

Харьковский государственный политехнический университет

На правах рукописи

Абделькарим Махд Бадави Эльджабали

**ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ СИСТЕМ АВТОМАТИКИ
ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ С УПРУГИМИ
ЭЛЕМЕНТАМИ**

05.02.06 - автоматы в машиностроении

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Харьков - 1994 г



00754084 (S)

Работа выполнена на кафедре "Колесные и гусеничные машины"
Харьковского государственного политехнического университета

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Александров Евгений Евгеньевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Кузнецов Борис Иванович,
кандидат технических наук,
Калногуз Анатолий Николаевич

Ведущая организация : Институт машин и систем НАН Украины и
Минмашпрома Украины, г.Харьков

Защита состоится "___" _____ 1994 г. в ___ часов
на заседании специализированного совета Д 02.09.01 в Харьковском
государственном политехническом университете по адресу:
(310002,г.Харьков-2,ГСП,ул.Фрунзе,21).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Харьковского
государственного политехнического университета.

Автореферат разослан "___" _____ 1994 г.

Ученый секретарь
специализированного
ученого совета

Узунян М.Д.

Общая характеристика работы

Дискретно-континуальные объекты (ДКО) получили широкое распространение в современной технике. Под ДКО будет понимать динамическую систему любой физической природы, возмущенное движение которой описывается системой дифференциальных уравнений, часть из которых является обыкновенными дифференциальными уравнениями, а часть - дифференциальными уравнениями в частных производных. К таким системам относятся самолеты с упругими крыльями, космические аппараты с упругими элементами солнечных батарей, турбины с упругими лопатками, танковые орудия, стволы которых совершают упругие колебания и др.

Обычно, основной задачей системы стабилизации ДКО является поддержание ориентации такого объекта относительно заданного направления с высокой степенью точности. Известно, что обеспечение высокой точности стабилизации объекта как абсолютно жесткого тела приводит к повышенным амплитудам колебаний упругих частей объекта и наоборот, малые отклонения упругих частей объекта являются следствием замедленных реакций системы стабилизации на возмущенное движение объекта. Современные системы стабилизации летательных аппаратов, танкового вооружения содержат в качестве чувствительных элементов гироскопические датчики углов и угловых скоростей, позволяющие оценить отклонения возмущенного движения объекта стабилизации от требуемого положения как жесткого тела. Колебания упругих элементов при синтезе систем стабилизации как правило не учитываются, вместе с тем, учет упругих колебаний элементов ДКО необходим для построения эффективной системы стабилизации.

Целью диссертационной работы является разработка математических моделей дискретно-континуальных объектов и методики синтеза оптимальных систем стабилизации таких объектов.

Общая методика исследования. В работе использован комплексный подход включающий в себя теоретические и экспериментальные исследования. В основе теоретических исследований были положены методы аналитической механики, теории колебания упругих систем, теории электропривода и методов современной теории автоматического управления.

Экспериментальные исследования включали физическое моделирование процессов стабилизации в реальных условиях,

измерение параметров, характеризующих качества процессов стабилизации, а также обработку результатов эксперимента.

Научная новизна. На основе результатов теоретических и экспериментальных исследований уточнена математическая модель дискретно-континуального объекта стабилизации, выработаны требования к качеству работы системы стабилизации, а также произведена формализация этих требований и представление их в виде требования минимума аддитивного интегрального квадратичного функционала, произведена процедура синтеза системы стабилизации, состоящая в выборе оптимальных значений параметров системы стабилизации, а также весовых коэффициентов аддитивного функционала качества.

Практическая ценность состоит в создании комплекта программной документации, реализующей процедуру параметрического синтеза оптимальных систем стабилизации дискретно-континуального объекта в условиях непрерывного воздействия на объект стабилизации случайных внешних воздействий.

Реализация работы в промышленности.

Результаты работы внедрены в Харьковском конструкторском бюро по машиностроению им. А.А.Морозова, в научно-производственном объединении "Хартрон" и в научно-исследовательском институте машин и систем АН Украины при проведении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

Основные положения выносимые на защиту.

- математическая модель объекта стабилизации танкового вооружения с учетом упругих колебаний ствола орудия;

- формализация требований предъявляемых к системе стабилизации дискретно-континуального объекта и представление их в виде требования минимума аддитивного квадратичного интегрального функционала;

- постановка проблемы параметрического синтеза системы стабилизации с учетом выбора весовых коэффициентов аддитивного функционала качества;

- разработка метода решения задачи синтеза системы стабилизации для дискретно-континуального объекта;

- разработка метода выбора весовых коэффициентов аддитивного функционала качества;

- алгоритмы и программы, реализующие разработанные методы;

- экспериментальное сравнение эффективности предлагаемой системы стабилизации с серийной системой.

Апробация работы: материалы диссертации докладывались на ежегодных научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава ХГПУ в 1991 - 1994 г.г., на I-й Всесоюзной НТК "Координирующее управление в технологических системах", г. Алушта, 1992 г.; на международной школе "Проектирование автоматизированных систем контроля и управления сложными объектами", г. Туапсе, 1992 г.; на международной НТК "Micro CAD - SYSTEM 93", г. Харьков, 1993 г.; на международной НТК "ФОВС - 93", г. Киев - Харьков, 1993 г. "

Публикации. По материалам диссертации имеется 6 публикаций, отражающих основное содержание диссертации.

Структура и объем работы: Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов и рекомендаций и библиографического списка основной использованной литературы и приложений.

Основной объем работы составляет 98 страниц, 19 рисунков, 3 таблицы, 87 наименований использованных источников, общий объем работы составит 124 стр.

Предлагаемая работа представляет собой научное обобщение и решение важной научно-технической задачи синтеза оптимальных систем стабилизации дискретно-континуальных объектов.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы исследования и кратко сформулированы основные положения и научные результаты диссертации, приведены сведения об апробации и практической ценности работы и результаты реализации в промышленности.

В первой главе сформулирована задача исследования, состоящая в отыскании оптимальных значений параметров систем стабилизации дискретно-континуальных объектов (ДКО).

Рассмотрим ДКО, представляющий собой твердое тело с закрепленными на нем упругим элементом, представленном на рис. 1.

Введем следующие системы координат: $0X_0Y_0Z_0$ - инерциальная система координат с началом в центре масс ДКО, $0X_1, 0Y_1, 0Z_1$ - связанная с твердым телом система координат $0X, Y, Z$ - вспомогательная система координат для описания колебаний упругих элементов. Начало координат вспомогательной системы совпадает с точкой заделки упругого элемента, ось 0_1X направлена по оси недеформированного упругого

элемента, а ось O_1Y_1 параллельна оси OY_1 . Предположим, что управляемый объект совершает колебательное движение вокруг оси OZ_0 , а упругий элемент располагается и совершает колебания в плоскости OX_1Y_1 .

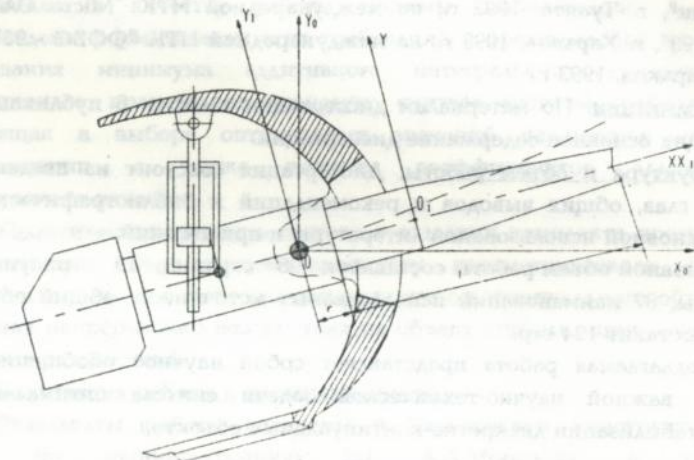


Рис.1 Дискретно-континуальный объект управления

Обозначим через $\gamma(t)$ угол поворота жесткого тела в инерциальной системе координат, $Y(x, t)$ - отклонение точек стержня от недеформированного состояния.

Количественно точность стабилизации оценивают с помощью интегрального квадратичного функционала. Для ДКО такой функционал представляет собой линейную комбинацию двух функционалов. Первый функционал количественно оценивает точность стабилизации ДКО как твердого тела без учета колебаний упругой части объекта, другой функционал количественно оценивает точность стабилизации ДКО как упругого тела:

$$I = I_1 + I_2, \quad (1)$$

где

$$I_1 = M \int_0^T [\alpha \gamma^2(t) + b \dot{\gamma}^2(t)] dt, \quad (2)$$

$$I_2 = M \int_0^{Tl} \left[cy^2(x, t) + d \left(\frac{\partial y(x, t)}{\partial t} \right)^2 \right] dx dt; \quad (3)$$

где a, b, c, d - весовые коэффициенты подлежащие определению, M - символ математического ожидания.

Функционал (1) количественно оценивает качество процессов стабилизации: чем меньше значение (1), тем выше качество процесса стабилизации.

Рассмотрим закон стабилизации ДКО в виде

$$U(t) = K_{\varphi} \varphi(t) + K_{\dot{\varphi}} \dot{\varphi}(t),$$

где $K_{\varphi}, K_{\dot{\varphi}}$ - коэффициенты усиления системы стабилизации, подлежащие определению.

Требуется выбрать такие значения коэффициентов усиления $K_{\varphi}, K_{\dot{\varphi}}$, чтобы в процессе стабилизируемого движения ДКО достигал минимума функционал (1).

Сформулированная задача относится к классу задач параметрической оптимизации стабилизируемых систем.

Известно, что для решения задач оптимизации динамических систем, т.е. систем, возмущенное движение которых описывается дифференциальными уравнениями (обыкновенными или в частных производных), необходимо знание математической модели объектов стабилизации. Составление дифференциальных уравнений, описывающих возмущенное движение объекта стабилизации не вызывает принципиальных затруднений. Используя уравнения Лагранжа второго рода, принцип Даламбера или же уравнение Аппеля, такие дифференциальные уравнения могут быть записаны. Однако при составлении таких уравнений не всегда известна информация о значениях параметров объекта стабилизации, поэтому составление математические модели динамической системы не всегда точно. Точность математической модели - ее свойство отражать степень соответствия модели реальному объекту. Для повышения точности математической модели объекта управления требуется идентифицировать параметры математической модели на основе экспериментальных данных.

Вторым основным требованием, предъявляемым к математической модели объекта управления, является экономичность. Экономичность математической модели определяется затратами времени при решении

задачи параметрической оптимизации с помощью ЭВМ. Для уменьшения затрат машинного времени от полных математических моделей динамических систем часто переходят к упрощенным моделям. Один из наиболее распространенных методов перехода к упрощенным моделям - декомпозиция математической модели.

Для решения проблемы параметрического синтеза системы стабилизации необходимо решить три частные подготовительные задачи:

- 1) составление математической модели объекта управления;
- 2) идентификация параметров математической модели объекта управления;
- 3) декомпозиция математической модели объекта управления.

Кроме того, минимизация функционала (1) предполагает выбор его весовых коэффициентов a, b, c, d . Этот выбор должен быть целенаправлен, ибо функционал (1) является мерой отклонения возмущенного движения динамической системы от невозмущенного и неоднозначность трактовки такой меры обычно приводит к неоднозначности решения проблемы оптимизации.

Во второй главе получена математическая модель замкнутой системы стабилизации имеющая в канале вертикального наведения следующий вид:

$$I_0 \ddot{\Phi}(t) - \int_r^{r+l} m_1(x) \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} dx = M_{co}(t) + M_{Go}(t); \quad (5)$$

$$m_1(x) \ddot{\Phi}(t) + m(x) \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} + EI(x) \frac{\partial^4 y(x,t)}{\partial x^4} + \zeta EI(x) \frac{\partial^5 y(x,t)}{\partial x^4 \partial t} = F_0(x,t); \quad (6)$$

$$T_y^2 \ddot{M}_{co}(t) + 2\xi T_y \dot{M}_{co}(t) = K_{ry} i_{y_0}(t); \quad (7)$$

$$i_{y_0}(t) = K_{yM} U_{\Sigma_0}(t); \quad (8)$$

$$U_{\Sigma_0}(t) = K_{\Phi} U_{\varphi_0}(t) + K_{\dot{\varphi}}(t) U_{\omega_0}(t); \quad (9)$$

$$T_r^2 \ddot{U}_{\varphi_0}(t) + 2\xi_r T_r \dot{U}_{\varphi_0}(t) + U_{\varphi_0}(t) = K_r \varphi(t); \quad (10)$$

$$T_c^2 \ddot{U}_{\omega_0}(t) + 2\xi_c T_c \dot{U}_{\omega_0}(t) + U_{\omega_0}(t) = K_c \dot{\varphi}(t); \quad (11)$$

где I_0 - момент инерции орудия относительно оси цапф;

$m(x)$ - погонная масса орудия;

$m_1(x)$ - величина, связанная с $m(x)$ соотношением

$$m_1(x) = m(x)(x+r);$$

M_{c0} - стабилизирующий момент орудия;

$M_{B0}(t)$ - возмущающий момент, обусловленный трением в оси цапф;

$EI(x)$ - изгибная жесткость ствола;

ζ - коэффициент внутреннего демпфирования материала ствола;

$F_0(x,t)$ - распределенное по длине ствола внешнее возмущение, обусловленное вертикальными колебаниями оси цапф орудия при движении танка по пересеченной местности;

T_y, ξ, K_y - соответственно постоянная времени, коэффициент демпфирования и коэффициент усиления исполнительного органа в канале вертикального наведения;

K_{yM} - коэффициент усиления усилителя мощности (УМ);

$K_\varphi, K_{\dot{\varphi}}$ - коэффициенты усиления стабилизатора танкового вооружения подлежащие выбору;

$i_{y0}(t)$ - выходной сигнал УМ;

$U_{\Sigma 0}(t)$ - выходное напряжение сумматоров;

T_r, ξ_r, K_r - соответственно постоянная времени, коэффициент демпфирования и коэффициент усиления гироскопического датчика угла (ГДУ);

T_c, ξ_c, K_c - соответственно постоянная времени, коэффициент демпфирования и коэффициент усиления гироскопического датчика угловой скорости (ГДУС).

Используя метод Фурье, при условии, что определяющим является первый тон упругих колебаний ствола, математическая модель замкнутой системы стабилизации принимает следующий вид:

$$I_0 \ddot{\varphi}(t) - a_0 \dot{I}(t) = M_{c0}(t) + M_{B0}(t);$$

$$a_0 \ddot{\varphi}(t) + C_0 \ddot{T}_0(t) + \mathfrak{B}_0 \dot{T}_0(t) + b_0 T_0(t) = f_0(t); \quad (12)$$

$$\gamma_y^2 \ddot{M}_{c_0}(t) + 2\mathfrak{E}T_y \dot{M}_{c_0}(t) + M_{c_0}(t) =$$

$$K_{\Gamma y} K_{eM} [K_{\varphi} K_{\Gamma} \Phi(t) + K_{\varphi} K_c \dot{\varphi}(t)];$$

а функционал качества - следующий вид:

$$I = 0.5M \int_0^T \{ pX_1^2(t) + qX_2^2 + md_0 X_3^2(t) + Sd_0 X_4^2(t) \} dt \quad (13)$$

где a_0, b_0, c_0, d_0 и функционал $f_0(t)$ записываются в виде:

$$a_0 = \int_r^{r+l} m_1(x) \gamma(x) dx, \quad b_0 = E \int_r^{r+l} I(x) \gamma^{IV}(x) \gamma(x) dx,$$

$$c_0 = \int_r^{r+l} m(x) \gamma(x) dx, \quad d_0 = \int_r^{r+l} \gamma(x) dx, \quad f_0(t) = \int_r^{r+l} F(x, t) \gamma(x) dx. \quad (14)$$

В третьей главе рассматривается задача выбора оптимальных значений коэффициентов усиления системы стабилизации $K_{\varphi}, K_{\dot{\varphi}}$ в канале вертикального наведения (ВН) и $K_{\psi}, K_{\dot{\psi}}$ в канале горизонтального наведения (ГН).

В общем случае система (12) и функционал (13) могут быть написаны в виде:

$$\dot{X}(t) = A(K_{\varphi}, K_{\dot{\varphi}}) X(t) + F(t) \quad (15)$$

$$I(\alpha) = \frac{1}{2} M \left[\int_0^T \langle X(t), P X(t) \rangle dt \right] \quad (16)$$

где $F(t)$ - внешнее возмущение с матрицей интенсивности Q_f .

Показано, что функционал качества может быть приведен к виду:

$$I(K_{\varphi}, K_{\dot{\varphi}}) = S P [Q_f K(K_{\varphi}, K_{\dot{\varphi}})] \quad (17)$$

где матрица $K(K_{\varphi}, K_{\dot{\varphi}})$ определяется алгебраическим уравнением:

$$K(K_{\varphi}, K_{\dot{\varphi}}) A(K_{\varphi}, K_{\dot{\varphi}}) + A^T(K_{\varphi}, K_{\dot{\varphi}}) K(K_{\varphi}, K_{\dot{\varphi}}) + P = 0 \quad (18)$$

Проведен статистический анализ случайных внешних возмущений, действующих на танковое вооружение.

На танковую пушку действуют два вида внешних возмущений. В канале вертикального наведения - продольно-угловые перемещения корпуса танка, обусловленные рельефом местности и продольно-угловыми колебаниями подрессоренной части танка относительно неподдресоренной. Эти перемещения, благодаря трению в осях цапф, вызывают возмущающие моменты, действующие на орудие. Аналогичные моменты действуют на башню со стороны корпуса танка через погон. Эти моменты определяются следующими формулами:

$$M_{BO} = \mu_o \dot{\Phi}_B(t) \quad (19)$$

$$M_{B\delta} = \mu_\delta \dot{\Psi}_B(t); \quad (20)$$

где μ_o, μ_δ - постоянные коэффициенты, определяемые экспериментально;

$\dot{\Phi}_B(t), \dot{\Psi}_B(t)$ - угловые скорости перемещения корпуса танка в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

На рис.2 приведены спектральные плотности величин $\dot{\Phi}_B(t)$ и $\dot{\Psi}_B(t)$ (соответственно кривые 1 и 2). Спектральные плотности внешних возмущений $M_{BO}(t)$ и $M_{B\delta}(t)$ связаны со спектральными плотностями, представленными на рис.2, следующими соотношениями:

$$S_{BO}(\omega) = \mu_o^2 S_{\dot{\Phi}}(\omega); \quad (21)$$

$$S_{B\delta}(\omega) = \mu_\delta^2 S_{\dot{\Psi}}(\omega); \quad (22)$$

Второй тип внешних возмущений связан с ускорением корпуса танка относительно его вертикальной и поперечной осей. Эти ускорения, будучи приложенными к распределенным массам орудия, вызывают его упругие колебания. Распределенные силы, приложенные к орудию и входящие в уравнения его изгибных колебаний, равны:

$$F_o(x, t) = m(x)\ddot{z}(t); \quad (23)$$

$$F_\delta(x, t) = m(x)\ddot{y}(t); \quad (24)$$

где $m(x)$ - погонная масса орудия; $\ddot{z}(t), \ddot{y}(t)$ - ускорения корпуса танка относительно его вертикальной и поперечной осей. Подставляя (22) и (24) в последнюю формулу (14), получаем

$$f_o(t) = \ddot{z}(t) \int_m(x) \gamma_1(x) dx = k_z \ddot{z}(t); \quad (25)$$

$$f_\delta(t) = \ddot{y}(t) \int_m(x) \gamma_1(x) dx = k_\delta \ddot{y}(t); \quad (26)$$

Спектральные плотности величин $\ddot{z}(t)$ и $\ddot{y}(t)$ представлены на рис.3. Спектральные плотности возмущений $f_o(t)$ и $f_\delta(t)$ равны

$$S_{f_o}(\omega) = k_z^2 \ddot{S}_z(\omega); \quad (27)$$

$$S_{f_\delta}(\omega) = k_y^2 \ddot{S}_y(\omega); \quad (28)$$

Анализ спектральных плотностей позволяет сделать вывод, что спектральные плотности внешних возмущений, действующих на танковую пушку в канале горизонтального наведения изменяются незначительно, т.е. практически имеют постоянные значения:

$$\begin{aligned} \ddot{S}_y(\omega) &\cong \ddot{S}_y = 0.06 \text{ c}^2 \\ \ddot{S}_z(\omega) &\cong \ddot{S}_z = 0.025 \text{ M}^2 \text{ c}^2 \end{aligned}$$

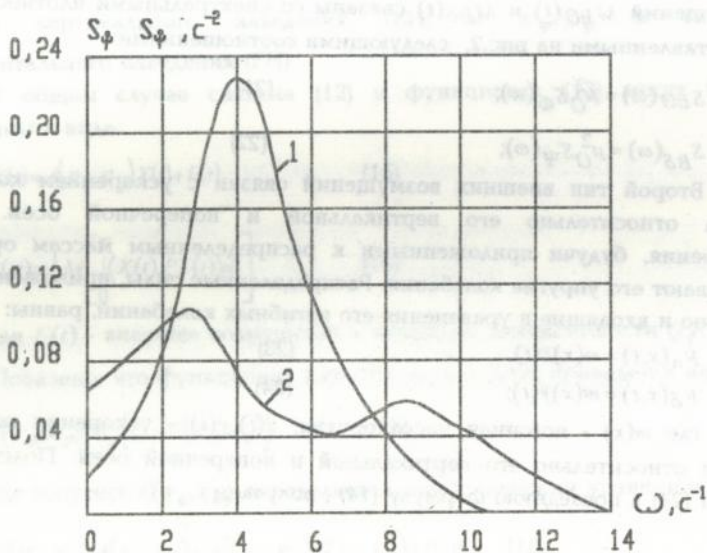


Рис.2 Спектральные плотности угловых скоростей поворота орудия и башни

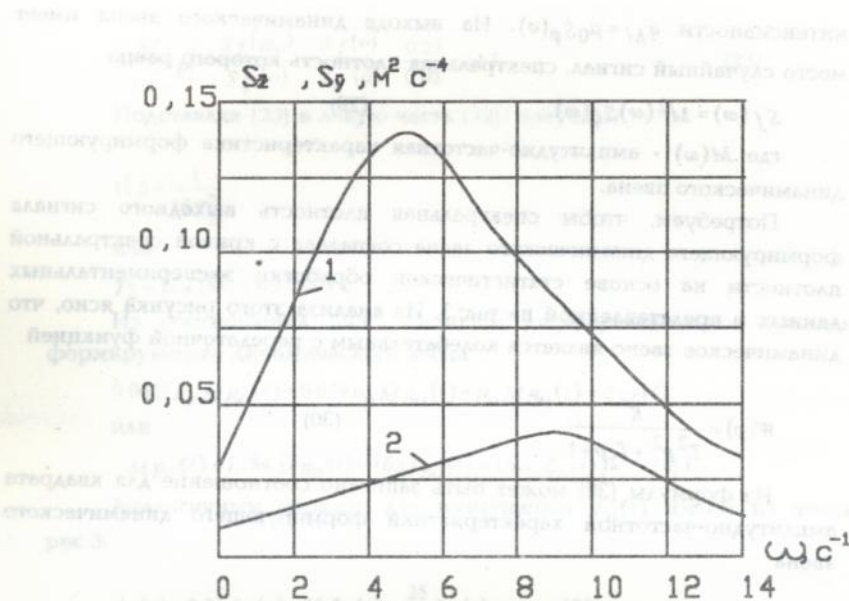


Рис.3 Спектральные плотности вертикальных и поперечных ускорений подрессоренной части корпуса танка

Этот вывод приводит к заключению о том, что внешние возмущения, действующие на танковую пушку в канале горизонтального наведения можно считать белым шумом. Физически этот факт можно объяснить тем, что возмущения в канале горизонтального наведения обусловлены поворотом танка и действием возникающих при этом центробежных сил. Повороты же танка в процессе ведения боя осуществляются практически во всем диапазоне скоростей движения.

Что касается внешних возмущений, действующих на танковую пушку в канале вертикального наведения, определяемых продольно-угловыми и вертикальными колебаниями подрессоренной части корпуса танка, то эти возмущения в значительной мере зависят от параметров системы подрессоривания и не могут носить характер белого шума. Спектральные плотности этих возмущений носить характер цветного шума.

Введем в рассмотрение формирующее динамическое звено с передаточной функцией $W(p)$, на вход которого подан белый шум $\xi_M(t)$

интенсивности $q_M = \mu_0 \dot{S}_\phi(\omega)$. На выходе динамического звена имеет место случайный сигнал, спектральная плотность которого равна

$$S_f(\omega) = M^2(\omega) S_\xi(\omega), \quad (29)$$

где $M(\omega)$ - амплитудно-частотная характеристика формирующего динамического звена.

Потребуем, чтобы спектральная плотность выходного сигнала формирующего динамического звена совпадала с кривой спектральной плотности на основе статистической обработки экспериментальных данных и представленной на рис.3. Из анализа этого рисунка ясно, что динамическое звено является колебательным с передаточной функцией

$$W(p) = \frac{K}{T_1^2 p^2 + T_2 p + 1}. \quad (30)$$

Из формулы (30) может быть записано соотношение для квадрата амплитудно-частотной характеристики формирующего динамического звена

$$M^2(\omega) = \frac{K^2}{(1 - \omega^2 T_1^2)^2 + \omega^2 T_2^2}.$$

Отыщем величины K , T_1 и T_2 .

Потребуем, чтобы интенсивность входного и выходного сигналов формирующего динамического звена были одинаковы

$$S_\xi(\omega) = S_f(\omega).$$

Тогда из формулы (30) получаем $k = 1$.

Резонансный пик спектральной плотности соответствует частоте $\omega_p = 4c^{-1}$, при которой обращается в минимум знаменатель (30).

Следовательно,

$$T_1 = 1/\omega_p = 0.25 \text{ с}. \quad (31)$$

Полагая в (31) $\omega = \omega_p$, получаем:

$$M^2(\omega_p) = \frac{k^2}{\omega_p^2 T_2^2} = \frac{1}{16T_2^2} \quad (32)$$

С другой стороны, из формулы (29) имеем:

$$M^2(\omega_p) = \frac{S_f(\omega_0)}{S_{\xi}(\omega)} = \frac{S_f(\omega)}{S_{\xi}(\omega)} = \frac{0.23}{0.02} = 11.5 \quad (33)$$

Подставляя (33) в левую часть (32), получаем

$$11.5 = \frac{1}{16T_2^2}$$

или

$$T_2 = 1/\sqrt{16 \cdot 11.5} = 0.074 \text{ с.}$$

Из соотношения (30) запишем дифференциальное уравнение формирующего динамического звена

$$0.0625\mu_0 \ddot{M}_{Bo}(t) + 0.074\mu_0 \dot{M}_{Bo}(t) + \mu_0 M_{Bo}(t) = \xi_M(t)$$

или

$$\ddot{M}_{Bo}(t) + 1.184 \dot{M}_{Bo}(t) + 16 M_{Bo}(t) = 16\mu_0 \xi_M(t). \quad (34)$$

Аналогичным образом для возмущения $f_o(t)$ имеем из анализа рис.3.

$$\ddot{f}_o(t) + 2.31 \dot{f}_o(t) + 25 f_o(t) = \frac{25}{k_z} \xi_f(t), \quad (35)$$

где $\xi_f(t)$ - белый шум интенсивности $q_f = k_z \ddot{z}_z(\omega)$.

Подставляя уравнения (34) и (35) в систему (12), получаем математическую модель замкнутой системы стабилизации в канале вертикального наведения. при воздействии на объект стабилизации белых шумов $\xi_M(t)$ и $\xi_f(t)$.

Введем расширенный вектор состояния в канале ВН

$$X(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ x_4(t) \\ x_5(t) \\ x_6(t) \\ x_7(t) \\ x_8(t) \\ x_9(t) \\ x_{10}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi(t) \\ \dot{\Phi}(t) \\ T_0(t) \\ \dot{T}_0(t) \\ M_{CO}(t) \\ \dot{M}_{CO}(t) \\ M_{BO}(t) \\ \dot{M}_{BO}(t) \\ f_0(t) \\ \dot{f}_0(t) \end{bmatrix}; \quad F(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ (16/\mu_0)\xi_M \\ 0 \\ (25/k_r)\xi_f \end{bmatrix}$$

Тогда уравнение возмущенного движения замкнутой системы стабилизации представим в векторно-матричной форме:

$$\dot{X}(t) = A(k_\phi, \dot{k}_\phi)X(t) + F(t),$$

которое эквивалентно системе дифференциальных уравнений 10-го порядка

$$\dot{X}_1(t) = X_2(t);$$

$$\begin{aligned} \dot{X}_2(t) = & \frac{c_0}{I_0 c_0 + a_0^2} X_5(t) - \frac{\xi a_0 b_0}{I_0 c_0 + a_0^2} X_4(t) - \frac{a_0 b_0}{I_0 c_0 + a_0^2} X_3(t) + \\ & + \frac{c_0}{I_0 c_0 + a_0^2} X_7(t) + \frac{a_0}{I_0 c_0 + a_0^2} X_9(t); \end{aligned}$$

$$\dot{X}_3(t) = X_4(t);$$

$$\begin{aligned} \dot{X}_4 = & -\frac{\xi I_0 b_0}{I_0 c_0 + a_0^2} X_4(t) - \frac{I_0 b_0}{I_0 c_0 + a_0^2} X_3(t) - \\ & - \frac{a_0}{I_0 c_0 + a_0^2} X_7(t) + \frac{I_0}{I_0 c_0 + a_0^2} X_9(t); \end{aligned}$$

(36)

$$\dot{X}_5(t) = X_6(t);$$

$$\begin{aligned} \dot{X}_6(t) = & -\frac{1}{T_y^2} X_5(t) - \frac{2\xi}{T} X_6(t) + \frac{k_{\Gamma Y} k_{\Upsilon M} k_{\Gamma} k_{\Phi}}{T_y^2} X_1(t) + \\ & + \frac{k_{\Gamma Y} k_{\Upsilon M} k_{C} k_{\Phi}}{T_y^2} X_2(t); \end{aligned}$$

$$\dot{X}_7(t) = X_8(t);$$

$$\dot{X}_8(t) = -1.184 X_8(t) - 16 X_7(t) + (16 \mu_o) \xi_m(t);$$

$$\dot{X}_9(t) = X_{10}(t);$$

$$\dot{X}_{10}(t) = -2.31 X_{10}(t) - 25 X_9(t) + (25/k_z) \xi_f(t).$$

Требуется отыскать оптимальные значения параметров K_ϕ и K_ψ , доставляющих на решениях системы минимум интегральному квадратичному функционалу

$$I = 0.5M \left[\int_0^T \left\{ p\phi^2(t) + q\psi^2(t) + \int_r^{r+1} \left[m y^2(x,t) + s \left(\frac{\partial y(x,t)}{\partial t} \right)^2 \right] dx \right\} dt \right], \quad (37)$$

где M - символ математического ожидания; p, q, m, s - весовые коэффициенты. Функционал (37) принимает вид:

$$I = 0.5M \left[\int_0^T \left\{ p\phi^2(t) + q\psi^2(t) + \sum_{j=1}^m \left[m d_j T_{j0}^2(t) + s d_j \dot{T}_{j0}^2(t) \right] \right\} dt \right], \quad (38)$$

где

$$d_j = \int_x^{r+1} \gamma_j(x) dx.$$

На значения компонент вектора параметров системы

$$K = [k_\phi \quad \dot{k}_\phi]^T$$

наложены ограничения

$$K \in G_k, \quad (39)$$

где G_k - множество допустимых значений вектора K ,

представляющее собой в плоскости (K_ϕ, \dot{K}_ϕ) область устойчивости замкнутой системы, представленную на рис.4.

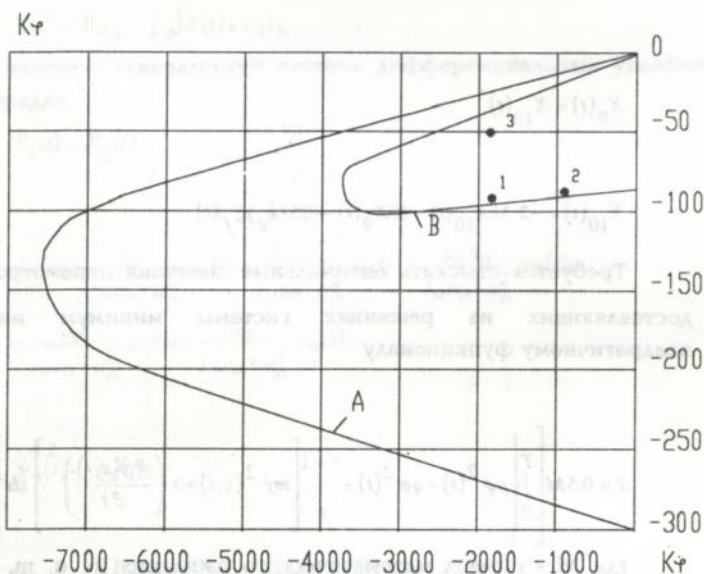


Рис.4 Области устойчивости замкнутой системы стабилизации танкового вооружения: А - жесткого тела; В - упругого тела

В соответствии с методом параметрической оптимизации, имеем

$$I(k_\phi, \dot{k}_\phi) = q_m K_{88}(k_\phi, \dot{k}_\phi) + q_f K_{1010}(k_\phi, \dot{k}_\phi). \quad (40)$$

где величины $K_{88}(k_\phi, k_\phi)$ и $K_{1010}(k_\phi, k_\phi)$ представляют собой соответствующие элементы матрицы $K(k_\phi, k_\phi)$ удовлетворяющей уравнению (18).

Решение задачи оптимизации сводится к поиску минимума целевой функции (40) при ограничениях (39). Задаваясь различными стартовыми точками в области, представленной на рис.4, получаем различные значения оптимальных коэффициентов K_ϕ^* и K_ϕ^* . Одновременно производится и расчет весовых коэффициентов p, q, m и s функционала (38).

Результаты расчетов приведены в таблице 1.

Таблица 1

$\min I(k)$,	K_ϕ^* ,	K_ϕ^* ,	p ,	q ,	m ,	s
0.102,	-1795,	-99,7,	1,3,	1,2,	1,2,	1,9
0,130,	-1790,	-97,	1,2,	1,3,	1,2,	1,9
0,040,	-1774,	-98,	1,2,	1,2,	1,3,	1,9
0,140,	-1780,	-97,	1,2,	1,2,	1,2,	2,0
0,050,	-1764,	-97,	1,2,	1,2,	1,2,	1,9
0,080,	-1770,	-97,	1,3,	1,3,	1,3,	2,0
0,087,	-1768,	-99,	1,3,	1,3,	1,3,	2,0
0,140,	-1764,	-96,	1,3,	1,2,	1,2,	1,9
0,062,	-1747,	-96,	1,2,	1,3,	1,2,	1,9
0,103,	-1751,	-98,	1,2,	1,2,	1,3,	1,9
0,130,	-1755,	-96,	1,2,	1,2,	1,2,	2,0

Из анализа таблицы 1 можно сделать вывод, что минимальное значение целевой функции составляет $I(k^*) = 0.040$. При этом оптимальные значения коэффициентов усиления равны $k_\phi^* = -1774$; $k_\phi^* = -98$, а значения весовых коэффициентов функционала (37) составляют: $p = 1,2$; $q = 1,2$; $m = 1,3$; $s = 1,9$.

Четвертая глава посвящена экспериментальному исследованию оптимальной системы стабилизации танкового вооружения.

Целью экспериментальных исследований является анализ возмущенного состояния объекта стабилизации (танковая пушка) в зависимости от изменения регулировочных характеристик (коэффициентов усиления) стабилизатора танкового вооружения (СТВ).

Для проведения экспериментального исследования применялся метод тензометрирования, т.е. в качестве чувствительных элементов использовались наклеенные на ствол тензодатчики, на вход СТВ подавались синусоидальные входные сигналы различной частоты, а с помощью шлейфового осциллографа осуществлялась запись выходных сигналов, которые подвергались обработке, т.е. определялась средняя амплитуда колебаний, которая позволяет количественно оценить переходной процесс при различных значениях K_{φ}, K_{ψ} .

Результаты эксперимента приведены в таблице 2.

Таблица 2

Канал наведения	ВН			ГН		
	1	2	3	4	5	6
№ точки						
$k_{\varphi}(k_{\psi})$	k_{φ}^*	$0.5k_{\varphi}^*$	k_{φ}^*	k_{ψ}^*	$0.5k_{\psi}^*$	k_{ψ}^*
$k_{\psi}(k_{\varphi})$	k_{ψ}^*	k_{ψ}^*	$0.5k_{\psi}^*$	k_{φ}^*	k_{φ}^*	$0.5k_{\varphi}^*$
\bar{J}	28.2	29.3	Тех.не уст.	86.6	98	103.5

Выводы и рекомендации

1. Разработана математическая модель дискретно-континуального объекта стабилизации, содержащая как обыкновенные дифференциальные уравнения, так и уравнения в частных производных. Проведена декомпозиция математической модели в смысле разделения быстрых и медленных движений. Показано, что существенное значение

имеет только лишь первый тон колебаний упругого элемента объекта стабилизации.

2. Требования, предъявляемые к системе стабилизации дискретно-континуального объекта, формализованы и представлены в виде требования минимума аддитивного интегрального функционала качества с неизвестными заранее весовыми коэффициентами.

3. Задача параметрического синтеза системы стабилизации при воздействии на объект управления сложного случайного возмущения сведена к задаче нелинейного программирования, где в качестве целевой функции предложено использовать функцию Ляпунова замкнутой системы стабилизации.

4. Произведен статистический анализ внешних возмущений, действующих на танковое орудие как объект стабилизации. Сделан вывод о том, что внешние возмущения в канале горизонтального наведения близки к белому шуму заданной интенсивности. В канале вертикального наведения внешние возмущения представляют собой непрерывный цветной шум, который может быть сведен к белому шуму путем расширения пространства состояний объекта стабилизации.

5. Разработана методика выбора весовых коэффициентов аддитивного функционала качества и предложен алгоритм выбора весовых коэффициентов, основанный на требовании быстрого затухания функции Ляпунова в процессе стабилизации.

6. Предложен алгоритм выбора оптимальных значений параметров системы стабилизации, который позволил получить значения коэффициентов усиления системы в каналах вертикального и горизонтального наведения, обеспечивающих наивысшую точность стабилизации оси канала ствола танковой пушки относительно направления на цель.

7. Анализ экспериментальных данных, полученных на специально созданном исследовательском стенде, содержащем танковую систему стабилизации вооружения, задающую и регистрирующую аппаратуру, подтвердил эффективность предлагаемого метода параметрического синтеза.

Основные результаты диссертационной работы изложены в следующих публикациях автора:

1. Александров Е.Е., Альджабали К. Параметрический синтез дискретного регулятора для объекта возмущенного цветным шумом. // В кн.: 1-я Всесоюзная НТК "Координирующее управление в технических системах", - Харьков, Алушта, ХПИ, 1991.

2. Александров Е.Е., Альджабали К. Параметрический синтез цифрового регулятора, для дискретно-континуального объекта. //В кн.: Проектирование автоматизированных систем контроля в управлении сложными объектами., - Харьков, Туапсе, 1992, 1992.

3. Александров Е.Е., Альджабали К. Параметрическая оптимизация дискретно-континуальных вибрационных систем. //В кн.: Прочность и колебания конструкций при вибрационных систематических нагрузках. - Запорожье, 1993.

4. Александров Е.Е., Альджабали К. Идентификация и декомпозиция математических моделей технологических объектов. //В кн.: Международная научно-техническая конференция "microCAD - SYSTEM-93" - Харьков, 1993.

5. Александров Е.Е., Альджабали К., Мазманишвили А.С., Щербань В.С. Математическое моделирование управляемых динамических систем при воздействии на объект сложного дискретно-непрерывного случайного возмущения. //В кн.: Международная научно-техническая конференция "ФОВС-93", - Киев, Харьков, 1993.

6. Александров Е.Е., Альджабали К., Бех М.В. Параметрическая оптимизация дискретно-континуальной динамической системы с использованием вычислительной процедуры Нелдера-Мида. //В кн.: Международная научно-техническая конференция "ФОВС-93", - Киев, Харьков, 1993.

Кооп. "СИГМА-І"
тираж - 150 шт.
І, П.Л

AB 30.584

AB 30.584