



А. Я. Круглов С. Н. Трапезников

052-88

17
К84

**КОРРЕКЦИЯ ПАРАМЕТРОВ
НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ**

МОСКВА 1988

Государственный комитет СССР
по народному образованию

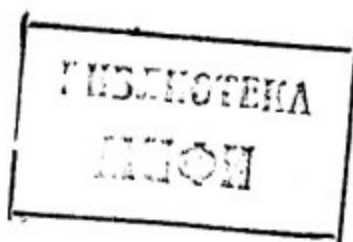
Московский ордена Трудового Красного Знамени
инженерно-физический институт

А. Я. Круглов С. Н. Трапезников

КОРРЕКЦИЯ ПАРАМЕТРОВ НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ

Препринт 052-88

БИБЛИОТЕЧНЫЙ
ФОНД
НИИУ МИФИ



Утверждено
редсоветом института

Москва 1988

Круглов А.Я., Трапезников С.Н. Коррекция параметров нелинейных систем управления. - М.: Препринт/МИФИ, 052-88, 1988.- 20 с.

Излагаются вопросы исследования процессов настройки параметров нелинейных систем управления по характеристикам, получаемым непосредственно в испытаниях. Необходимые поправки к настраиваемым параметрам определяются с помощью метода дифференциальной коррекции (МДК), который ранее применялся только для линейных систем. Приводятся результаты исследования устойчивости процессов настройки посредством МДК.



ВВЕДЕНИЕ

Настройка параметров (передаточных коэффициентов) автоматических управляющих устройств в процессе доводочных испытаний систем управления по результатам, полученным в ходе натурных экспериментов, является важным и ответственным этапом их создания и сдачи в эксплуатацию. При модификации действующих систем, а также при изменении требований, предъявляемых к их характеристикам, возникает проблема коррекции настроек автоматических регуляторов. Аналогичную задачу приходится решать при уточнении параметров динамических моделей заданной структуры [1]. Настройка параметров по характеристикам системы, полученным в ходе испытаний дает возможность учитывать реальные условия функционирования, воздействие возмущений и помех, исключить неустойчивые режимы.

Процесс настройки параметров может быть представлен в виде последовательного алгоритма:

1. Выбор режима испытаний, сигналов управления и начальных значений настраиваемых параметров.
2. Проведение испытаний, измерение значений координат движения и обработка результатов испытаний.
3. Оценка характеристик и вычисление поправок к настраиваемым параметрам.
4. Коррекция параметров, проверка качества настройки.

Коррекция параметров систем управления в ходе доводочных испытаний осуществляется с целью обеспечения требуемых по техническому заданию (ТЗ) показателей качества процессов при обработке заданных командных сигналов и возмущений. Поэтому режим испытаний и сигналы управления однозначно определяются соответствующими пунктами ТЗ. Начальные значения настраиваемых параметров определяются на этапе параметрического синтеза систем управления известными методами, основанными на использовании моделей различного класса.

Наряду с традиционными требованиями, предъявляемыми к системам сбора и хранения информации (точность измерения, емкость накопителей информации), большое значение для качества настройки имеет корректный выбор величины такта измерения координат

движения и его стабильность во всем диапазоне характеристик и режимов эксплуатации [2]. В ряде случаев для организации процесса настройки требуется предварительная обработка результатов измерений статистическими методами.

В работе [3] рассмотрены метод и алгоритм определения иско- мых оценок неизвестных коэффициентов уравнения регрессии с использованием вероятностных характеристик результатов экспери- мента. При этом вопросы устойчивости работы алгоритма оценки и зависимость вычислительных процессов от параметров информацион- ного канала (период наблюдения и величина такта обмена данными) не исследуются. Основное внимание уделено формированию экспери- ментальных планов по различным критериям оптимальности с целью повышения достоверности вычисляемых значений коэффициентов регрессионной функции.

1. НАСТРОЙКА ПАРАМЕТРОВ В ПРОЦЕССЕ ИСПЫТАНИЙ

Под характеристиками системы понимается перечень показателей ее функционирования – показатели качества переходных процессов при отработке заданных командных сигналов, частотные характе- ристики, экономические, расходные и т.д. Некоторые из указанных показателей могут быть определены или вычислены в ходе продол- жительной эксплуатации. Предметом данной работы является ис- следование процессов настройки параметров систем управления по характеристикам, получаемым непосредственно в испытаниях.

Задача настройки параметров сводится к определению величины и знака необходимых поправок к коэффициентам. Практически все методы вычисления поправок основаны на минимизации отклонения выбранного или заданного показателя качества от значений, при- нятых как оптимальные [4]. К указанному классу методов отно- сится и метод дифференциальной коррекции (МДК), где поправки определяются из условия минимума отклонения переходных харак- теристик от желаемых на всем интервале наблюдения (рис. 1). Это выгодно отличает МДК от других методов, где минимизация откло- нения координат движения системы осуществляется для конечного числа точек интервала наблюдения [5].

Математическая постановка проблемы определения приращений к параметрам аналитических выражений методом дифференциальной коррекции встречается в работах академика В.А.Стеклова. В статье [6] дано решение задачи для непрерывных, представленных в виде конечных аналитических выражений, линейных структур. Исследования показали, что при определенных ограничениях данный метод может быть использован и для нелинейных систем, когда контролируемые координаты движения представлены в виде дискретного ряда значений в тактовые моменты времени. Такой подход к решению задачи определения необходимых поправок является более актуальным с точки зрения практической реализации автоматизированных систем настройки параметров, так как современные накопители информации определяют собой устройства дискретного типа [2].

Дифференциальная коррекция параметров заключается в определении поправок $\Delta \bar{C} = \{\Delta C_j\}$, $j = \overline{1, m}$ к настраиваемым коэффициентам C_0 системы управления, минимизирующих сумму квадратов отклонений

$$\sum_{k=0}^N \varepsilon_k^2 = \sum [\bar{Y}_0(t_k) - \bar{Y}(t_k, C)] [\bar{Y}_0(t_k) - \bar{Y}(t_k, C)]^T,$$

где $\bar{Y}_0(t_k)$ - вектор значений координат движения системы (объекта), выбранного в качестве опорного $\bar{Y}_0(t_k) = \{y_{0i}(t_k)\}$, $i = \overline{1, n}$; $\bar{Y}(t_k, C)$ - соответствующие характеристики, полученные в процессе испытаний;

t_k - тактовые моменты времени ($k = \overline{0, N}$).

Значения поправок ΔC_j могут быть получены как решение уравнения

$$A \cdot \Delta \bar{C} = \bar{B},$$

где

$$\left. \begin{aligned} a_{sq} &= \sum_{k=0}^N \left\{ \sum_{i=1}^n \frac{\partial y_i(t_k, C_0)}{\partial C_q} \cdot \frac{\partial y_i(t_k, C_0)}{\partial C_s} \right\}; \\ b_s &= \sum_{k=0}^N \left\{ \sum_{i=1}^n \Delta y_i(t_k, C_0) \cdot \frac{\partial y_i(t_k, C_0)}{\partial C_s} \right\}; \\ s, q &= \overline{1, m}; \\ \Delta y_i(t_k, C_0) &= y_{0i}(t_k) - y_i(t_k, C_0). \end{aligned} \right\}$$

В работе [7] предложено развитие метода дифференциальной коррекции для случая, когда измеряемые в процессе испытаний характеристики являются нелинейными функциями координат движения. В отличие от линейных систем, когда корректирующие поправки определяются за один шаг, коррекция параметров в нелинейных представляют собой многошаговую итерационную процедуру. При этом количество итераций зависит от числа настраиваемых параметров, начального отклонения их значений от требуемых. Определенное влияние на качество настройки оказывает величина такта съема информации о поведении координат движения системы, по которым осуществляется настройка коэффициентов.

В данной работе приведены результаты исследования устойчивости процессов настройки параметров систем и моделей заданной структуры методом дифференциальной коррекции.

2. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ КОРРЕКЦИЯ ПАРАМЕТРОВ

Рассмотрим алгоритм дифференциальной коррекции параметров системы, математическая модель которой представляется уравнением вида

$$\dot{y} = ay + b_u, \quad (1)$$

где a, b — корректируемые коэффициенты.

При фиксированном значении параметра u (в частном случае — управляющий сигнал) величина y является некоторой функцией

$$y = y(a, b, t). \quad (2)$$

Задача коррекции заключается в выборе поправок $\Delta a, \Delta b$ к начальным значениям коэффициентов $a = a_0$ и $b = b_0$, которые обеспечили бы совпадение или необходимую близость функции (2) к характеристикам, полученным в результате испытаний

$$y_0 = y_0(u, t). \quad (3)$$

В работе [6] алгоритм дифференциальной коррекции рассмотрен достаточно детально. Поэтому, опуская промежуточные математические операции, запишем результирующие выражения для определения поправок Δa и Δb в виде

$$\left. \begin{aligned} \Delta a \int_0^{t_n} \left(-\frac{\partial y}{\partial a} \right) dt + \Delta b \int_0^{t_n} \left(\frac{\partial y}{\partial a} \right) \left(\frac{\partial y}{\partial b} \right) dt &= \int_0^{t_n} \Delta y \left(\frac{\partial y}{\partial a} \right) dt; \\ \Delta a \int_0^{t_n} \left(\frac{\partial y}{\partial a} \right) \left(\frac{\partial y}{\partial b} \right) dt + \Delta b \int_0^{t_n} \left(\frac{\partial y}{\partial b} \right) dt &= \int_0^{t_n} \Delta y \left(\frac{\partial y}{\partial b} \right) dt, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где $(0, t_n)$ - интервал наблюдения переходных процессов;
 $\frac{\partial y}{\partial a}, \frac{\partial y}{\partial b}$ - частные производные координат движения
при вариациях настраиваемых коэффициентов
(функции чувствительности);
 $\Delta y = y(u, t) - y(a_0, b_0, t)$ - разность значе-
ний координат движения, полученных в ре-
зультате испытаний и моделированием.

Значения функций чувствительности в методе дифференциальной
коррекции определяются интегрированием модели чувствительности,
которая формируется дифференцированием уравнений модели систе-
мы (I), т.е.

$$\left. \begin{aligned} \dot{S}_a &= \frac{d}{dt} \left(-\frac{\partial y}{\partial a} \right) = y; \\ \dot{S}_b &= \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial y}{\partial b} \right) = u. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

При коррекции систем с большим числом настраиваемых пара-
метров значения функций чувствительности могут быть определены
моделированием и заданы в виде конечных аналитических выраже-
ний.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМА КОРРЕКЦИИ

При организации режима коррекции параметров важное с практической точки зрения значение имеет качество работы системы настройки. Этот показатель определяется сходимостью процесса коррекции и продолжительностью (количеством шагов) итерационной процедуры, которые в свою очередь зависят от корректного выбора начальных значений настраиваемых параметров. Анализ работы алгоритма дифференциальной коррекции показывает, что существует область значений параметров, где процесс настройки сходится за конечное число итераций. Величина этой области зависит от количества корректируемых коэффициентов, объема информации, используемой для определения искомых поправок, и динамических характеристик настраиваемых коэффициентов. Размеры области, определяемые в координатах отклонения параметров от оптимальных значений, дают величины допусков на задание начальных значений настраиваемых коэффициентов.

Рассмотрим один из способов оценки этой области при раздельной настройке параметров a , b модели (I). В этом случае выражения для определения поправок Δa , Δb будут иметь вид

$$\left. \begin{aligned} \Delta a \int_0^{t_n} \left(\frac{\partial y}{\partial a} \right)^2 dt &= \int_0^{t_n} \Delta y \left(\frac{\partial y}{\partial a} \right) dt ; \\ \Delta b \int_0^{t_n} \left(\frac{\partial y}{\partial b} \right)^2 dt &= \int_0^{t_n} \Delta y \left(\frac{\partial y}{\partial b} \right) dt \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Анализ полученных выражений дает важный, несмотря на очевидность, вывод - корректируемые параметры должны быть "настраиваемыми", то есть функции чувствительности координат системы $(\frac{\partial y}{\partial a}, \frac{\partial y}{\partial b})$ к вариациям параметров не должны тождественно равняться нулю, т.е.

$$\frac{\partial y}{\partial a} \neq 0; \frac{\partial y}{\partial b} \neq 0 \quad \text{при } t \in \{0, t_n\}. \quad (7)$$

Для простых моделей условие (7) может быть оценено непосредственно из уравнений динамики. В случае многомерных многосвязных моделей с большим числом настраиваемых параметров и регистрируемых координат движения условие (7) принимает вид ограниченный типа

$$\left| \frac{\partial y}{\partial a} \right| \leq \varepsilon_y(a, t). \quad (8)$$

Правые части соотношений (6) представляют собой интегральные зависимости, подынтегральные функции которых в общем случае могут оказаться знакопеременными функциями параметра интегрирования

$$\left. \begin{aligned} f_a &= \Delta y(a_0, b_0, t) \cdot \frac{\partial y(a_0, b_0, t)}{\partial a}; \\ f_b &= \Delta y(a_0, b_0, t) \cdot \frac{\partial y(a_0, b_0, t)}{\partial b}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Таким образом, при определенных значениях коэффициентов a_0, b_0 и интервала наблюдения t_n переходных процессов в настраиваемой системе величины поправок Δa и Δb могут оказаться равными нулю при наличии отклонения

$$\Delta y(t) \neq 0 \quad \text{при } t \in \{0, t_n\}.$$

Следовательно, границы области значений настраиваемых параметров и характеристик процессов настройки в соответствии с условием обеспечения функциональной надежности алгоритма дифференциальной коррекции определяются интегральными соотношениями вида

$$F_1(a_0, b_0, t) = \int_0^{t_*} \{y_0(u, t) - y(a_0, b_0, t)\} \frac{\partial y(a_0, b_0, t)}{\partial a} dt = 0, \quad (I0)$$

$$F_2(a_0, b_0, t) = \int_0^{t_*} \{y_0(u, t) - y(a_0, b_0, t)\} \frac{\partial y(a_0, b_0, t)}{\partial b} dt = 0. \quad (II)$$

Для простых моделей невысокой размерности предельные зависимости параметров могут быть получены аналитически путем интегрирования выражений (I0), (II).

4. ОЦЕНКА ОБЛАСТИ УСТОЙЧИВОЙ РАБОТЫ АЛГОРИТМА МДК

В качестве числового примера определения области устойчивой работы алгоритма МДК рассмотрим процесс коррекции параметров модели вида (I). В этом случае значения координаты y будут определяться выражением

$$y(a_0, b_0, t) = \frac{b_0 u}{a_0} (e^{a_0 t} - 1), \quad (I2)$$

где a_0, b_0 — начальные значения настраиваемых параметров

Предположим, что характеристики объекта заданы соотношением

$$y_0(u, t) = \kappa u (1 - e^{-\frac{t}{T}}), \quad (I3)$$

где κ, T — известные коэффициенты.

Для некоторого упрощения математических преобразований полагаем

$$\kappa = 1; \quad T = 1; \quad u = 1. \quad (I4)$$

Первые два равенства в (I4) представляют собой обычную нормировку параметров, которая не приводит к изменению формы зоны устойчивой работы алгоритма МДК и учитывается вариацией масштаба координат. Третье равенство означает нормирование командного сигнала, принятое при анализе и синтезе систем автоматического управления.

С учетом системы (I4) модель чувствительности (5) может быть представлена соотношениями

$$\left. \begin{aligned} S_a &= \frac{\partial y(\tau)}{\partial a} = \int_0^{\tau} \frac{b_0}{a_0} (e^{a_0 t} - 1) dt; \\ S_b &= \frac{\partial y(\tau)}{\partial b} = \int_0^{\tau} dt \end{aligned} \right\} \quad (I5)$$

Тогда выражения (I0), (II), определяющие искомые границы области, принимают вид алгебраических уравнений

$$\begin{aligned} F_1(a_0, b_0, t_n) &= (1 - e^{a_0 t_n}) \left[\frac{b_0}{a_0^2} \left(1 + \frac{b_0}{a_0} \right) \right] + \frac{b_0}{a_0^2 (a_0 - 1)} (e^{(a_0 - 1)t_n} - 1) - \\ &- (1 + b_0) \frac{b_0 t_n^2}{2a_0^2} + \frac{b_0}{a_0} [1 - (t_n + 1)e^{t_n}] + \frac{b_0^2}{2a_0^2} (e^{2a_0 t_n} - 1) + \\ &+ \frac{b_0^2}{a_0^3} \left[\frac{1}{a_0} + (t_n - \frac{1}{a_0}) e^{a_0 t_n} \right] = 0, \end{aligned} \quad (I6)$$

$$\begin{aligned} F_2(a_0, b_0, t) &= \left(1 + \frac{b_0}{a_0} \right) \frac{t_n^2}{2} - [1 - (1 + t_n)e^{-t_n}] - \\ &- \frac{b_0}{a_0^2} \left[\frac{1}{a_0} - \left(\frac{1}{a_0} - t_n \right) e^{a_0 t_n} \right] = 0. \end{aligned} \quad (I7)$$

Очевидно, что выражения (I6), (I7) могут быть решены относительно параметра b_0 . В результате получим два семейства зависимостей

$$\rho_0^i = \frac{\frac{1-e^{a_0 t_N}}{a_0^3} + \frac{e^{(a_0-1)}-1}{a_0^2(a_0-1)} - \frac{t_N^2}{2a_0^2} + \frac{1-(t_N+1)e^{-t_N}}{a_0}}{\frac{t_N^2}{2a_0^2} - \frac{1-e^{a_0 t_N}}{a_0^4} + \frac{1-e^{2a_0 t_N}}{2a_0^4} - \frac{1+(a_0 t_N-1)e^{a_0 t_N}}{a_0^4}}; \quad (18)$$

$$\rho_0^{\bar{i}} = \frac{\left\{ [1 - (1+t_N)e^{-t_N}] - \frac{t_N^2}{2} \right\} a_0}{\frac{t_N^2}{2} - \left[\frac{1}{a_0} - \left(\frac{1}{a_0} - t_N \right) e^{a_0 t_N} \right] \frac{1}{a_0}}. \quad (19)$$

Результаты вычислений представлены в табл. I,2.

Таблица I

t_N	a_0					
	-0,1	-0,2	-0,5	-2,0	-5,0	-10,0
0,1	23.48	26.58	43.05	-19.44	7.68	-132.4
0,2	12.40	14.12	23.29	-9.01	-61.48	- 18.59
0,5	5.79	6.78	12.23	-11.51	- 7.05	- 9.29
2,0	2.84	4.41	-29.15	- 1.82	- 2.56	- 4.00
5,0	3.90	-17.86	-1.94	- 1.17	- 1.39	- 1.77
10.0	-15.71	- 2.12	-1.20	- 1.04	- 1.10	- 1.20

Таблица 2

t_n	q_0					
	-0,1	-0,2	-0,5	-2,0	-5,0	-10,0
0,1	0,967	0,970	0,982	1,037	1,154	1,36
0,2	0,936	0,943	0,964	1,074	1,313	1,762
0,5	0,851	0,867	0,915	1,181	1,803	3,015
2,0	0,568	0,610	0,745	1,586	3,587	7,065
5,0	0,332	0,392	0,598	1,884	4,631	9,240
10,0	0,208	0,279	0,531	1,970	4,904	9,802

На рис.2 приведены графические зависимости предельных значений настраиваемого параметра $\rho_o^i = \rho_o^i(t_n)$ для различных величин q_0 ($q_0 = -0,1$ - кривая 1; $q_0 = -0,5$ - кривая 2, $q_0 = -5,0$ - кривая 3). Соответствующие зависимости $\rho_o^{\bar{i}} = \rho_o^{\bar{i}}(t_n)$ изображены на рис.3 ($q_0 = -0,1$; $-0,2$; $-5,0$; $-10,0$ - кривые 1, 2, 3, 4). Из приведенных характеристик следует, что при настройке коэффициентов, относительно которых значения контролируемых координат являются линейными функциями (ρ_o в модели (12)), зона устойчивой работы алгоритма МДК представляет собой регулярную зависимость от величины интервала наблюдения t_n (рис.3). Тогда как при коррекции нелинейных параметров (q_0 в (12)) от величины начальных значений настраиваемых параметров зависит и вид самой зоны (рис.2).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные данные позволяют определить характер и степень зависимости качества работы алгоритма дифференциальной коррекции от выбора начальных значений настраиваемых параметров и объема информации о поведении координат системы в переходных режимах при отработке заданных командных сигналов и возмущений.

Таким образом предварительное исследование алгоритма МДК при коррекции параметров систем управления дает возможность рационально построить программу испытаний, избежать неустойчивых режимов работы автоматизированных систем настройки.

Данный подход может быть использован при оценке алгоритмов самонастройки, контуров адаптивного управления и систем идентификации параметров на основе интегральных оценок отклонений координат движения от требуемых по техническому заданию.

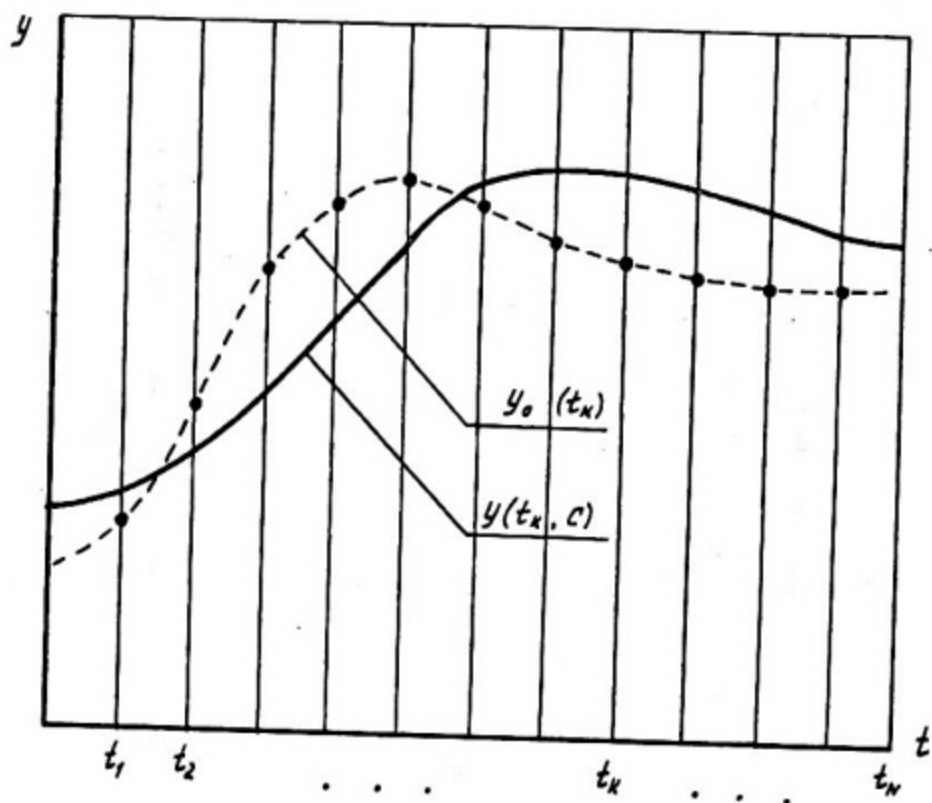


Рис. 1

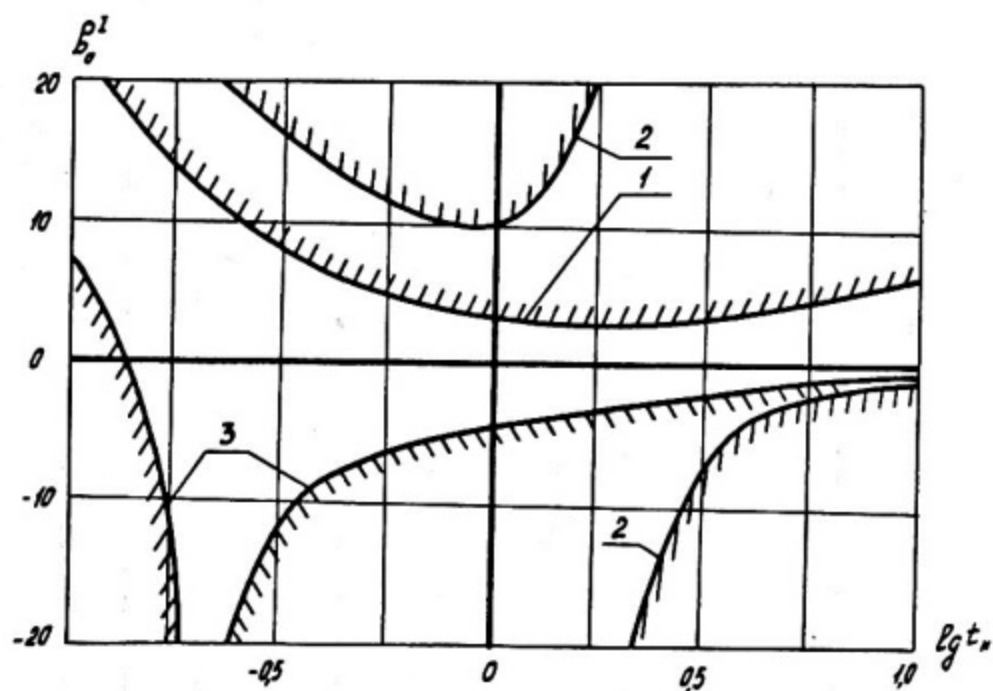


Рис. 2

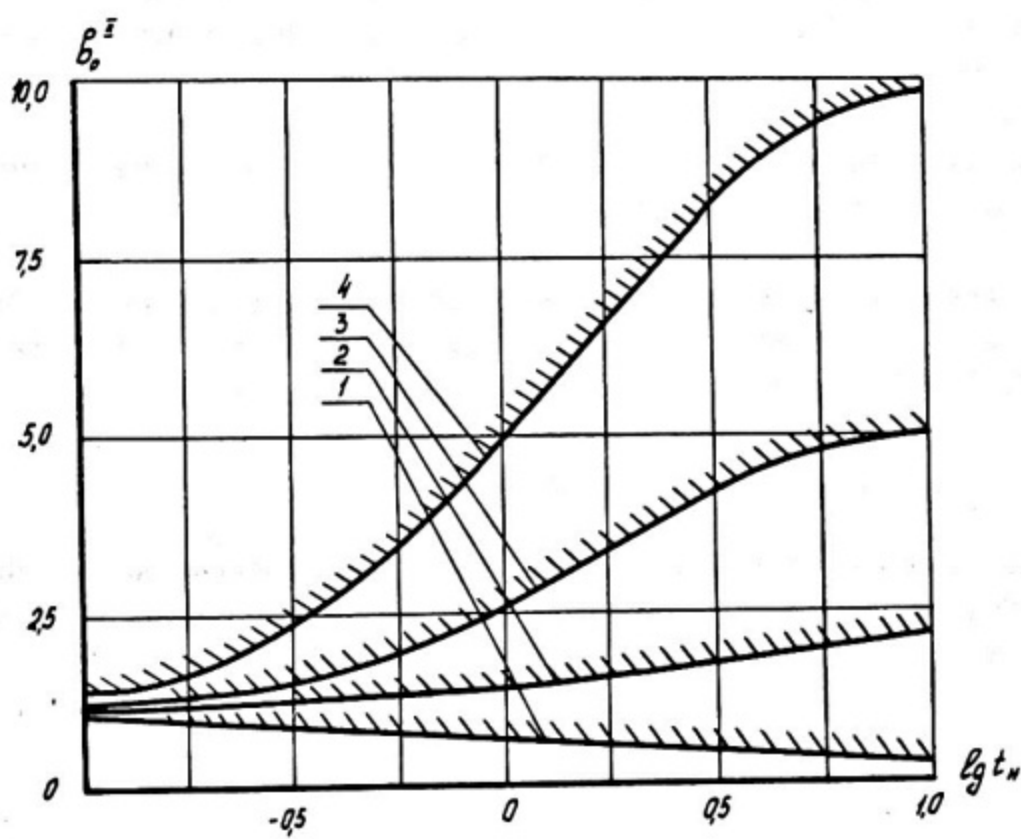


Рис. 3

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Илиф К.В., Мейн Р.Э. К вопросу об оценках методом максимального правдоподобия аэродинамических характеристик самолетов по данным летных испытаний. Перевод с англ. "Ракетная техника и космонавтика", 1979, 9, т. 17, с. 19.
2. Журавлев Ю.П., Забубенов В.Н. Мультитаймеры. Библиотека по автоматике. Вып. 604. Л.: Энергия, 1979. - 64с.
3. Круг Г.К., Сосулин Ю.А., Фатуев В.А. Планирование эксперимента в задачах идентификации и экстраполяции. М.: Наука, 1977. - 208 с.
4. Фельдбаум А.А. Основы теории оптимальных автоматических систем. М.: Наука, 1966. - 743с.
5. Ли У., Уитейкер Х. Оценка качества переходных процессов для самонастраивающихся систем управления. В сб. Самонастраивающиеся автоматические системы. М.: Наука, 1964, с.140-154.
6. *Stecloff W.A Sur la formule generale de l'analyse et ses diverses applications.-Annali di matematica pure ed applicata. Ser.3, 1913, t.21, pp. 65-120.*
7. Трапезников С.Н., Петроченко А.В. Нелинейная коррекция параметров систем управления. В сб. Методы расчета нелинейных систем управления. - М.: Энергоатомиздат, 1983, с. 77-83.

СОДЕРЖАНИЕ

	стр.
Введение	3
1. Настройка параметров в процессе испытаний	4
2. Дифференциальная коррекция параметров	6
3. Исследование алгоритма коррекции	8
4. Оценка области устойчивой работы алгоритма МДК	10
Заключение	14
Список литературы	18

Андрей Яковлевич Круглов
Сергей Николаевич Трапезников

Коррекция параметров нелинейных
систем управления

Рукопись поступила в издательский отдел 04.07.88

Редактор Е.Г.Станкевич

Ответственный за выпуск Л.А.Тиунова

Л. - 50384	Подписано в печать 2/ви-88г.	Формат 60x84 1/16
П.л. I, 25	Уч.-изд.л. I 25	Тираж 200 экз.
	Изд. № 052-88 Заказ 2/38	Цена 10 коп.

Московский инженерно-физический институт, типография МИФИ,
115409, Москва, Каширское шоссе, д.31