

**РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ С
РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ**

Васильев В. И., к.т.н.

*Конотопский институт Сумского государственного университета
г. Конотоп, Украина*

**THE ALGORITHM ENGINEERING FOR CONTROL OF ELECTROMECHANICAL
SYSTEM WITH THE DISTRIBUTED PARAMETERS**

Vasiliev V. I., PhD

Konotop Institute of Sumy State University, Konotop-city, Ukraine

Введение

В процессе работы ряда промышленных установок происходят сложные энергетические взаимодействия упругих элементов с движущимися массами (моментами инерции), что ухудшает динамику, безопасность и ресурс работоспособности. При этом массы и упругости отдельных участков могут быть сосредоточенными (орган навивки или шкив трения, подъёмные сосуды: скипы, клетки, вагонетки, противовесы) и распределенными (конвейерная лента, стальные тяговые и резинотросовые уравнивающие канаты, штанги буровых установок глубокого бурения и др.).

Для исследования систем и разработки законов управления сложными системами с инерционными элементами разной физической природы удобно пользоваться методом структурного моделирования [1, 2].

Постановка задачи

Качественное управление сложными электромеханическими системами с распределенными и сосредоточенными параметрами, к которым относятся подъёмные установки и лифты, требует формирования управляющих воздействий, обеспечивающих необходимое качество переходных процессов, минимизацию динамических перегрузок в элементах систем и быстрое действие.

По материалам зарубежных источников глубина шахтного подъёма достигла 2000 м и более, грузоподъёмность сосудов возросла до 75 т, скорость подъёма — до 20 м/с, мощность электроприводов составляет 5–10 тыс. кВт. Например, в шахтных подъёмных установках с высотой подъёма 1000 м, при стопорении подъёмной машины механическим тормозом амплитуда колебаний концевых грузов достигает 1 м.

Динамические перегрузки, возникающие в таких режимах, приводят к снижению ресурса оборудования, а при неконтролируемых проскальзыва-

ниях канатов по шкиву трения — к аварийным ситуациям.

Проблема снижения динамических перегрузок в механических узлах машин в критических режимах может быть решена путем формирования рациональных воздействий на привод машины со стороны аппаратуры управления, алгоритм работы которой учитывает динамические свойства электромеханической системы.

Исследования модели подъёма

Для разработки алгоритма автоматического управления подъёмом необходимо математически описать его динамические характеристики.

Расчетная схема динамики уравновешенного подъёма приведена на рис. 1а. Выходными параметрами в ней являются усилия в точках сопряжения канатов со шкивом трения подъемной машины, F'_{1y} и F''_{1y} , а входными — движущее усилие, $F_D = F_T \pm F_{CT}$.

Структурная схема, соответствующая расчетной схеме и выполненная по методике [1], приведена на рис. 1б.

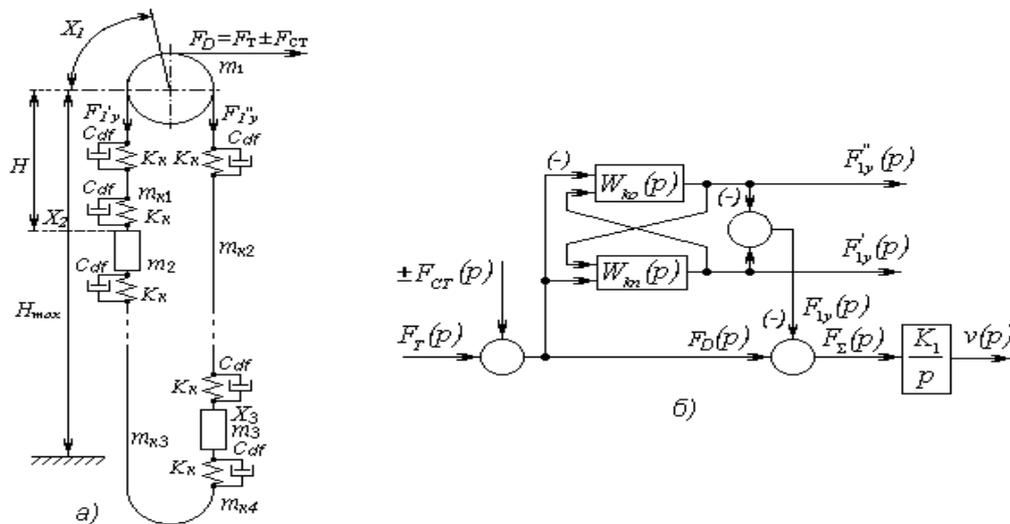


Рис. 1. Расчетная и структурная схемы динамики уравновешенного подъёма

Приняты обозначения: m_1, m_2, m_3, m_{ki} — соответственно: приведенная к оси вращения масса всех движущихся частей подъёма, массы поднимающихся и опускающихся грузов, ветвей канатов; H, H_{max} — текущая и максимальная высота шахтного подъёма; $F_D, F_T, F_{CT}, F'_{1y}, F''_{1y}$ — соответственно, усилия: динамическое, тормозное, статическое, упругое в точке сопряжения канатов с органом навивки (барабана, шкива трения); K_{ki}, C_{df} — соответственно, коэффициенты, учитывающие жесткости поднимающихся и опускающихся ветвей канатов и их демпфирующие свойства, X_i — линейные перемещения точек сосредоточенных масс, K_1 — коэффициент, учитывающий инерционные свойства движущихся масс подъем-

ной установки; v — линейная скорость движения грузов подъемной машины, $W_{kn}(p)$, $W_{ko}(p)$ — передаточные функции поднимающейся и опускающейся ветвей упругой части (канатов) статически уравновешенной системы подъема [1].

При анализе качества динамических процессов в системе подъема для критических режимов, наибольший практический интерес представляют характеристики, когда подъемные сосуды находятся в крайних положениях. В этом случае взаимное перераспределение энергии между движущимися сосредоточенными массами и упругой частью (канатами) будут оказывать существенное влияние на динамику процессов в системе. При этом одна из ветвей подъемного каната будет иметь максимальную длину, а другая — минимальную и, соответственно, наоборот, для уравновешивающих канатов. В таком случае влиянием упругости коротких ветвей можно пренебречь и для перехода от общих выражений передаточных функций к частным, следует положить $K_{k1} \rightarrow \infty$, $K_{k4} \rightarrow \infty$, $C_{df} \rightarrow \infty$. Это даёт возможность уменьшить порядок передаточных функций упругой части системы и дифференциальных уравнений системы.

Динамические параметры усилий в точках сопряжения канатов с органом навивки изменятся незначительно, если пренебречь упругостью уравновешивающих канатов, включив их массы в соответствующие массы подъемных сосудов. В рассматриваемом случае, учитывая влияние упругой части (канатов), усилия в точках сопряжения канатов со шкивом трения могут быть описаны в операторной форме таким образом [1]:

$$F'_{1y}(p) = F_D(p) \frac{\alpha_{11}(b_4 p^4 + b_3 p^3 + b_2 p^2 + b_1 p + b_0)}{a_4 p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0},$$
$$F''_{1y}(p) = -F_D(p) \frac{\alpha_{21}(c_4 p^4 + c_3 p^3 + c_2 p^2 + c_1 p + c_0)}{a_4 p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0},$$

где α_{11} , α_{21} , a_i , b_i , c_i — коэффициенты дифференциальных уравнений, которые учитывают параметры упругости и соотношений масс канатов и сосудов.

Компьютерное моделирование динамики усилий $F'_{1y}(t)$ и $F''_{1y}(t)$ для сосудов, расположенных в крайних положениях, с учетом и без учета влияния упругости уравновешивающих канатов (рис. 2), показало отсутствие значительных отличий по частоте, амплитуде, коэффициенту затухания колебаний и установившемуся значению. Возникающие в начальный момент высокочастотные колебания в коротких ветвях, быстро затухают и не оказывают существенного влияния на динамику процесса.

С учетом всех инерционных элементов, представленных схемой на рис. 1, динамические свойства уравновешенного подъема должны быть описаны системой дифференциальных уравнений не ниже восьмого по-

рядка. В то же время, любой затухающий колебательный процесс высокого порядка может быть аппроксимирован элементарной гармонической функцией вида:

$$y(t) = Ae^{-at} \sin(\omega t + \psi) + y_{уст},$$

где A, ω — амплитуда и частота колебаний; a — коэффициент затухания колебаний (демпфирования); ψ — фазовый сдвиг; $y_{уст}$ — установившееся значение.

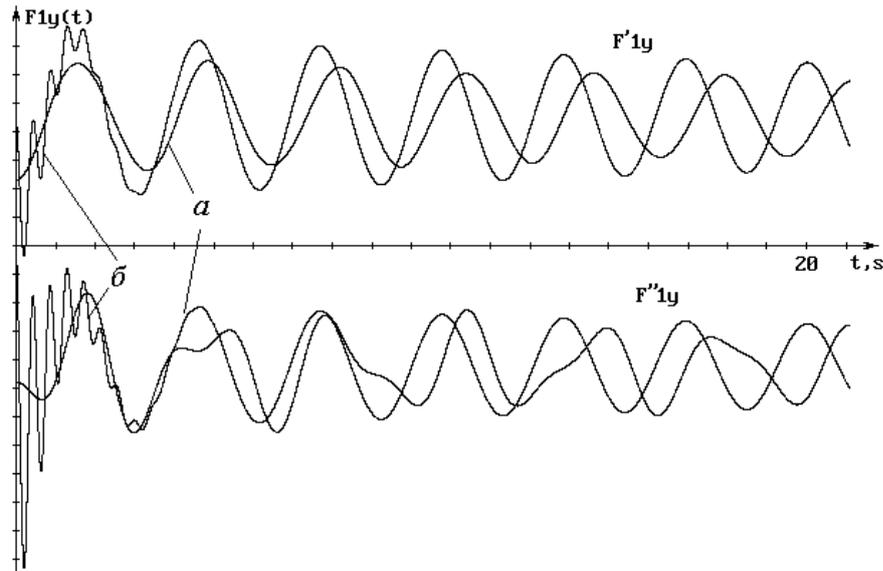


Рис. 2. Семейства переходных характеристик усилий $F'_{1y}(t)$ и $F''_{1y}(t)$, полученных для сосудов, расположенных в крайних точках, с учетом (a) и без учета ($б$) влияния упругости уравновешивающего каната

Результаты компьютерного моделирования переходного процесса упругой части подъема относительно упругих усилий $F'_{1y}(t)$, $F''_{1y}(t)$, результирующего суммарного усилия $F_{1y}(t)$ и его аппроксимация гармонической функцией $F_{1yанп}(t)$ представлены на рис. 3. В качестве параметров были взяты данные вертикальной многоканатной уравновешенной подъемной установки ЦШ4-4Р(Д) с максимальной глубиной подъема 900 м [2].

Такая аппроксимация позволяет упростить математическое описание при расчётах технических устройств в системе управления, в частности сформировать закономерность воздействия на механический тормоз, которая будет учитывать влияния инерционных свойств упругой части подъема на динамику процесса торможения. Аппроксимированное описание упругой части системы подъема в операторной форме будет:

$$F_{\Sigma}(p) = F_D(p) \frac{e_2 p^2 + e_1 p + e_0}{a_2 p^2 + a_1 p + a_0},$$

где e_i, a_i — коэффициенты, которые учитывают динамические свойства

упругой части подъёма.

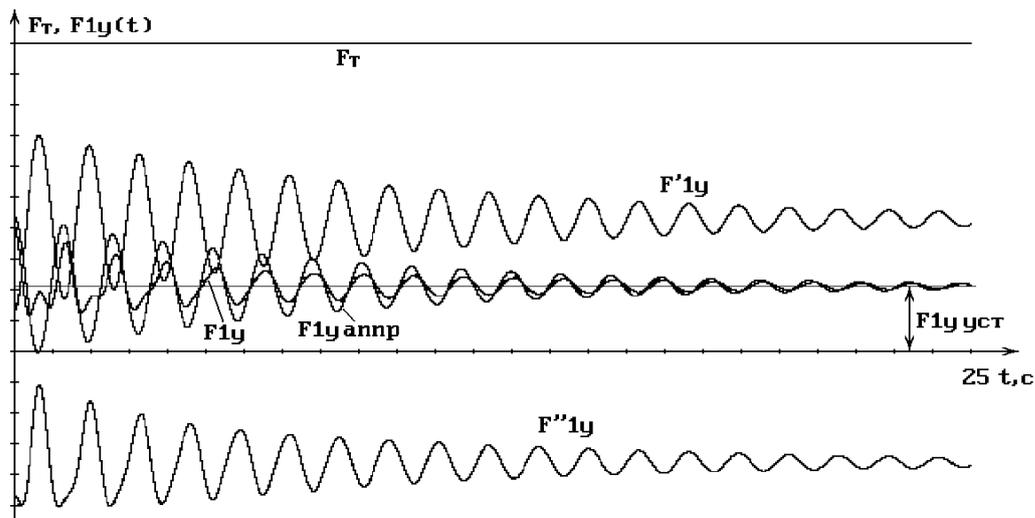


Рис. 3. Моделирование переходных характеристик упругих усилий в точках сопряжения канатов со шкивом трения, $F_{1y}'(t)$, $F_{1y}''(t)$, $F_{1y}(t)$, $F_{1y\text{аннп}}(t)$.

Расчетная модель подъёмной установки с аппроксимированной характеристикой упругой части приведена на рис. 4. Модель содержит электромеханический преобразователь для управления тормозом, $W_T(p)$; аппроксимированную упругую часть, на выходе которой формируется действующее на подъёмную машину усилие, $F_{\Sigma}(p) = f(F_T(p) \pm F_{CT}(p))$; подъёмную машину, обеспечивающую требуемую скорость движения грузов $v(p) = F_{\Sigma}(p) \frac{K_1}{p}$. Здесь U_y – сигнал управления тормозом.

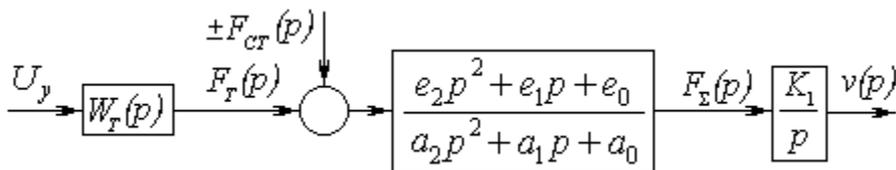


Рис. 4. Расчетная модель подъёмной установки

Синтез задающего устройства

Качество систем автоматического управления определяется свойствами передаточной функции, и процесс управления считается оптимальным, если обеспечивается монотонный переходной процесс с минимальным временем [3]. Для создания условий оптимального управления сложной электромеханической системой при естественных ограничениях фазовых переменных (рывок, замедление) монотонность переходного процесса может быть обеспечена путём поочередного ограничения каждой из производных управляемой переменной объекта управления [4].

Моделирование работы системы управления с использованием ПД-

регулятора, применительно к предохранительному торможению шахтного подъёма глубоких шахт, представлено в [4].

Оптимизировать процесс управления такой системой удалось применением задающего устройства, выполняющего функции многоканального регулятора с ограничениями не только регулируемой переменной, но и её производных [5]. Структурная схема задающего устройства представлена на рис. 5. Это нелинейный фильтр второго порядка, формирующий управляющее воздействие в виде суммы дифференциально связанных сигналов, каждый из которых имеет соответствующее ограничение, что повышает быстродействие и устойчивость к помехам, например, от механических вибраций.

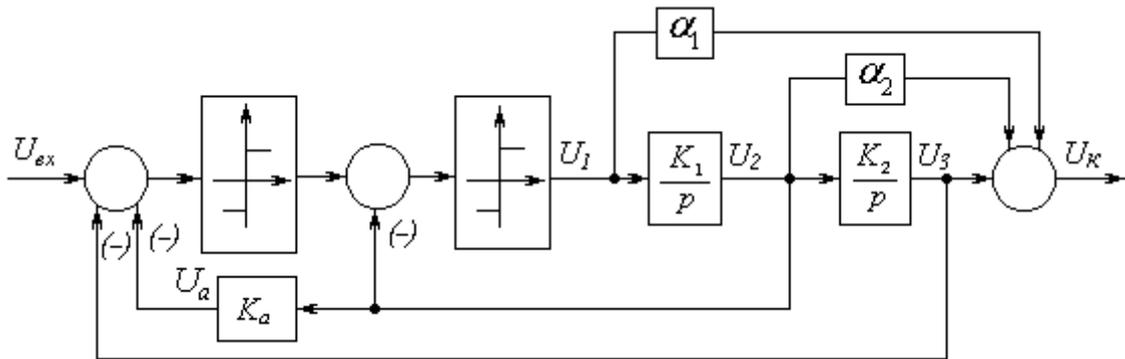


Рис. 5. Структурная схема задающего устройства

Для того чтобы при любых значениях $U_{вх}$ выходная переменная системы изменялась по оптимальному закону, цепь обратной связи должна обеспечить зависимость $U_a = K_a \cdot U_2^2 \cdot \text{sign}U_2$, где $K_a = K_2 / (2 \cdot K_1 \cdot U_{1m})$, U_{1m} — гранично-допустимое ограничение значение второй производной. Коэффициенты K_1 и K_2 выбирают исходя из установленных ограничиваемым значениям первой и второй производных управляемой переменной объекта управления. Для передаточной функции расчётной модели системы, представленной на рис. 4, коэффициенты задающего устройства $\alpha_2 = K_2 \cdot a_1 / a_0$; $\alpha_1 = K_1 \cdot K_2 \cdot a_2 / a_0$.

Исследование функционирования задающего устройства в составе системы управления предохранительным торможением подъёмной установки приведены в [2].

Выводы

В статье рассмотрен функциональный аспект проектирования аппаратуры регулируемого предохранительного торможения шахтных подъёмных установок для глубоких шахт.

На основании экспериментальных исследований инерционных свойств упругой части канатной системы подъёма разработана её модель, выполнена аппроксимация, снижающая порядок описывающих уравнений до

второго. Предложена структурная схема задающего устройства для системы управления подъемной установки, учитывающая инерционные характеристики упругой части системы подъема, и определены её параметры, обеспечивающие требуемые динамические режимы работы оборудования.

Представленные технические решения могут быть использованы при создании систем автоматически регулируемого предохранительного торможения шахтных подъемных установок для шахт глубиной свыше 1000 м.

Перелік посилань

1. Чермалых В. М. Исследование сложных электромеханических систем / В. М. Чермалых. – Киев, КПИ, 1979. – 63 с.
2. Васильев В.И. [Обоснование рациональных динамических параметров предохранительного торможения шахтных подъемных установок](#) : дисс. на соиск. науч. степени канд. техн. наук : спец. 05.02.09 “Динамика и прочность машин”/ В.И. Васильев ; СумДУ. – Сумы, 2012. – 211 с.
3. Солодовников В.В. Основы теории и элементы систем автоматического регулирования / В.В. Солодовников, В.Н. Плотников, А.В. Яковлев. – М. : Машиностроение, 1985. – 536 с.
4. Васильев В. И. Регуляторы давления для систем регулируемого предохранительного торможения / В. И. Васильев, Н.П. Матвиенко // Механизация и автоматизация производства. – 1990. – № 11. – С. 25-27.
5. А.с. № 1447743 СССР. Устройство для управления приводом шахтной подъемной машины / В.И. Васильев, В.Г. Дубовик, В.М. Чермалых. – Опубл. 30.12.88, Бюл. № 48.

References

1. Chermalykh V.M. (1979) Issledovanie slozhnykh elektromekhanicheskikh sistem [Investigation of complex electromechanical systems]. Kiev, KPI, 63 p.
2. Vasil'ev V.I. (2012) [Obosnovanie ratsional'nykh dinamicheskikh parametrov predokhranitelnogo tormozheniya shakhtnykh pod"emnykh ustanovok](#). Diss. kand. tekhn. nauk [Rational justification of the dynamic parameters of blown fuses Executive braking mine hoisting plant. Diss. Cand. of Science]. Sumy, SumDU, 211 p.
3. Solodovnikov V.V., Plotnikov V.N. and Yakovlev A.V. (1985) *Osnovy teorii i elementy sistem avtomaticheskogo regulirovaniya* [Fundamentals of Theory and elements of automatic control systems]. Moskow, Mashinostroenie Publ., 536 p.
4. Vasil'ev V.I. and Matvienko N.P. (1990) Regulyatory davleniya dlya sistem reguliruemogo predokhranitel'nogo tormozheniya [Pressure regulators for safety systems controlled braking]. *Mekhanizatsiya i avtomatizatsiya proizvodstva*. No 11, pp. 25-27.
5. Vasiliev V.I., Dubovik V.G. and Chermalih V.M. (1988) *Ustroistvo dla upravleniia privodom shahtnoi podiemnoi mashini* [A device for controlling the drive shaft hoisting machines]. Patent SU No. 1447743.

Васильев В. И. Розробка алгоритму управління електромеханічною системою з розподіленими параметрами. В роботі представлено методику розробки алгоритму управління динамікою процесу автоматично регульованого запобіжного гальмування шахтної підіймальної установки. Представлено результати комп'ютерного моделювання динаміки системи з зосередженими і розподіленими параметрами, пружною частиною при взаємодії її з механічним гальмом підіймальної установки. Розроблено й

досліджено комп'ютерну модель оптимального управління процесом по критерію зниження динамічних перевантажень.

Ключові слова: комп'ютерне моделювання, інерційні характеристики, оптимальне управління, електромеханічна система, шахтна підіймальна установка, автоматично регульоване запобіжне гальмування.

Васильев В. И. Разработка алгоритма управления электромеханической системой с распределенными параметрами. В работе представлена методика разработки алгоритма управления динамикой процесса автоматически регулируемого предохранительного торможения шахтной подъемной установки. Представлены результаты компьютерного моделирования динамики системы с сосредоточенными и распределенными параметрами, упругой частью при взаимодействии ее с механическим тормозом подъемной установки. Разработана и исследована компьютерная модель оптимального управления процессом по критерию снижения динамических перегрузок.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, инерционные характеристики, оптимальное управление, электромеханическая система, шахтная подъемная установка, автоматически регулируемое предохранительное торможение.

Vasiliev V. The algorithm engineering for control of electromechanical system with the distributed parameters.

Introduction. A number of electromechanical systems have the complex dynamic properties. For their research it is convenient to use a method of structural modeling.

Statement of a task. The dynamic properties can be improved by the optimum laws of control.

Researches of mine hoist model. The method of computer simulations is used for research of mine hoists dynamics. The computer simulation results of dynamics of system with the concentrated and distributed parameters, elastic part are submitted at interaction it with a mechanical brake of elevating installation.

Synthesis of the optimal control device. The optimum law of control the complex system dynamic modes can be supplied with the help of the second order nonlinear filter. The technique of application is given.

Conclusions. The computer model of optimum control of process by criterion of decrease of dynamic overloads is developed and investigated. The technique of the device debugging is submitted. It sets optimum on minimization dynamic overloads the law of influence on brake system of the automatically regulated emergency braking of mining hoist.

Keywords: computer simulation, inertial properties, optimization of control, electromechanical systems, mine hoists, automatically adjustable emergency braking system..