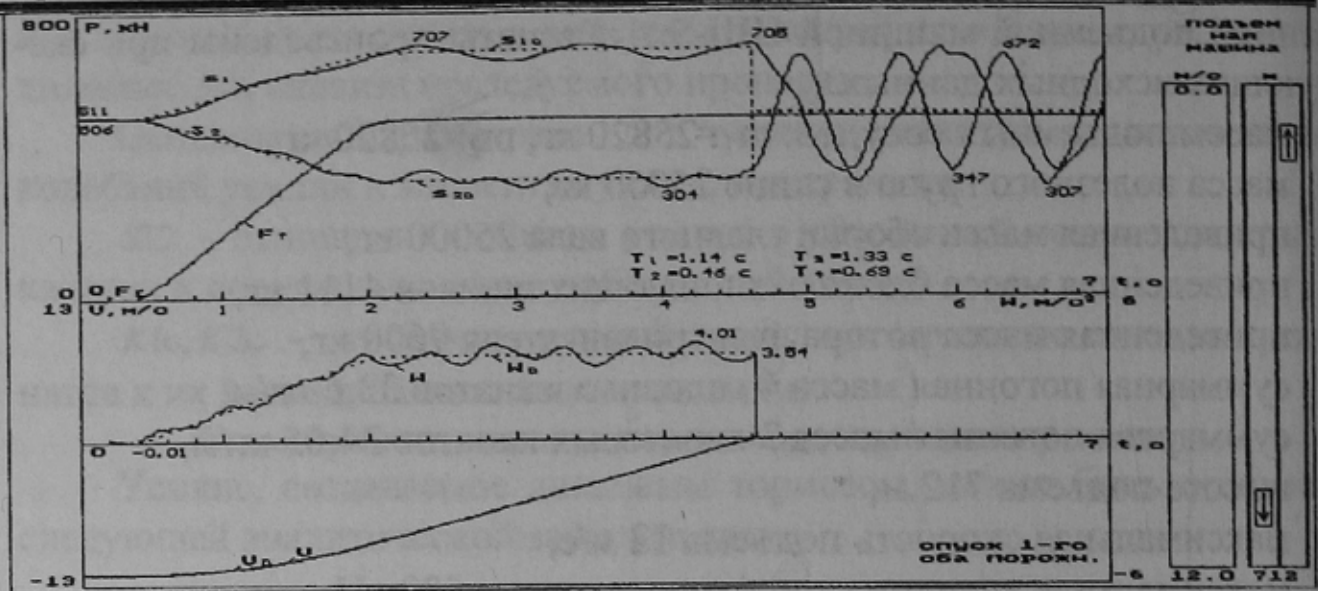
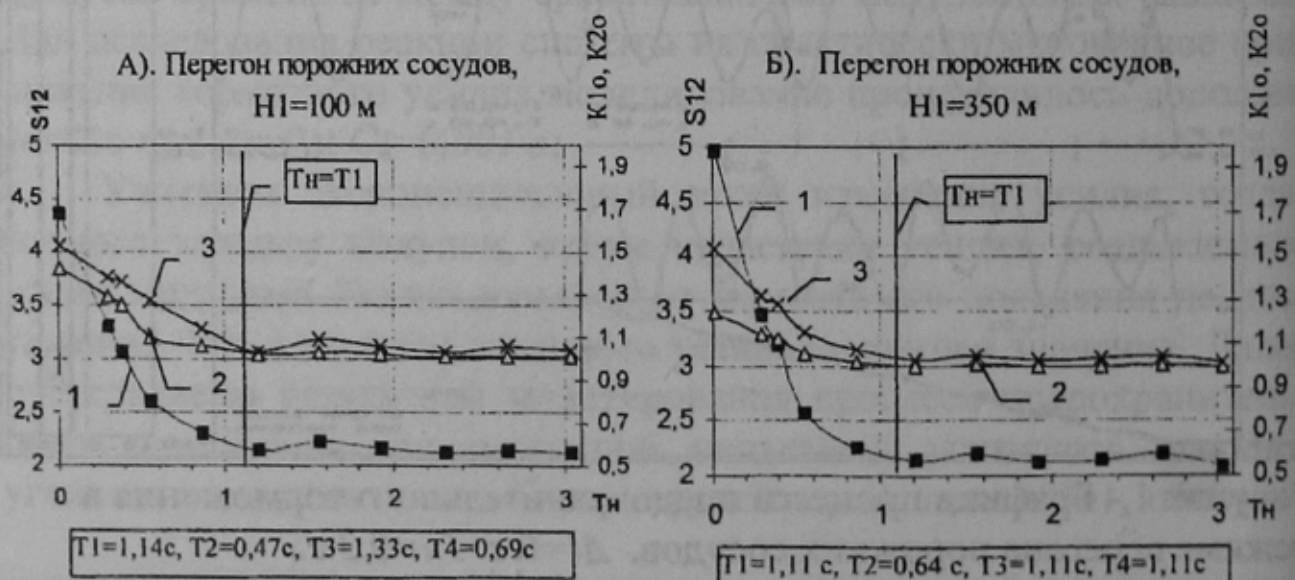


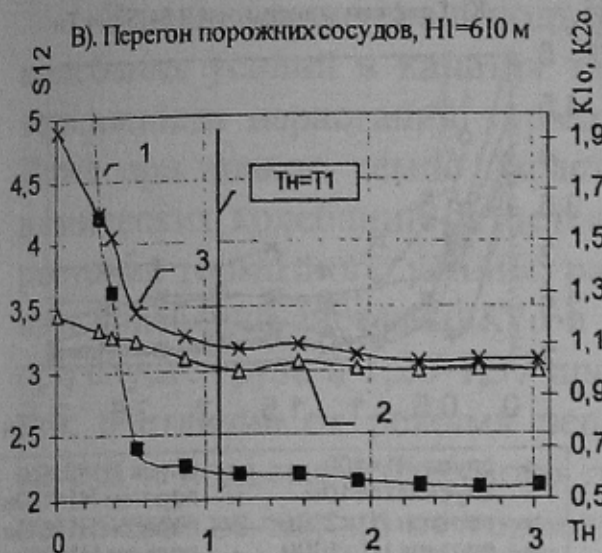
Рисунок 2 - Графики процесса предохранительного торможения в режиме перегона порожних сосудов.  $\Delta t=0,1$  с,  $T_H=1,57$  с.

$T_1, T_2, T_3, T_4$  – периоды первых четырех тонов собственных колебаний системы.

Аналогичное моделирование произведено для режимов спуска и подъема расчетного груза при расположении подъемных сосудов, как в середине ствола, так и вблизи крайних положений. Время нарастания тормозного усилия  $T_H$  варьировалось практически от нуля до величины, значительно превышающей период первого тона собственных колебаний системы. По результатам моделирования построены приведенные ниже графики зависимостей  $S_{12}^{max}(1)$ ,  $K_{10}^{max}(2)$ ,  $K_{20}^{max}(3)$ , от времени нарастания тормозного усилия  $T_H$  для различных технологических режимов работы подъема и различного местоположения сосудов в стволе (рис.3 А-К).  $H_1$ -расстояние от первого скипа до разгрузки.

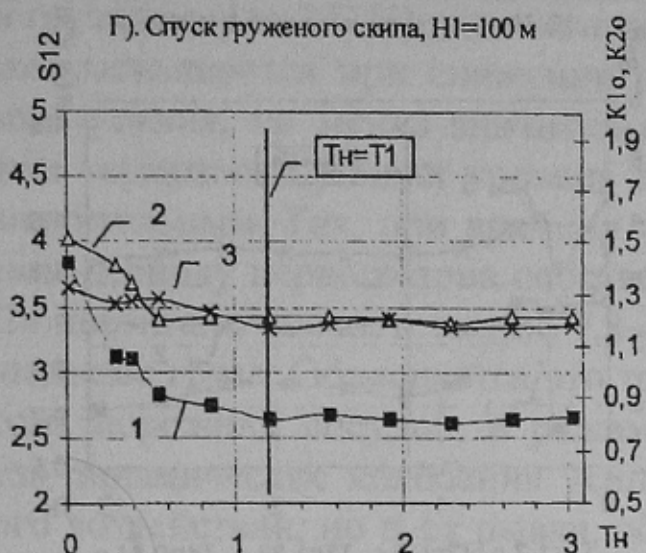


В). Перегон порожніх судів,  $H_1=610$  м



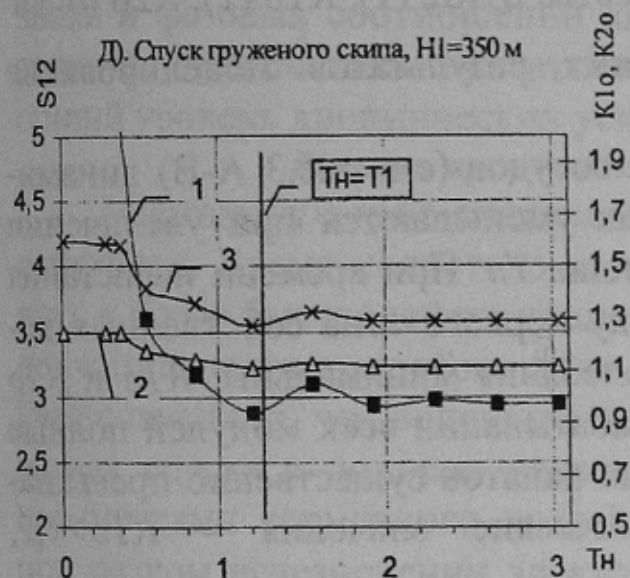
$T_1=1,14$  с,  $T_2=0,46$  с,  $T_3=1,33$  с,  $T_4=0,69$  с

Г). Спуск груженого скіпа,  $H_1=100$  м



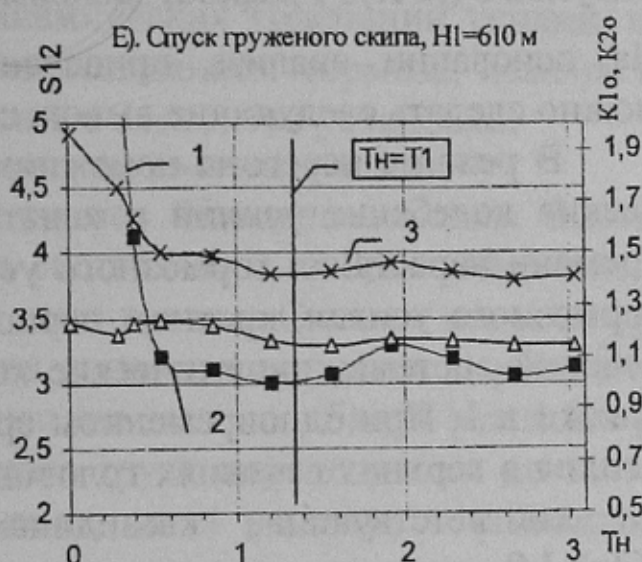
$T_1=1,2$  с,  $T_2=0,51$  с,  $T_3=1,33$  с,  $T_4=0,85$  с

Д). Спуск груженого скіпа,  $H_1=350$  м



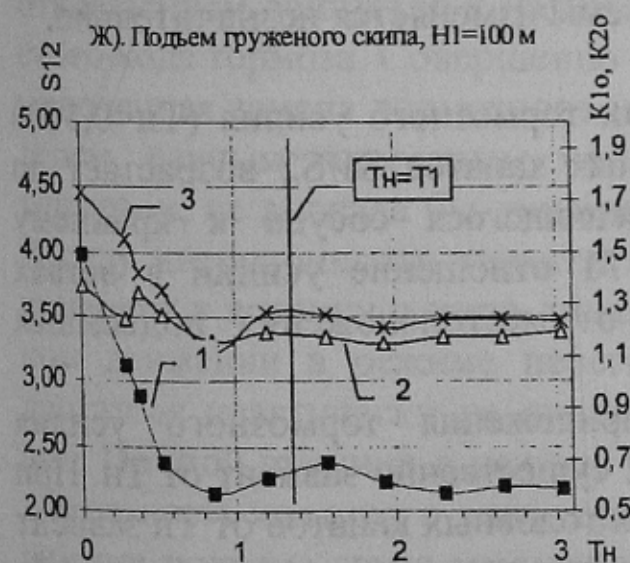
$T_1=1,24$  с,  $T_2=0,66$  с,  $T_3=1,39$  с,  $T_4=1,11$  с

Е). Спуск груженого скіпа,  $H_1=610$  м



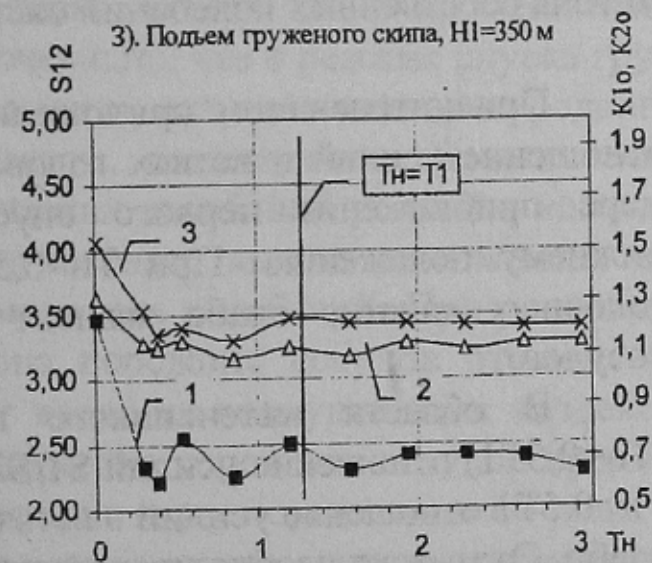
$T_1=1,36$  с,  $T_2=0,47$  с,  $T_3=1,72$  с,  $T_4=0,68$  с

Ж). Подъем груженого скіпа,  $H_1=100$  м



$T_1=1,35$  с,  $T_2=0,47$  с,  $T_3=1,72$  с,  $T_4=0,69$  с

З). Подъем груженого скіпа,  $H_1=350$  м



$T_1=1,25$  с,  $T_2=0,66$  с,  $T_3=1,4$  с,  $T_4=1,11$  с

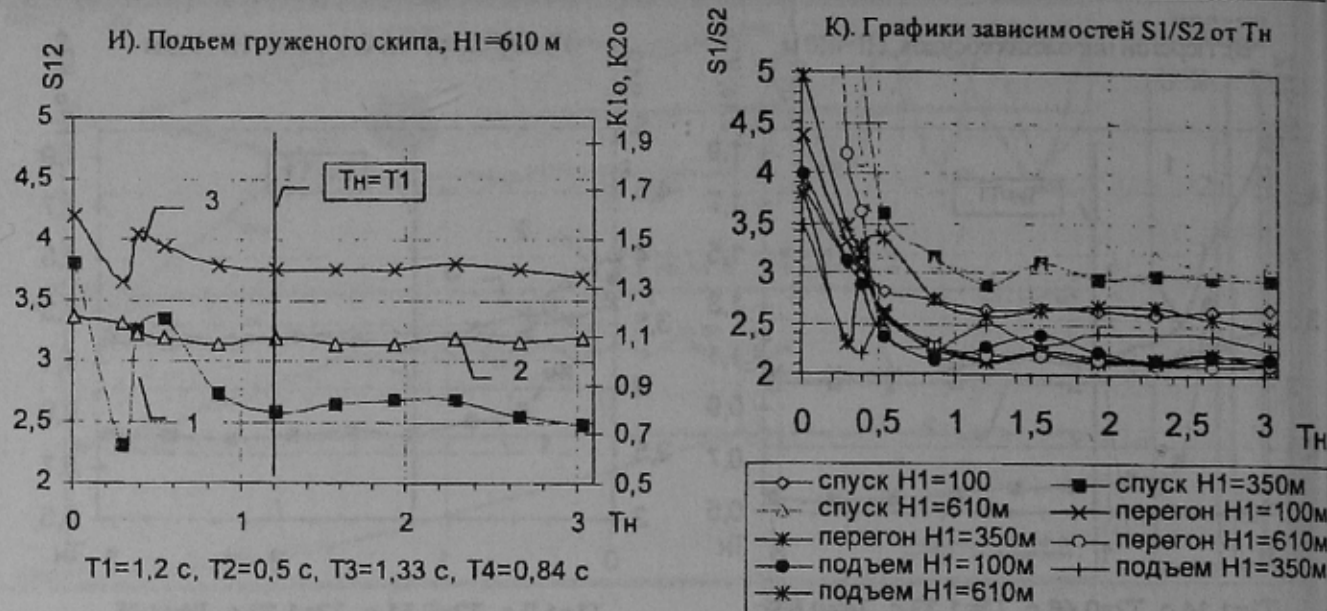


Рисунок 3 (А-К) - Графики зависимостей S1/S2 (1), K1o (2), K2o от Tн. На основании анализа приведенных результатов моделирования можно сделать следующие выводы:

В режиме перегона порожних сосудов (см. рис.3 А-В) динамические колебания усилий в канатах уменьшаются при увеличении времени нарастания тормозного усилия  $T_n$ . При времени нарастания тормозного усилия, кратном периоду первого тона собственных колебаний системы, динамические колебания минимальны,  $K1o$  и  $K2o$  близки к 1. При одновременном срабатывании всех модулей полные усилия в верхних сечениях головных канатов существенно превышают соответствующие квазидинамические значения -  $K1o > 1,2$ ,  $K2o > 1,9$ .

С изменением местоположения сосудов в стволе период первого тона собственных колебаний системы изменяется незначительно.

При интенсивном приложении тормозного усилия ( $T_n < 0,5T1$ ) отношение усилий в ветвях головных канатов S1/S2 возрастает по мере приближения первого опускающегося сосуда к крайнему нижнему положению. При  $T_n > 0,5T1$  отношение усилий в ветвях головных канатов слабо зависит от местоположения подъемных сосудов.

В области интенсивного приложения тормозного усилия ( $T_n < 0,5T1$ ) отношение усилий S1/S2 существенно зависит от  $T_n$ . При  $T_n > 0,5T1$  отношение усилий в ветвях головных канатов от  $T_n$  зависит слабо. Этот факт необходимо учитывать при наладке подъемных установок.

В режимах спуска и подъема груза (см. рис.3 Г-И) динамические колебания усилий в канатах также уменьшаются при снижении интенсивности нарастания тормозного усилия, но менее значительно. Даже при низком темпе нарастания тормозного усилия уровень динамических колебаний остается значительным. Так, при времени нарастания тормозного усилия, равном периоду первого тона собственных колебаний системы,  $K1_0$  и  $K2_0$  достигают соответственно 1,2-1,4 при спуске груза и 1,26-1,37 при подъеме груза. Объясняется это тем, что, в отличие от режима перегона порожних сосудов, в режимах спуска и подъема расчетного груза динамические колебания усилий возникают не только от тормозного воздействия, но и от рывка, обусловленного резким исчезновением электродинамического усилия подъемного двигателя при разрыве цепи защиты. В зависимости от знака и фазовых соотношений динамических колебаний усилий, вызванных отключением двигателя и наложением тормоза, изменяется общий уровень динамических усилий в элементах установки.

#### *Влияние времени холостого хода тормоза*

Многомодульный дисковый тормоз обладает высоким быстродействием. Время холостого хода составляет 0,15-0,2 с. Можно создать и более быстродействующие конструкции. Оценим влияние продолжительности холостого хода на динамику процесса торможения. Выше показано, что величины динамических колебаний усилий в режимах спуска и подъема расчетного груза определяются не только параметрами тормозного воздействия, но и рывком, возникающим при резком исчезновении электродинамического момента двигателя. Результирующее воздействие зависит от промежутка времени между отключением двигателя и наложением тормоза, т.е. от времени холостого хода тормоза. Совершенно очевидно, что в режиме спуска груза мгновенная замена тормозного момента, создаваемого электродвигателем, равным тормозным моментом, создаваемым механическим тормозом, не вызвала бы динамических колебаний усилий в канатах. В силу инерционности тормоза мгновенная замена невозможна, что приводит к возникновению динамических колебаний. При равномерном движении в режиме перегона порожних сосудов отключение двигателя практически не вносит внешних возмущающих воздействий. По этой причине в режиме перегона порожних сосудов продолжительность холостого хода тормоза не играет существенной роли. В режиме подъема груза мгновенное приложение тормозного момента

одновременно с отключением двигателя вызывает усиление колебаний.

На рисунке 4 представлены графики зависимостей  $S_{12}$  (1),  $K_{1o}$  (2) и  $K_{2o}$  (3) от  $T_{xx}$ , построенные по результатам моделирования

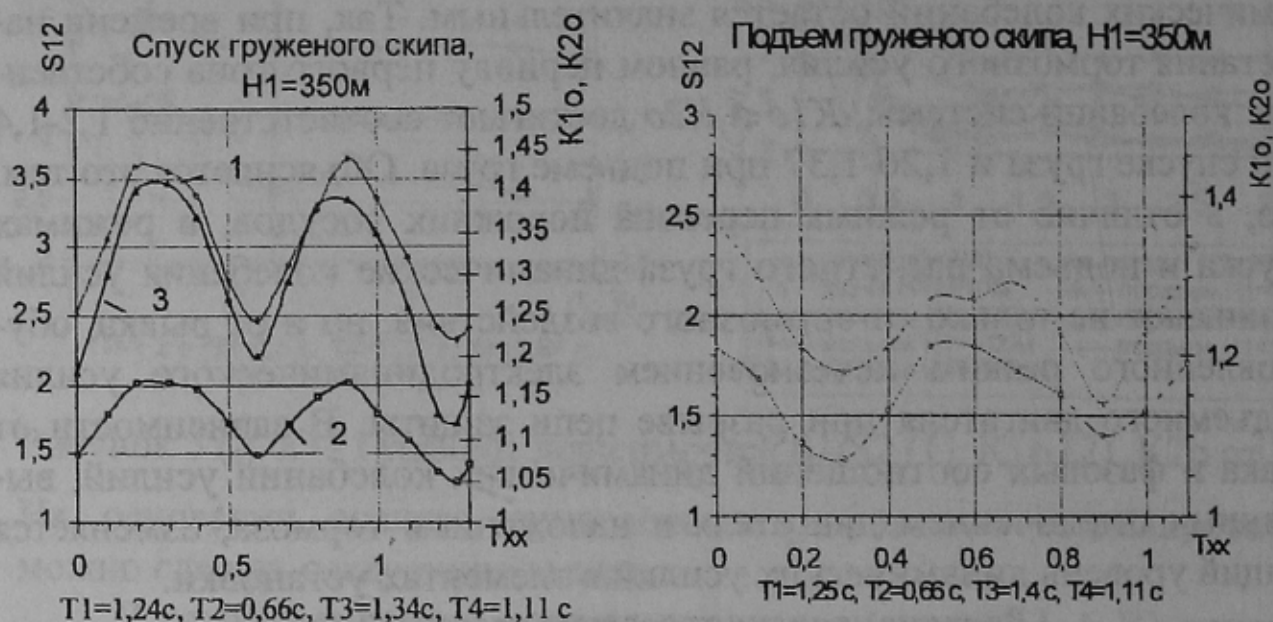


Рисунок 4 – Графики зависимостей  $S_{12}$ ,  $K_{1o}$ ,  $K_{2o}$  от  $T_{xx}$

угольной подъемной установки шахты "Красноармейская–Западная" №1. При моделировании варьировалось время холостого хода тормоза от 0 до величины, примерно равной периоду первого тона собственных колебаний системы. Постоянная времени тормозных модулей принималась равной 0,1 с. Первые шесть модулей, обеспечивающих тормозной момент, равный статическому моменту нагрузки включались одновременно, остальные – с равными интервалами 0,2 с.

Анализ результатов моделирования позволяет сделать следующие выводы.

В режиме спуска грузеного скипа минимальные амплитудные значения динамических колебаний усилий в ветвях канатов возникают при времени холостого хода тормоза, равном 0 и кратном периодам первого и второго тона собственных колебаний системы. В рассматриваемом случае периоды первого и второго тона равны соответственно  $T_1=1,24\text{ с}$ ,  $T_2=0,66\text{ с}$ . Соответственно минимальные амплитуды колебаний возникают при времени холостого хода тормоза, приблизительно равном нулю, 0,66 и 1,24 с. Последние два значения превышают действующие нормативы на быстродействие предохранительного тормоза. Таким образом, в режиме спуска груза необхо-



димо стремиться к максимальному сокращению продолжительности холостого хода тормоза. При указанных выше параметрах тормозного воздействия уже при времени холостого хода около 0,3 с динамические усилия в канатах достигают максимальных амплитудных значений.

В режиме подъема груженого скипа при времени холостого хода тормоза, равном 0 и кратном периодам первого и второго тона собственных колебаний системы амплитудные значения динамических колебаний усилий в ветвях канатов достигают максимальных величин. Первый минимум наблюдается при времени холостого хода тормоза около 0,3 с. Таким образом, одной настройкой тормоза не удастся одновременно обеспечить режимы торможения с минимальными динамическими усилиями, как при спуске, так и при подъеме расчетного груза. Целесообразно создание систем управления тормозом, формирующих тормозные воздействия в зависимости от рода выполняемой технологической операции.

**Влияние количества тормозных модулей.**

Совершенно очевидно, что при дискретном способе управления предохранительным тормозом от количества тормозных модулей существенно зависят характеристики тормозного воздействия. При малом числе модулей тормозное воздействие приобретает ярко выраженный ступенчатый характер, что может ухудшить качество переходного процесса.

Количеством модулей определяется частота их включения при заданном времени нарастания тормозного усилия. При совпадении частоты включения модулей с одной из гармонических составляющих спектра собственных частот системы возможно возникновение резонансных режимов.

Важно знать, - в какой степени вероятны и опасны такие режимы. С учетом изложенного определение рационального количества модулей

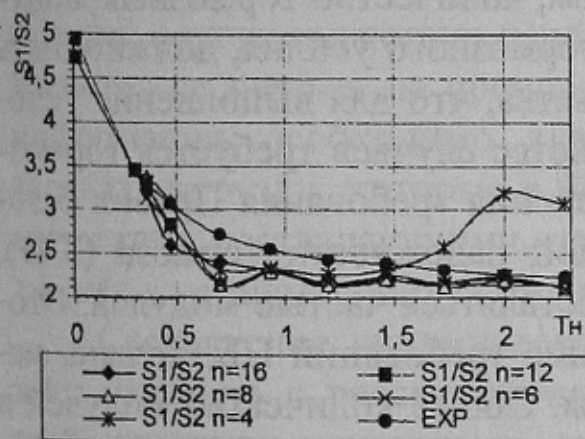


Рисунок 5 – Графики зависимости S1/S2 от количества тормозных модулей.

является актуальной задачей. Поставленная задача решается методом моделирования. В качестве основного параметра для оценки качества процесса торможения примем отношение полных усилий в верхних сечениях головных канатов S1/S2.

С целью исключения влияния других факторов, в частности, рывка, вызванного отключением подъемного двигателя, моделировался процесс торможения в режиме перегона порожних сосудов при их расположении в середине ствола. Для сравнительной оценки качества процесса моделировался процесс предохранительного торможения радиальным и дисковым тормозом с количеством тормозных модулей 4, 6, 8, 12 и 16. Время холостого хода дискового и радиального тормозов принято равным 0,2 с, величина тормозного усилия 500 кН. При моделировании процесса торможения установки с радиальным тормозом принят экспоненциальный характер тормозного воздействия. По результатам моделирования построены графики зависимости  $S1/S2$  от времени нарастания тормозного усилия  $T_n$ , при экспоненциальном и дискретном характере тормозного воздействия (рис. 5).

Анализ результатов моделирования показывает, что при количестве тормозных модулей 6 и более,  $S1/S2$  по величине меньше, чем при экспоненциальном характере нарастания тормозного усилия и мало зависит от количества тормозных модулей независимо от интенсивности нарастания тормозного усилия. При 4-х тормозных модулях характер тормозного воздействия имеет явно выраженный ступенчатый характер. Динамические колебания усилий в канатах и соответственно  $S1/S2$  в этом случае могут значительно превышать величины, имеющие место при экспоненциальном характере нарастания тормозного усилия. Таким образом, количество тормозных модулей, создающих заданную величину тормозного усилия, должно быть не менее 6. С учетом того обстоятельства, что для выполнения условий нескольжения канатов в большинстве случаев требуется тормозной момент меньший, чем для выполнения требования Правил безопасности к коэффициенту статической надежности тормоза ( $K_{\Sigma}$ ), торможение установки должно осуществляться частью модулей. Вторая часть, обеспечивающая выполнение требований ПБ, должна накладываться после останова машины. Общее количество модулей в этой связи должно быть не менее 8.

Список источников.

1. Дворников В.И. Основы динамики шахтного подъемного комплекса // Теоретические и эксплуатационные проблемы шахтных стационарных установок. Донецк, 1986. – С. 10-33.
2. Шинкаренко Н.А. Трибухин В.А. Лямин Г.С. Экспериментальные исследования характеристик дискового тормоза. // Сборник научных трудов. Стационарное оборудование шахт. Донецк, 1987 г., 218 с.