

## ЛАБОРАТОРНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ТРОГАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ МЕХАНИЗМОВ

*Гладырь А.И., к.т.н., доц., Пупынин С.П., ассист., Лесной Н.И., студ.*

*Кременчугский государственный политехнический университет*

*имени Михаила Остроградского*

*39600, г. Кременчуг, Полтавская обл., ул. Первомайская, 20, КГПУ*

*E-mail: gai@polytech.poltava.ua*

В роботі представлено лабораторний комплекс для дослідження процесу рушання промислових механізмів, що характеризуються підвищенням пусковим моментом опору, з урахуванням вібраційних навантажень.

**Ключові слова:** лабораторний комплекс, промисловий механізм, важке рушання.

The article considers the laboratory complex for research of production machine breakaway with increased starting resistance moment subject to vibration load.

**Key words:** laboratory complex, industrial machine, heavy breakaway.

**Введение.** Предстартовая подготовка технологического механизма, заключающаяся в целенаправленном разрушении структуры рабочего тела путем отработки электроприводом специальных алгоритмов движения рабочего органа, позволяет уменьшить момент сопротивления механизма при трогании  $M_{mp}$  и, тем самым, значительно облегчить условия пуска электроприводов [1].

Момент трогания определяется множеством факторов, например, углом поворота вала  $j$ , временем простоя механизма  $t$ , параметрами рабочего тела  $v$ , температурой окружающей среды  $t^{\circ}C$  и т.д.;  $M_{mp} = F(j, t, v, t^{\circ}C, \dots)$ . Поэтому разработка и применение рациональных алгоритмов управления трогания с целью построения эффективных систем управления электроприводами для широкого класса технологических механизмов является достаточно сложной научно-практической задачей.

Решение этой задачи авторы видят в создании универсальных стохастических моделей процесса трогания, учитывающих все значимые факторы, в том числе, конструктивные особенности механизма и свойства технологического сырья. Такие модели могут быть получены путем создания и экспериментального исследования физических моделей технологических объектов с последующим анализом непосредственных данных наблюдения и установлением закономерных связей между параметрами объекта.

На сегодняшний день создано большое количество лабораторных комплексов, которые способны моделировать различные по сложности технологические процессы и механизмы. Проведение такого рода исследований стало возможным благодаря развитию полупроводниковой и микропроцессорной техники, развитию компьютеризированных измерительных комплексов.

Но анализ характеристик электромеханических систем как многокомпонентных сложных объектов с учетом специфики технологического процесса, конструкции механизма, вида механической трансмиссии и т. д. требует дальнейшего совершенствования лабораторной базы в области создания точных физических моделей технологических объектов, приводимых в движение электроприводом.

Для исследований режимов работы технологических механизмов с позиции трогания разработан универсальный лабораторный комплекс, состоящий из набора физических моделей наиболее характерных технологических механизмов и преобразователей контролируемых физических величин. Применено специализированное оборудование для преобразования и масштабирования физических величин, характеризующих вибрационную нагрузку. Решена задача поверки и калибровки измерительных преобразователей виброперемещения, виброскорости и виброускорения.

**Анализ предыдущих исследований.** Экспериментальные исследования процесса трогания пульпоноса выполнялись в работах [2-5]. Основным результатом этих исследований является регрессионная модель начального значения момента трогания  $M_{mp}$  от параметров  $T, N, g$  в виде:

$$m = M_{mp} / M_{mp}^{\max} = A(T, g) e^{a(T, g)N},$$

где  $A, a$  – коэффициенты регрессии.

Предложенная в указанных работах методика аппроксимации механической характеристики пульпоноса выражением

$$M(w) = M_0 + k \left( \frac{w}{w_{ном}} \right)^p + M_{mp} e^{-b_1 |j_{\Sigma}|},$$

где  $|j_{\Sigma}| = \int_0^t w(t) dt$  – модуль угла поворота вала,

среды,  $M_{тр}$  – значение момента трогания при  $|j_{\Sigma}| = 0$ , требует сопоставления с экспериментальными данными и не может быть перенесена на другие классы механизмов. Дальнейшие исследования процесса трогания ограничивались возможностями лабораторного оборудования. В частности, программа эксперимента не предусматривала регистрацию момента трогания в функции времени и угла поворота вала двигателя.

**Цель работы.** Разработка конструкции комплекса для исследования процесса трогания производственных механизмов с учетом вибрационных нагрузок, оценка работоспособности измерительного комплекса ВИБ-5МА для регистрации вибрационных параметров – виброперемещения, виброскорости и виброускорения.

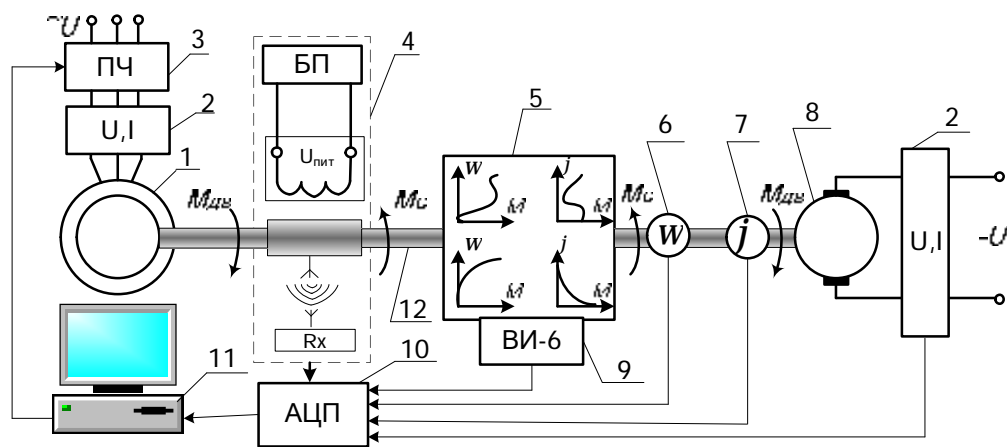


Рисунок 1 – Функциональная схема лабораторного комплекса

При проведении исследований ротор датчика устанавливается непосредственно в валопровод исследуемой электромеханической системы, а статор фиксируется неподвижно. Конструкция датчика позволяет измерять как статический, так и динамический момент положительной и отрицательной полярности.

Встроенная компенсационная муфта исключает нагружение вала радиальными и сгибающими моментами из-за несоосности валов, перекосов и температурных деформаций.

Предусмотрена возможность балансировки тензометрических мостов и регулировки коэффициента усиления телеметрических тензоусилителей.

Блок аналого-цифрового преобразования содержит программное обеспечение для фильтрации и спектрального анализа измеряемых сигналов, расчета механической мощности, установки «нуля». Исследование механических характеристик механизма с учетом момента трогания проводится в следующей последовательности:

– выбирается тип исследуемого технологического механизма;

– оценивается «переносимость» предложенных алгоритмов на другие технологические объекты, «устойчивость» к варьированию параметров;

Основными составляющими комплекса (рис. 1) являются асинхронный двигатель – 1, блок датчиков тока и напряжения – 2, преобразователь частоты – 3, тензометрический датчик момента – 4, технологическая трансмиссия и физическая модель технологического механизма – 5, датчики частоты вращения – 6 и угла поворота – 7, вспомогательная машина постоянного тока – 8, виброизмерительный комплект – 9, аналого-цифровой преобразователь – 10, персональный компьютер – 11, соединительный вал – 12.

Датчик момента содержит бесконтактную систему питания и передачи сигналов и позволяет осуществлять измерения крутящего момента как при вращении вала, так и в неподвижном состоянии с одновременной регистрацией мгновенных значений измеряемого сигнала.

– моделируется характер технологической нагрузки с помощью соответствующей физической модели объекта (пульпоноса, барабана мельницы и т.д.) путем задания момента инерции, законов изменения статического момента сопротивления и параметров рабочей среды от технологических и конструктивных параметров;

– выполняется прямой пуск электромеханической системы с регистрацией мгновенных значений технологических и электрических величин: токов, напряжений статора, момента сопротивления, угла поворота, частоты вращения вала, виброперемещения, виброскорости, виброускорения в функции времени. Полученные данные обрабатываются и сохраняются для последующего анализа;

– выполняются пуски электромеханической системы с различными способами предстартовой подготовки в соответствии с предложенными ранее алгоритмами функционирования;

– проводится сравнительный анализ пусковых режимов с позиции минимальных энергозатрат и вибронгрузок электропривода, определяются наиболее рациональные алгоритмы предстартовой подготовки электропривода;

– в случае необходимости, сопоставляется эффективность предстартовой подготовки, выполненной с использованием различных систем электропривода, например, системы «тиристорный регулятор напряжения – асинхронный двигатель» в режиме квазичастотного управления, системы «тиристорный преобразователь – двигатель постоянного тока», системы на базе непосредственного преобразователя частоты или преобразователя частоты со звеном постоянного тока.

При создании универсального лабораторного комплекса были учтены следующие требования:

- возможность формирования изменяющегося момента инерции ( $J_{var}$ ), который обусловлен как конструктивными особенностями комплекса, так и поведением технологического сырья (сушка, грануляция, измельчение, перемешивание, транспортировка);
- возможность формирования реактивного момента сопротивления по заданному закону;
- стенд должен включать несколько электромеханических агрегатов, связанных между собой механической трансмиссией, что позволит исследовать поведение распределенных многомассовых электромеханических систем.

Кинематическая схема стенда, удовлетворяющая перечисленным требованиям, изображена на рис. 2. Комплекс, реализованный на основании кинематической схемы (рис. 3), размещается на едином каркасе с демпфирующим элементом, который моделирует распространение вибраций на фундамент механизма. Комплекс делится на две секции: верхнюю и нижнюю, которые содержат свой набор конструктивных элементов. На верхней секции на едином валу располагаются:

- съемные диски, которые увеличивают либо уменьшают инерционную массу вала (1);
- приводной асинхронный двигатель (2);
- тормозные колодки, создающие изменяющийся статический момент на валу механизма (3);
- многоскоростной шкив (4);
- насос, представляющий собой уменьшенную физическую модель пульпоноса (5).

На нижней секции находятся:

- барабан, позволяющий имитировать переменный момент инерции рудничной мельницы или дробилки, обусловленный поведением технологического сырья (8);
- вспомогательный двигатель постоянного тока для косвенного определения временной зависимости момента сопротивления механизма по зарегистрированным значениям тока якоря электрической машины.

Валы агрегатов соединены между собой ременной передачей. Такая компоновка комплекса позволяет исследовать поведение многомассовых распределенных систем, связанных между собой трансмиссией.

В соответствии с планом эксперимента исследовались три произвольных канала: подключались датчики ДП-3 к комплекту ВИ6-5МА, питание датчиков осуществлялось от встроенного генератора частотой 5680 Гц; устанавливался выход ВИ6-5МА на значение

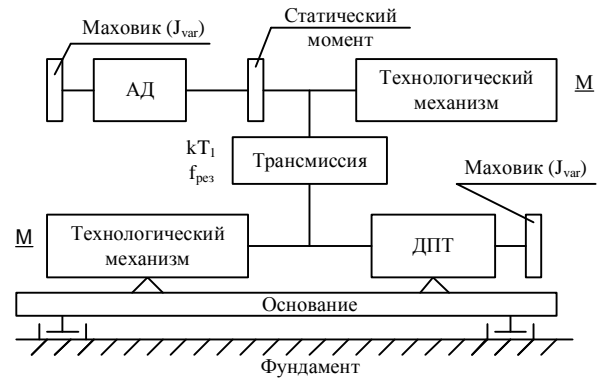


Рисунок 2 – Кинематическая модель лабораторного комплекса

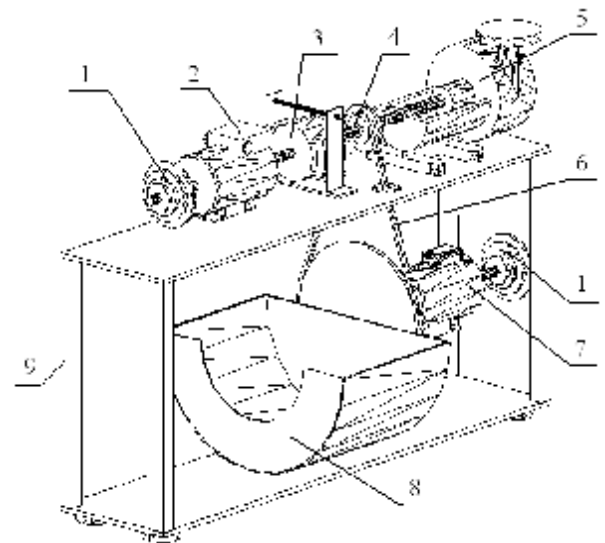


Рисунок 3 – Внешний вид комплекса:

- 1 – съемные диски; 2 – асинхронный двигатель;
- 3 – тормозные колодки; 4 – многоскоростной шкив;
- 5 – насос; 6 – ременная передача;
- 7 – двигатель постоянного тока; 8 – барабан (в разрезе); 9 – каркас

Для измерения вибропараметров используется комплект ВИ6-5МА, внешний вид которого представлен на рис. 4, с набором датчиков ДП-3 (Д1-Д6), которые подключаются к детекторам (Дет1-Дет6), предназначенным для выделения полезного сигнала.

Датчики и детекторы питаются от встроенного генератора напряжения (Ген.Н.). Выходы детекторов подключаются к фильтрам (Ф1-Ф6), сигналы от которых подаются на многоканальный АЦП, а далее – на ЭВМ (рис. 5).

В ходе эксперимента необходимо получить функцию преобразования физической величины виброперемещения ( $s$ ) в электрическую ( $U_{вх}$ ) датчика ДП-3.

«ноль» при отсутствии входного сигнала на чувствительном элементе (штоке); датчик закреплялся в станину; шток перемещался на заданные расстояния, фиксировалось соответствующее выходное напряжение датчика. Полученные результаты представлены на рис. 6.

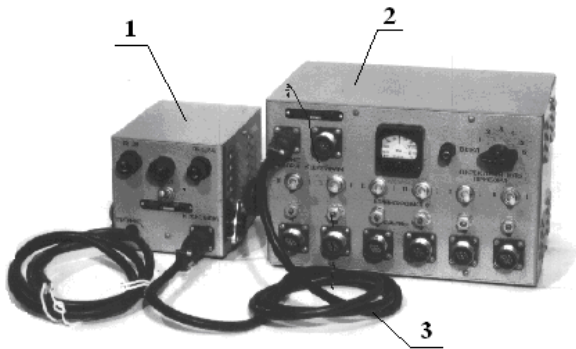


Рисунок 4 – Измерительная аппаратура ВИБ-5МА: 1 – блок питания; 2 – основной блок; 3 – кабель питания для основного блока

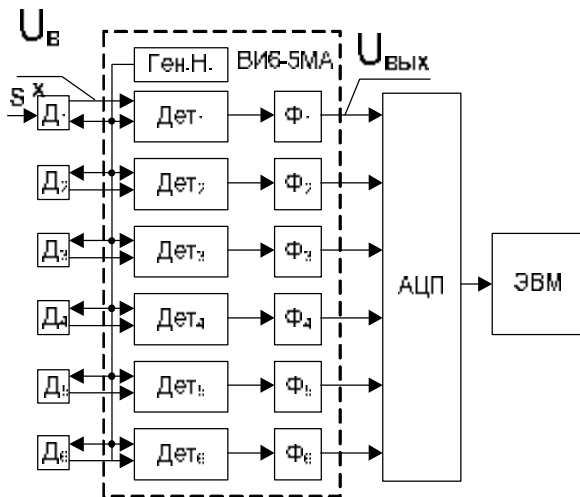


Рисунок 5 – Структурная схема виброизмерительного комплекта: Д – датчик; Дет – детектор; Ф – фильтр

Определяем функцию преобразования электрического сигнала с датчика ДП-3 ( $U_{вх}$ ) в выходной электрический сигнал комплекта ВИБ-5МА ( $U_{вых}$ ). План эксперимента аналогичен предыдущему опыту, с той лишь разницей, что в данном случае при перемещениях штока регистрируется выходной сигнал ( $U_{вых}$ ), отфильтрованный преобразователем ВИБ-5МА.

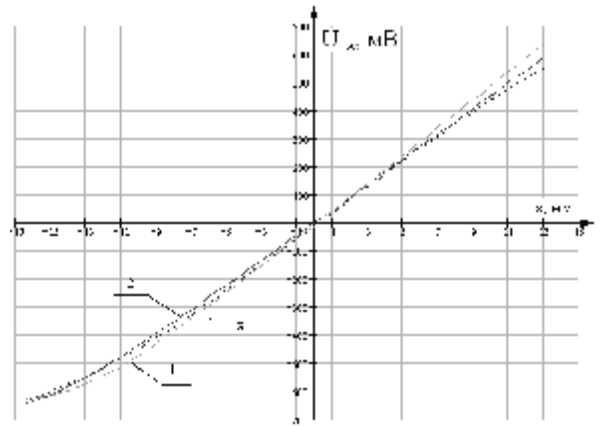


Рисунок 6 – Зависимость выходных сигналов с датчика ДП-3 от перемещения штока: 1 – первый канал; 2 – второй канал; 3 – третий канал

Полученные результаты представлены на рис. 7. Из рисунка видно, что зависимость имеет ярко выраженную нелинейность для всех каналов.

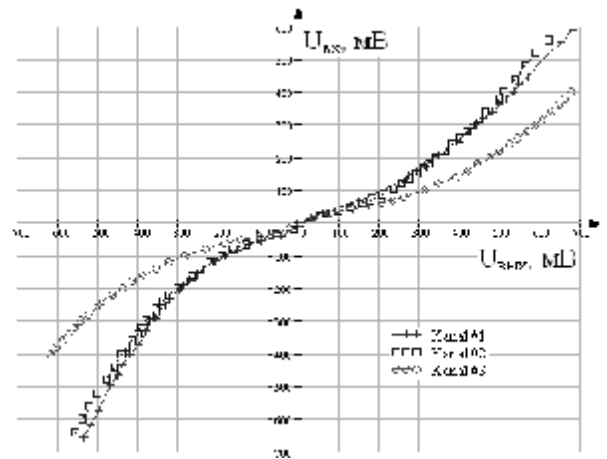


Рисунок 7 – Зависимость выходного электрического сигнала  $U_{вых}$  от электрического сигнала с датчика ДП-3

Результаты испытаний аппроксимируются по методу наименьших квадратов полиномом третьей степени типа:  $y = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 + a_3 \cdot x^3$ . В результате аппроксимации получены следующие коэффициенты полиномов и их среднеквадратические отклонения (табл. 1-2).

Таблица 1 – Коэффициенты аппроксимационных полиномов и их среднеквадратические ошибки для модели датчика ДП-3

	a0	a1	a2	a3	$\epsilon_{ср.кв}$
y1	-1,33	50,595	0,256	-0,028	59,411
y2	-1,967	45,661	0,14	-0,013	36,453
y3	-11,967	46,944	0,081	-0,029	15,876

**Таблица 2 – Коэффициенты аппроксимационных полиномов и их среднеквадратические ошибки для модели комплекта ВИБ-5МА**

	a0	a1	a2	a3	$\epsilon_{\text{ср.кв}}$
y1	15,897	0,512	$-4,783 \cdot 10^{-4}$	$1,575 \cdot 10^{-6}$	74,55
y2	3,756	0,443	$-2,78 \cdot 10^{-4}$	$1,786 \cdot 10^{-6}$	75,793
y3	0,451	0,273	$-7,91 \cdot 10^{-5}$	$8,212 \cdot 10^{-7}$	34,289

Оценим зависимость среднеквадратической ошибки  $\epsilon_{\text{ср.кв}}$  от приращения коэффициента полинома. Для каждого коэффициента полинома ( $a_0, a_1, a_2, a_3$ ) поочередно задаем ошибку в диапазоне  $-20\% \dots +20\%$  с постоянным шагом 5% (для получения  $\epsilon_{\text{ср.кв}}$  в каждом случае изменяется только один коэффициент полинома, остальные остаются без изменений). Результаты приведены на рис. 8.

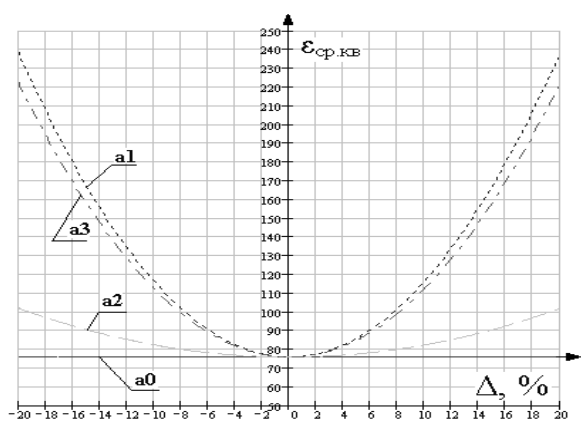


Рисунок 8 – Зависимость среднеквадратической ошибки от приращения коэффициента полинома

Полученные коэффициенты полиномов являются оптимальными и любое их изменение приводит к увеличению среднеквадратичной ошибки аппроксимации. Стоит отметить симметричность величин  $\epsilon_{\text{ср.кв}}$  при отклонении от оптимальных значений коэффициентов полинома как в большую, так и в меньшую сторону, что говорит об экстремуме функции  $\epsilon_{\text{ср.кв}}(a_0, a_1, a_2, a_3)$  в точке с рассчитанными ранее коэффициентами.

Полученные полиномы могут быть учтены при разработке программного обеспечения для дальнейшей обработки данных, которые позволят измерить физическую величину с учетом параметров каждого канала.

**Выводы.** Разработанный лабораторный комплекс позволяет исследовать характеристики технологических механизмов на этапе трогания, разгона и квазиустановившегося процесса переработки сырья. При наличии соответствующих датчиков и измерительных средств комплекс позволяет выявлять закономерности вибрационных параметров и характеристик электромеханической системы в зависимости от закона изменения и характера нагрузки на валу двигателя.

Рассчитанные в данной работе аппроксимационные оценки описывают функциональное преобразование физической величины комплекта ВИБ-5МА, в частности, для измерения вибропараметров двигателя в процессах трогания и разгона, используя значение перемещения. Помимо этого, при подключении данного комплекта к ЭВМ, полученные коэффициенты аппроксимации помогут точнее определить исходную физическую величину. Идентифицирован источник погрешности самого преобразователя, что позволит в дальнейшем улучшить его характеристики.

Таким образом, представленный лабораторный комплекс позволит проводить широкий спектр научных исследований, которые помогут совершенствовать системы плавного запуска технологических механизмов со сложными пусковыми характеристиками момента сопротивления.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гладырь А.И. Экспериментальные пусковые характеристики насосного агрегата с учетом момента трогания // Вісник Кременчуцького політехнічного університету. – Кременчук: КДПУ, 2003. – Вип. 2 (19). – С. 247–250.
2. Черный А.П., Гладырь А.И., Осадчук Ю.Г., Курбанов И.Р., Вошун А.Н. Пусковые системы нерегулируемых электроприводов: Монография – Кременчук: ЧП Щербатых А.В., 2006. – 280 с.
3. Родькин Д.И., Черный А.П., Коренькова Т.В., Гладырь А.И., Живора В.Ф. Пусковые системы нерегулируемых приводов в задачах энергоресурсосбережения // Вестник Национального технического университета "Харьковский политехнический институт". – Харьков: НТУ "ХПИ", 2003. – Вып. 10. – С. 235–243.
4. Гладырь А.И., Гомилко В.И. Экспериментальные пусковые характеристики асинхронного двигателя при питании от тиристорного регулятора напряжения в режиме преобразователя частоты // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук: КДПУ, 2002. – Вип. 1 (12). – С. 38–42.
5. Гладир А.І., Гомілко В.І. Система формування пускових характеристик електроприводів змінного струму з важкими умовами запуску // Електроінформ. – 2005. – №1. – С.17–19.

Стаття надійшла 12.04.2009 р.  
Рекомендовано до друку д.т.н., проф.  
Родькіним Д.Й.