

МОДЕЛИРОВАНИЕ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ С ИДЕНТИФИКАТОРОМ

Чадеев В.М. (Институт Проблем Управления
Академии Наук СССР),

Алмаши Г. (Исследовательский Институт Вычислительной
Техники и Автоматизации Венгерской Акаде-
мии Наук).

I. В в е д е н и е

Адаптивные системы управления с идентификатором в цепи обратной связи (АСИ) имеют широкие перспективы применения в промышленности, особенно для управления крупными объектами, например, — прокатными станами. Это связано с тем, что такие системы не требуют предварительного точного знания модели объекта, а строят ее в процессе работы. Наличие модели позволяет осуществлять управление по возмущению для нестационарных объектов, а крупные объекты, как правило, нестационарны.

В настоящее время достаточно хорошо разработана теория адаптивной идентификации в разомкнутых системах [1,2]. В литературе имеются описания работающих в промышленности АСИ [3,4]. Многие вопросы в этих АСИ решены эвристически, в частности, — вопросы адаптивной идентификации в замкнутой системе. Получены также весьма общие результаты о гиперустойчивости АСИ в смысле Попова [5,6]. Однако, многие важные для практики вопросы оказываются слишком сложными, чтобы их можно было исследовать теоретически. Это влияние ограничений на качество идентификации, определение целесообразного уровня идентификации при переходе к управлению и т.п.

В настоящей работе предпринимается попытка исследования АСИ с помощью статистического моделирования.

2. Описание АСИ и постановка задачи.

Рассмотрим стандартную схему АСИ, показанную на рис. 1. На входе объекта 0 действует вектор случайных возмущений

$$x_N^T = (x_{1,N} \ x_{2,N} \ \dots \ x_{n-1,N}) \quad (1)$$

где T - знак транспонирования,

$x_{i,N}$ - i -я компонента вектора x_N в момент времени N , и скалярное управляющее воздействие u_N . Введем в рассмотрение также вектор входа

$$X_N^T = (x_{1,N}, \dots, x_{n-1,N}; u_N) \quad (2)$$

Скалярный измеримый выход объекта y_N связан с входными переменными уравнением

$$y_N = H_N^T X_N + \varepsilon_N, \quad (3)$$

где ε_N - шум измерения,

H_N - вектор неизвестных параметров объекта размерности n

$$H_N^T = (h_{1,N}, h_{2,N}, \dots, h_{n-1,N}, h_{n,N}). \quad (4)$$

Входные x_N и выходные y_N переменные объекта поступают в идентификатор 1, где с помощью алгоритма идентификации преобразуются в оценки объекта

$$K_{N-1}^T = (k_{1,N-1}, k_{2,N-1}, \dots, k_{n,N-1}). \quad (5)$$

В дальнейшем будем предполагать, что структуры модели и объекта совпадают и модель описывается уравнением

$$y_N^* = K_{N-1}^T X_N \quad (6)$$

где y_N^* - оценка выхода объекта (выход модели),
 K_{N-1} - оценки параметров объекта H_N .

Оценки параметров объекта K_{N-1} поступают в управляющую часть системы с, где используются для выработки управляющего воздействия u_N .

Для системы стабилизации, которую впоследствии мы только и будем рассматривать, уравнение управления имеет вид

$$K_{N-1}^T x_N = 0 \quad (7)$$

Это уравнение соответствует случаю, когда стабилизируется нулевое значение выхода. Это наиболее трудный для идентификации случай и мы ограничим свое рассмотрение только им. Дело в том, что уравнение (7) приводит к линейной зависимости между компонентами входного вектора. По этой причине в замкнутой системе невозможно использовать обычный МНК (метод наименьших квадратов), так как матрица исходных данных будет вырождена. Решая уравнение (7), получим явное выражение для управления

$$u_N = - \frac{1}{k_{n,N-1}} k_{N-1}^T x_N, \quad (8)$$

где

$$k_{N-1}^T = (k_{1,N-1}, \dots, k_{n-1,N-1}). \quad (9)$$

Для идентификации объекта как в замкнутом, так и в разомкнутом состоянии, будем использовать одношаговый алгоритм идентификации

$$K_N = K_{N-1} + \Delta_N \cdot x_N, \quad (10)$$

где скаляр Δ_N задается формулой

$$\Delta_N = \frac{y_N - y_N^*}{\gamma + x_N^T x_N}, \quad (II)$$

а константа γ выбирается заранее, в зависимости от уровня шума [2].

Алгоритм (IO), (II) подробно исследован в [2]. Он обеспечивает абсолютную сходимость во всей области начальных оценок. В частности, доказано, что если компоненты вектора x_N представляют собой независимые случайные величины с нулевыми математическими ожиданиями и одинаковыми дисперсиями, а сами векторы δ -коррелированы, γ равно нулю, то ошибка идентификации стационарного объекта ($H_N = \text{const.}$) будет уменьшаться по экспоненте в соответствии с формулой

$$e_N^T e_N = \left(1 - \frac{1}{n}\right)^N e_0^T e_0, \quad (I2)$$

где вектор ошибки идентификации e_N равен

$$e_N = H_N - K_N, \quad (I3)$$

n - размерность объекта.

Формула (I2) верна, когда H_N - константа.

Однако, в замкнутой системе скорость сходимости, по-видимому, будет меньше. Оценка скорости сходимости в замкнутой системе представляет значительные трудности.

Наша задача будет состоять в получении верхней границы скорости сходимости алгоритма (IO) в замкнутой системе и в получении путем моделирования зависимостей средней ошибки управления и средней ошибки идентификации от параметров системы управления.

3. Максимальная скорость сходимости.

Вычислим оценку максимальной скорости сходимости алгоритма (IO), (II) в замкнутой стационарной системе без помех. Как известно [2], ошибка идентификации за один шаг изменяется в соответствии с формулой

$$\theta_N^T \theta = \theta_{N-1}^T \theta_{N-1} - \frac{(\theta_{N-1}^T x_N)^2}{x_N^T x_N} \quad (I4)$$

В замкнутой системе ошибка идентификации тоже будет изменяться в соответствии с этой формулой; однако, компоненты входного вектора будут связаны между собой дополнительно уравнением (7). Подставляя значение u_N из (8) в (I4), получим

$$\theta_N^T \theta_N = \theta_{N-1}^T \theta_{N-1} - \frac{(c^T x_N)^2}{a^2 x_N^T x_N = (k_{N-1}^T x_N)^2} \quad (I5)$$

где

$$\begin{aligned} c &= (c_1, \dots, c_{n-1}), \\ c_i &= k_{n,N-1} \theta_{i,N-1} - k_{i,N-1} \theta_{n,N-1}, \\ a &\equiv k_{n,N-1}. \end{aligned} \quad (I6)$$

Вычисление математического ожидания ошибки $\theta_N^T \theta_N$ даже для случая, когда входные переменные статистически независимы, очень трудно. Поэтому вычислим значение ошибки, соответствующее наилучшему распределению компонент вектора x_N . Будем выбирать вектор x_N таким образом, чтобы минимизировать (I5). Решая систему уравнений

$$\frac{\partial \theta_N^T \theta_N}{\partial x_{i,N}} = 0, \quad (i=1,2,\dots,n-1). \quad (I7)$$

получим, что значения компонент вектора x_N , доставляющие минимум ошибке $e_N^T e_N$, равны

$$x_{j,N} = b \frac{h_{j,N} K_{N-1}^T K_{N-1} - k_{j,N} H_N^T K_{N-1}}{h_{1,N} K_{N-1}^T K_{N-1} - k_{1,N} H_N^T K_{N-1}}, \quad (I8)$$

(j=1,2,...,n-1)

где b - произвольная, но не равная нулю константа.

Ошибка идентификации будет изменяться в соответствии с формулой

$$e_N^T e_N = \frac{G^2}{K_{N-1}^T K_{N-1}}, \quad (I9)$$

где

$$G = H^T K_0 - K_0^T K. \quad (20)$$

Поскольку ошибка идентификации $e_N^T e_N$ может только монотонно уменьшаться, то из (I9) следует, что норма вектора оценок в замкнутой системе может только увеличиваться. Отсюда, в частности, следует, что в замкнутой системе ошибка идентификации, хотя и уменьшается монотонно, но не обязательно стремится к нулю. Ошибка идентификации была бы равна нулю (точнее могла бы быть), если начальная оценка лежит на сфере

$$K_0^T K_0 - K_0^T H = 0$$

В заключение подчеркнем еще раз, что оптимальный алгоритм идентификации (I8) конечно же не может быть реализован на практике. Смысл полученных результатов состоит в оценке предельных возможностей идентификации при случайном совпадении наиболее благоприятных условий.

4. Моделирование АСИ.

Моделирование АСИ осуществлялось, в основном, по схеме рис. 1, но дополнительно были введены дополнительные элементы. Были введены ограничения на области изменения u_N и K_N , исследовался алгоритм автоматического перехода из режима управления в режим обучения и обратно. Управление включалось, если выполнялся критерий

$$A_{crit} \geq A, \quad (21)$$

где $A = D^{\#} \Delta Y / D^{\#} Y$, (22)

где, в свою очередь,

$D^{\#} \Delta Y$ - оценка дисперсии ошибки предсказания,

$D^{\#} Y$ - дисперсия выхода объекта.

Исследовалось влияние уровня переключения A_{crit} на среднюю ошибку идентификации и управления. Были рассмотрены два алгоритма повторного использования данных. Подробнее программа моделирования описана в следующем параграфе.

5. Программа моделирования.

При моделировании предполагалось, что процесс изменения параметров объекта описывается стохастическим уравнением авторегрессии первого порядка

$$H_N = (E - Z_H) H_{N-1} + Z_H \xi_{H,N},$$

где E - единичная матрица,

Z_H - матрица весов процесса авторегрессии,

$\xi_{H,N}$ - вектор независимых случайных переменных с нулевым средним.

Изменение входных переменных при моделировании описывалось стохастическим уравнением авторегрессии первого порядка

$$x_N = (E - Z_x)x_{N-1} + Z_x \cdot \xi_{x,N},$$

где значения переменных те же самые, что и выше.

Автоматический переход от управления к чистой идентификации и обратно осуществлялся в соответствии с условием

$$A \geq A_{crit}.$$

Если A удовлетворяет этому условию, то система от управления переходит к идентификации, а управляющее воздействие попеременно принимает значения

$$u_N = lastu + \Delta u$$

и

$$u_N = lastu - \Delta u,$$

где $lastu$ - последнее значение управляющего воздействия при работе системы в режиме управления. Значение Δu задается в программе.

Программа моделирования предусматривает возможность повторной идентификации на основе одношагового алгоритма, когда число тактов работы системы в режиме управления превысит заданное число тактов l_{max} . Разработаны два варианта повторного использования данных. В первом варианте память заполняется в режиме обучения и делается пустой после использования данных из нее. Во втором варианте память при использовании данных сохраняется.

Программа позволяет вводить ограничения на оценки параметров объекта $k_{i,N}$ и управляющее воздействие u_N .

Логическая схема программы показана на рис. 2.

6. Результаты моделирования.

Следует отметить, что результаты данного параграфа необходимо рассматривать как предварительные, поскольку дополнительно должно быть исследовано влияние на результаты различных распределений исходных данных.

Однако в результате моделирования выявлены некоторые важные для практики особенности АСИ, которые могут быть использованы уже сейчас.

Дисперсия помехи выхода 2500, ограничения на управление ± 10 . Вектор входов x_N имел нулевое математическое ожидание и одинаковые дисперсии компонент, независимых между собой и во времени, значение z_N при моделировании было равно 0,01Е.

Подробнее мы остановимся на двух результатах.

а). Влияние уровня переключения A_{crit} .

Были исследованы два случая. Первый случай, когда ограничения на оценки параметров были очень велики $\pm 1000\%$ для каналов возмущений и $+ 1000\%$; $- 99\%$ - для канала управления. В этом случае, как видно из рис. 3, средняя ошибка стабилизации имеет минимум при некотором среднем значении уровня переключения A_{crit} , а ошибка идентификации медленно уменьшается с увеличением A_{crit} .

Второй случай, когда ограничения на оценки параметров достаточно узки $\pm 50\%$. В этом случае картина радикально меняется. Ошибка стабилизации с увеличением A_{crit} сначала увеличивается, а затем уменьшается и, достигнув после **единицы** некоторой постоянной величины, дальше не изменяется. Ошибка идентификации монотонно увеличивается с увеличением A_{crit} (рис. 4).

Таким образом, в системе управления, когда параметры объекта заранее неизвестны, уровень переключения должен быть выбран меньше единицы; если же параметры объекта заранее известны достаточно точно ($\pm 50\%$ как в нашем случае), то управление должно включаться практически сразу.

б). Влияние повторного использования данных.

Одношаговый алгоритм идентификации (IО), (II) почти всегда, за исключением экзотического случая ортогональности, только частично использует информацию, содержащуюся в исходных данных. Поэтому повторное их использование должно было улучшить качество идентификации. Так оно и оказалось, однако одновременно с этим увеличилась ошибка стабилизации.

Таким образом, в замкнутой системе, где процессы идентификации и управления связаны, повторное использование данных, улучшая идентификацию, ухудшает управление. Если критерием является ошибка стабилизации, то использовать старые данные повторно не следует, если ошибка идентификации, - то следует.

Литература

1. Перельман И.И.: Текущий регрессионный анализ и его применение в некоторых задачах автоматического управления.
Изд. АН СССР, ОТН. "Энергетика и автоматика", 1960, № 2.
2. Райбман Н.С., Чадеев В.М.: Построение моделей процессов производства.
Изд-во "Энергия", М., 1975.
3. Адаптивное управление точностью труб. Под ред. Данилова Ф.А. и Райбмана И.С.
М., "Металлургия", 1973.
4. Rajbman N.S., Chadeev V.M. Tibe Rolling mills adaptive control system. - Preprints of 3-rd IFAC/IFIP Conference on Digital Computer Applicafions of Process Control. Helsinki, Finland. 1971.
5. Juan M. Martin - Sanches. A new solufion of Control. Proc. IEEE, v. 64, № 8, August 1976.
6. Ципкин Я.З.: Основы теории обучающихся систем.
М., "Наука", 1970.

S u m m a r y

Simulation of an adaptive system with identification

W.M. Chadeev – Gedeon Almásy

The system is composed

- of a linear multi-input, single-output static process with slowly varying parameters,
- of a simple adaptive identification algorithm, and
- of a control law, adjusting a simple control variable in order to obtain zero output.

A heuristic strategy against model degeneration is investigated by simulation.

Ö s s z e f o g l a l ó

Egy adaptív identifikátoros rendszer szimulációs vizsgálata

Csagyeejev, V.M. – Almásy Gedeon

A rendszer összetevői:

- egy lineáris több-bemenetű, egykimenetű lassan változó paraméterű statikus folyamat,
- egy egyszerű adaptív identifikációs algoritmus, és
- szabályozás zérus kimenetre egy beavatkozó változóval.

A dolgozat egy modellefajulás elleni heurisztikus stratégia szimulációs vizsgálatát ismerteti.

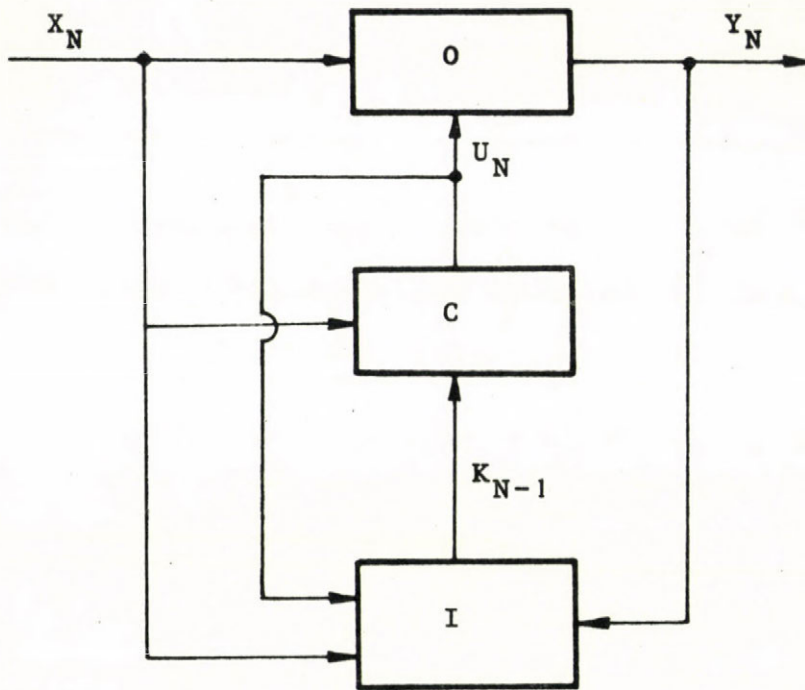


Рис. 1.

Блок-схема адаптивной системы с идентификатором
(АСИ)

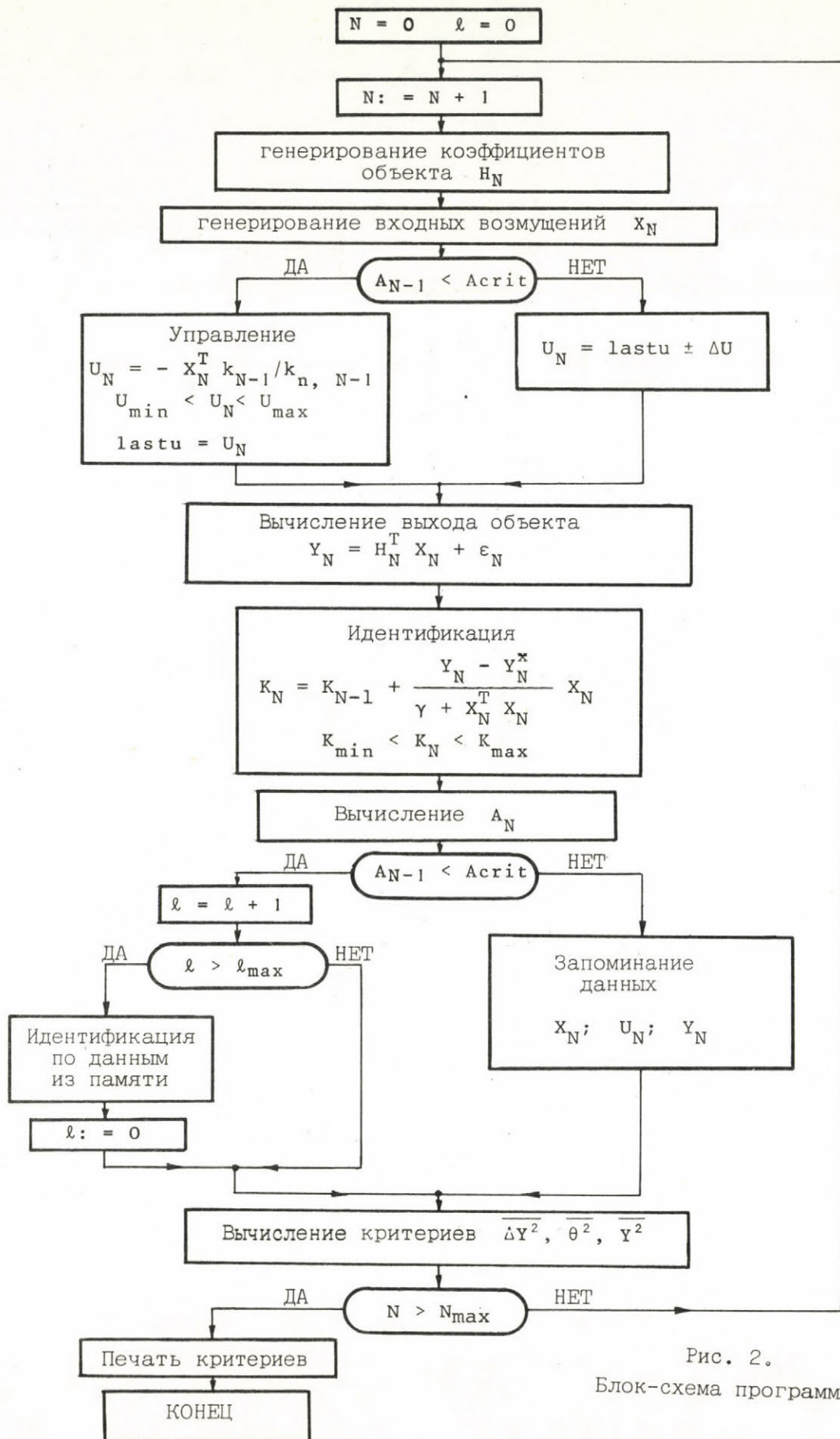


Рис. 2.
Блок-схема программы.

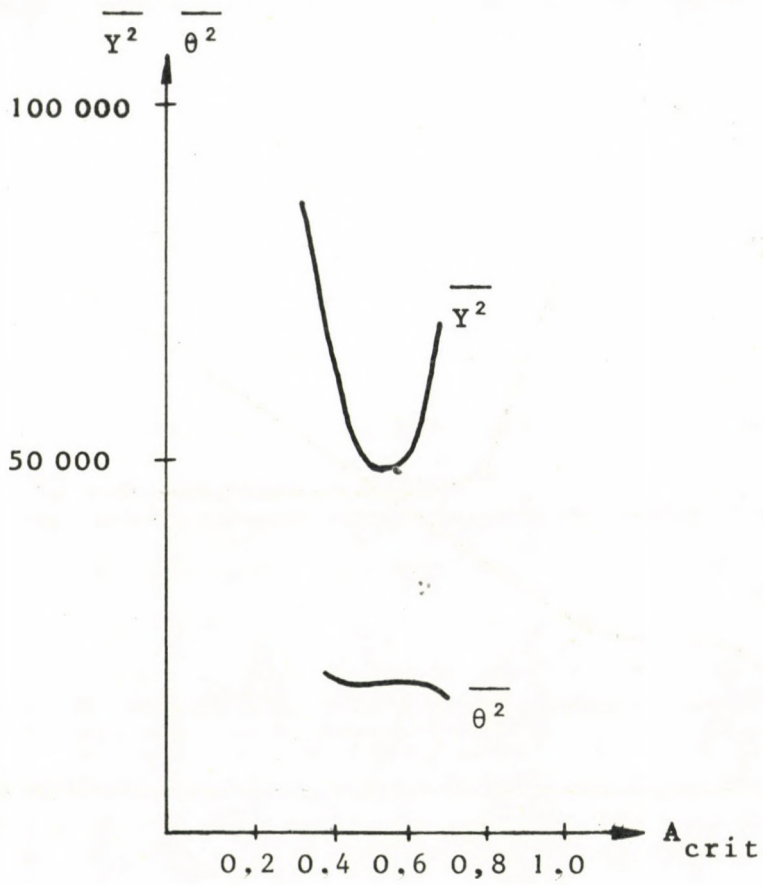


Рис. 3.

Моделирование при широких ограничениях

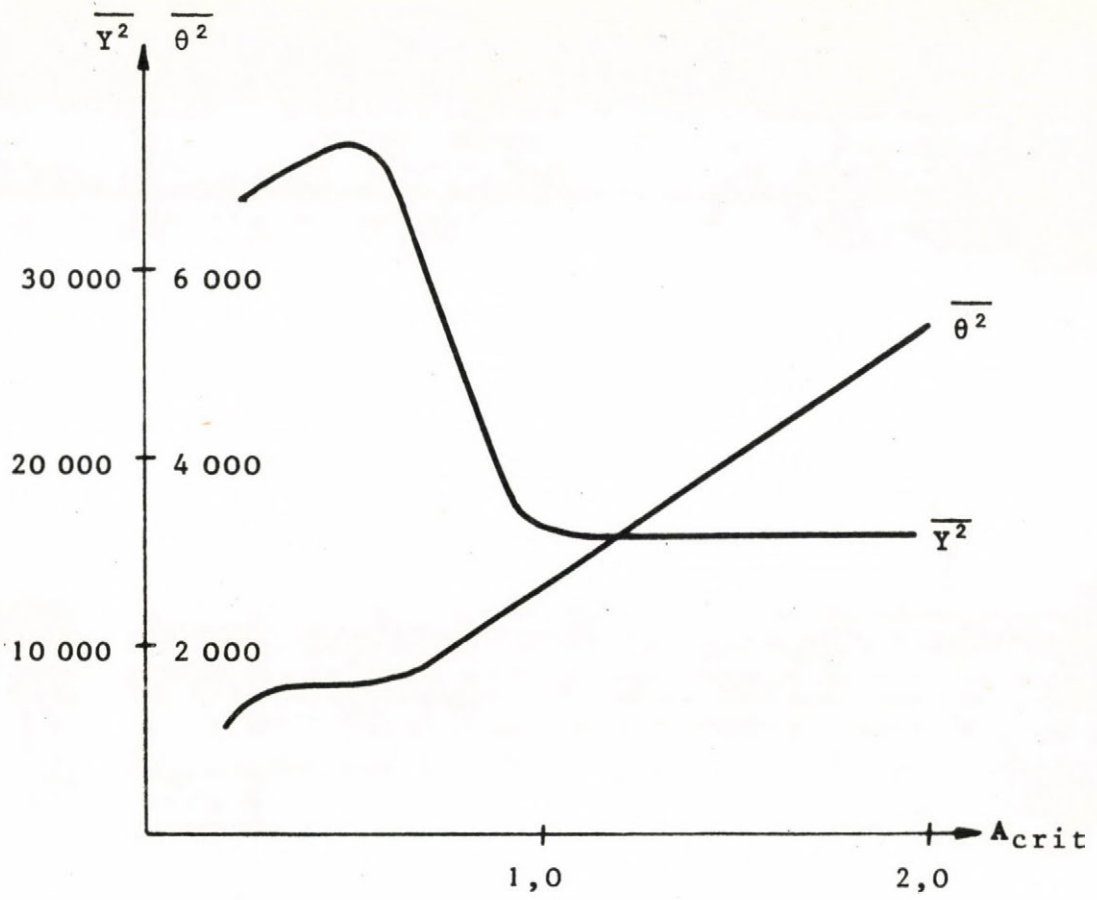


Рис. 4.

Моделирование при узких ограничениях