

УДК 62.83.52

ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ПОЗИЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ КЛЕТЕВЫМИ ПОДЪЕМНЫМИ УСТАНОВКАМИ ГЛУБОКИХ ШАХТ

И. Я. Майданский, В. М. Чермалых, А. В. Чермалых

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

просп. Победы, 37, г. Киев, 03057, Украина. E-mail: ivanmaidanskyi@gmail.com

На основе компьютерного моделирования определена структура регулирующего устройства, позволяющего максимально уменьшить амплитуду низкочастотных колебаний клетки, вызванных наличием длинных подъемных и уравнивающих стальных канатов, которые следует рассматривать как динамические звенья с распределенными параметрами (массой и упругостью). Для математического описания упругих колебаний использована идентифицированная передаточная функция системы, полученная по переходной характеристике.

Ключевые слова: оптимизация, подъемная установка, упругие колебания, позиционное управление.

ОПТИМІЗАЦІЯ СИСТЕМИ ПОЗИЦІЙНОГО УПРАВЛІННЯ КЛІТЬОВИМИ ПІДЙОМНИМИ УСТАНОВКАМИ ГЛУБОКИХ ШАХТ

І. Я. Майданський, В. М. Чермалих, О. В. Чермалих

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03057, Україна. E-mail: ivanmaidanskyi@gmail.com

На основі аналізу комп'ютерного моделювання визначено структуру регулюючого пристрою, який дозволяє максимально зменшити амплітуду низькочастотних коливань кліті, що викликано наявністю довгих підйомних та врівноважуючих сталевих канатів, які слід розглядати як динамічні ланки з розподіленими параметрами (масою та пружністю). Для математичного опису пружних коливань використано ідентифіковану передатну функцію системи, що отримана за перехідною характеристикою.

Ключові слова: оптимізація, підйомна установка, пружні коливання, позиційне управління.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Клетевые подъемные установки глубоких шахт представляют собой сложную электромеханическую систему, характерной особенностью которой является наличие длинных подъемных и уравнивающих стальных канатов, которые следует рассматривать как динамические звенья с распределенными параметрами (массой и упругостью). Поэтому в переходных режимах возникают низкочастотные колебания клетки, что существенно затрудняет ее остановку в заданном положении без применения специальных посадочных устройств, используются также клетки с отделяющимися кузовам.

Следовательно, для надежной и безопасной работы установки используется сложная диаграмма скорости с периодами движения с малыми скоростями в крайних положениях периода движения, что приводит к потере производительности и энергии.

Оптимизация системы позиционного управления клетевыми установками предусматривает реализации диаграммы скорости без использования посадочных устройств с остановом клетки на заданном уровне с наложением механического тормоза при нулевой скорости. Обязательным условием при этом является исключение механических упругих колебаний, т.е. осуществляется оптимизация системы по динамическим нагрузкам [1]. Решение этой задачи возможно только методом моделирования для получения математического описания упругой системы [2].

Целью работы является получение структуры регулирующего устройства, обеспечивающего максимальное уменьшение амплитуды колебаний клетки на основе использования идентифицированной передаточной функции объекта управления по выходной координате – перемещению клетки с использованием дискретной аппроксимации на основе Z-преобразования и схем в переменных состояния [3].

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.

Для математического описания колебательных процессов в подъемной установке, а также экспериментального исследования перемещений клетки в пере-

ходных режимах использованы методы, изложенные в [3]. Учитывая, что при замкнутой по скорости двигателя системе управления скорость канатоведущего шкива мало зависит от влияния на неё движения клетки, то можно рассматривать механическую систему с входным воздействием в виде динамической составляющей движущего момента двигателя $F_{дин}$, приведенного к окружности приводного шкива, как показано на рис. 1.

Главные упругие звенья механической части системы представлены передаточными функциями $W_1(p)$, $W_2(p)$ соответственно для поднимающейся и опускающейся ветвей головных канатов и $W_3(p)$, $W_4(p)$ – для уравнивающих:

$$W_1(p) = \frac{\pi^2/8 p^2}{p^2 + \mu_k b_{k1}^2 p + b_{k1}^2}; \tag{1}$$

$$W_2(p) = \frac{\pi^2/8 p^2}{p^2 + \mu_k b_{k2}^2 p + b_{k2}^2}; \tag{2}$$

$$W_3(p) = \frac{b_{32} p^2 + (1 + \alpha_{32})(\mu_x p + 1) b_{k3}^2}{(1 + \pi^2/4) p^2 + (\mu_x p + 1) b_{k3}^2}; \tag{3}$$

$$W_4(p) = \frac{b_{43} p^2 + (1 + \alpha_{43})(\mu_x p + 1) b_{k4}^2}{(1 + \pi^2/4) p^2 + (\mu_x p + 1) b_{k4}^2}; \tag{4}$$

где $b_{32} = 1 + \alpha_{32} + \pi^2/4$; $b_{43} = 1 + \alpha_{43} + \pi^2/4$; μ_k , μ_x – коэффициенты затухания упругих колебаний в головных и уравнивающих ветвях канатов, для стальных канатов $\mu_k = \mu_x = 0,005-0,01$;

$$b_{k1} = \frac{\pi a_k}{l_1}; \quad b_{k2} = \frac{\pi a_k}{l_2}; \quad b_{k3} = \frac{\pi a_k}{l_3}; \quad b_{k4} = \frac{\pi a_k}{l_4};$$

$$\alpha_{32} = \frac{m_{k3}}{m_3}; \quad \alpha_{43} = \frac{m_{k4}}{m_4}.$$

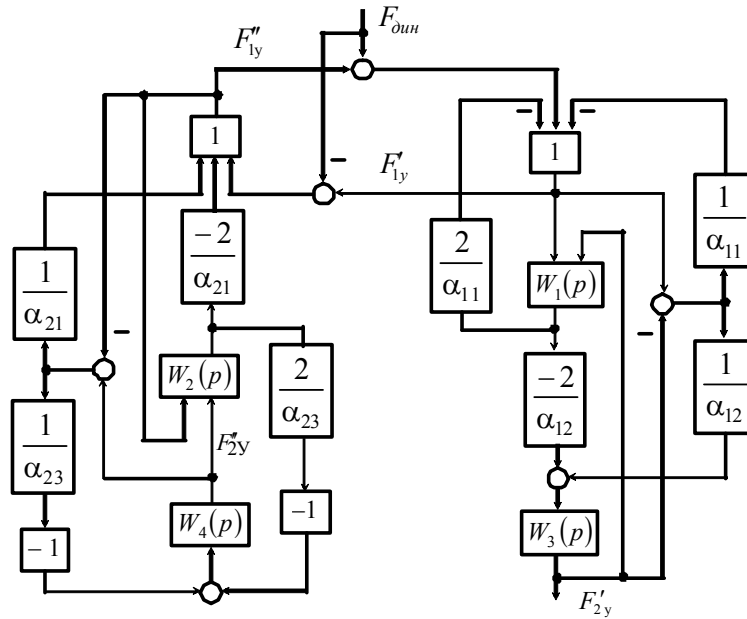


Рисунок 1 – Структурная схема статически уравновешенной подъемной установки с электроприводом

Кроме перечисленных параметров, на структурной схеме приняты следующие обозначения:

$$\alpha_{11} = \frac{m_{k1}}{m_1}; \quad \alpha_{12} = \frac{m_{k1}}{m_2}; \quad \alpha_{21} = \frac{m_{k2}}{m_1}; \quad \alpha_{22} = \frac{m_{k2}}{m_2};$$

$$\alpha_{32} = \frac{m_{k3}}{m_3}; \quad F'_{1y}, F''_{1y} - \text{динамические составляющие усилий, действующих со стороны головных канатов на канатопроводящий шкив; } F'_{2y}, F''_{2y} - \text{динамические усилия, действующие со стороны головных канатов на подъемные сосуды.}$$

В приведенных соотношениях a_k – скорость распространения упругих деформаций вдоль каната (для стальных канатов $a_k \approx 4000 \text{ м/с}$); l_1, l_2 – соответственно длины поднимающейся и опускающейся ветвей канатов; l_3, l_4 – соответственно длины поднимающейся и опускающейся ветвей уравновешивающих канатов; m_1 – приведенная к окружности канатопроводящего шкива масса вращающихся звеньев системы; m_2, m_3 – массы поднимающегося и опускающегося подъемных сосудов; m_{k1}, m_{k3} – соответственно массы поднимающихся ветвей головных и уравновешивающих канатов; m_{k2}, m_{k4} – то же для опускающихся ветвей.

Имея в виду, что в реальных системах управления подъемными установками нет внешней обратной связи по координатам упругих механических звеньев, то, как показали исследования, при анализе динамических режимов механическую часть можно рассматривать отдельно, используя в качестве входного воздействия вращающий момент, развиваемый двигателем (M_d).

На рис. 2 представлена модель в системе MATLAB механической части подъемной установки для исследования динамических нагрузок при постоянном и изменяющемся по трапецеидальному закону движущем моменте [2].

В качестве исходных данных приняты параметры многоканатной клетевой подъемной установки МК 5x4 высотой подъема 1400 м. и мощностью двигателя постоянного тока 2500 кВт. Параметры упругой части системы при нахождении концевых грузов в крайних точках высоты подъема (рассматривается начало цикла подъема груза): $l_1 = 1445 \text{ м}; l_2 = 45 \text{ м}; l_3 = 25 \text{ м}; l_4 = 1425 \text{ м}; \alpha_{11} = 0,956; \alpha_{12} = 1,11; \alpha_{21} = 0,028; \alpha_{23} = 0,044; \alpha_{32} = 0,02; \alpha_{43} = 1,456; b_{k1} = 8,7; b_{k2} = 279; b_{k3} = 502,4; b_{k4} = 8,8$.

Представленная на рис. 1 структурная схема справедлива для любых систем вертикального подъема (одноконцевой, двухконцевой с барабанными машинами, многоканатного статически уравновешенного со шкивами трения). Передаточные функции (1), (2) соответствуют любому типу подъемной установки, (3), (4) – только для статически уравновешенного.

Чтобы перейти от приведенной структурной схемы, учитывающей упругости всех подъемных и уравновешивающих канатов, к абсолютно жесткой системе, нужно в передаточных функциях принять $\mu_k = \mu_x = 0$, а параметры $b_{k1}, b_{k2}, b_{k3}, b_{k4}$ приравнять к ∞ . Тогда получим: $W_1(p) = W_2(p) = 0; W_3(p) = 1 + \alpha_{32}; W_4(p) = 1 + \alpha_{43}$, а структурная схема примет вид, показанный на рис. 3.

При ступенчатом приложении $F_{дин}$ динамические усилия в верхних точках грузенной и холостой ветвей F'_{1y}, F''_{1y} показаны на рис. 2, а изменение динамического усилия, действующего на клеть F'_{2y} , приведено на рис. 4,а (рассмотрена клетевая подвесная подъемная установка с противовесом с расположением концевых грузов в крайних точках высоты подъема).

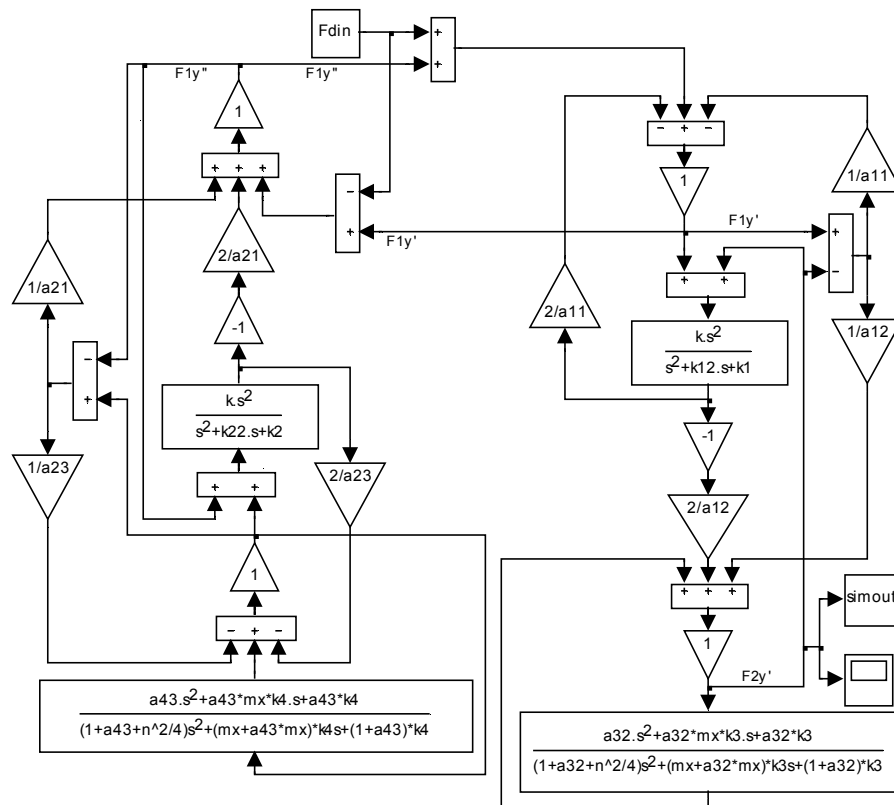


Рисунок 2 – Моделирование подъемной установки в пакете MATLAB

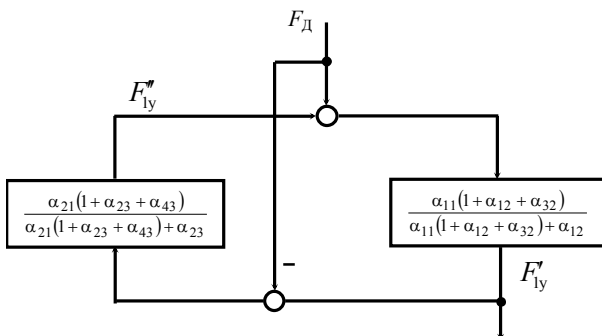


Рисунок 3 – Структурная схема подъемной установки без учета упругости канатов

Для получения идентифицированной переходной характеристики F'_{2y} , воспользуемся дискретной моделью второго порядка [4], соответствующей желаемой непрерывной передаточной функции:

$$W_{\text{жс}}(p) = \frac{K}{p^2 + a_1 p + a_2} \quad (5)$$

Для реализации задачи идентификации разработана программа (рис. 4), позволяющая в автоматическом режиме определить параметры передаточной функции (5) по переходной характеристике, согласно методике, описанной в [4]. Для первоначальной обработки рассматриваемой переходной характеристики используется полиномиальная аппроксимация общего вида. Определяются значения аппроксимирующего полинома и коэффициенты аппроксимирующего полинома, которые определяют полином, наилучшим образом аппроксимирующий набор входных данных X и Y.

Общий вид полиномиальной аппроксимирующей функции задается выражением

$$f_i = \sum_{j=0}^m a_j x_i^j, \quad (6)$$

где f_i – выходная последовательность – аппроксимирующий полином; x – входная последовательность X; a – коэффициенты аппроксимирующего полинома; m – порядок полинома.

При выборе наиболее подходящего варианта аппроксимации и результата идентификации используется критерий минимального значения среднеквадратичного значения ошибки, которое определяется по выражению:

$$\psi = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} (x_i - y_i)^2}, \quad (7)$$

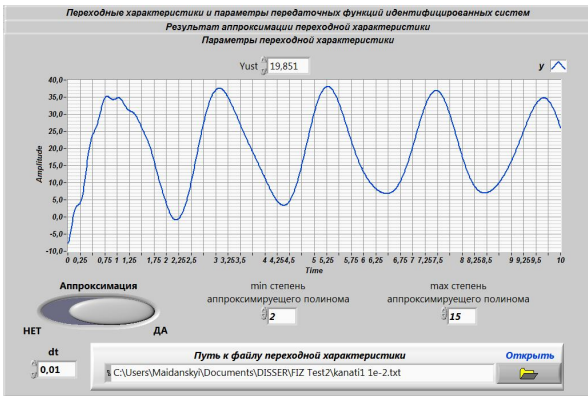
где x – входная последовательность X эталонного сигнала, y – входная последовательность Y сравниваемого сигнала, n – число точек входных последовательностей.

Результатом выполнения программы являются передаточные функции второго порядка, представленные в непрерывном и дискретном виде, соответствующие переходной характеристике системы.

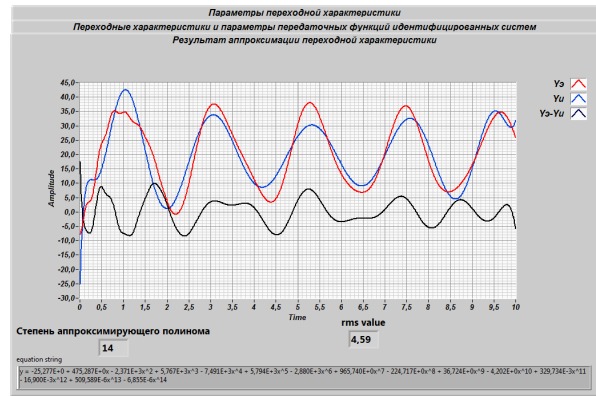
В непрерывном виде идентифицированная передаточная функция имеет вид:

$$W_u(p) = \frac{K_*}{p^2 + a_{1*} p + a_{2*}}, \quad (8)$$

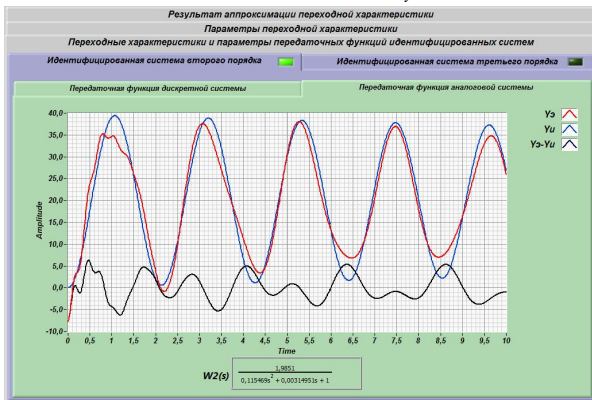
где K_* , a_{1*} , a_{2*} – коэффициенты, полученные в результате аппроксимации.



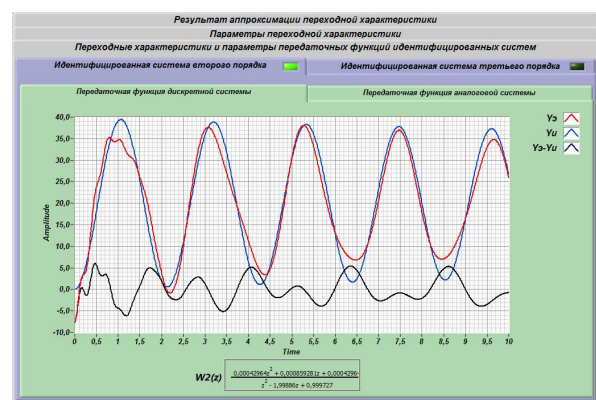
а) окно задания параметров реальной переходной характеристики F'_{2y} ;



б) окно отображения результата аппроксимации переходной характеристики;



в) окно отображения результата идентификации переходной характеристики передаточной функцией второго порядка в непрерывном виде;



г) окно отображения результата идентификации переходной характеристики передаточной функцией второго порядка в дискретном виде.

Рисунок 4 – Скриншоты программы идентификации переходной характеристики

Тогда по полученной идентифицированной передаточной функции объекта для синтеза ПИД-регулятора системы привода с двигателем постоянного тока нужно рассмотреть систему, состоящую из системы подчиненного регулирования скорости и

контура положения с ПИД-регулятором (рис. 5). Структурная схема контура скорости привода клетевой подъемной установки представлена на рис. 6, диаграммы скорости перемещения клетки представлены на рис. 7.

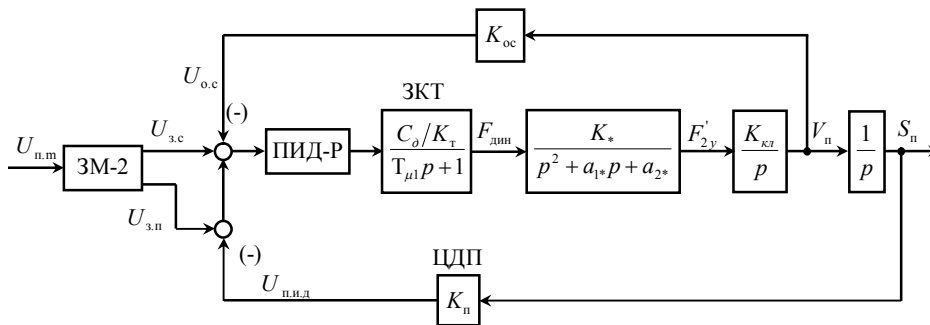


Рисунок 5 – Система привода клетевой подъемной установки с двигателем постоянного тока: ЗМ-2 – задающая модель второго порядка; ПИД-Р – ПИД-регулятор положения; ЗКТ – замкнутый контур тока; ЦДП – цифровой датчик перемещения (считывает магнитные метки на тресе)

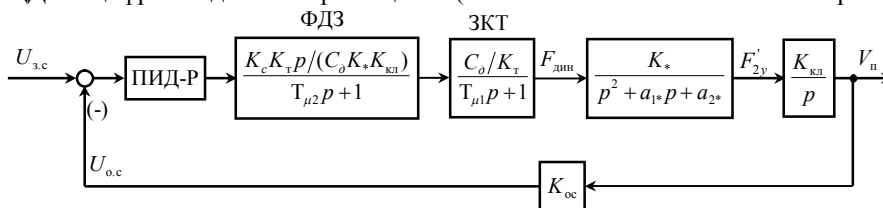


Рисунок 6 – Структурная модель контура скорости привода клетевой подъемной установки: ПИД-Р – ПИД-регулятор положения; ФДЗ – фильтрующее дифференцирующее звено; ЗКТ – замкнутый контур тока

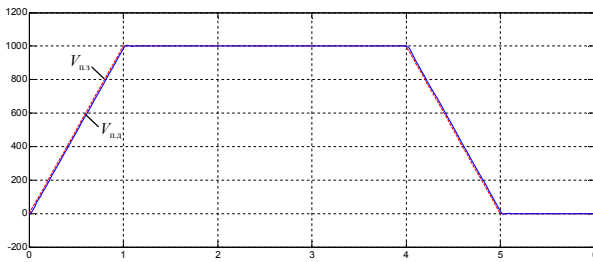


Рисунок 7 – Диаграммы заданной и действительной скоростей перемещения клетки

ВЫВОДЫ. Исследование динамики подъемной установки показали, что для оптимизации системы позиционного управления подъемной установки необходимо исключать колебательные процессы в конце рабочего цикла, что позволит останавливать клеть без посадочных устройств. Построение структурной схемы системы управления с учетом упругих звеньев следует выполнять, используя идентифицированную передаточную функцию по скорости и перемещению клетки на основе метода Z-преобразования и схем в переменных состояния.

OPTIMIZATION OF THE POSITION OF KLETEVYMI HOIST DEEP MINES

I. Maidanskyi, V. Chermalykh, A. Chermalykh

National Technical University of Ukraine «Kiev Polytechnic Institute»
 prosp. Pobedy, 37, Kiev, 03057, Ukraine. E-mail: ivanmaidanskyi@gmail.com

Based on computer modeling of the structure of a control device that allows to minimize the amplitude of the low-frequency oscillations stands, are caused by the presence of lifting and balancing long steel cables that should be considered as dynamic links with distributed parameters (mass and elasticity). For the mathematical description of the elastic vibrations used the identified transfer function is obtained for the transition of the product.

Key words: optimization, lift installation, elastic vibrations, position control.

REFERENCES

1. Chermalykh V.M., Rodkin D.I., Kanevsky V.V. *Electric drive and automatic steady-state mining machinery and equipment.* – M.: Nedra, 1976. – 398 p. [in Russian]
2. Chermalykh V.M., Altukhov E.I., Kuznetsov V.V., Maidanskyi I.Y. Modeling the static equation noveshennoy hoisting plant in the environment of MATLAB. // *Bulletin of the Kremenchuk State Polytechnic University: Proceedings of KDPU.* – Kremenchuk: KDPU, 2004. – Iss. 2/2004 (25). – PP. 165–169. [in Russian]
3. Chermalykh V.M., Kuznetsov V.V., Maidanskyi I.Y. Discrete approximation by the Z-transform of the vibrational transition characteristics of electromechanical systems // *Bulletin of the Kremenchuk State Polytechnic University: Proceedings of KDPU.* – 2005. – Iss. 3/2005 (32). – PP. 188–192. [in Russian]

1. Чермалых В.М., Родькин Д.И., Каневский В.В. *Электропривод и автоматика рудничных стационарных машин и установок.* – М.: Недра, 1976. – 398 с.
2. Чермалых В.М., Алтухов Е.И., Кузнецов В.В., Майданский И.Я. Моделирование статически уравновешенной подъемной установки в среде пакета MATLAB // *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Наукові праці КДПУ.* – Кременчук: КДПУ, 2004. – Вип. 2/2004 (25). – С. 165–169.
3. Чермалых В.М., Кузнецов В.В., Майданский И.Я. Дискретная аппроксимация методом Z-преобразования колебательных переходных характеристик электромеханических систем. // *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету.* – 2005. – Вип. 3/2005 (32). – С. 188–192.
4. Чермалых В.М., Чермалых А.В., Майданский И.Я., Прядко С.Л. Идентификация параметров на основе Z-преобразования и оптимизация управления электромеханическими системами с упругими звеньями // *Промэлектр.* – К., ТОВ «ДІЯ». – 2007. – № 5/2007. – С. 6–11.

Стаття надійшла 23.07.2012.

Рекомендовано до друку
 к.т.н., доц. Шамардіною В.Н.