

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ДОБЫЧНЫМ КОМБАЙНОМ В РЕЖИМЕ СТАБИЛИЗАЦИИ СКОРОСТИ ПОДАЧИ

В статье анализируются переходные процессы в нескорректированной системе автоматического управления добычным комбайном с бесцепной системой подачи. Осуществляется синтез эффективного закона управления скоростью подачи комбайна с позиции улучшения переходных процессов. Анализируется эффективность закона управления при имитации реальных условий работы комбайна.

В статті аналізуються перехідні процеси в нескорегованій системі автоматичного керування видобувним комбайном з безланцюговою системою подачі. Відбувається синтез ефективного закону керування швидкістю подачі комбайна з позиції покращення перехідних процесів. Аналізується ефективність закону керування у випадку імітації реальних умов роботи комбайну.

The transient processes in noncorrected automated control system by shearer with chainless haulage are analysed in the article. The development of effective automated control system by shearer from the standpoint of improving of transient processes is done. The effectiveness of automated control by shearer during imitation of real working conditions is analysed.

**Вступление.** В настоящее время отличительной особенностью горных машин является их высокая энерговооруженность. Например, добычной комбайн УКД300, который применяется для отработки маломощных пластов, имеет два электродвигателя приводов резания мощностью по 250 кВт и два электродвигателя приводов подачи мощностью по 30 кВт. Существенная мощность электродвигателей добычного комбайна с учетом сложного характера формирования нагрузки на выходных валах электроприводов предъявляет повышенные требования к протеканию переходных процессов в электроприводах подачи. Особенно это важно при работе комбайна в автоматическом режиме, когда закон управления скоростью подачи необходимо воспроизводить с приемлемой точностью. На данный момент в режиме стабилизации скорости подачи автоматическое управление комбайном реализуется по отклонению фактической скорости подачи от заданной. При этом должно соблюдаться требование по ограничению максимального значения и скорости изменения во времени вращающего момента электродвигателя привода подачи. В статье рассматривается распространенная конструктивная реализация механизма перемещения комбайнов современного поколения, когда привода подачи не имеют кинематической связи и работают независимо друг от друга.

**Последние достижения.** Исследования на основе математического моделирования переходных процессов в электроприводах подачи и резания добычных комбайнов до этого момента проводились в основном для определения рациональных параметров элементов механизма перемещения [1], а также установления закономерностей формирования динамических нагрузок в механизме перемещения с целью эффективной защиты электропривода [2]. Однако, не менее важным вопросом является улучшение переходных процессов в механизме

перемещения с помощью систем автоматического управления (САУ) в нормальном режиме работы комбайна. Исходя из этого, в статье поставлена цель:

- на основе динамической модели САУ добычным комбайном УКД300 исследовать переходные процессы в нескорректированной системе;
- осуществить синтез эффективного закона управления скоростью подачи добычного комбайна УКД300 с учетом ограничений по амплитуде и скорости изменения во времени вращающего момента электродвигателя привода подачи;
- исследовать эффективность синтезированного закона управления скоростью подачи при имитации реальных условий работы комбайна по отношению к нагрузкам, которые формируются в механизме перемещения.

**Изложение основного материала исследований.** Для синтеза эффективного закона управления скоростью подачи комбайна с целью корректирования переходных процессов в приводе подачи необходимо математическое описание и анализ динамических процессов, которые протекают в подсистеме перемещения добычного комбайна. Для этого использована динамическая модель системы «преобразователь частоты – асинхронный электродвигатель» [3], структурная схема которой представлена на рис. 1.

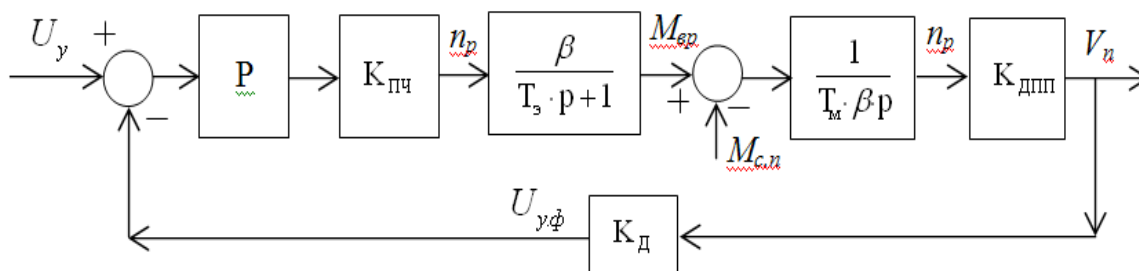


Рис. 1. Структурная схема динамической модели САУ добычным комбайном

При этом принимаются следующие допущения:

- не учитывается электромагнитная инерция электродвигателя;
- моделируется режим работы электродвигателя, когда его скольжение стремится к нулю;
- не учитываются упругие и диссипативные свойства в механической части электропривода подачи;
- не учитываются переходные процессы в преобразователе частоты питающего электродвигатель напряжения;
- при применении жесткого тягового органа механизм перемещения добычного комбайна рассматривается как передаточное звено с незначительными моментами инерции элементов движителя и жесткими механическими связями, при которых приведенный к валу электродвигателя коэффициент жесткости стремится к бесконечности.

Коэффициент  $\beta$  в апериодическом звене (рис.1) представляет собой модуль жесткости линеаризованной механической характеристики:

$$\beta = \frac{2 \cdot M_{к.п}}{n_{0.п} \cdot s_{к}} = \frac{2 \cdot 545}{1000 \cdot 0,053} = 20,57, \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{мин} / \text{об}, \quad (1)$$

где  $n_{0,p}$  – синхронная частота вращения ротора (1000 об/мин);  $M_{к.п}$  – критический вращающий момент электродвигателя привода подачи (545 Н·м);  $s_k$  – критическое скольжение электродвигателя привода подачи (0,053).

Электромагнитная постоянная привода подачи:

$$T_{\varepsilon} = \frac{1}{\omega_{0,эл} \cdot s_k} = 0,06, \text{ с}, \quad (2)$$

где  $\omega_{0,эл}$  – угловая частота напряжения питания статора (314,159 рад/с).

Электромеханическая постоянная привода подачи:

$$T_M = \frac{\omega_{0,эл} \cdot s_k \cdot (J_p + J_{к.к})}{2 \cdot p \cdot M_{к.п}} = 0,032, \text{ с}, \quad (3)$$

где  $J_p$  – механический момент инерции ротора электродвигателя (1,12 кг·м<sup>2</sup>);  $J_{к.к}$  – механический момент инерции комбайна, приведенный к валу электродвигателя (4,17 кг·м<sup>2</sup>);  $p$  – число пар полюсов электродвигателя (3).

Для определения коэффициентов усиления элементов динамической модели САУ рассмотрим работу комбайна при максимальной скорости подачи  $V_{п}$ , равной 10 м/мин, которой соответствует управляющий сигнал  $U_y$ , равный 100%. Преобразователь частоты ПЧ в динамической модели САУ (рис.1) представлен усилительным звеном с коэффициентом усиления:

$$K_{ПЧ} = \frac{n_p}{U_y} = \frac{1000}{100} = 10, \text{ об}/(\text{мин} \cdot \%), \quad (4)$$

Двигатель подсистемы подачи ДПП в динамической модели САУ (рис.1) представлен усилительным звеном с коэффициентом усиления:

$$K_{ДПП} = \frac{V_n}{n_p} = \frac{10}{1000} = 0,01, \text{ м}/\text{об}. \quad (5)$$

Датчик скорости подачи в динамической модели САУ (рис.1) представлен усилительным звеном с коэффициентом усиления:

$$K_D = \frac{U_y}{V_n} = \frac{100}{10} = 10, \text{ } (\% \cdot \text{мин})/\text{м}. \quad (6)$$

На рис. 2 показаны результаты моделирования – переходные процессы в нескорректированной САУ (коэффициент усиления регулятора Р на рис.1 равен единице) добычным комбайном УКД300 при отсутствии возмущающего воздействия (момент сопротивления  $M_{с.п}$  на валу электродвигателя привода подачи равен нулю).

Даже при отсутствии нагрузки на валу электродвигателя привода подачи, что является условным из-за веса комбайна и наличия сил трения при перемещении, наблюдаются негативные переходные процессы в САУ комбайном. А именно, в изменении скорости подачи присутствует перерегулирование более 30 % (рис. 2,а), а вращающий момент электродвигателя привода подачи превышает свое критическое значение 545 Н·м более чем в 10 раз (рис. 2, б). Поэтому с целью соблюдения требования по ограничению динамики вращающего момента электродвигателя привода подачи в динамическую модель САУ добычным комбайном УКД300 введены дополнительные блоки. Для ограничения максимального значения момента до 545 Н·м добавлен блок «Saturation\_M»

(рис. 3), а для ограничения скорости изменения во времени момента до 100 Н·м/с в регулятор введен блок «Limiter\_V» (рис.3).

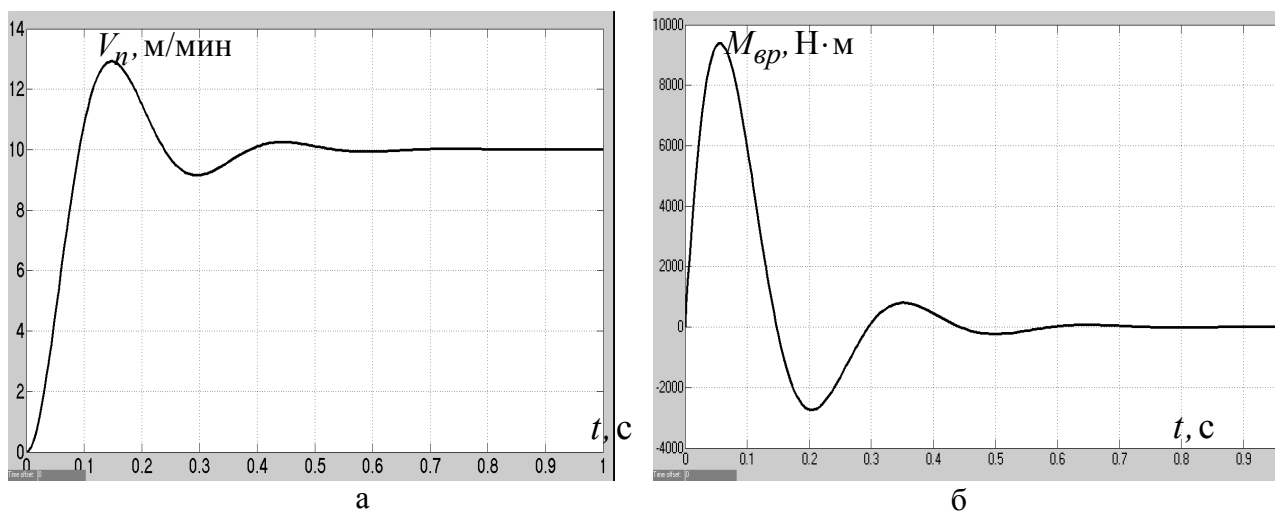


Рис. 2. Изменение во времени: а – скорости подачи добычного комбайна; б – вращающего момента электродвигателя привода подачи

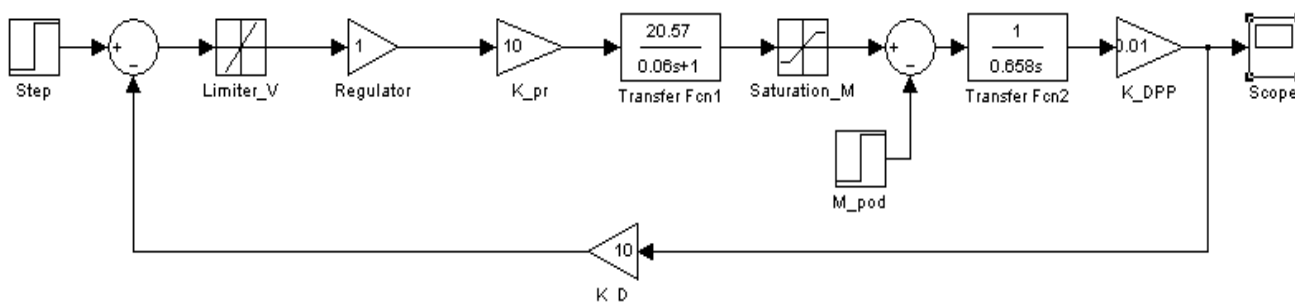


Рис. 3. Структурная схема динамической модели нескорректированной САУ добычным комбайном с ограничениями по вращающему моменту и скорости подачи

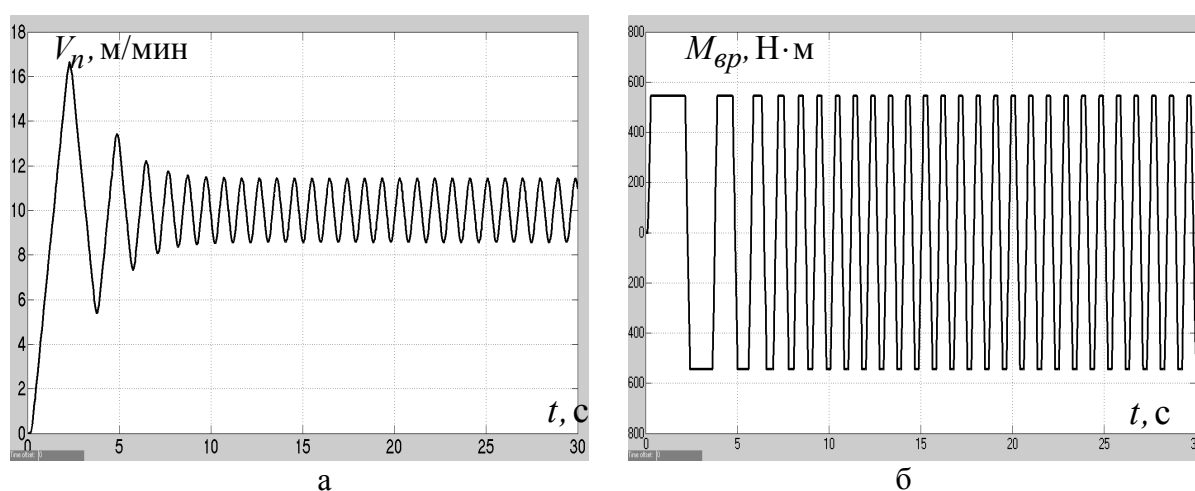


Рис. 4. Изменение во времени: а – скорости подачи добычного комбайна; б – вращающего момента электродвигателя привода подачи

Результаты моделирования представлены на рис. 4. Из рис. 4, б видно, что требования по ограничению максимального значения и скорости изменения во

времени вращающего момента электродвигателя привода подачи соблюдены, однако при этом наблюдаются автоколебания как в динамике скорости подачи, так и в динамике вращающего момента. Поэтому с целью улучшения переходных процессов в САУ комбайном в регуляторе реализован ПИД-закон управления с ограничением скорости изменения во времени управляющего сигнала. Для определения рациональных параметров ПИД-закона управления, при которых обеспечивается переходный процесс на выходе САУ с приемлемыми показателями качества, использовано приложение математического пакета «Matlab» «Nonlinear control design».

Согласно результатам поиска рациональных параметров регулятора в приложении «Nonlinear control design», коэффициент усиления пропорционального звена  $K_p$  равен 0,41 (рис.5), коэффициент усиления интегрирующего звена  $K_i$  равен 0,0089, коэффициент усиления дифференцирующего звена  $K_d$  равен 0,78, а постоянная времени дифференцирующего звена  $T_d$  составляет 0,021 с. Ниже приведена структурная схема динамической модели скорректированной САУ комбайном (рис.5) с найденными параметрами регулятора, которая реализована в приложении математического пакета «Matlab» «Simulink».

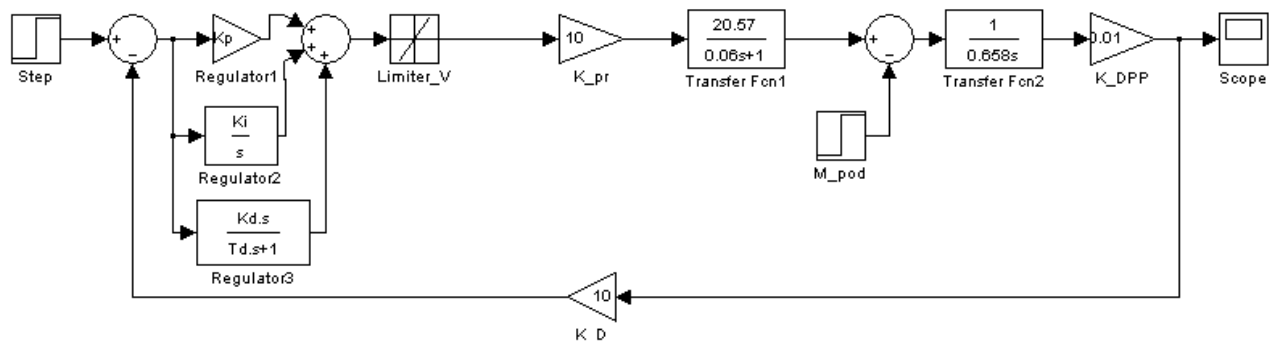


Рис. 5. Структурная схема динамической модели скорректированной САУ добычным комбайном УКД300 с ограничением по ускорению подачи

Результаты моделирования представлены на рис. 6. Из рис. 6, а видно, что при разгоне комбайна с 0 до 10 м/мин перерегулирование переходного процесса на выходе САУ не превышает 3 %. До максимальной скорости 10 м/мин комбайн разгоняется за 7,2 с, что соответствует паспортным данным современных комбайнов (от 5 до 10 с). При резком увеличении на 50-ой секунде моделирования момента сопротивления на валу электродвигателя привода подачи с 0 до 180 Н·м скорость подачи падает до 8 м/мин с последующим возвратом в диапазон  $\pm 5\%$  от установившегося значения скорости подачи за 5,3 с. С учетом того, что автоматическое управление комбайном ведется по возмущающему воздействию, которое изменяется во времени намного медленнее (период колебаний крепости угля вдоль забоя в десятки раз больше, чем длительность переходного процесса), этот результат отработки возмущающего воздействия является приемлемым.

Из рис. 6, б видно, что требования по ограничению максимального значения и скорости изменения во времени вращающего момента электродвигателя привода подачи соблюдены даже при отсутствии блока «Saturation\_M» в динамической модели САУ комбайном (рис. 5).

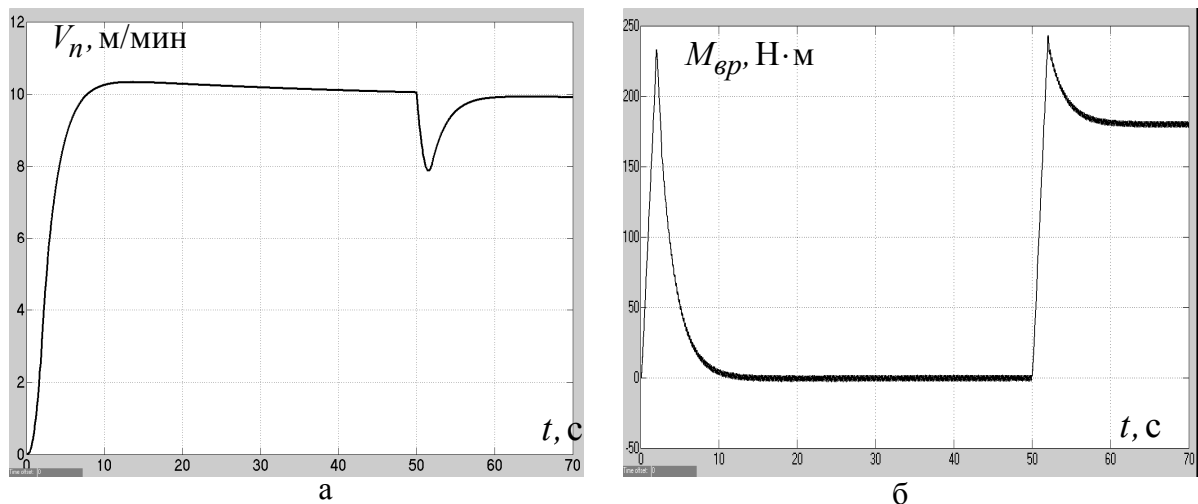


Рис. 6. Изменение во времени: а – скорости подачи добычного комбайна; б – вращающего момента электродвигателя привода подачи

С целью исследования эффективности синтезированного закона управления скоростью подачи при имитации реальных условий работы комбайна реализовано случайное изменение во времени момента сопротивления на валу электродвигателя привода подачи (рис. 7, б). Параметры функции плотности вероятности и автокорреляционной функции, которые описывают случайное изменение во времени момента сопротивления, получены в процессе статистической обработки результатов экспериментальных замеров при испытании комбайна УКД300 в реальных условиях на шахте “Павлоградская”.

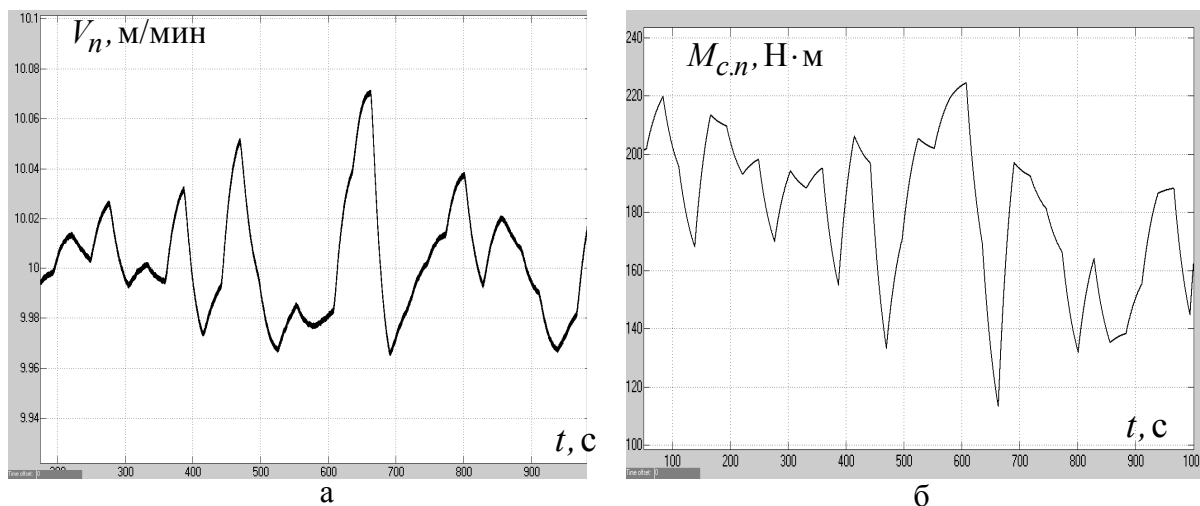


Рис. 7. Изменение во времени: а – скорости подачи добычного комбайна; б – момента сопротивления на валу электродвигателя привода подачи

На выходе динамической модели САУ комбайном в ходе имитации момента сопротивления на валу электродвигателя привода подачи получены случайные изменения во времени скорости подачи (рис.7,а). В процессе статистической обработки результатов моделирования определены математическое ожидание (10,0019 м/мин) и дисперсия (0,01437 м<sup>2</sup>/мин<sup>2</sup>) скорости подачи комбайна. Полученные значения статистических оценок существенно меньше рекомендуемых, которые обычно принимаются для САУ горными машинами, что

свидетельствует о приемлемой точности стабилизации скорости подачи комбайна при имитации реальных условий его работы.

#### Список литературы

1. Кондрахин В.П. Моделирование рабочих режимов вынесенной системы перемещения очистного комбайна, оснащенной частотно-регулируемым приводом / В.П. Кондрахин, А.А. Мельник, В.В. Косарев, Н.И. Стадник, А.В. Мезников // Наукові праці ДонНТУ. — 2009. — Випуск 16(142). — С. 141—148.
2. Дубинин С.В. Исследование переходных процессов в двухприводной автоматизированной вынесенной системе подачи очистного комбайна при аварийном заклинивании тяговой цепи / С.В. Дубинин // Наукові праці ДонНТУ. - 2012. - Випуск 23(196). - С. 86-91.
3. Ключев В.И. Теория электропривода / Ключев В.И. - М.: Энергоатомиздат, 1998. - 704 с.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Мещеряковим Л.І.  
Надійшла до редакції 08.05.2013*

УДК 622.6-52

© В.О. Кондратець, А.М. Мацуй

### **ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АДЕКВАТНОСТІ ТИСКУ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ОТОТОВЖЕННЯ РОЗРІДЖЕННЯ ПУЛЬПИ ПРИ ПОДРІБНЕННІ ПІСКІВ ДВОСПІРАЛЬНОГО КЛАСИФІКАТОРА**

Представлені результати досліджень забезпечення адекватності тиску перетворювачів ототожнення розрідження пульпи при подрібненні пісків двоспірального класифікатора.

Представлены результаты исследований по обеспечению адекватности давления преобразователей отождествления разрежения пульпы при измельчении песков двуспирального классификатора.

Presented results of researches of providing of adequacy of pressure of transformers of equation of rarefaction of poulpi at growing shallow of sands of dvospiralnogo classifier.

**Вступ.** В Україні значна частка залізних руд підлягає збагаченню. Для подрібнення міцних залізних руд в Україні отримали розповсюдження технологічні схеми, де вихідна руда здрібнюється стержневим млином у відкритому циклі, а кульовий млин працює у замкнутому циклі з двоспіральним класифікатором, з першої спіралі якого надходить мокре вихідне живлення. Продукт другої спіралі створює циркулююче навантаження. За таких умов кульовий млин, який несе основне навантаження, працює без підтримання необхідного для конкретного типу сировини розрідження пульпи, що не забезпечує найбільш ефективне використання молільних тіл і оптимальну швидкість транспортування рідкого матеріалу вздовж технологічного агрегату. Це приводить до значних збитків в наслідок перевитрати куль, футерівки, електричної енергії та зменшення продуктивності по готовому продукту, які можливо звести до міні-