

Б.И. КУЗНЕЦОВ, д-р техн. наук, проф., зав. отделом, НТЦ МТО
НАН Украины, Харьков

Т.Б. НИКИТИНА, канд. техн. наук, докторант, НТУ "ХПИ", Харьков

А.В. ВОЛОШКО, аспирант, НТЦ МТО НАН Украины, Харьков

БУАКЛИН МОХАММЕД АЛИ, аспирант, НТУ "ХПИ", Харьков

СИНТЕЗ РОБАСТНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО НАВЕДЕНИЯ

Розроблено метод синтезу робастного керування електроприводом горизонтального наведення з урахуванням пружних елементів як дискретно-континуальним об'єктом. Наведено приклад динамічних характеристик синтезованої системи.

Разработан метод синтеза робастного управления электроприводом горизонтального наведения с учетом упругих элементов как дискретно-континуальным объектом. Приведен пример динамических характеристик синтезированной системы.

Введение. Многие объекты управления представляют собой протяженные конструкции, связывающие исполнительный двигатель с рабочим органом. Это, в частности, касается стрел подъемных кранов, рук антропоморфных роботов, стволов орудий и т.д. При управлении такими протяженными объектами необходимо учитывать собственные механические колебания, обусловленные упругими свойствами этих протяженных объектов управления.

Анализ последних достижений и публикаций. В работах [1-7] рассмотрены вопросы параметрического синтеза систем наведения и стабилизации. Однако в этих системах используется классическая структура регуляторов с жесткими обратными связями по сигналам с гироскопических датчиков углов и угловых скоростей, что ограничивает возможности получения высокой точности работы системы.

Цель работы. Целью данной работы является повышение точности работы системы наведения и стабилизации за счет применения робастного регулятора. Задачей статьи является синтез и исследование динамических характеристик робастной системы наведения и стабилизации с учетом упругости объекта управления.

Постановка проблемы. Рассмотрим в качестве примера систему управления дискретно-континуальным объектом управления, следуя работе [3], схема которой показана на рис. 1. Требуемое угловое положение

оси канала ствола задается с помощью пульта наведения (ПН) воздействием на электромагниты наведения (ЭН) с помощью которых рамка гироскопического датчика угла (ГДУ) устанавливается в требуемое направление, которое контролируется с помощью главного зеркала прицела. Гироскопический датчик угла установлен непосредственно на башне (Б), что позволяет непрерывно измерять угловое отклонение башни от заданного направления на цель.

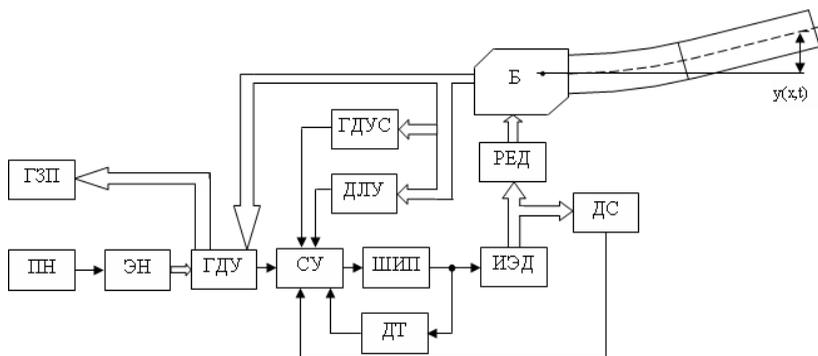


Рис. 1. Схема системы управления дискретно-континуальным объектом управления

Объект управления – башня (Б) приводится во вращение от исполнительного электродвигателя (ИЭД) через редуктор (РЕД). Исполнительный электродвигатель является высокомоментным двигателем постоянного тока, якорная обмотка которого питается от широтно-импульсного преобразователя (ШИП), входное напряжение которого формируется с помощью системы управления (СУ). На входы системы управления подаются сигналы: с выхода гироскопического датчика угла, пропорционального углу рассогласования между заданным направлением и фактическим направлением башни; с выхода гироскопического датчика угловой скорости (ГДУС), пропорционального угловой скорости вращения башни; с выхода датчика линейных ускорений (ДЛУ) пропорционального угловому ускорению башни; с выхода датчика скорости (ДС), пропорционального скорости вращения исполнительного электродвигателя и с выхода датчика тока (ДТ), пропорционального току якорной цепи исполнительного электродвигателя.

Башня танка совместно с орудием является объектом регулирования системы стабилизации вооружения в горизонтальной плоскости. Возмущающими моментами, действующими на башню является суммарный момент инерции башни и связанных с ней подвижных механиз-

мов, суммарный момент трения, а также возмущающий момент, обусловленный неуравновешенностью башни относительно ее оси вращения, т.к. в отличие от орудия, башня танка, вследствие смещения центра масс относительно оси вращения башни в сторону орудия, всегда имеет значительную неуравновешенность. Наличие такой неуравновешенности приводит к возникновению целого ряда возмущающих моментов при движении танка и колебаниях его корпуса. Горизонтальные угловые колебания корпуса обусловлены изменениями направления движения, а также неравномерностью натяжения гусеничных цепей и состоянием грунта на трассе движения, что порождает соответственно низкочастотные и высокочастотные составляющие угловых колебаний башни, характер которых в значительной степени определяется манерой вождения танка. Интенсивность горизонтальных угловых колебаний в значительной мере определяет точность работы системы стабилизации вооружения в горизонтальной плоскости. В частности, при движении по твердому промерзшему грунту в зимних условиях интенсивность горизонтальных угловых колебаний может возрасти более чем в два раза [8].

Рассмотрим математическую модель объекта управления системы наведения и стабилизации в горизонтальной плоскости следуя работе [1]. Представим объект управления в виде твердого тела – и упругого элемента – как это показано на рис. 1. Помимо вращения относительно оси, оно совершает упругие колебания. Обозначим через $\gamma(t)$ угол поворота жесткого тела в инерциальной системе координат, $y(x,t)$ – отклонение точек стержня от недеформированного состояния.

Предположим, что управление осуществляется с помощью стабилизирующего момента $M_{c0}(t)$, приложенного к основному жесткому телу. Возмущающий момент $M_{в0}(t)$ действует также относительно этой оси поворота основного жесткого тела.

Тогда уравнение движения башни относительно оси может быть записано в следующем виде [1]:

$$I_0 \ddot{\phi}(t) - \int_r^{r+l} m_1(x) \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} dx = M_{c0}(t) + M_{в0}(t).$$

Это уравнение описывает свободное движение дискретно-континуального объекта управления, в котором I_c является характеристикой дискретно-континуального объекта как твердого тела, а $m_1(x)$ характеризует взаимное влияние движений жесткого модуля и колебаний упругих элементов. Функция $y(x,t)$ удовлетворяет уравнению колебаний упругой балки

$$m_1(x)\ddot{\varphi}(t) + m(x)\frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} + EI(x)\frac{\partial^4 y(x,t)}{\partial x^4} + \xi EI(x)\frac{\partial^5 y(x,t)}{\partial x^4 \partial t} = F_0(x,t),$$

где $EI(x)$ – изгибная жесткость ствола; ξ – коэффициент внутреннего демпфирования материала ствола; $F(x,t)$ – распределенное по длине ствола внешнее возмущение, обусловленное вертикальными колебаниями оси цапф орудия при движении танка по пересеченной местности.

Представим функцию $y(x,t)$ в виде следующего разложения

$$y(x,t) = \sum_{i=1}^n \gamma_i(t) T_i(t),$$

где n – число учитываемых форм упругих колебаний ствола. Тогда получим следующие уравнения, описывающие движение дискретно – континуального объекта под действием стабилизирующего момента $M_{c0}(t)$, возмущающего момента $M_{в0}(t)$, а также распределенной по длине ствола силы $F_0(x,t)$, вызванной горизонтальными колебаниями подрессоренной части танка

$$I_0 \ddot{\varphi}(t) - \sum_{i=1}^n \ddot{T}_i(t) \int_r^{r+l} m_1(x) \gamma_i(x) dx = M_{c0}(t) + M_{в0}(t);$$

$$m_1(x) \ddot{\varphi}(t) + m(x) \sum_{i=1}^n \gamma_i(x) \ddot{T}_i(t) + EI(x) \sum_{i=1}^n \gamma_i^{IV}(x) T_i(t) + \xi EI(x) \sum_{i=1}^n \gamma_i^{IV}(x) \dot{T}_i(x) = F(x,t)$$

Учитывая только первую основную форму упругих колебаний, функцию $y(x,t)$ представим в виде

$$y(x,t) = \gamma_0(x) T_0(t).$$

Тогда уравнения динамики движения дискретно-континуального объекта управления примут следующий вид

$$\begin{aligned} I_0 \ddot{\varphi}(t) - a_0 \ddot{T}_0(t) &= M_{c0}(t) + M_{в0}(t); \\ a_0 \ddot{\varphi}(t) + c_0 \ddot{T}_0(t) + \xi b_0 \dot{T}_0(t) + b_0 T_0(t) &= f_0(t); \end{aligned}$$

Электропривод горизонтального наведения содержит высоко моментный двигатель постоянного тока независимого возбуждения, якорная цепь которого питается от широтно-импульсного преобразователя. Для упрощения математической модели электропривода горизонтально наведения предположим, что он содержит внутренний контур тока. В контуре тока с помощью пропорционально-интегрального регулятора компенсируется постоянная времени электромагнитных процессов, происходящих в якорной цепи двигателя, а динамика замкнутого контура

тока, настроенного на модульный оптимум описывается передаточной функцией второго порядка

$$W_{\text{зт}}(p) = \frac{1}{T_0^2 p^2 + 2\xi T_0 p + 1}$$

Эквивалентная постоянная времени T_0 которого определяется малой некомпенсируемой постоянной времени $T_{\mu m}$ контура тока, так что

$$T_0 = \sqrt{2} T_{\mu m},$$

а коэффициент демпфирования $\xi = \sqrt{2}/2$. Так как в двигателе постоянного тока независимого возбуждения момент двигателя $M_{\text{д}}$ связан с током якорной цепи двигателя $I_{\text{я}}$ соотношением

$$M_{\text{д}}(t) = K\Phi I_{\text{я}}(t),$$

где K – конструктивная постоянная двигателя, Φ – магнитный поток двигателя, то динамика изменения момента двигателя $M_{\text{д}}$ описывается точно такой же передаточной функцией и отличается лишь коэффициентом передачи замкнутого контура регулирования момента. Тогда уравнение динамики исполнительного органа относительно момента стабилизации $M_{\text{с0}}$ запишем в следующем виде

$$T_{\text{м}}^2 \ddot{M}_{\text{с0}}(t) + 2\xi_{\text{м}} T_{\text{м}} \dot{M}_{\text{с0}}(t) + M_{\text{с0}}(t) = K_{\text{м}} u(t),$$

где $T_{\text{м}}$, $\xi_{\text{м}}$, $K_{\text{м}}$ – соответственно постоянная времени, коэффициент демпфирования и коэффициент усиления замкнутого контура момента с учетом коэффициента передачи редуктора электромеханического исполнительного механизма в канале горизонтального наведения.

Заметим, что на большинстве отечественных танках используется электромашинный усилитель мощности, однако при модернизации танков такой усилитель, как правило, заменяется на широтно-импульсный преобразователь.

Введем следующие компоненты вектора состояния: угол $\varphi(t)$ отклонения между осью канала ствола и направлением на цель и его производную $\dot{\varphi}(t)$, значение функции $T_0(t)$ в представлении функции $y(x, t)$ характеризующей отклонение точек оси канала ствола от его недеформируемого состояния, а также производную этой функции $\dot{T}_0(t)$, момент стабилизации $M_{\text{с0}}(t)$ башни с помощью исполнительного электродвигателя и его производную $\dot{M}_{\text{с0}}(t)$. При этом вектор состояния примет следующий вид

$$\bar{X}(t) = \{\varphi(t), \dot{\varphi}(t), T_0(t), \dot{T}_0(t), M_{c0}(t), \dot{M}_{c0}(t)\}.$$

Тогда уравнения возмущенного движения дискретно-континуального объекта стабилизации совместно с уравнением исполнительного электропривода с гидроцилиндром и интегратором, на котором реализуется астатический регулятор, эквивалентны системе дифференциальных уравнений 11-го порядка

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= x_2(t); \\ \dot{x}_2(t) &= \frac{c_0}{I_0 c_0} + a_0^2 x_5(t) - \frac{\xi a_0 b_0}{\Delta} x_4(t) - \frac{a_0 b_0}{\Delta} x_3(t); \\ \dot{x}_3(t) &= x_4(t); \\ \dot{x}_4(t) &= -\frac{\xi I_0 b_0}{\Delta} x_4(t) - \frac{I_0 b_0}{\Delta} x_3(t) - \frac{a_0}{\Delta} x_5(t); \\ \dot{x}_5(t) &= x_6(t); \\ \dot{x}_6(t) &= -\frac{1}{T_M^2} x_5(t) - \frac{2\xi_M}{T_M} x_6(t) + \frac{K_M}{T_M^2} u(t); \end{aligned}$$

Здесь введено обозначение $\Delta = I_0 c_0 + a_0^2$.

Тогда в уравнении состояния возмущенного движения дискретно-континуального объекта стабилизации совместно с уравнением исполнительного электропривода и интегратором, на котором реализуется астатический регулятор, матрица состояния примет следующий вид

$$A = \begin{pmatrix} 1 & & & & & \\ & -\frac{a_0 b_0}{\Delta} & -\frac{\xi a_0 b_0}{\Delta} & \frac{c_0}{\Delta} & & \\ & & 1 & & & \\ & -\frac{I_0 b_0}{\Delta} & -\frac{\xi I_0 b_0}{\Delta} & -\frac{a_0}{\Delta} & & \\ & & & & 1 & \\ & & & & -\frac{1}{T_M^2} & -\frac{2\xi_M}{T_M} \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} \\ \\ \\ \\ \\ \frac{K_M}{T_M^2} \end{pmatrix}.$$

Заметим, что эта система уравнений является упрощенной, так как в ней не учитывается собственная динамика гироскопических датчиков угла и угловой скорости, а также учитывается лишь первый тон упругих колебаний ствола орудия.

Метод решения. Рассмотрим задачу робастной оптимизации системы наведения и стабилизации в канале горизонтального наведения. Для построения астатического робастного регулятора [9] введем инте-

гратор с переменной состояния $Z(t)$, на вход которого подадим разность между заданным значением угла направления на цель $\varphi_3(t)$ и фактическим значением угла направления орудия $\varphi(t)$, так что уравнение состояния интегратора примет следующий вид

$$\dot{z}(t) = \varphi_3(t) - \varphi(t).$$

Построим робастный астатический регулятор для этого объекта управления [10-14]. Представим эту систему дифференциальных уравнений в стандартной форме, принятой в теории H^∞ [9-13]

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= A\bar{x}(t) + B_1\bar{w}(t) + B_2\bar{u}(t), \\ \bar{z}(t) &= C_1\bar{x}(t) + D_{11}\bar{w}(t) + D_{12}\bar{u}(t), \\ \bar{y}(t) &= C_2\bar{x}(t) + D_{21}\bar{w} + D_{22}\bar{u}(t).\end{aligned}$$

Синтез робастного регулятора и робастного наблюдателя сводится к определению такого динамического блока, заданного матрицами A_p , B_p , C_p , входом которого является измеряемый вектор исходной системы $\bar{y}(t)$, а выходом является вектор управления $\bar{u}(t)$ исходной системы

$$\begin{aligned}\frac{d\bar{x}_p}{dt} &= A_p\bar{x}_p + B_p\bar{y}; \\ \bar{u} &= C_p\bar{x}_p; \\ A_p &= A - B_2B_2^T X_\infty + [I - \gamma^{-2}Y_\infty X_\infty]^{-1} Y_\infty C_2^T C_2 + \gamma^{-2} B_1 B_1^T X_\infty; \\ B_p &= [I - \gamma^{-2}Y_\infty X_\infty]^{-1} Y_\infty C_2^T; \\ C_p &= -B_2^T X_\infty,\end{aligned}$$

где X_∞ и Y_∞ являются решением обобщенных алгебраических уравнений Риккати по управлению и фильтрации

$$\begin{aligned}A^T X_\infty + X_\infty A - X_\infty [B_2 B_2^T - \gamma^{-2} B_1 B_1^T] X_\infty + C_1 C_1^T &= 0; \\ A Y_\infty + Y_\infty A^T - Y_\infty [C_2^T C_2 - \gamma^{-2} C_1^T C_1] Y_\infty + B_1 B_1^T &= 0.\end{aligned}$$

Результаты моделирования. В вектор контролируемых параметров $\bar{z}(t)$ включим угол $\varphi(t)$ и скорость изменения угла $\dot{\varphi}(t)$ отклонения направления оси ствола от направления на цель, отклонение $T_0(t)$ и скорость отклонения $\dot{T}_0(t)$ оси ствола от недеформируемого состояния, выходное напряжение интегратора $z(t)$ и управляющее напряжение $u(t)$ электрогидравлического усилителя.

В вектор измеряемых переменных включим выходные напряжения гироскопических датчиков угла $\varphi(t)$ и угловой скорости $\dot{\varphi}(t)$, а также выходное напряжение интегратора измерение с помехами $f_i(t)$ так, что

$$\varphi_u = \varphi + f_\varphi, \dot{\varphi}_u = \dot{\varphi} + f_{\dot{\varphi}}, z_u = z + f_z$$

В вектор внешних возмущений $\vec{w}(t)$ включим заданное значение углового положения цели φ_3 , входной сигнал v_x формирующего фильтра продольно – угловых перемещений корпуса танка, вызванных рельефом местности, а также продольно – угловых колебаний подрессоренной части танка относительно неподдресоренной, входной сигнал v_f формирующего фильтры ускорения корпуса танка относительно его вертикальной оси, приложенного к распределенным массам ствола и вызывающего упругие колебания, помехи f_φ , $f_{\dot{\varphi}}$ измерения углов φ_u угловых скоростей $\dot{\varphi}$ отклонения направления ствола от направления на цель, а также помехи измерения f_z выходного напряжения интегратора z .

В качестве примера на рис. 2-7 показаны переходные процессы компонент вектора состояния замкнутой системы: угла $\varphi(t)$ отклонения между осью канала ствола и направлением на цель и его производной $\dot{\varphi}(t)$, значение функции $T_0(t)$ в представлении функции $y(x,t)$, характеризующей отклонение точек оси канала ствола от его недеформируемого состояния и момента стабилизации $M_{c0}(t)$ башни с помощью электропривода при отработке системой заданного рассогласования $\Delta\varphi = 0,1$ между направлением башни и направлением на цель.

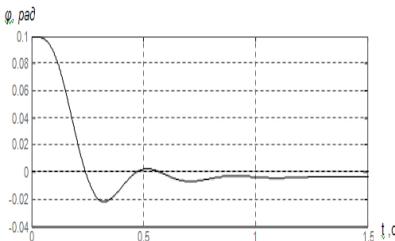


Рис. 2. Переходной процесс угла $\varphi(t)$ горизонтального наведения при отработке системой рассогласования $\Delta\varphi = 0,1$

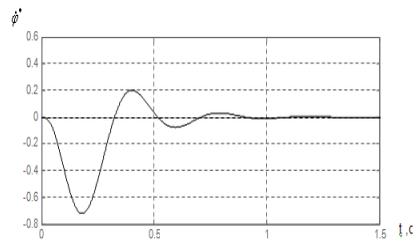


Рис. 3. Переходной процесс производной угла $\dot{\varphi}(t)$ отклонения горизонтального наведения при отработке системой рассогласования $\Delta\varphi = 0,1$

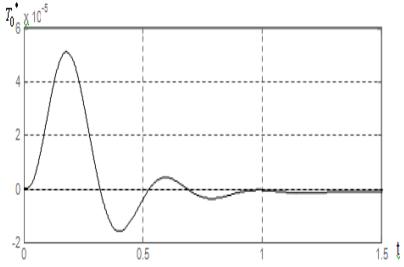


Рис. 4. Переходной процесс функции $T_0(t)$ горизонтального наведения при обработке системой рассогласования $\Delta\varphi = 0,1$

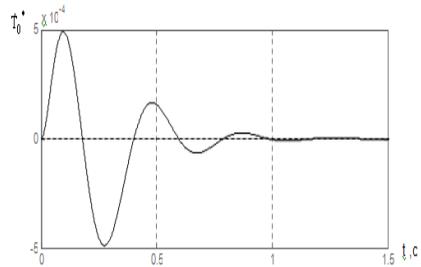


Рис. 5. Переходной процесс производной функции $\dot{T}_0(t)$ горизонтального наведения при обработке системой рассогласования $\Delta\varphi = 0,1$

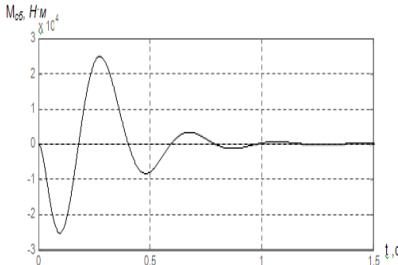


Рис. 6. Переходной процесс момента стабилизации $M_{c\sigma}(t)$ башни горизонтального наведения при обработке системой рассогласования $\Delta\varphi = 0,1$

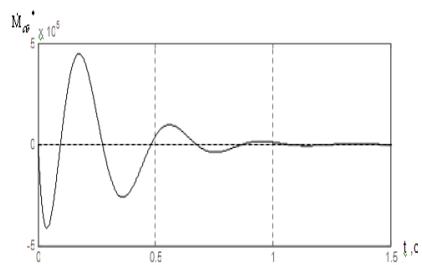


Рис. 7. Переходной процесс производной момента стабилизации $\dot{M}_{c\sigma}(t)$ башни горизонтального наведения при обработке системой рассогласования $\Delta\varphi = 0,1$

Заметим, что результаты синтеза робастного управления в значительной степени определяются вектором контролируемых параметров $\vec{z}(t)$. При этом роль весовых матриц играют B_1 и D_{12} . В частности, быстродействие системы в значительной мере определяется отношением значений элементов матрицы B_1 к значениям элементов матрицы D_{12} . Чем выше это отношение, тем меньший "вес" управления $u(t)$ в критерии качества, определяемого вектором контролируемых параметров $\vec{z}(t)$, а, следовательно, и тем больше быстродействие системы управления.

Естественно, что за повышение быстродействия приходится "платить" более энергичным управлением – чем больше быстродействие системы, тем требуется большее значение стабилизирующего момента для приведения системы в согласованное положение. С другой сторо-

ны, для реализации робастного управления, по полному вектору состояния строится робастный наблюдатель, с помощью которого восстанавливается весь вектор состояния системы $\bar{x}(t)$ по измеряемому вектору выхода системы $\bar{y}(t)$. Быстродействие наблюдателя в основном определяется отношением элементов матриц B_1 и C_2 к элементам матрицы D_{21} . Это отношение характеризует фактическое отношение сигнал/шум измеряемого вектора выхода системы $\bar{y}(t)$. Чем выше это отношение, тем большим быстродействием и, соответственно, более широкой полосой пропускания обладает наблюдатель. Использование такого быстродействующего наблюдателя по сравнению с быстродействием исходной системы позволяет реализовать практически те же динамические характеристики в системе, что и при замыкании системы по полному вектору состояния. Если полоса пропускания наблюдателя сравнима с полосой пропускания исходной системы, то отношение сигнал/шум в измеряемом векторе $\bar{y}(t)$ невелико и, следовательно, вектор состояния исходной системы восстанавливается с помощью такого наблюдателя с большей погрешностью.

Заключение. Применение робастных регуляторов позволило получить приемлемые показатели качества для стабилизатора как дискретно-континуального объекта управления с учетом упругих колебаний. Дальнейшее повышение точности стабилизации сдерживается энергетическими ограничениями исполнительного электродвигателя и информационными ограничениями измерителей.

Список литературы: 1. Александров Е.Е., Богаенко И.Н., Кузнецов Б.И. Параметрический синтез систем стабилизации танкового вооружения. – К.: Техніка, 1997. – 112 с. 2. Александров Е.Е., Кузнецов Б.И., Радиевский А.Е. Оптимизация электромеханических систем с упругими элементами. – Харків: ІМІС, 1995. – 304 с. 3. Александров Е.Е., Александрова И.Е., Богаенко И.Н. Инвариантный стабилизатор основного вооружения танка // Артиллерийское и стрелковое вооружение. Киев. – 2006. – № 3. – С. 30-34. 4. Александров Є.Є., Богатыренко К.І., Беляев С.М. Параметричний синтез автоматизованого електропривода танкової башти // Електромашинобудування та електрообладнання. Міжвідомчий науково-технічний збірник. – Київ: Техніка, 2006. – Вип. 66. – С.195-196. 5. Александров Е.Е., Александрова И.Е., Костяник И.В. Параметрический синтез стабилизатора переменной структуры дискретно-континуального объекта // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск. Силова електроніка та енергоефективність. – Ч. 4. – Київ: 2006. – С. 65-68. 6. Богатыренко К.И., Беляев С.Н., Савчук А.О. Инвариантный танковый стабилизатор основного вооружения. Механіка та машинобудування // Науково-технічний журнал. – Харків: НТУ "ХПИ", 2006. – № 1. – С. 229-232. 7. Нефедов

А.В., Рудник Н.П. Определение параметров передаточных функций модели стабилизатора для тренажера боевого отделения танка. Механіка та машинобудування // Науково-технічний журнал. – Харків: НТУ "ХПІ", 2004. – № 2 – С. 185-192. **8.** *Корнеев В.В., Кузнецов М.И., Кузьмин Л.П.* Основы автоматизации и танковые автоматические системы. – М.: АБТВ, 1976. – 546 с. **9.** *Кузнецов Б.И., Никитина Т.Б., Коломиец В.В.* Синтез электромеханических систем со сложными кинематическими цепями. – Харьков, УИПА, 2005. – 511 с. **10.** *Khargonekar P., Petersen I., Rotea M.* H^∞ optimal control with state feedback // IEEE Trans. Automat. Contr., AC – 33. – 1988. – PP. 783-786. **11.** *J. Doyle, K. Glover, P. Khargonekar, B. Francis.* State – space solutions to standard H^2 and H^∞ control problems // IEEE Trans. Automat. Contr., AC – 34, no 8. – Aug. 1989 – PP. 831-847. **12.** *J.C. Doyle.* Synthesis of Robust Controllers and Filters // Proc. IEEE Conf. On Decision and Control, San Antonio, TX, December 14-16, 1983. **13.** *M.G. Safonov, R.Y. Chiang, H. Flashner.* H^∞ Control Synthesis for a Large Space Structure // AIAAJ. Guidance, Control and Dynamics, 14, 3 – May/June 1991. – PP. 513-520. **14.** *G. Stein.* Lecture Notes, Tutorial Workshop on H^∞ Control Theory // Los Angeles, CA, Dec. 7-8, 1987.

Поступила в редколлегию 15.01.2009