

## ПОДАВЛЕНИЕ УПРУГИХ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ В СИСТЕМЕ ТП-Д С МОДАЛЬНЫМ ПРИНЦИПОМ УПРАВЛЕНИЯ

*На основі дослідження електромеханічної взаємодії електричної (ЕП) та механічної (МП) підсистем у складі повної ЕМС визначенні оптимальні параметри модального регулятора за критерієм мінімуму коливань.*

*На основе исследования электромеханического взаимодействия электрической (ЭП) и механической (МП) подсистем в составе полной ЭМС определены оптимальные параметры модального регулятора по критерию минимума колебательности.*

*On base of the study of the electromechanic interaction electric (EP) and mechanical (MP) of the subsystems in composition full EMS are determined optimum parameters of the modal regulator on criterion of the minimum.*

**Введение.** Наличие значительного количества упругих элементов приводит к тому, что динамические нагрузки в несколько раз превышают номинальные. Под их действием происходит разрушение элементов каркаса сооружения, элементов электромеханической системы (ЭМС), коммуникаций, прилегающих или проходящих в зоне работы механизма. Наличие упругого механического звена отрицательно сказывается на качестве изготавливаемой продукции, сроке службы электрического и механического оборудования, показателях качества регулирования, а, следовательно, необходимо компенсировать упругие механические колебания с целью оптимизации параметров ЭМС.

Существует несколько основных способов подавления упругих механических колебаний которые широко освещены в многочисленных трудах отечественных и зарубежных экспертов. Наиболее широкое распространение получил электротехнический способ демпфирования упругих колебаний, использование которого позволяет легко оптимизировать любую электромеханическую систему по критерию минимума колебательности. В статье [1] определена основная задача электропривода, которая заключается в ограничении динамических нагрузок в его механической части. Это достигается использованием демпфирующих свойств самого электропривода при электромеханическом взаимодействии протекающих в нем процессов [2-4].

**Постановка задачи.** Задачей является определение оптимальных значений коэффициентов модального регулятора с целью предельного подавления упругих механических колебаний в системе тиристорный преобразователь-двигатель (ТП-Д).

**Результаты работы.** Обычно для управления системы ТП-Д используют принцип подчиненного регулирования, достоинствами которого являются простота настройки регуляторов и ограничения основных координат электропривода. Однако в последнее время все более возрастает интерес к системам модального управления.

При синтезе и анализе системы ТП-Д следует учитывать, что она представляет собой сложную электромеханическую систему, электрическая и механическая части которой находятся в непрерывном взаимодействии. В общем случае электрическая подсистема (ЭП) привода содержит ряд накопителей и преобразователей энергии, объединенных электрическими и магнитными связями, а механическая подсистема (МП) имеет более или менее развитую инерционную многомассовую структуру с упругими механическими связями. Управляющие и возмущающие воздействия в такой системе вызывают переход-

ные процессы, связанные с накоплением, отдачей энергии, а также с обменом энергией между ее элементами. Структурная схема электромеханической системы ТП-Д с учётом разделения её на электрическую и механическую подсистемы представлена на рисунке 1.

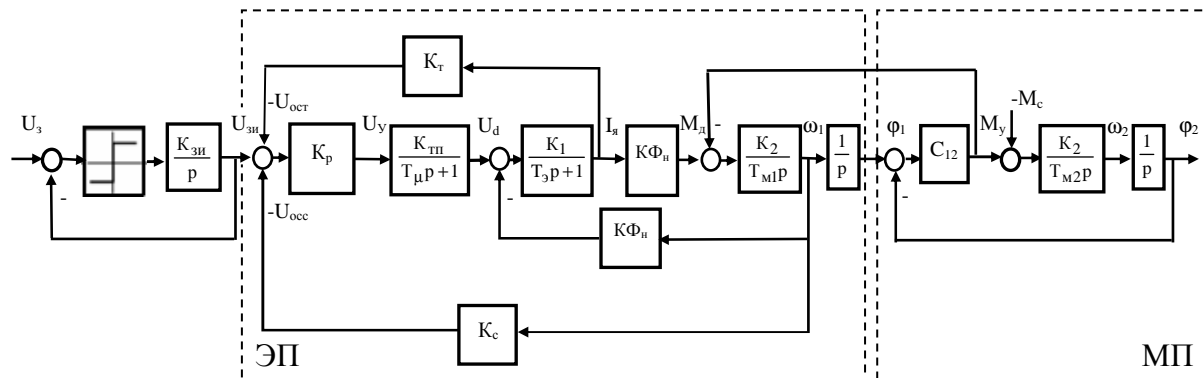


Рисунок 1 – Структурная схема системы ТП-Д с модальным управлением

В схеме приняты следующие обозначения:  $\omega_1$  – угловая скорость двигателя;  $\omega_2$  – угловая скорость механизма;  $U_y$  – напряжения на зажимах обмотки якоря;  $M_d$  – момент развиваемый двигателем;  $M_y$  – момент упругих сил;  $M_c$  – момент статического сопротивления на валу двигателя;  $I_a$  – ток якорной цепи двигателя;  $T_э$  – электромагнитная постоянная времени двигателя;  $T_{м1}$ ,  $T_{м2}$  – электромеханические постоянные времени двигателя и приводного механизма;  $C_{12}$  – приведенный коэффициент жесткости;  $K_1=1/R_{яц}$  – коэффициент передачи якорной цепи;  $K_2=R_{яц}/K_{Фн}^2$ ,  $K_{Фн}$  – коэффициент пропорциональности ЭДС скорости  $\omega_1$ ;  $K_p$  – коэффициент модального регулятора;  $K_{тп}$  – коэффициент передачи тиристорного преобразователя;  $K_c$ ,  $K_t$  – коэффициенты обратных связей модального регулятора по скорости и току;  $T_\mu$  – некомпенсированная постоянная времени контура тока;  $\phi_1$ ,  $\phi_2$  – обобщенные угловые координаты первой и второй массы.

Выполнив преобразование структурной схемы, получаем передаточные функции по управляющему и возмущающему воздействию, свойства электропривода определяются характеристическим уравнением, которое имеет вид:

$$Q(p) = \gamma T_{м1} T_э / \Omega_{12}^2 p^4 + \gamma T_{м1} (1 + K_3 K_t) / \Omega_{12}^2 p^3 + \gamma (K_{31} K_c + T_{м1} T_э \Omega_{12}^2) / \Omega_{12}^2 p^2 + \gamma T_{м1} (1 + K_3 K_t) p + K_{31} K_c = 0, \quad (1)$$

где  $K_3=K_p K_{тп} K_1$ ;  $K_{31}=K_3 K_2 (K_{Фн})$ .

По виду корней характеристического уравнения определяется характер переходных процессов, качество системы регулирования с точки зрения быстродействия, демпфирующей способности. Для анализа демпфирующей способности электропривода при электромеханическом взаимодействии процессов представим полную электромеханическую систему в виде двух отдельных (парциальных) подсистем ЭП и МП.

На основании определений теории колебаний [5-6] положим координату двухмассовой ЭМС (рисунок 1)  $\phi_2=0$  и получим систему с одной степенью свободы – парциальную ЭП, её уравнение движения при общепринятых допущениях теории электропривода и записанное с использованием преобразования Лапласа имеет вид:

$$Q_{ЭП}(p) = T_{м1} T_э p^2 + T_{м1} (1 + K_3 K_t) p + K_{31} K_c = 0 \quad (2)$$

Для исследования общего случая колебательных процессов ЭП, динамические параметры электропривода должны быть таковы, чтобы соблюдалось соотношение  $T_{м1} < 4T_э$ , корни уравнения (2) являются тогда комплексно-сопряженными:  $p_{1,2} = -\alpha \pm j\Omega$ .

Для анализа запишем характеристическое уравнение (2) в канонической форме:

$$Q_1(p) = p^2 + 2\xi_d \Omega_{\text{Э}} p + \Omega_{\text{Э}}^2. \quad (3)$$

Сравнив характеристические уравнения (2) и (3) получим соотношения:

$$\Omega_{\text{Э}}^2 = K_{31}K_c / T_{M1}T_{\text{Э}}; \quad 2\xi_d \Omega_{\text{Э}} = (1 + K_3K_T) / T_{\text{Э}}. \quad (4)$$

Из соотношений (4) определяем собственно недемпфированную частоту электрической подсистемы и коэффициент демпфирования собственно электродвигателя:

$$\Omega_{\text{Э}} = \sqrt{K_{31}K_c / T_{M1}T_{\text{Э}}}; \quad \xi_d = 1/2 \cdot \sqrt{T_{M1} / K_{31}K_c T_{\text{Э}}} \cdot (1 + K_3K_T). \quad (5)$$

Действуя аналогичным образом, примем вторую координату ЭМС (рисунок 1)  $\varphi_1=0$  и получим систему с одной степенью свободы – парциальную МП, её уравнение движения, записанное с использованием преобразования Лапласа, имеет вид:

$$Q_{\text{МП}}(p) = \gamma / \Omega_{12}^2 p^2 + 1 = 0. \quad (6)$$

Корни уравнения (6) являются чисто мнимыми:  $p_{3,4} = -j\Omega$ .

Запишем характеристическое уравнение (6) в канонической форме:

$$Q_2(p) = p^2 + 2\xi_M \Omega_M p + \Omega_M^2. \quad (7)$$

При совместном рассмотрении уравнений (6) и (7) получим собственную частота механической подсистемы и коэффициент демпфирования МП:

$$\Omega_M = \Omega_{12} / \sqrt{\gamma}; \quad \xi_M = 0. \quad (8)$$

Связь процессов, протекающих в электрической и механической подсистемах полной ЭМС, характеризуется коэффициентом электромеханического взаимодействия [2]:

$$K_B = \Omega_{12}^2 / \Omega_{\text{Э}}^2 = T_{M1}T_{\text{Э}}\Omega_{12}^2 / K_{31}K_c. \quad (9)$$

На основе представленного способа разделения полной электромеханической системы на отдельные подсистемы мы получили возможность установить связь между свойствами полной ЭМС и свойствами составляющих ее отдельных частей, а именно ЭП и МП. Запишем характеристическое уравнение (1) в форме обобщенных показателей электромеханического взаимодействия парциальных ЭП и МП (5), (9):

$$Q(p) = \gamma K_B T_y^4 p^4 + 2\gamma \sqrt{K_B} \xi_d T_y^3 p^3 + \gamma (K_B + 1) T_y^2 p^2 + 2\gamma \sqrt{K_B} \xi_d T_y p + 1 = 0, \quad (10)$$

где  $T_y = 1/\Omega_{12}$  – постоянная времени упругих колебаний.

Предельное подавление упругих механических колебаний возникающих в электроприводе в процессе его работы достигается при электромеханическом взаимодействии и полной идентичности колебаний в электрической и механической подсистемах. Представим свободное движение полной электромеханической системы в виде произведения двух уравнений второго порядка, которые будут характеризовать свободное движение электрической и механической частей (11) взаимосвязанной ЭМС (12).

$$Q_{\text{ЭП}}(p) = (T_y^2 p^2 + 2\xi_{\text{Э}} T_y p + 1); \quad Q_{\text{МП}}(p) = (T_y^2 p^2 + 2\xi_M T_y p + 1) \quad (11)$$

$$Q_{\text{П}}(p) = Q_{\text{ЭП}}(p) \cdot Q_{\text{МП}}(p) \quad (12)$$

При совместном решении уравнений (10) и (12) получаем соотношения:

$$\begin{cases} \gamma K_B T_Y^4 = T_Y^4 \\ 2\gamma\sqrt{K_B}\xi_D T_Y^3 = 2T_Y^3(\xi_M + \xi_D) \end{cases} \begin{cases} \gamma T_Y^2(K_B + 1) = T_Y^2(2 + 4\xi_M\xi_D) \\ 2\gamma\sqrt{K_B}\xi_D T_Y = 2T_Y(\xi_M + \xi_D) \end{cases} \quad (13)$$

Если корни уравнений (11) имеют одинаковые вещественные и мнимые части, то демпфирование процессов в электрической и механической подсистемах будет одинаково и, следовательно, максимально. В этом случае будет равенство частот колебаний парциальных ЭП и МП ( $\Omega_D = \Omega_M$ ). Подстановка  $\xi_D = \xi_M$  в (13) дает нам соотношения для обобщенных показателей электромеханического взаимодействия при предельном демпфировании:

$$K_B^* = 1/\gamma; \xi_D^* = \sqrt{(\gamma-1)/\gamma} \quad (14)$$

Из соотношений (13-14) следует, что в ЭМС обеспечивается предельное демпфирование упругих колебаний в электрической и механической подсистемах с максимально возможным значением коэффициента демпфирования:

$$\xi^* = \xi_D = \xi_M = \sqrt{\gamma-1}/2 \quad (15)$$

Учитывая соотношения (11) и (15) уравнение (12) принимает вид:

$$Q(p) = (T_Y^2 p^2 + \sqrt{\gamma-1} T_Y p + 1)(T_Y^2 p^2 + \sqrt{\gamma-1} T_Y p + 1) \quad (16)$$

Приравняв уравнение (16) к нулю и решив его, получим кратные комплексно-сопряженные корни, которые имеют вид:

$$p_{1,2} = p_{3,4} = -(\sqrt{\gamma-1}/2T_Y) \pm j(\sqrt{5-\gamma}/2T_Y) = -\alpha \pm j\Omega_p \quad (17)$$

На основании корней (17) установим значения важных динамических показателей характеризующих колебательные процессы в электроприводе, при наличии упругих звеньев: логарифмический декремент затухания и колебательность ЭМС (18).

$$\lambda = 2\pi|\alpha/\Omega_p|, \lambda^* = 2\pi\sqrt{(\gamma-1)/(5-\gamma)}; \mu = |\Omega_p/\alpha|, \mu^* = \sqrt{(5-\gamma)/(\gamma-1)} \quad (18)$$

На основании численного метода решения характеристического уравнения (10) найдены корни при варьировании параметров и построены зависимости:  $\lambda=f(\xi_D, K_B)$ ,  $\mu=f(\xi_D, K_B)$ , которые подтверждают результаты анализа процессов электромеханического взаимодействия в системе модального регулирования и полученные соотношения (14) и (18).

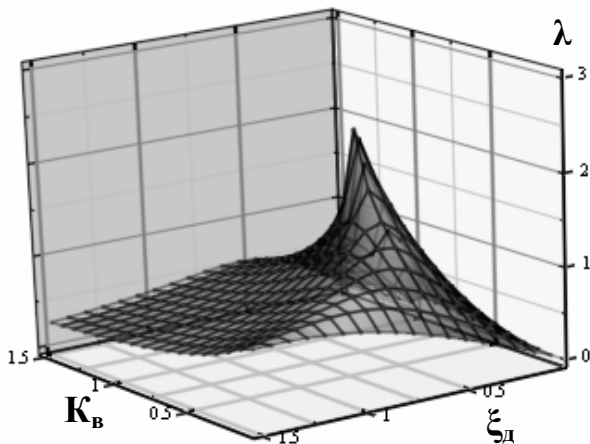


Рисунок 2 – Зависимость  $\lambda$  от  $\xi_D$  и  $K_B$

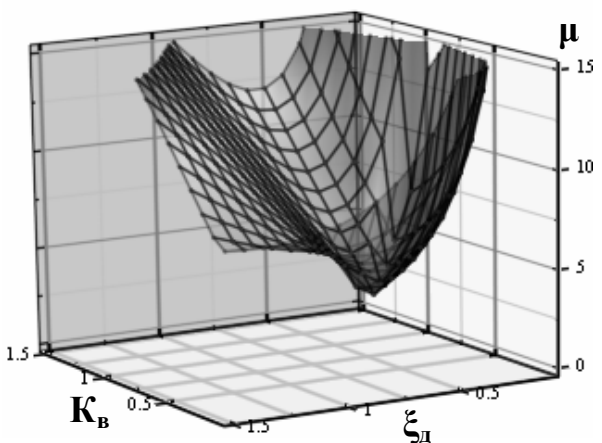


Рисунок 3 – Зависимость  $\mu$  от  $\xi_D$  и  $K_B$

Перейдем от обобщенных показателей электромеханического взаимодействия (14) к оптимальным коэффициентам обратных связей по току и скорости системы ТП-Д реализованной на принципе модального управления:

$$K_c^* = (\gamma T_{M1} T_9 \Omega_{12}^2) / K_{31}; K_T^* = (2T_9 \Omega_{12} \sqrt{\gamma-1} - 1) / K_3 \quad (19)$$

По полученным значениям коэффициентов (19) можно легко определить параметры системы ТП-Д, которые позволят добиться максимального демпфирования упругих колебаний в замкнутой электромеханической системе с минимальными потерями энергии. Зависимости (19) представляют собой обобщенные требования к конструкции упругой механической передачи машин с минимальной колебательностью процессов.

Проверим полученные соотношения для системы ТП-Д с параметрами:  $P_H=85$  кВт;  $U_H=220$  В;  $I_H=438$  А;  $n_H=750$  об/мин;  $\gamma=1,5$ ;  $\Omega_{12}=94,25$  с<sup>-1</sup>;  $R_{яц}=0,0336$  Ом;  $L_{яц}=1,62 \cdot 10^{-3}$  Гн;  $K\Phi_H=2,72$  Вс;  $T_3=0,048$  с;  $T_{M1}=0,027$  с;  $K_{тп}=73,17$ .

Составим математическую модель системы ТП-Д с модальным принципом управления, реализованную в среде MATLAB Simulink (Рисунок 6).

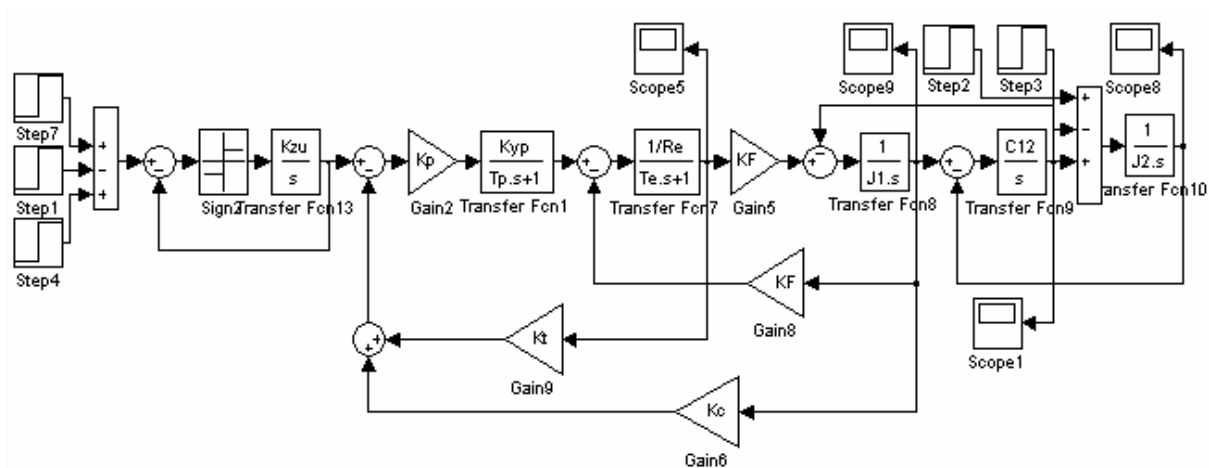


Рисунок 4 – Математическая модель системы ТП-Д в среде MATLAB Simulink

На основе математической модели промоделируем замкнутый цикл работы системы ТП – Д и приведем графики переходных процессов в электрической (ЭП) и механической (МП) подсистемах для основных координатам привода (рисунки 5-6).

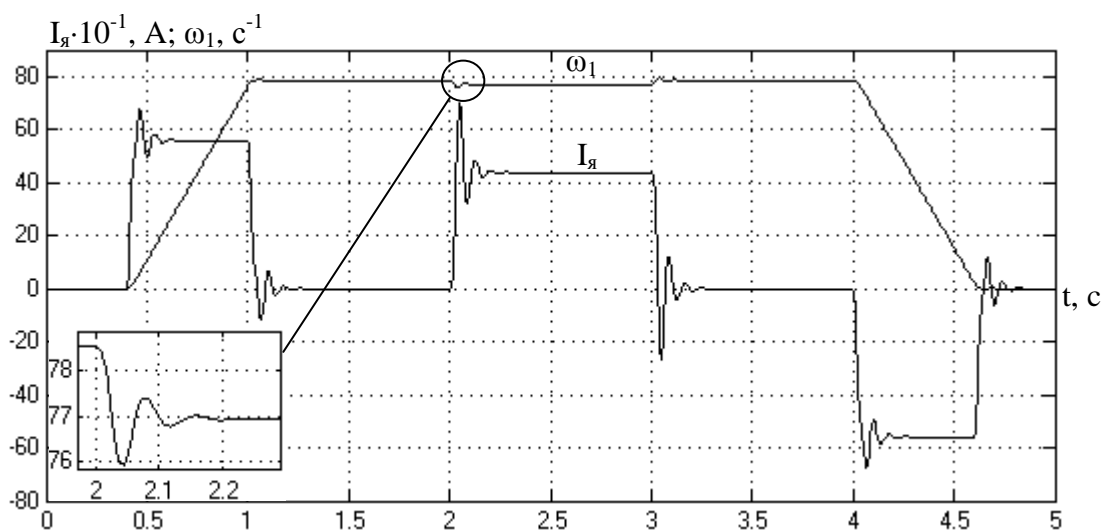


Рисунок 5 - Графики переходных процессов в ЭП системы ТП-Д

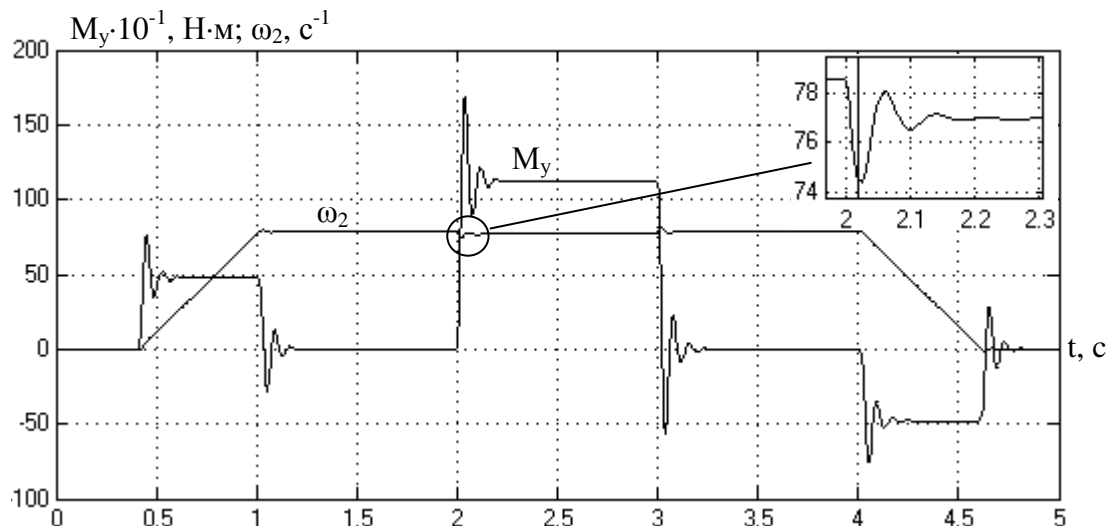


Рисунок 6 - Графики переходных процессов в МП системы ТП-Д

Из графиков переходных процессов в ЭП и МП видно, что оптимизированная система ТП-Д удовлетворяет высоким требованиям, предъявляемым технологическим процессом.

**Выводы.** Разработана методика определения оптимальных параметров двухмассовой электромеханической системы модального управления с целью достижения максимального электромеханического демпфирования упругих механических колебаний. Для подтверждения полученных соотношений составлена математическая модель ЭМС в среде Simulink, моделирование которой дает нам графики переходных процессов в электроприводе с максимальным подавлением упругих колебаний.

Предложенные настройки САУ позволяют уменьшить время переходных процессов; сократить потери энергии в динамических режимах; уменьшить динамические нагрузки и как следствие сократить простои на производстве из-за отказа механической части; снизить тепловые нагрузки на электродвигатель и управляемый преобразователь; исключить возможность возникновения резонансных режимов, перегрузок, развития усталостных явлений, отказов; увеличить срок службы оборудования; повысить производительность, качество и надежность технологических машин.

### Литература

1. Ключев В.И., Жильцов Л.В, Калашников Ю.Т. Состояние и перспективы развития теории электропривода с упругими механическими связями. // Электричество. – 1981. – №7. – С.28-32.
2. Земляков В.Д., Задорожний Н.А. О демпфировании электроприводом постоянного тока упругих электромеханических колебаний. – Изв. вузов. Электромеханика. – 1984. – №5. – С.92-98.
3. Пушкин А.А., Тимошенко А.В. Оптимизация параметров электроприводов прокатных станов с целью улучшения качества динамических процессов // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – 2008. – Т.1, №3. – С. 33-38.
4. Пушкин А.А. Определение путей достижения минимума колебательности в электроприводе с упругими связями // Электротехника и электромеханика: материалы Всеукраинской научно-технической конференции студентов, аспирантов, молодых ученых с международным участием. – Николаев: НУК, 2007 – С.77-82.
5. Стрелков С.П. Введение в теорию колебаний. – М.: Наука, 1964 – 440с.
6. Мандельштам Л.И. Лекции по теории колебаний. – М.: Наука, 1972. – 452с.