Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. XLVI, вып. 3, 1966 г.

УДК 669. 02/. 09 65. 011. 56

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СУШИЛЬНОГО БАРАБАНА КАК ОБЪЕКТА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

В. В. Стальский

Как известно, многие объекты (участки) автоматического регулирования можно экспериментально исследовать нанесением скачкообразных или импульсных воздействий на вход объекта с получением на выходе разгонной или импульсной характеристик соответственно. Определение динамических параметров объекта по его импульсной характеристике предпочтительней, чем по разгонной, так как, во-первых, дает более точные результаты и, во-вторых, проведение эксперимента с подачей воздействия в виде импульса меньше нарушает нормальный ход технологического процесса [Давыдов, 1953].

При снятии динамических характеристик этим методом принимается следующее: 1) все возмущающие воздействия во время эксперимента можно стабилизировать в некоторых пределах так, чтобы их влиянием на выходной параметр можно было пренебречь; 2) импульсное возмущение не влечет за собой существенных нелинейных искажений переходного процесса [Дудников, 1956].

Если первое условие не удовлетворяется, рекомендуются [Солодовников, 1960] статистические методы. Но и они не дают высокой точности результатов [Ицкович, 1964], связаны со значительным объемом вычислений. Поэтому по возможности желательно применять «классический» метод, т. е. снимать импульсные характеристики с последующей графоаналитической обработкой.

В настоящей статье сделана попытка расширения возможностей применения классического метода, его приложение к объектам, имеющим ряд возмущающих воздействий, которые не удается стабилизировать полностью во время опытов. Часть этих возмущений может быть и неконтролируемой (помехой). К таким объектам относится сушильный барабан для сушки апатитового концентрата. Основными возмущающими воздействиями процесса сушки являются: расход топлива, количество кека, влажность кека, расход воздуха, идущего на образование сушильного агента, и др. Расход воздуха вследствие «неорганизованных» (случайных) подсосов — фактически неконтролируемое воздействие.

Объект с достаточной для практики точностью можно аппроксимировать по всем каналам вход-выход одноемкостными апериодическими звеньями с чистым запаздыванием. Многие промышленные объекты, в том числе вращающиеся печи [Ицкович, 1959] и конструктивно аналогичные им

сушильные барабаны, можно с хорошей степенью точности аппроксимировать такими звеньями.

Функции $x_i(t-\tau_i)$, указанные на рис. 1, представим на интересующем нас интервале времени разложением в ряд Фурье

$$x_i(t-\tau_i)=\frac{A_{i0}}{2}+\sum_{k=1}^{m}[A_{ik}\cos\omega_{ik}(t-\tau_i)+B_{ik}\sin\omega_{ik}(t-\tau_i), \qquad (1)$$

где m — необходимое число членов ряда, которым можно аппроксимировать функции входов объекта с достаточной для практики точностью; A_{ik}, B_{ik} — коэффициенты ряда Фурье; ω — круговая частота.

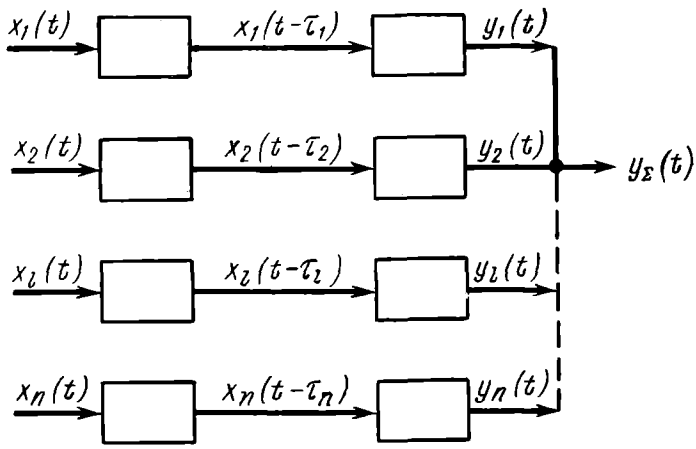


Рис. 1. Структурная схема объекта автоматического управления: $x_i(t)$ — известные функции времени, кроме одной при $i=l$; $x_l(t)$ — неконтролируемая и, следовательно, неизвестная функция времени (суммарная помеха); $i=1, 2, \ldots n$ — число каналов вход-выход; τ_i — чистое (транспортное) запаздывание по соответствующему каналу — искомый динамический параметр; $y_\Sigma(t)$ — известная функция времени — суммарный выход по регулируемому параметру; $y_i(t)$ — неизвестные функции времени — выходы по каждому каналу объекта; t — время; $x_i(t-\tau_i)$ — функция на выходе звена чистого запаздывания.

Систему дифференциальных уравнений объекта представим в виде

$$T_i\dot{y}_i+y_i=x_i(t-\tau_i), \qquad (2)$$

где T_i — постоянная времени объекта по i-му каналу.

Начальные условия

$$\text{при } t\leqslant\tau_i \qquad y_i=0. \qquad (3)$$

Интегрируя (2), получим

$$y_i=C_ie^{-\frac{t-\tau_i}{T_i}}+\frac{A_{i0}}{2}+\sum_{k=1}^{m}[a_{ik}\cos\omega_{ik}(t-\tau_i)+b_{ik}\sin\omega_{ik}(t-\tau_i)], \qquad (4)$$

где

$$a_{ik}=\frac{A_{ik}-B_{ik}T_i\omega_{ik}}{1+T_i^2\omega_{ik}^2};$$

$$b_{ik}=\frac{B_{ik}+A_{ik}T_i\omega_{ik}}{1+T_i^2\omega_{ik}^2};$$

C_i — постоянные интегрирования.

Из начальных условий

$$C_i = -\left(\frac{A_{i0}}{2} + \sum_{k=1}^{m} a_{ik}\right). \tag{5}$$

Из формулы (4)

$$y_i = -\left(\frac{A_{i0}}{2} + \sum_{k=1}^{m} a_{ik}\right) e^{-\frac{t-\tau_i}{T_i}} + \frac{A_{i0}}{2} + \sum_{k=1}^{m} [a_{ik} \cos \omega_{ik}(t-\tau_i) + b_{ik} \sin \omega_{ik}(t-\tau_i)], \quad t-\tau_i \geqslant 0. \tag{6}$$

Суммарная функция на выходе объекта

$$y_\Sigma = \sum_{i=1}^{n} y_i. \tag{7}$$

Значения T_i и τ_i первого приближения получаем методом нанесения импульсных искусственных возмущающих воздействий [Давыдов, 1953; Дудников, 1956] для всех i, кроме $i = l$ с той степенью точности, с которой это позволяет реальный объект.

Подставив полученные значения T_i и τ_i в формулу (6), получим для всех y_i, кроме $i = l$,

$$y_i = -\left(\frac{A_{i0}}{2} + \sum_{k=1}^{m} a_{ik}\right) e^{-\frac{t-\tau_i}{T_i}} + \frac{A_{i0}}{2} + \sum_{k=1}^{m} [a'_{ik} \cos \omega_{ik} t + b'_{ik} \sin \omega_{ik} t], \quad t-\tau_i \geqslant 0, \tag{8}$$

где

$$a'_{ik} = a_{ik} \cos \omega_{ik}\tau_i - b_{ik} \sin \omega_{ik}\tau_i,$$

$$b'_{ik} = a_{ik} \sin \omega_{ik}\tau_i + b_{ik} \cos \omega_{ik}\tau_i.$$

При снятии импульсных характеристик с объектов, подобных рассматриваемому, регулируемая величина y_Σ после снятия возмущения по данному каналу x_i не возвращается (рис. 2) к своему первоначальному значению, так как ни величину, по которой проводилось возмущение, ни другие входы не удается достаточно строго стабилизировать. Кроме того, стабилизировать помехи вообще не представляется возможным. Поэтому методом приближенного определения параметров [Давыдов, 1953] следует вычислить $y_{\Sigma 1_{max}}$, отсчитываемое от оси, отстоящей от оси времени на $\frac{d_1}{2}$ (рис. 2). Когда получим параметры τ_i и T_i по всем каналам, используя формулу (8), выделим на импульсной характеристике y_Σ каждого из каналов ту часть $y^*_{\Sigma 1}$, которая является суммой реакций объекта на все возмущения, кроме реакции на возмущения неконтролируемых входов и реакции на функцию входа, где наносится искусственное импульсное возмущение.

При этом следует учитывать, что первый член справа в уравнении (8) представляет свободные колебания, которые при достаточно большом t затухают. Суммарный выход всех контролируемых входов объекта после окончания переходного процесса

$$y^*_\Sigma = \sum_{i=1}^{n-1} \left[\frac{A_{i0}}{2} + \sum_{k=1}^{m} (a'_{ik} \cos \omega_{ik} t + b'_{ik} \sin \omega_{ik} t)\right]. \tag{9}$$

Построив кривую $y^*_{\Sigma 1}$, можно уточнить значение максимального отклонения $y_{\Sigma_{max}}$. По значению второго приближения $y_{\Sigma 2_{max}}$, найденному из графика рис. 2, и по значению площадей под кривыми x_i и $y^*_{\Sigma 1}$ тем же способом находим уточненные τ_i и T_i. Таким же образом можно получить и третье приближение.

Для выяснения степени достоверности постоянных, полученных этим методом, оценим величину составляющей помехи по сравнению

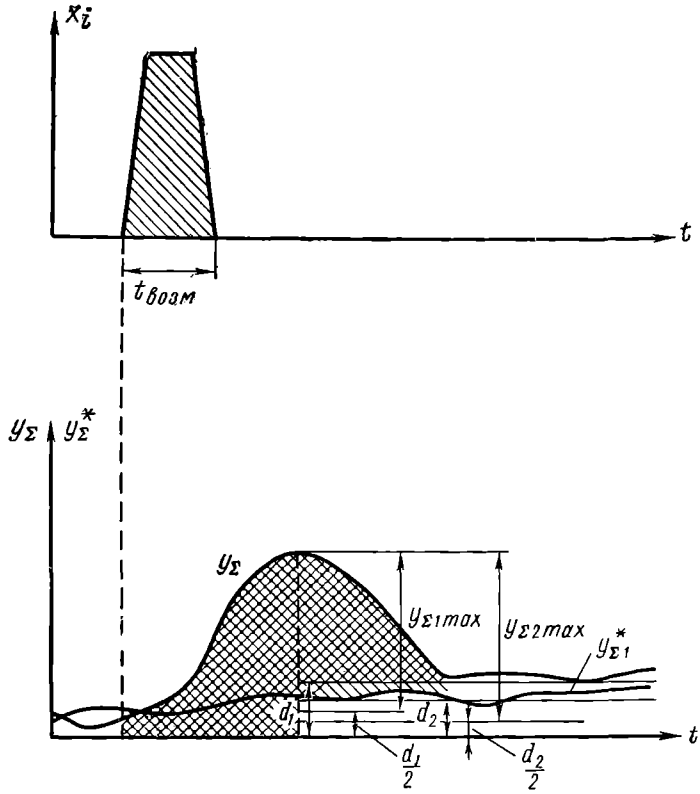


Рис. 2. График возмущающей функции (импульса) и реакции объекта.

с составляющими контролируемых входов. Используем для этого интегральную оценку простейшего вида, которая часто применяется при исследованиях качества переходных процессов в системах автоматического регулирования [Красовский, Поспелов, 1962].

Принимая из практических соображений некоторый отрезок времени $\theta \gg \tau$ (рис. 3), в течение которого режим работы объекта значительно не изменяется, оценим сравнительную величину воздействия помех за этот период.

Площадь под кривой по формуле (7)

$$I_\Sigma = \int_0^\theta |y_\Sigma| \, dt. \tag{10}$$

Площадь под кривой по формуле (9)

$$I^*_\Sigma = \int_0^\theta |y^*_\Sigma| \, dt. \tag{11}$$

Площадь под кривой помехи

$$I_{\text{п}} = \int_0^{\theta} \left| y_{\Sigma} - y_{\Sigma}^{*} \right| dt. \tag{12}$$

Отношение площади помехи к площади под суммарной кривой выхода от известных входов показывает степень воздействия помех на переходную функцию выхода

$$S = \frac{100 I_{\text{п}}}{I_{\Sigma}^{*}} = \frac{100 \int_0^{\theta} \left| y_{\Sigma} - y_{\Sigma}^{*} \right| dt}{\int_0^{\theta} \left| y_{\Sigma}^{*} \right| dt}, \ \%. \tag{13}$$

При

$$S \leqslant 10 \div 15\% \tag{14}$$

можно считать значения τ_i и T_i определенными с достаточной для практики степенью точности (во всяком случае, не меньше той, которую дают статистические методы [Ицкович, 1964]).

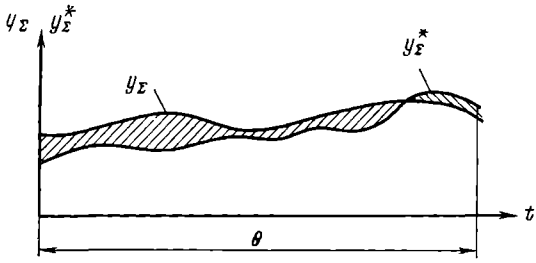


Рис. 3. График $y_{\Sigma} = f(t)$ и $y_{\Sigma}^{*} = f_1(t)$.

Коэффициенты усиления по исследуемым каналам можно определить из выражения

$$k_i = \left(\frac{A_{i0}}{2} + \sum_{k=1}^{m} a_{ik} \right) \tag{15}$$

и проверить по данным, полученным из импульсных характеристик.

Для выявления роли помехи и подтверждения возможности ее выделения рассматриваемые процессы промоделировали на электронной моделирующей машине МН-7*. Для упрощения вычислений функции возмущающих воздействий представлены только первыми членами разложения, и число возмущающих воздействий ограничено тремя: два контролируемых возмущающих воздействия и суммарная случайная помеха. В качестве датчика случайных возмущений использован известный генератор белого шума, работающий в инфразвуковом диапазоне.

Конструкция такого генератора состоит из проводящего цилиндра, в котором при вращении с постоянной скоростью во время работы генератора перекатываются металлические шарики, касающиеся центрального электрода, расположенного по оси цилиндра (рис. 4). Перекатывание шариков создает случайные изменения контактного сопротивления и общего сопротивления между центральным электродом и цилиндром. Изменение напряжения на выходе такого устройства близко к белому шуму [Красовский, 1962].

Для набора на модели принято только два контролируемых возмущающих воздействия (рис. 5, *а*, кривые *1*, *2*, *3*), причем амплитуда и частота помехи (рис. 5, кривая *3*) приблизительно соизмеримы с амплитудой и частотой любого из возмущений. Несмотря на это, условие (14) выполняется на всем протяжении эксперимента.

---

* Работа на модели выполнена С. В. Стороженко.

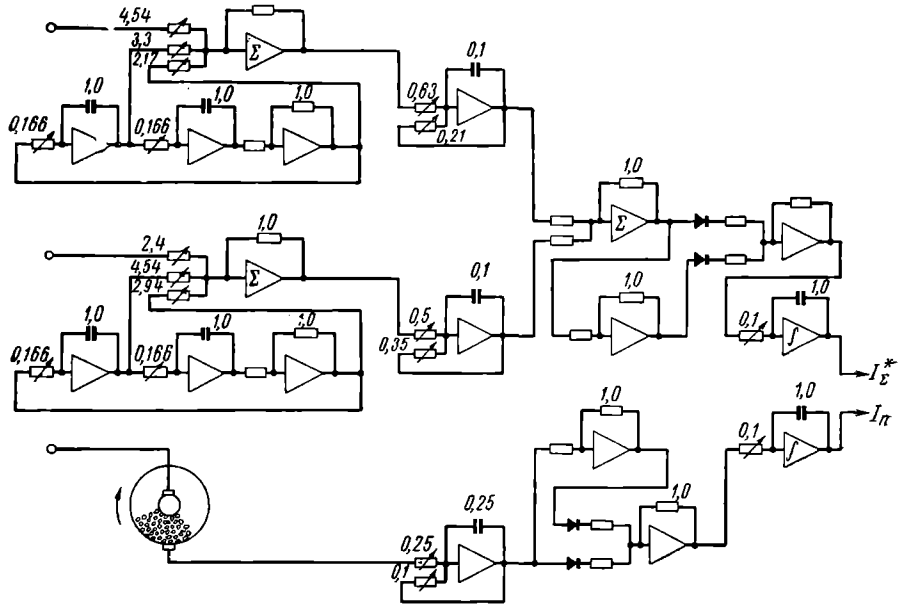


Рис. 4. Схема набора задачи на модели.

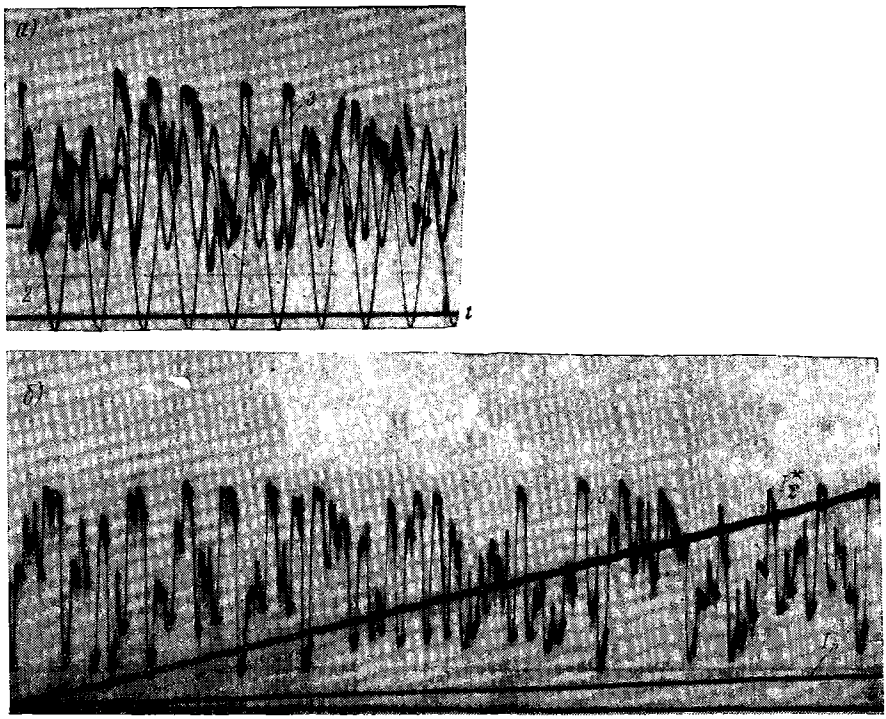


Рис. 5. Осциллограммы функций возмущающих воздействий *а* и осциллограммы интегралов I_Σ^* по формуле (11), $I_п$ по формуле (12) *б*.

ЛИТЕРАТУРА

Давыдов Н. И., Сергиевская Е. Н. Определение динамических параметров объектов регулирования по их экспериментальным характеристикам. Изв. ВТИ, № 5, 1953.

Дудников Е. Г. Основы автоматического регулирования тепловых процессов. ГЭИ, 1956.

Ицкович Э. Л. Синтез схемы автоматического регулирования вращающейся цементообжигающей печи. Приборостроение, № 10, 1959.

Ицкович Э. Л. Статистические методы при автоматизации производства. Энергия, 1964.

Красовский А. А., Поспелов Г. С. Основы автоматики и технической кибернетики. ГЭИ, 1962.

Солодовников В. В. Статистическая динамика линейных систем автоматического управления. Физматгиз, 1960.