

**КОМПЕНСАЦИЯ НЕЛИНЕЙНОЙ ПЕТЛЕВОЙ ИНЕРЦИОННОСТИ  
ДЛЯ СИСТЕМ АВАРИЙНОГО ТОРМОЖЕНИЯ ШАХТНЫХ  
ПОДЪЕМНЫХ УСТАНОВОК**

***Васильев В.И.***

*Конотопский институт*

*Сумского Государственного университета г. Конотоп, Украина*

**Введение**

Повышение производительности и безопасности эксплуатации сложных электромеханических комплексов требует постоянного совершенствования способов управления и аппаратуры. Эффективным инструментом для этого является компьютерное моделирование. Математические описания динамических режимов современного шахтного подъема с учетом множества инерционных элементов разной физической природы представляют собой уравнения высокого порядка. В частности, динамика упругой части уравновешенного шахтного подъема, с учетом взаимодействия всех движущихся инерционных элементов может быть описана дифференциальными уравнениями не ниже 8-го порядка. Для улучшения динамических свойств необходимо компенсировать инерционные параметры системы путем рационального управления. Одним из сложных динамических режимов шахтной подъемной установки (ШПУ) является предохранительное (аварийное) торможение, функцию которого осуществляет механический тормоз. В современном шахтном подъеме используются радиальные (колодочные) и дискретные (многоступенчатые дисковые) системы торможения. Механическая система тормоза совместно с электромеханическим преобразователем обладает естественными нелинейными свойствами, обусловленными: холостым ходом (нечувствительностью), люфтами в соединениях, сухим трением и пр. Нелинейности усложняют управление и аппаратуру для автоматизации управления процессом аварийного торможения.

**Исследования характеристик электромеханического привода**

НПО "Красный металлист", г. Конотоп, совместно с ПО Донецкгормаш проводились работы по разработке и внедрению в серийное производство аппаратуры автоматически регулируемого предохранительного торможения ШПУ одностороннего действия по заданному замедлению с электромеханическими преобразователями клапанного типа. Аппаратура успешно прошла промышленные испытания и по их результатам были сделаны выводы, что заложенный в ней принцип одностороннего регулирования тормозного усилия делает ее нелинейной и склонной к перерегулированию

замедления. Это ограничивает возможности дальнейшего ее совершенствования, потому было рекомендовано провести исследования возможностей перехода к двухстороннему регулированию тормозного усилия путем перехода от клапанных исполнительных механизмов к преобразователям. Были проведены работы по исследованию исполнительных механизмов на основе электромеханического преобразователя “ток – давление” РДУЗ-3. Он представляет многокаскадный преобразователь. В состав его входит линейный электромагнитный привод, сопло-заслонка, мембранный усилитель и золотниковый механизм. Он разработан в двух модификациях, с падающей и восходящей характеристикой. Переходные и фазовые характеристики РДУЗ-3, снятые экспериментально приведены на рис. 1 и 2.

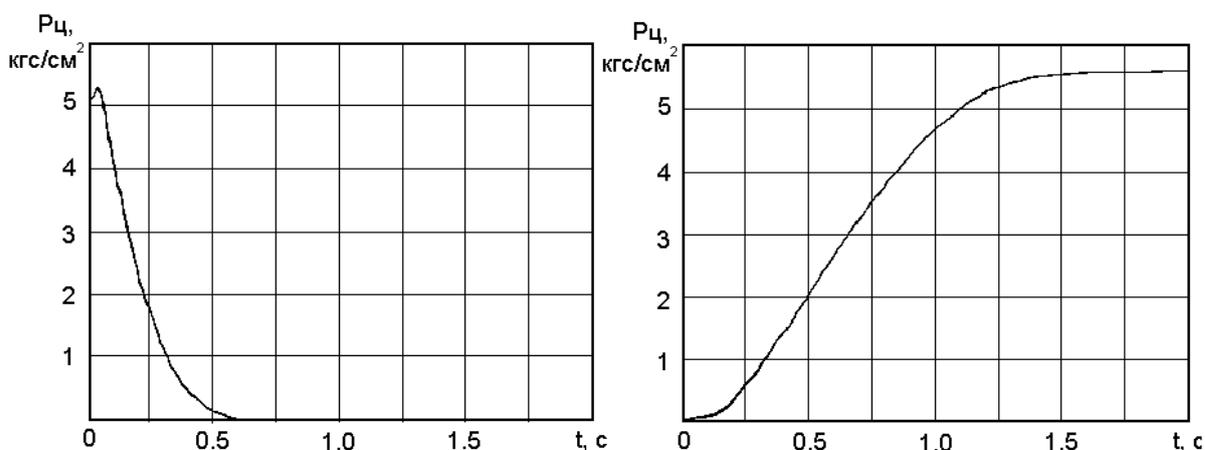


Рис. 1. Переходные характеристики регулятора давления РДУЗ-3

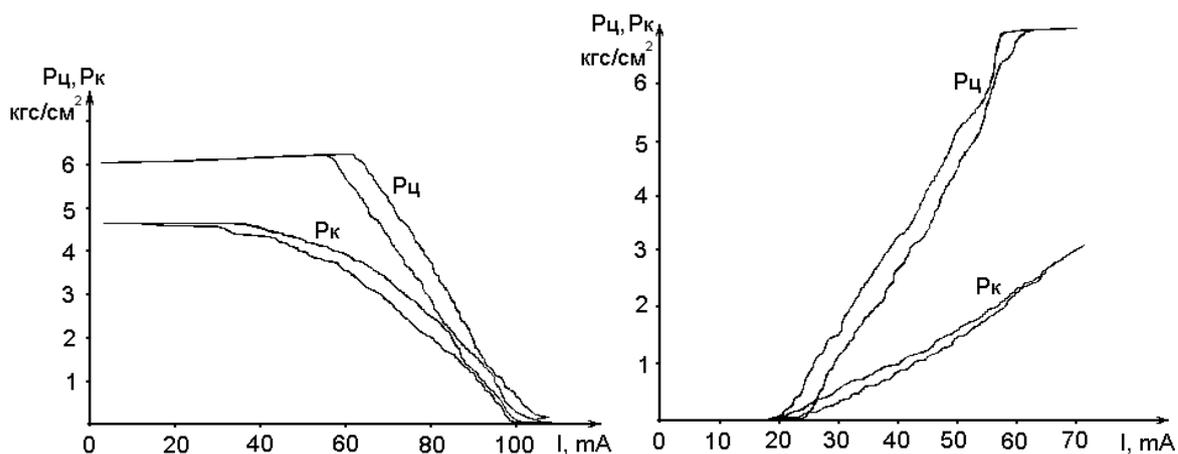


Рис. 2. Фазовые характеристики регулятора давления РДУЗ-3 с падающей и восходящей характеристикой. Pк и Pц, соответственно, давления в камере преобразователя и в тормозном цилиндре

Особенностью фазовых характеристик является естественная петлевая нелинейность (гистерезис), что объясняется наличием люфтов, сухого трения в механических узлах и, в частности, в преобразователе.

### Моделирование линеаризации петлевой инерционности

При использовании такого устройства в замкнутой системе автоматики его петлевая нелинейность в сочетании с инерционными свойствами механической системы создает условия для возникновения автоколебаний, ухудшает надежность, безопасность и быстродействие системы. При ручном управлении торможением оператором неоднозначность фазовой характеристики также создает неудобства.

Для адаптации преобразователей к требуемым условиям был разработан способ и устройство [1] компенсации петлевой нелинейной инерционности. Компенсация осуществляется путем формирования на привод дискретных воздействий с постоянной амплитудой и периодом, и использованием принципа широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Период следования воздействий привязан к постоянной времени механической системы. Структурная схема модели устройства приведена на рис. 3.

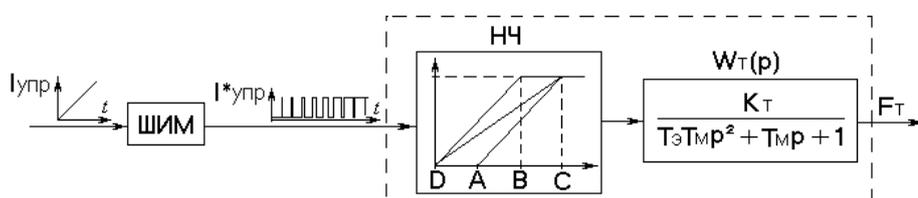


Рис. 3. Структурная схема модели линеаризованного механического объекта с петлевой инерционностью

На структурной схеме механический тормоз условно представлен нелинейной частью (НЧ), и линейной частью, аппроксимированной динамическим звеном второго порядка  $W_t(p)$ , где:  $K_t$  – коэффициент передачи, учитывающий конструкционные особенности устройства;  $T_э$  и  $T_m$  – соответственно электрическая и механическая постоянные времени. В данной упрощенной модели не учтены особенности реального преобразователя, имеющего в зависимости от направления движения различные постоянные времени и которые могут быть учтены при разработке и настройке аппаратуры управления на конкретной системе.

На основе приведенной структурной схемы с параметрами, соответствующими экспериментальным характеристикам разработано математическое описание, которое реализовано в компьютерной модели линеаризации свойств электромеханической системы тормоза. Для удобства модели и сравнения ее с результатами эксперимента она реализована в виде графиков динамических и фазовых характеристик.

На рис. 4 представлены результаты компьютерного моделирования переходных и фазовых характеристик тормозной системы с постоянной времени  $T_m \approx 1$  с для несущих частот управления ШИМ с периодами 0.1 с и 0.01 с.

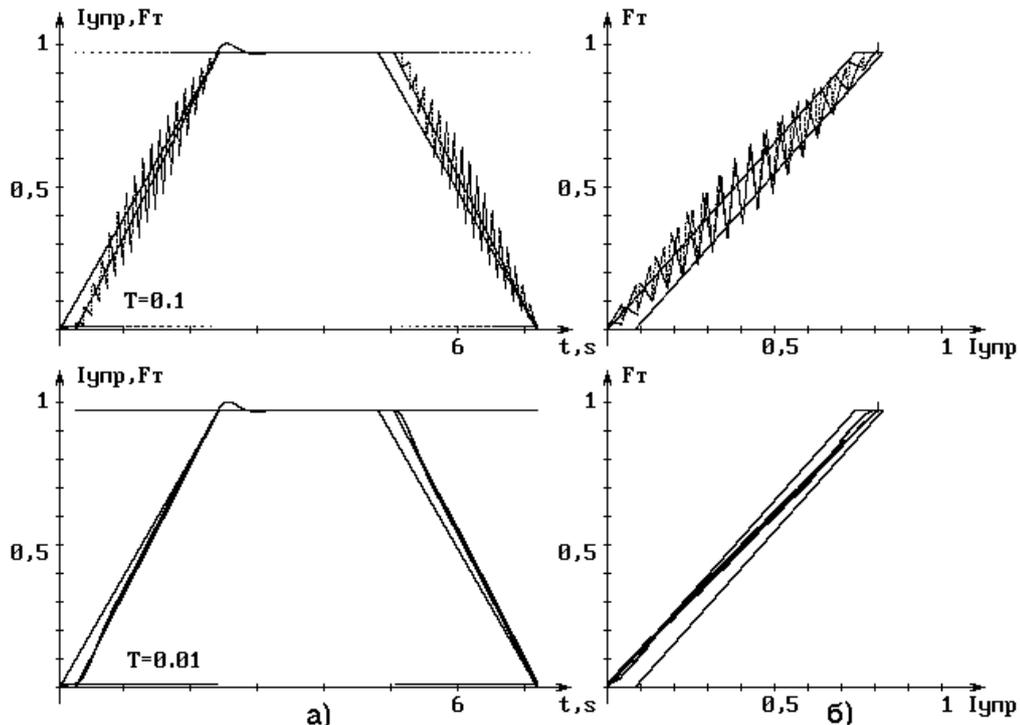


Рис. 4. Моделирование линеаризованной системы ШИМ при  $T=0.1$  и  $T=0.01$   
 а) переходные характеристики  $F_t(t)=f(1)$ . б) фазовые характеристики  $F_t=f(I_{упр})$

### Моделирование систем управления аварийным торможением

Для исследования автоматически регулируемого предохранительного торможения подъемной установки с линеаризованным тормозным устройством составляется математическую модель системы. За ее основу принята модель, описанная в [2]. Структурная схема модели замкнутой системы АРПТ с приводом предохранительного тормоза на основе описанного линеаризованного устройства приведена на рис. 5.

Эта модель позволяет учитывать влияние основных возмущений на подъемную машину в процессе аварийного торможения: время естественного холостого хода тормозного устройства в начале процесса, влияние упругой части подъема в процессе замедления, возможность снижения динамических перегрузок в момент остановки. На структурной схеме подъемная машина (ПМ) представлена интегрирующим звеном, на вход которого воздействует результирующее усилие: тормозного  $F_t$ , статической нагрузки  $\pm F_{ст}$ , результирующего усилия воздействия упругой части системы  $F_{\Sigma}$ . Выходным параметром системы является сигнал скорости движения подъемной установки  $U_v$ . В структурную схему также включены модели подсистем: упругой части подъемной установки (канаты); предохранительного тормоза (нелинейная и линейная части) и автоматического управления (аппаратура САРПТ).

Таким образом, если коэффициент  $K_1$  выбрать равным единице, то коэффициенты, определяющие воздействия усилий  $\pm F_{ст}$ ,  $F_t$ ,  $F_{\Sigma}$  на

подъемную установку будут равны отношениям соответствующих усилий к суммарной массе движущихся частей установки, приведенной к оси вращения шкива трения (барабана). Такие параметры соответствуют реальному объекту моделирования.

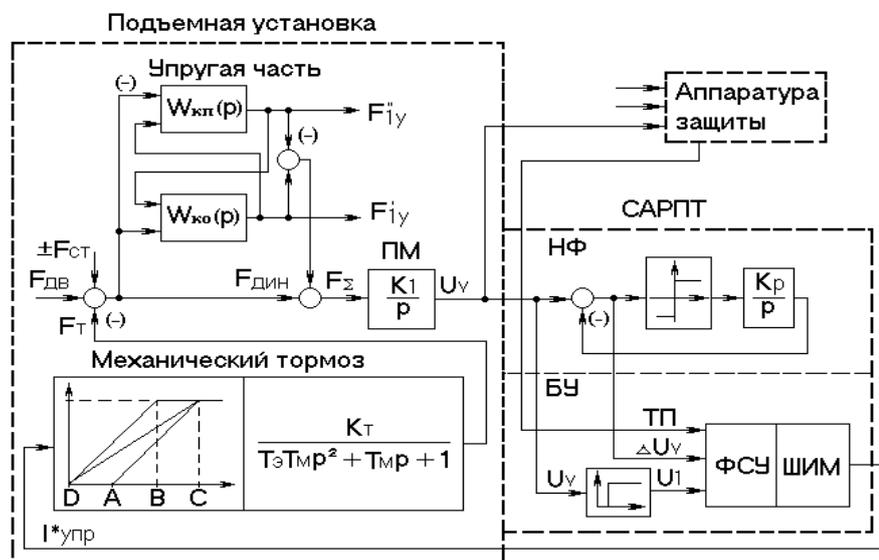


Рис. 5. Структурная схема модели замкнутой системы АРПТ с клапанным приводом предохранительного тормоза

Процесс запускается сигналом предохранительного торможения ТП, формируемым аппаратом защиты при возникновении какой-либо аварийной ситуации: отключение электроэнергии, нарушения в работе электрооборудования, несоответствие параметров движения защитной диаграмме скорости и пр.

Аппарат управления САРПТ предназначен для контроля и поддержания процесса предохранительного торможения ШПУ с заданным замедлением. Логика работы аппарата состоит в контроле процесса и регулировании замедления.

Контроль осуществляется в функции заданной скорости, которая формируется нелинейным фильтром (НФ) [3]. Применение такого формирователя снижает порядок производной контролируемой переменной, повышая помехоустойчивость системы от высокочастотных вибраций. Кроме того, позволяет формировать заданную скорость с учетом естественного влияния холостого хода тормоза в начальный момент работы системы и учитывать влияние низких частот упругой части системы (канатов) на процесс работы системы, чтобы при необходимости скорректировать параметры замедления сигналами САРПТ.

Формирователем сигналов управления (ФСУ) формируются воздействия, пропорциональные рассогласованию между заданной и действительной скоростью. Далее сигналы модулируются ШИМ и поступают на управление электромеханическим преобразователем.

Для снижения динамических перегрузок на заключительном этапе торможения процесс контролируется датчиком минимальной скорости, по сигналу которого перед остановкой диаграмма заданной скорости переводится с линейной траектории на параболическую, соответствующую естественным динамическим свойствам системы ШПУ.

Аппаратура САРПТ может также использоваться в разомкнутой адаптивной системе регулирования, описанной в [3]. Такой режим удобно использовать для снижения динамических перегрузок от упругой части в системах уравновешенных ШПУ, к которым относят многоканатные со шкивами трения. В этом случае нет необходимости использования ШИМ, поскольку в этом режиме регулирование направлено на снижение динамических перегрузок путем компенсации влияния инерционности упругой части ШПУ за счет одномоментного формирования рационального закона регулирования, преобразования его в сигналы воздействия на систему.

Рациональный закон регулирования в функции времени, формируется в ФСУ и представляет собой функцию, созданную путем ступенчатого переключения, парабол и линейной функции. Параметры ее основаны на частотных свойствах упругой части системы, полученных путем аппроксимации влияния упругой части на скорость замедляющейся ШПУ при постоянном тормозном усилии.

$$F_{\text{анпр}}(t) = e^{-at} A_m \sin(\omega t + \psi) + y_{\text{уст}},$$

где  $F_{\text{анпр}}(t)$  – аппроксимированное результирующее усилие в упругой части ШПУ,  $A_m$  – амплитуда,  $\omega$  – частота,  $\psi$  – фазовый сдвиг,  $a$  – степень затухания колебаний,  $y_{\text{уст}}$  – установившееся значение.

Определяются частотные параметры упругой части системы: собственная частота, степень затухания колебаний и др.

Операторная форма дифференциального уравнения движения ШПУ, включающая аппроксимированную систему упругой части подъема, необходимая для проектирования корректирующего устройства аппаратной части и расчета коэффициентов его настройки представляет дробную функцию степенных многочленов:

$$F_{\Sigma}(t) = [F_{\delta}(t) \pm F_{\dot{\delta}}(t)] \frac{\frac{y_{\dot{\delta}} + A_m \sin \psi}{\omega^2 + a^2} p^2 + \frac{2ay_{\dot{\delta}} + A_m(a \cdot \sin \psi + \omega \cdot \cos \psi)}{\omega^2 + a^2} p + y_{\dot{\delta}}}{\frac{1}{\omega^2 + a^2} p^2 + \frac{2a}{\omega^2 + a^2} p + 1}$$

Основные гармонические свойства упругой части определены параметрами знаменателя, которые используются при настройке формирователя сигналов для компенсации дифференцирующей, интегрирующей и пропорциональной составляющих инерционности

системи.

### Выводы

В статье рассмотрена методика разработки аппаратуры для улучшения системы автоматически регулируемого предохранительного торможения ШПУ путем применения в системе преобразователя с нелинейной петлевой инерционностью. На основании результатов экспериментальных исследований, найдены закономерности, разработан способ и технические решения для линеаризации естественных петлевых инерционных свойств исполнительного механизма и проведено компьютерные моделирования. Разработанная модель подсистемы включена в модель апробированной и внедренной в серийное производство системы автоматически регулируемого предохранительного торможения ШПУ. Проанализированы возможности применения аппаратуры для замкнутых и разомкнутых систем автоматики. Двустороннее регулирование тормозного усилия электромеханическим приводом, сформированное в виде сигналов САРПТ на основе рационального закона, исключает динамические перегрузки в системе. Тем самым улучшаются эксплуатационные характеристики системы, ее безопасность и надежность.

### Литература

1. А.с. № 1715705 (СССР) Способ дискретного управления тормозом шахтной подъемной машины / Васильев В.И., Чермалых В.М., Матвиенко Н.П. Оpubл. 29.02.92. Бюл. № 8.
2. Васильев В.И. Компьютерное моделирование предохранительного торможения шахтной подъемной установки / Васильев В.И. // АСУ и приборы автоматики: Всеукр. межвед. н.-техн. сб. – 2002. – Вып. 121. – С.48– 51.
3. Васильев В.И. Пути снижения динамических нагрузок в канатах шахтных подъемных установок системами автоматически регулируемого предохранительного торможения / В.И. Васильев // Стальные канаты: Сб. науч. тр. МАИСК. – Одесса: “Астропринт” – 2010. – №8. – С.18– 29.

*Васильєв В.І. Компенсація нелінійної петльової інерційності для систем аварійного гальмування шахтних підйомних установок. В роботі представлено методику досліджень і розробки апаратури для керування процесом автоматично регульованого запобіжного гальмування шахтної підйомальної установки. Представлені результати експериментальних досліджень технічних характеристик електромеханічного перетворювача сумісно з механічним гальмом підйомальної установки. Розроблено й досліджено комп'ютерну модель підсистеми, що вбудована в загальну модель шахтної підйомальної установки для досліджень і проектування апаратури автоматично регульованого запобіжного гальмування.*

**Ключові слова:** комп'ютерна модель, нелінійні петльові інерційні характеристики, електромеханічний перетворювач, раціональне керування, шахтна підйомальна установка, автоматично регульоване запобіжне гальмування.

*Васильєв В.І. Компенсація нелінійної петльової інерційності для систем аварійного торможения шахтных подъемных установок . Компенсация нелінійної*

петлевой инерционности для систем предохранительного торможения шахтной подъемной установки. В работе представлены методики исследований и разработки аппаратуры для управления процессом автоматически регулируемого предохранительного торможения шахтной подъемной установки. Представлены результаты экспериментальных исследований технических характеристик электромеханического преобразователя совместно с механическим тормозом подъемной установки. Разработаны и исследованы компьютерную модель подсистемы встроена в общую модель шахтной подъемной установки для исследований и проектирования аппаратуры автоматически регулируемого предохранительного торможения.

**Ключевые слова:** компьютерная модель, нелинейные петлевые инерционные характеристики, электромеханический преобразователь, рациональное управление, шахтная подъемная установка, автоматически регулируемое предохранительное торможение

*Vasiliev V. Indemnification of nonlinear loopback inertial properties for emergency braking system of mining hoists. In the article the experience of designing and researches of an electromechanical system with the nonlinear loopback inertial properties is stated. The characteristics of an electromechanical converter are obtained experimentally. The computer simulation of an electromechanical system is investigated. A subsystem, is part in a common system of mine hoist. It is intended for designing of an equipment for automatically adjustable emergency braking of mining hoists.*

**Keywords:** computer simulation, nonlinear loopback inertial properties, electromechanical converter, rational control, mine hoists, automatically adjustable emergency braking of mining hoists.