

УДК 622.647.1

*д.т.н., Корнеев С.В.,  
Доброногова В.Ю.  
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина),  
к.т.н. Сафонов В.И.  
(УИПА, г. Харьков, Украина)*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСТРЕННЫХ ПЕРЕГРУЗОК ЗАБОЙНЫХ СКРЕБКОВЫХ КОНВЕЙЕРОВ С ГИДРОДИНАМИЧЕСКИМ ПРИВОДОМ И ГИДРАВЛИЧЕСКИМИ НАТЯЖНЫМИ УСТРОЙСТВАМИ**

*Наведена математична модель вибійного скребкового конвеєра з гідродинамічним приводом і з гідравлічними натяжними пристроями (ГНП). Підтверджена адекватність моделі. В результаті моделювання режимів роботи конвеєра встановлена працездатність ГНП як засобу оперативного захисту від екстрених перевантажень.*

***Ключові слова:** вибійний скребковий конвеєр, гідродинамічний привід, гідравлічний натяжний пристрій, математична модель, адекватність, екстрені перевантаження, оперативний захист.*

*Приведена математическая модель забойного скребкового конвейера с гидродинамическим приводом и с гидравлическими натяжными устройствами (ГНУ). Подтверждена адекватность модели. В результате моделирования режимов работы конвейера установлена работоспособность ГНУ как средства оперативной защиты от экстренных перегрузок.*

***Ключевые слова:** забойный скребковый конвейер, гидродинамический привод, гидравлическое натяжное устройство, математическая модель, адекватность, экстренные перегрузки, оперативная защита.*

Существенное повышение технико-экономических показателей добычи угля может быть достигнуто в результате повышения надежности забойного оборудования, в том числе и забойных скребковых конвейеров (ЗСК), для которых наиболее тяжелым остается режим сравнительно редкого экстренного стопорения тягового органа (ТО), зачастую приводящего к его разрушению и длительным простоям лавы. Полностью устранить стопорения ТО не удастся, поэтому в приводе конвейера предусматриваются те или иные способы и средства защиты от перегрузок. Наибольшее распространение получили самоуправляемые гидро-

муфты (ГМ) постоянного заполнения, выполняющие, наряду с прочими, функцию ограничения крутящего момента. Вместе с тем продолжающиеся разрушения конструктивных элементов ТО и трансмиссии ЗСК в режимах стопорения указывают на то, что при надежной защите двигателей от опрокидывания при длительных перегрузках ГМ оказываются недостаточно эффективными при экстренных перегрузках. Отказы ТО обусловлены удаленностью ГМ от объекта защиты – ТО и наличием значительных вращающихся масс, присоединенных к турбинному колесу ГМ, (ведомой части привода). Особенно их влияние заметно при заклиниваниях ТО вблизи привода. В этом случае при большой жесткости участка силовой системы между ГМ и препятствием движению ТО запасенной в ведомой части привода кинетической энергии, как известно, достаточно для возникновения опасных динамических перегрузок. Очевидно, что для повышения надежности конвейеров необходимо предусмотреть дополнительные средства защиты от экстренных перегрузок.

Анализ результатов известных теоретических и экспериментальных исследований [1, 2] режимов экстренного нагружения конвейеров с гидродинамическим приводом указывает на недостаточную изученность его защитных свойств. Это связано со сложностью протекающих в ГМ процессов и с несовершенством применяемых для их исследования моделей. Нельзя, например, пренебрегать влиянием на динамические нагрузки в ТО вращающихся масс рабочей жидкости (РЖ) в ГМ, на что косвенно указывают материалы работы [2], в которой отмечается существенное различие статических и динамических механических характеристик гидромуфт. Максимальный динамический момент ГМ типа ГПЭ400, например, в 1,4 раза превышает максимальный статический.

В работе [3] с теоретических позиций рассматривается возможность применения для оперативного ограничения динамических нагрузок в ТО гидравлического натяжного устройства (ГНУ), хотя его основной функцией традиционно считается обеспечение монтажного натяжения. Показано, что в случае применения в составе конвейера СП63М с гидромуфтами ГНУ, гидроцилиндры которого опираются на опоры приводного вала со звездочками, максимальные нагрузки в ТО снижаются на 12...13 %. Лучшим компоновочным решением считается применение ГНУ с обособленным телескопическим узлом раздвижности (раздвижным рештаком), устанавливаемым между приводом и переходной секцией рештачного става. И в этом случае, несмотря на увеличение массы перемещаемых посредством ГНУ частей привода и сопротивлений их движению, нагрузки в ТО, также несколько снижаются. Из данной работы видно, что от ГНУ нельзя ожидать существенного снижения нагрузок и повышения надежности системы. Вместе с тем, полученные с применением упрощенных двухмассовых моделей конвейера резуль-

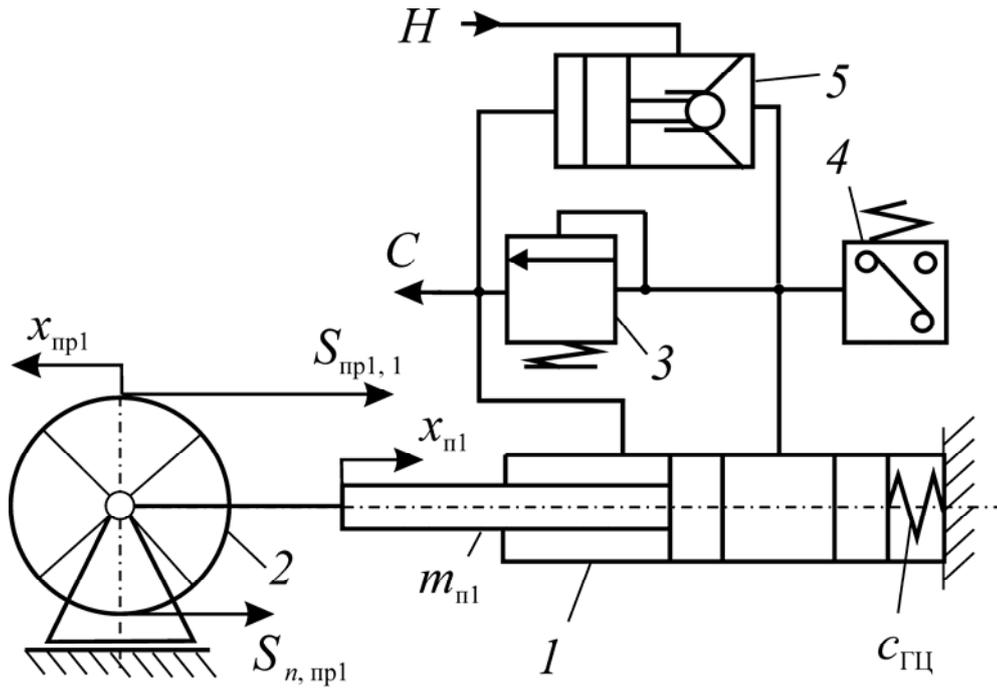
таты нуждаются в теоретической проверке на более детально разработанных моделях.

Дальнейшие исследования защитных функций ГНУ с телескопическим рештаком в составе конвейеров нового технического уровня КСД27 с электромеханическим приводом (без гидромурфт) при условии своевременного отключения двигателей при срабатывании предохранительного клапана (ПК) ГНУ, а, возможно, и с некоторым упреждением, отражены в работе [4]. ГНУ содержит датчик нагрузок, входящий также в систему автоматического управления основными средствами защиты или защитного отключения приводных асинхронных двигателей (АД), возможно, с наложением динамического торможения. Применение ГНУ позволяет после его срабатывания увеличить продолжительность процесса нагружения ТО, тем самым обеспечивая возможность своевременного включения и эффективной работы управляемых основных средств защиты. На приведенных в работе примерах показано, что максимальные усилия в ТО, благодаря применению ГНУ и отключению АД, снижаются в 2,2 раза до уровня, приемлемого по условию прочности цепей.

Анализ приведенных работ указывает на возможность эффективной защиты конвейеров с гидродинамическим приводом от экстренных перегрузок в результате применения ГНУ в комплексе с отключением, а возможно и с электрическим торможением АД. Однако для обоснования такой гипотезы необходимы дополнительные исследования и математическая модель для их проведения.

Целью работы является моделирование процессов нагружения силовой системы забойных скребковых конвейеров с гидродинамическим приводом и гидравлическими натяжными устройствами при экстренных стопорениях ТО для установления работоспособности ГНУ в качестве оперативного средства защиты.

Динамическая модель ГНУ приведена на рис. 1. Фрагменты математической модели конвейера с ГМ и ГНУ, общая структура которой гомоморфна реальным конвейерам, например, конвейеру СП250.11 и его аналогам СП202М, СП63М и др., заимствованы из работ [1, 4].



- 1 – гидроцилиндры; 2 – приводная станция;  
 3 – предохранительный клапан; 4 – датчик давления;  
 5 – гидрозамок

Рисунок 1 – Динамическая модель ГНУ

В целом математическая модель после ее «сборки» выглядит следующим образом:

$$J_1 \ddot{\varphi}_{1j} = M_{\partial j} - c_1(\varphi_{1j} - \varphi_{2j}) - \mu_1(\omega_{1j} - \omega_{2j});$$

$$J_2 \ddot{\varphi}_{2j} = c_1(\varphi_{1j} - \varphi_{2j}) + \mu_1(\omega_{1j} - \omega_{2j}) - M_{\partial j};$$

$$J_3 \ddot{\varphi}_{3j} = M_{\partial j} - c_2(\varphi_{3j} - \varphi_{4j}) - \mu_2(\omega_{3j} - \omega_{4j});$$

$$J_4 \ddot{\varphi}_{4j} = c_2(\varphi_{3j} - \varphi_{4j}) + \mu_2(\omega_{3j} - \omega_{4j}) - R_{ul1} F_{1j};$$

$$J_5 \ddot{\varphi}_{5j} = \eta_1 R_{\kappa 1} F_{1j} - R_{ul2} F_{2j};$$

$$J_6 \ddot{\varphi}_{6j} = \eta_2 R_{\kappa 2} F_{2j} - R_{ul3} F_{3j};$$

$$J_7 \ddot{\varphi}_{7j} = \eta_3 R_{\kappa 3} F_{3j} - c_6 \left( \varphi_{7j} - \frac{x_{np1}}{R_{3\delta}} \right) - \mu_6 \left( \omega_{7j} - \frac{v_{np1}}{R_{3\delta}} \right);$$

$$\frac{J_6 \ddot{x}_{np2}}{R_{3\delta}} = \sum_{j=1}^{p_1} \left[ c_6 \left( \varphi_{7j} - \frac{x_{np1}}{R_{3\delta}} \right) + \mu_6 \left( \omega_{7j} - \frac{v_{np1}}{R_{3\delta}} \right) \right] + R_{3\delta} (S_{n,np1} - S_{np1,1});$$

$$\frac{J_6 \ddot{x}_{np2}}{R_{3\delta}} = \sum_{j=p+1}^{p_1} \left[ c_6 \left( \varphi_{7j} - \frac{x_{np2}}{R_{3\delta}} \right) + \mu_6 \left( \omega_{7j} - \frac{v_{np2}}{R_{3\delta}} \right) \right] + R_{3\delta} (S_{k,np2} - S_{np2,k+1});$$

$$\begin{aligned}
m_i \ddot{x}_i &= F_i - f_{mpi} - F_{ni} - R_i; \\
m_{zi} \ddot{x}_{zi} &= F_{ni} - f_{mpzi}; \\
m_{nl} \ddot{x}_{nl} &= n_2 F_2 p_{2l} - S_l - F_{nl} \pm m_{nl} g \sin \beta = 0; \\
\dot{Q}_l &= Q_{nl} - Q_{pl} - Q_{пкl}.
\end{aligned}$$

В приведенных уравнениях:  $J_r$  и  $\varphi_{r,j}$  – момент инерции и угловая координата  $r$ -й вращающейся массы  $j$ -го приводного блока,  $r=1, 2, \dots, 5$ ,  $j=1, 2, \dots, p_1$ ;  $p$  и  $p_1$  – число приводных блоков в головном приводе и в целом в конвейере;  $J_6$  – момент инерции приводного барабана со звездочками;  $M_{dj}$  – крутящий момент, развиваемый АД;  $c_r$  и  $\mu_r$  – коэффициенты жесткости и вязкости  $r$ -й связи между сосредоточенными массами приводных блоков;  $M_{rj}$  – крутящий момент, передаваемый ГМ;  $F_{mj}$  – усилие в  $m$ -й зубчатой передаче редуктора,  $m=1, 2, 3, 4$ ;  $R_{ш(к)m}$  – радиус шестерни (с индексом «ш») и колеса (с индексом «к»)  $m$ -й передачи редуктора;  $\eta_m$  – КПД  $m$ -й передачи редуктора;  $R_{зв}$  – радиус приводной звездочки;  $x_{пр l}$  и  $v_{пр l}$  – перемещение и скорость ведущего сечения ТО на приводных звездочках  $l$ -го привода,  $l=1$  (головной привод),  $2$  (хвостовой привод);  $S_{пр 1, 1}$ ,  $S_{пр 2, k+1}$  и  $S_{n, пр 1}$ ,  $S_{k, пр 2}$  – усилия в набегающих и сбегающих с приводных звездочек 1-го и 2-го приводов ветвей ТО;  $W_l$  – тяговое усилие, развиваемое  $l$ -м приводом;  $m_i$  и  $x_i$  – соответственно,  $i$ -я сосредоточенная масса ТО и ее перемещение,  $i=1, 2, \dots, n$ ;  $f_{тp i}$  – сила сопротивления движению  $i$ -й массы ТО; то же, но с индексом «г» относится к  $i$ -й массе груза;  $F_i$  – сумма активных сил, действующих на  $i$ -ю массу ТО;  $F_{ni}$  – напорное усилие, с которым  $i$ -ая масса ТО действует на груз;  $R_i$  – реакция препятствия движению  $i$ -й массы ТО при его заклинивании;  $m_{пl}$  – масса поступательно перемещающихся частей  $l$ -й приводной станции;  $x_{пl}$  – перемещение  $l$ -й приводной станции;  $n_r$  – число ГЦ в каждом ГНУ;  $S_l$  – сила воздействия ТО на  $l$ -ю приводную станцию;  $F_{пl}$  – сопротивление движению  $l$ -й приводной станции;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\beta$  – угол установки конвейера;  $Q_l$  – количество жидкости в ГЦ  $l$ -й приводной станции;  $Q_{пl}$  и  $Q_{рl}$  – значения подачи и расхода РЖ через электрогидрораспределитель, которые обеспечиваются при крайних положениях золотника;  $Q_{пкl}$  – расход РЖ через ПК  $l$ -го привода,  $Q_{пкl} = Q_{пк} \sqrt{\Delta p_{r l} / \Delta p_{пк}}$ , где  $\Delta p_{r l}$  и  $\Delta p_{пк}$  – перепады давления в ПК,  $\Delta p_{r l} = p_{r l} - p_c$ ,  $\Delta p_{пк} = p_{пк} - p_c$ ;  $p_{r l}$  – текущее значение давления в ГЦ  $l$ -ой приводной станции;  $p_c$  – давление в сливной магистрали;  $p_{пк}$  – давление настройки ПК;  $Q_{пк}$  – расход РЖ через ПК при  $\Delta p_{пк}$ .

Здесь  $Q_{пк l} = 0$ , если  $p_{r l} < p_{пк}$ . В рабочем режиме, предшествующем стопорению,  $Q_{п 1} = Q_{р 1} = 0$ ,  $Q_{п 2} = 0$ , если  $p_{r 2} < p_{рег}$ , и  $Q_{р 2} = 0$ , если  $p_{r 2} > p_{рег}$ ,  $p_{рег}$  – давление в ГЦ, которое задается согласно закону регулирования.

Привод покоится, т.е.  $\dot{x}_{\text{пл}}=0$ , если выполняется условие  $t=0$  или  $\dot{x}_{\text{пл}}(t) \cdot \dot{x}_{\text{пл}}(t-\Delta t) < 0$  или  $x_{\text{пл}} = -h_{\text{ГЦ}}$ , где  $h_{\text{ГЦ}}$  – выдвигание поршней гидроцилиндров в начальный момент времени;  $\Delta t$  – шаг интегрирования приведенных выше уравнений.

Давление в поршневой полости ГЦ  $p_{\text{ГЦ}} = c_{\text{ГЦ}} x_{\text{ГЦ}} / n_{\text{Г}} F_{\text{П}}$ , где  $c_{\text{ГЦ}}$  и  $x_{\text{ГЦ}}$  – приведенные к днищу ГЦ соответственно жесткость и деформации ГЦ,  $x_{\text{ГЦ}} = Q / n_{\text{Г}} F_{\text{П}} - x_{\text{пл}}$ .

Моделирование производится для конвейера СП63М при стопорении ТО на расстоянии 20 м от привода (условия приняты такими же, как при проведении экспериментов). Так же, как и в работе [2], полагаем, что груз на конвейере не оказывает заметного влияния на динамику стопорения, поэтому рассматривается порожний конвейер. Вначале наблюдается интенсивное возрастание усилия  $S_{\text{наб}}$  в набегающей на приводную звездочку ветви ТО до 149 кН (рис. 2). Через 0,5 с усилие снижается до уровня, соответствующего работе привода на упор, т.е. до 87 кН. В данном случае гидромурфты в приводе не в состоянии полностью предотвратить динамические нагрузки в силовой системе.

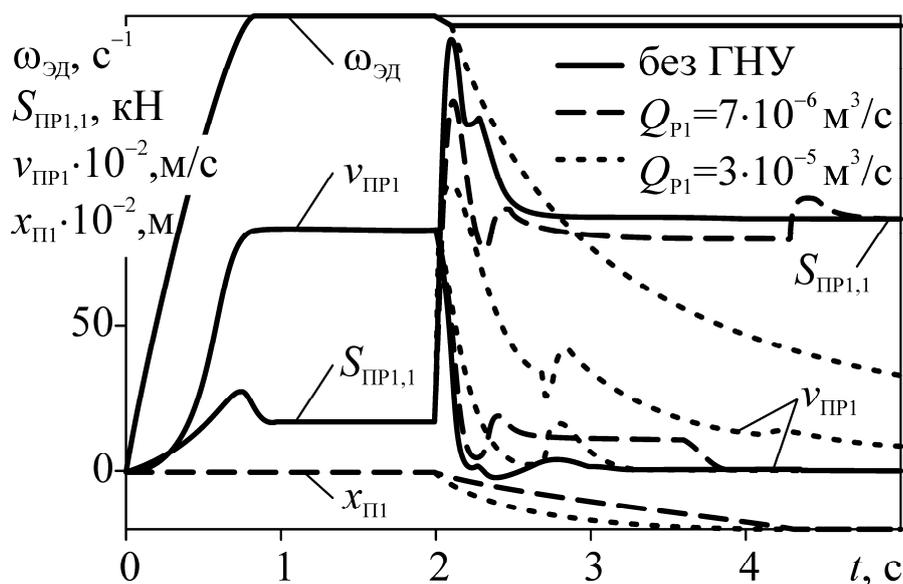


Рисунок 2 – Диаграммы процесса экстренного стопорения конвейера СП 63

В случае применения в тех же условиях ГНУ с телескопическим рештаком, для которого, как и при проведении экспериментов, принимались  $p_{\text{ПК}}=5$  МПа,  $Q_{\text{ПК}}=7 \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>/с,  $h_{\text{ГЦ}}=0,2$  м,  $S_{\text{наб}}$  достигает 121 кН (рис. 2). Все последующие пиковые значения  $S_{\text{наб}}$ , обусловленные колебаниями ведомой части привода, а затем посадкой ГЦ «нажестко», не превысили первого пикового значения. Благодаря применению ГНУ

обеспечивается снижение максимальных значений  $S_{\text{наб}}$  на 23 %. Заметим, что при моделировании с применением упрощенной двухмассовой модели снижение составило всего лишь 8 % [3].

Наконец, существенное снижение нагрузок в ТО обеспечивается при немедленном после срабатывания ПК отключении АД. При  $p_{\text{пк}}=5$  МПа,  $Q_{\text{пк}}=3 \cdot 10^{-5}$  м<sup>3</sup>/с,  $h_{\text{г/н}}=0,1$  м, первое пиковое значение  $S_{\text{наб}}$  равняется 98 кН (рис. 2). Следующее пиковое значение  $S_{\text{наб}}$ , обусловленное колебаниями масс ведомой части привода, при заданных параметрах ГНУ совпадает во времени с посадкой ГЦ «нажестко». Но даже при таком, как выясняется, неблагоприятном сочетании параметров ГНУ максимальное значение  $S_{\text{наб}}$  составляет всего лишь 103 кН (рис. 2), что в 1,45 раз меньше, чем в конвейере без ГНУ.

Моделирование режима стопорения с ГНУ, ГЦ которого связаны непосредственно с приводным валом со звездочками, (предмет исследования в [3]) показало, что, несмотря на снижение примерно в 3 раза поступательно перемещаемых масс привода, заметного снижения нагрузок в ТО не произошло.

Также проведено моделирование тяжелого пуска конвейера с ГНУ с телескопическим узлом раздвижности, т.е. пуска при застопоренном ТО. Казалось бы, особой необходимости в этом нет, так как одним из условий применения ГНУ в качестве средства защиты от экстренных перегрузок является максимальное использование тяговых возможностей привода, при котором крутящий момент, передаваемый ГМ при срабатывании ПК, должен быть не меньше его максимального значения  $M_{\text{г max}}$ . Вместе с тем, режим, при котором  $M_{\text{г пк}} < M_{\text{г max}}$ , вполне возможен, например, в силу случайного характера как  $p_{\text{пк}}$ , так и самого  $M_{\text{г max}}$ . Затем такой режим легко имитируется при проведении экспериментальных исследований, а полученные при этом результаты могут служить для дополнительной проверки адекватности модели. При проведении исследований значение  $p_{\text{пк}}$  принималось таким, чтобы обеспечить срабатывание ПК при значении крутящего момента ГМ на уровне  $0,9M_{\text{г max}}$ . Типичные диаграммы моделируемых величин отражены на рис. 3. Незначительная динамика, имеющая место при посадке ГЦ «нажестко», определяется уровнем запасенной в ведомой части привода кинетической энергии. При этом окружная скорость звездочки, которая близка к скорости поступательного движения привода, определяется расходом РЖ через ПК. Если отключения двигателя происходят раньше, чем ГЦ садятся «нажестко»,  $S_{\text{наб}}$  убывает. В начале пуска ведомая часть привода успевает разогнаться до некоторой скорости, которая затем под действием реакции ТО резко снижается. Одновременно давление в ГЦ возрастает и достигает значения  $p_{\text{пк}}$ .

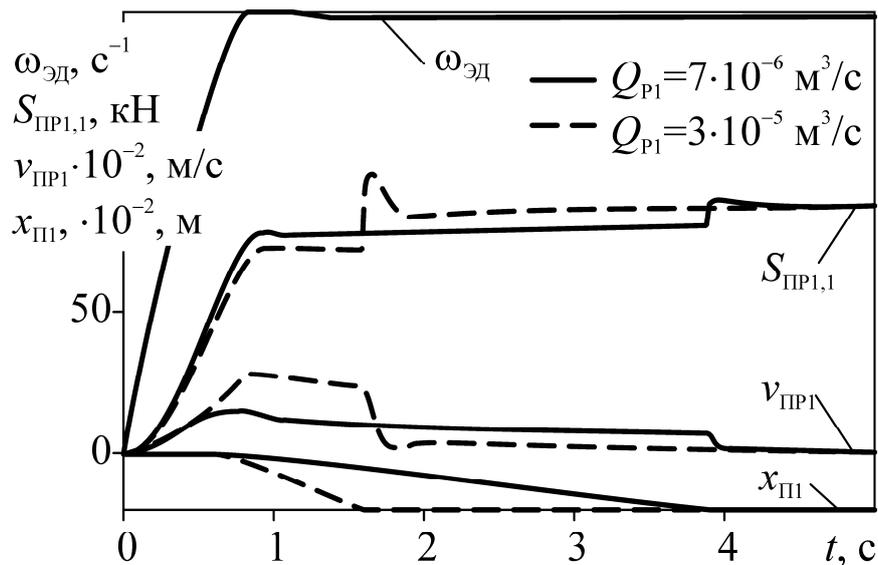


Рисунок 3 – Диаграммы процесса тяжелого пуска конвейера СП 63

После срабатывания ПК приводная станция приходит в движение, в результате чего темп снижения скорости вращения звездочки резко снижается. Устанавливается некоторый «квазистационарный режим», при котором усилие  $S_{наб}$  остается практически неизменным, а его уровень определяется, прежде всего, настройкой ПК. При исчерпании хода ГЦ и их посадки «нажестко» скорость звездочки резко падает до нуля, а усилие  $S_{наб}$  скачком возрастает до уровня, соответствующего работе привода на упор. Практически идентичная картина наблюдается на экспериментальных осциллограммах (рис. 4), которые получены для проверки адекватности модели.

Незначительные колебания  $S_{наб}$  в процессе движения приводной станции имеют случайный характер и определяются непостоянством сопротивлений ее движению, соответственно, давления в ГЦ, а также расхода РЖ через ПК.

Следует отметить, что тяжелый пуск представляет опасность, прежде всего, для самой ГМ и приводит к выплавлению плавкой пробки, по сути – к неполомочному отказу ГМ. В этом случае датчик давления в ГЦ ГНУ может служить для своевременного отключения конвейера, что позволит избежать срабатывания тепловой защиты ГМ.

В случае регулирования посредством ГНУ первоначального натяжения ТО в рабочем режиме, которое может оказаться значительно меньшим натяжения, осуществляемого традиционным способом – приводом, эффект от применения ГНУ в качестве защитного устройства усиливается.

Итак, установлена эффективность ГНУ, как оперативного средства защиты конвейеров с гидродинамическим приводом от экстренных

перегрузок, особенно в сочетании с отключением двигателей привода. Полученные результаты могут быть распространены на все известные конвейеры с гидродинамическим приводом.

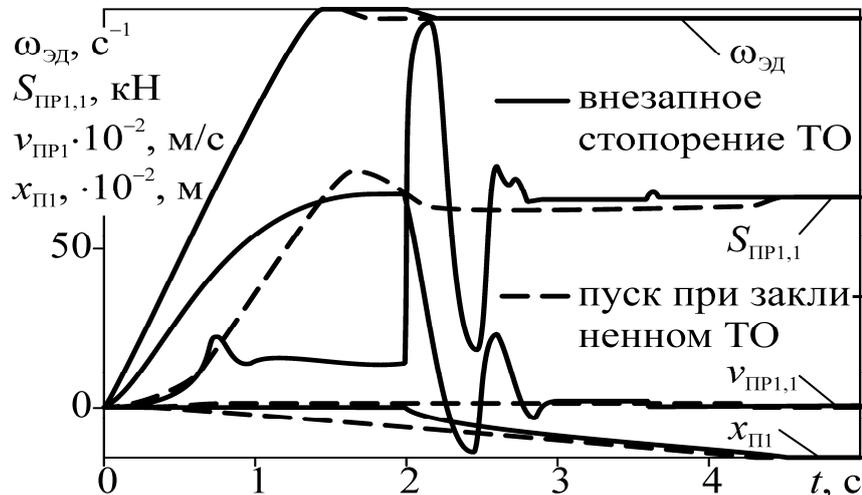


Рисунок 4 – Осциллограммы режимов экстренного стопорения и тяжелого пуска конвейера СП63 с ГНУ

Дальнейшие исследования должны быть направлены на обоснование параметров настройки предохранительного клапана ГНУ и его расходных характеристик, а также параметров согласования совместной работы ГНУ и основного средства защиты.

### Библиографический список

1. Корнеев С.В. Адаптация шахтных скребковых конвейеров к условиям производства/ С.В. Корнеев, Л.Н. Ширин, М.В. Плетнев. – Луганск: Книжковий світ, 2005. – 264 с.
2. Леусенко А.В. Скребковые конвейеры. Справочное пособие. / А.В. Леусенко, Г.В. Высоцкий, Б.А. Эйдерман. – М., Недра. – 1993. – 224 с.
3. Сигалов Л.Н. Гидравлическое устройство защиты привода скребкового конвейера/Л.Н. Сигалов // Разработка месторождений полезных ископаемых.– К.: Техника, 1987. – Вып.78. – С. 43-49.
4. Доброногова В.Ю. О применении многофункциональных гидравлических натяжных устройств в двухприводных забойных скребковых конвейерах. /В.Ю. Доброногова,, Вісник Криворізького технічного університету. – 2011. – вып. 28. – С. 140-145

Рекомендована к печати д.т.н., проф. Финкельштейном З.Л.