

УДК 62-52

Д.Н. Дюнова, А.Л. Рутковский

**ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ,
ФУНКЦИОНИРУЮЩИХ В ЗАМКНУТЫХ СИСТЕМАХ**

Рассматривается линейный объект, выходная переменная которого стабилизируется относительно постоянного значения посредством обратной связи. Входное случайное воздействие является неконтролируемым. Определяются условия, при которых по наблюдениям выходной переменной системы может быть решена задача идентификации передаточной функции объекта и формирующего фильтра возмущения. Предложен итеративный алгоритм поиска искомых оценок параметров.

Ключевые слова: *идентификация в замкнутых системах, алгоритм идентификации, условия идентифицируемости.*

Большинство промышленных объектов функционирует в условиях замкнутых систем. Характерные особенности задачи идентификации в этом случае связаны с наличием обратной связи, устанавливающей причинно-следственную связь между выходом объекта и входным управляющим воздействием на объект в дополнение к уже существующей в объекте причинно-следственной связи между входом и выходом. Применение в этих условиях известных методов пассивной идентификации по данным измерений координат на входе – выходе объекта без учета влияния обратной связи является невозможным, так как приводит к неверным результатам или порождает неоднозначность решения задачи идентификации [1–3]. В связи с этим актуальным является разработка алгоритмов идентификации объектов управления, эффективных в условиях замкнутых систем.

1. Постановка задачи

Рассмотрим линейный объект, выходная переменная которого стабилизируется относительно своего постоянного значения с помощью обратной связи. Динамической системе регулирования соответствует схема, изображенная на рис. 1. На схеме приняты следующие обозначения: y – выходная переменная системы; x – наблюдаемая выходная переменная; u – управляющее воздействие; v , η – неконтролируемые стационарные случайные процессы типа дискретного белого шума с нулевым математическим ожиданием; τ – запаздывание в объекте по каналу передачи управляющего воздействия, величина которого известна, заданное значение выходной переменной системы y_3 – неизменное во времени заданное значение выходной переменной.

Положим, что объект описывается разностными уравнениями, допускающими линеаризацию, и является квазистационарным. Влияние внешней среды на объект проявляется посредством возмущающих воздействий типа дискретного белого шума с нулевым математическим ожиданием:

$$\begin{aligned} M\{v_t\} &= 0, \\ M\{\eta_t\} &= 0. \end{aligned}$$

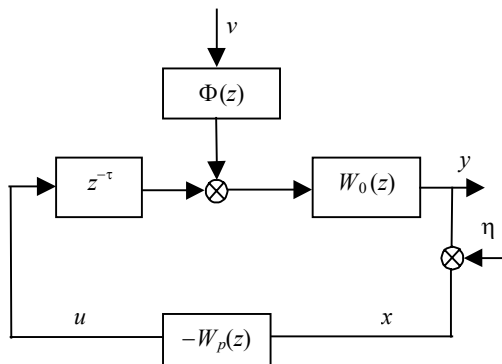


Рис. 1. Функциональная схема системы регулирования

Для определенности будем полагать, что модели объекта и формирующего фильтра возмущения представлены в виде передаточных функций с известными априори порядками полиномов n_0, m_0, n_Φ и неизвестными векторами параметров $[k_0, a_{0,1}, \dots, a_{0,n_0}, a_{1,1}, \dots, a_{1,m_0}, b_{0,1}, \dots, b_{1,n_\Phi}]$:

$$W_0(z) = k_0 \frac{P_0(z)}{Q_0(z)} = k_0 \frac{\prod_{i=1}^{m_0} (1 + a_{1,i} z^{-1})}{\prod_{i=1}^{n_0} (1 + a_{0,i} z^{-1})}, \quad (1)$$

$$\Phi(z) = \frac{1}{Q_\Phi(z)} = \frac{1}{\prod_{i=1}^{n_\Phi} (1 + b_{0,i} z^{-1})}. \quad (2)$$

Математическая модель «объект – среда» в виде канонической формы для дискретной стационарной динамической системы с одним входом и одним выходом имеет вид

$$y(z) = W_0(z) z^{-\tau} u(z) + W_0(z) \Phi(z) v(z). \quad (3)$$

В цепи обратной связи находится регулятор произвольного вида с известной передаточной функцией

$$W_p(z) = k_p \frac{P_p(z)}{Q_p(z)}. \quad (4)$$

Задача идентификации замкнутой системы, изображенной на рис. 1., состоит в определении несмещенных и состоятельных оценок параметров передаточной функции объекта $k_0, a_{0,i}$ ($i = 1, \dots, n_0$), $a_{1,i}$ ($i = 1, \dots, m_0$) и параметров передаточной функции формирующего фильтра возмущения $b_{0,i}$ ($i = 1, \dots, n_\Phi$).

Если бы входное случайное возмущение было доступно наблюдению, задача идентификации параметров передаточной функции объекта и спектральной плотности возмущения была бы тривиальной. Особенность рассматриваемой задачи состоит в том, что входное возмущение не контролируется и требуется по наблю-

даемым значениям одной лишь выходной переменной определить параметры передаточных функций объекта и формирующего фильтра возмущения.

Выражение для выходной переменной y в области комплексной переменной z имеет вид

$$y(z) = \frac{k_0 P_0(z) Q_\Phi(z) z^{-\tau} u(z) + k_0 P_0(z) v(z)}{Q_0(z) Q_\Phi(z)}. \quad (5)$$

Тогда выражение для наблюдаемой выходной переменной x

$$x(z) = y(z) + \eta(z) = \frac{k_0 P_0(z) Q_\Phi(z) z^{-\tau} u(z) + k_0 P_0(z) v(z) + Q_0(z) Q_\Phi(z) \eta(z)}{Q_0(z) Q_\Phi(z)}. \quad (6)$$

Обозначим неконтролируемую составляющую (5) через

$$\psi(z) = k_0 P_0(z) v(z) + Q_0(z) Q_\Phi(z) \eta(z) \quad (7)$$

или во временной области

$$\Psi_t = \sum_{i=0}^{m_0} g_{1,i} v_{t-i} + \sum_{i=0}^{n_0+n_\Phi} g_{2,i} \eta_{t-i}, \quad (8)$$

где коэффициенты $g_{1,i}$ и $g_{2,i}$ связаны с параметрами соответствующих передаточных функций однозначными соотношениями.

Поскольку выходная переменная системы y не наблюдается, вместо схемы, представленной на рис. 1, рассмотрим схему замкнутой системы, изображенной на рис. 2. В данном случае получена замкнутая система без возмущающего воздействия в обратной связи.

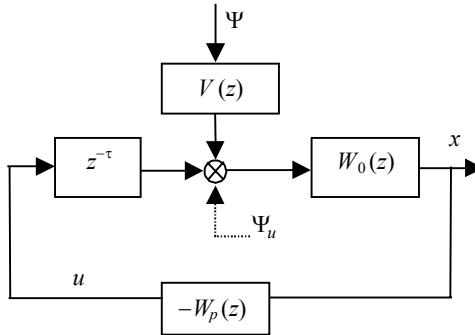


Рис. 2. Первая модификация функциональной схемы системы регулирования

Передаточная функция $V(z)$, согласно (6) и (7), имеет вид

$$V(z) = \frac{1}{k_0 P_0(z) Q_\Phi(z)}.$$

В соответствии со схемой, представленной на рис.2, выражение для выходной переменной x запишется как

$$x(z) = W_0(z) z^{-\tau} u(z) + W_0(z) V(z) \psi(z).$$

Поэтому выражение для неконтролируемого возмущения может быть представлено следующим образом:

$$\psi(z) = W_\psi(z)x(z) = Q_0(z)Q_\Phi(z)x(z) - k_0P_0(z)z^{-\tau}Q_\Phi(z)u(z).$$

Откуда с учетом равенств (1) и (2) получим

$$\psi(z) = \prod_{i=1}^{n_0+n_\Phi} (1 + \lambda_{1,i}z^{-1})x(z) - k_0 \prod_{i=1}^{m_0+n_\Phi} (1 + \lambda_{2,i}z^{-1})z^{-\tau}u(z), \quad (8)$$

где
$$\lambda_{1,i} = \begin{cases} a_{0,i} & \text{при } i = 1, \dots, n_0 \\ b_{0,i-m_0} & \text{при } i = n_0 + 1, \dots, n_0 + n_\Phi \end{cases}, \quad (9)$$

$$\lambda_{2,i} = \begin{cases} a_{0,i} & \text{при } i = 1, \dots, m_0 \\ b_{0,i-m_0} & \text{при } i = m_0 + 1, \dots, m_0 + n_\Phi \end{cases} \quad (10)$$

Выражению (8) во временной области соответствует разностное уравнение

$$\psi_t = x_t + \sum_{i=1}^{n_0+n_\Phi} \rho_i x_{t-i} - \sum_{i=\tau}^{m_0+n_\Phi+\tau} q_i u_{t-i}, \quad (11)$$

в котором коэффициенты ρ_i , q_i связаны взаимнооднозначными преобразованиями с коэффициентами $\lambda_{1,i}$, $\lambda_{2,i}$ и, следовательно, с коэффициентами передаточных функций $k_0, a_{0,i}, b_{0,i}, a_{1,i}$.

Таким образом, если бы удалось восстановить возмущение ψ в виде (11), то задача определения неизвестных оценок параметров передаточных функций объекта и формирующего фильтра была бы решена. Покажем, каким образом и при каких условиях можно осуществить указанное восстановление возмущения ψ по контролируемым переменным x и u .

2. Критерий идентификации в замкнутой системе

Для решения задачи идентификации необходимо ввести некоторую меру соответствия объекта и модели, в качестве которой нашли практическое применение критерии, характеризующие соответствие выходных координат модели и объекта. Сформулируем критерий идентификации для условия решаемой задачи.

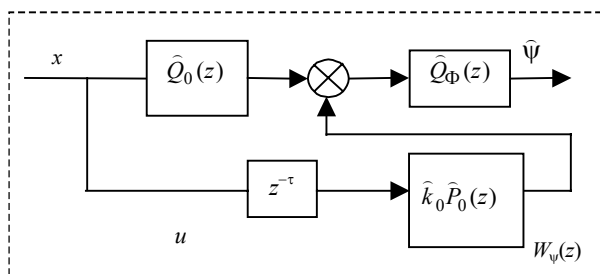


Рис. 3. Вторая модификация системы регулирования

В соответствии с (7) передаточная функция системы, которая восстанавливает неконтролируемое возмущение ψ , имеет вид

$$\hat{W}_\psi(z) = \hat{Q}_0(z)\hat{Q}_\Phi(z)x(z) - \hat{k}_0\hat{P}_0(z)z^{-\tau}\hat{Q}_\Phi(z)u(z), \quad (12)$$

где $\hat{Q}_0(z) = \prod_{i=1}^{n_0} (1 + a_{0,i} z^{-1})$, $\hat{Q}_\Phi(z) = \prod_{i=1}^{n_\Phi} (1 + b_{0,i} z^{-1})$, $\hat{P}_0(z) = \prod_{i=1}^{m_0} (1 + a_{1,i} z^{-1})$.

Схема системы приведена на рис. 3.

В соответствии с этой схемой возмущение ψ_t восстанавливается в виде оценки

$$\hat{\psi}_t = x_t + \sum_{i=1}^{n_0+n_\Phi} \hat{\rho}_i x_{t-i} - \sum_{i=\tau}^{m_0+n_\Phi+\tau} \hat{q}_i u_{t-i} . \quad (13)$$

Примем в качестве критерия идентификации условие равенства взаимно корреляционных функций

$$\varepsilon(\theta) = R_{x\hat{\psi}}(\theta) - R_{x\psi}(\theta) \quad (14)$$

Используя (13), можно выразить левую часть (14) через корреляционные функции наблюдаемых случайных процессов x и u , а также через неизвестные коэффициенты ρ_i , q_i . В результате получим

$$R_{x\hat{\psi}}(\theta) = R_{xx}(\theta) + \sum_{i=1}^{n_0+n_\Phi} \hat{\rho}_i R_{xx}(\theta-i) - \sum_{i=\tau}^{m_0+n_\Phi+\tau} \hat{q}_i R_{xu}(\theta-i) . \quad (15)$$

Тогда условие (14) принимает вид

$$R_{xx}(\theta) + \sum_{i=1}^{n_0+n_\Phi} \hat{\rho}_i R_{xx}(\theta-i) - \sum_{i=\tau}^{m_0+n_\Phi+\tau} \hat{q}_i R_{xu}(\theta-i) = R_{x\psi}(\theta) . \quad (16)$$

На первый взгляд, использование (16) не представляется возможным, так как сигнал ψ_t не наблюдается и, следовательно, неизвестна взаимно корреляционная функция $R_{x\psi}(\theta)$. Учитывая выражение (8) и известные свойства белого шума, имеем $R_{x\psi}(\theta) = 0$ при $\theta > n_0 + n_\Phi$. Поскольку интервал корреляции возмущения ψ конечен и равен $\theta > n_0 + n_\Phi$ (вытекает из (11)), то прошлые значения выхода x , начиная со сдвига $\theta = n_0 + n_\Phi$, некоррелированы с текущим значением возмущения ψ . Следовательно, вместо (16) можно записать следующий критерий, содержащий статистические характеристики только контролируемых случайных процессов:

$$R_{xx}(\theta) + \sum_{i=1}^{n_0+n_\Phi} \hat{\rho}_i R_{xx}(\theta-i) - \sum_{i=\tau}^{m_0+n_\Phi+\tau} \hat{q}_i R_{xu}(\theta-i) = 0 . \quad (17)$$

3. Условия параметрической идентифицируемости замкнутой системы

При использовании критерия (17) контролируемым переменным восстановлению возмущающего воздействия ψ можно выполнить по наблюдаемым сигналам x и u . Действительно на основе (17), при различных значениях θ , принадлежащих некоторому интервалу корреляции, можно сформировать систему $n_0 + 2n_\Phi + m_0 + 1$ алгебраических уравнений, линейных относительно неизвестных коэффициентов, в качестве которых выступают коэффициенты $\hat{\rho}_i, \hat{q}_i$. Решив полученную систему известными методами линейной алгебры, можно в соответствии с (9) – (13) перейти от коэффициентов $\hat{\rho}_i, \hat{q}_i$ к искомым оценкам коэффициентов $\hat{k}_0, \hat{a}_{0,i}, \hat{b}_{0,i}, \hat{a}_{1,i}$ передаточной функций объекта и передаточной функции формирующего фильтра.

Следует отметить, что определение коэффициентов $\hat{p}_i, \hat{q}_i$ на основе приведенного критерия возможно только для замкнутых систем. Действительно, пусть $W_p(z) = 0, U = \text{const}$, т.е. в идентифицируемой системе отсутствует управляемый вход. В этом случае в выражении (17) отсутствует последняя сумма, содержащая неизвестные коэффициенты $\hat{q}_i$. В то же время эти коэффициенты, как это следует из выражений (8), (10), (11), содержат информацию о статическом коэффициенте передачи объекта k_0 и коэффициентах числителя передаточной функции объекта $a_{1,i} (i = 1, \dots, m_0)$. Оставшихся же в (17) коэффициентов $\hat{p}_i$ недостаточно для однозначного определения параметров объекта и формирующего фильтра. Иными словами, коэффициенты p_i, q_i разностного уравнения (13), связывающего входное неконтролируемое возмущение ψ_t и наблюдаемые переменные x_t, u_t , являются одновременно функциями и коэффициентов передаточной функции объекта $k_0, a_{0,i}, a_{1,i}$, и коэффициентов передаточной функции формирующего фильтра $b_{0,i}$.

Вместе с тем лишь для замкнутых систем удастся разделить коэффициенты передаточных функций объекта и фильтра; для разомкнутых систем это разделение невозможно. Физический смысл таких, различных, с точки зрения идентификации, свойств замкнутых и разомкнутых систем можно объяснить следующим образом. В случае разомкнутой системы можно по выходной переменной определять лишь передаточную функцию объекта по каналу возмущение ψ – выходная переменная. Для того чтобы отдельно определить передаточные функции объекта и формирующего фильтра необходимо было бы на вход объекта дополнительно подать контролируемое возмущение, содержащее некоррелированную с возмущением ψ составляющую (пунктирная стрелка на рис.2).

В замкнутой системе роль упомянутого дополнительного возмущения играет управляющее воздействие, в котором при определенных условиях содержится некоррелированная составляющая. Детальный анализ позволяет установить, что не во всякой замкнутой системе управляющее воздействие содержит некоррелированную составляющую, достаточную для определения передаточных функций объекта и формирующего фильтра. Условия, при которых это возможно, являются условиями идентифицируемости замкнутых систем.

Определим условия, при которых из всевозможных уравнений (17), составленных для сдвигов θ , находящихся внутри интервала корреляции θ_k процесса x , т.е. для сдвигов $\theta = \theta_0, \dots, \theta_k (\theta_0 > n_0 + n_\Phi)$, можно сформировать систему $n_0 + 2n_\Phi + m_0 + 1$ независимых уравнений.

Сформируем на основе (17) избыточную систему уравнений вида

$$A\hat{C} = R, \quad (18)$$

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1j} & a_{1j+1} & \dots & a_{1l} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{k1} & \dots & a_{kj} & a_{kj+1} & \dots & a_{kl} \end{bmatrix}, \quad (19)$$

где

$$\begin{aligned} a_{11} &= R_{xx}(\theta_0 - 1), \quad a_{1j} = R_{xx}(\theta_0 - n_0 - n_\Phi), \quad a_{1j+1} = R_{xu}(\theta_0 - \tau), \\ a_{1l} &= R_{xu}(\theta_0 - \tau - m_0 - n_\Phi), \quad a_{k1} = R_{xx}(\theta_k - 1), \quad a_{kj} = R_{xx}(\theta_k - n_0 - n_\Phi), \\ a_{kj+1} &= R_{xu}(\theta_k - \tau), \quad a_{k,l} = R_{xu}(\theta_k - \tau - m_0 - n_\Phi), \\ \hat{C}^T &= [-\hat{p}_1 \dots -\hat{p}_{n_0+n_\Phi} \dots \hat{q}_\tau \dots \hat{q}_{\tau+m_0+n_\Phi}], \quad R^T = [R_{xx}(\theta_0) \dots R_{xx}(\theta_k)]. \end{aligned}$$

Данная задача однозначно разрешима тогда и только тогда, когда векторы матрицы A являются линейно независимыми. Для того чтобы система (20) имела единственное решение, необходима и достаточна линейная независимость столбцов матрицы A . В качестве критерия независимости воспользуемся критерием Грамма для системы векторов, согласно которому определитель матрицы $G = A^T A$ должен отличаться от нуля т.е.

$$\det(G) \neq 0. \quad (20)$$

Условие (21) является условием единственности решения системы (18), одновременно может рассматриваться как необходимое условие идентифицируемости замкнутой системы. В то же время, поскольку равенство (17) справедливо для замкнутой системы с параметрами $\hat{C} = C$, то условие (20) является одновременно и достаточным условием идентифицируемости.

4. Алгоритм идентификации

Рассмотренный выше критерии идентификации приводит к системам алгебраических уравнений, коэффициентами которых являются значения авто- и взаимно корреляционных функций. При этом решение задачи идентификации замкнутой системы сводится к последовательной процедуре определения коэффициентов ρ_i и q_i уравнения (11) и деления их на искомые параметры передаточной функции объекта и фильтра. Вместе с тем интерес представляют итеративные алгоритмы идентификации, с помощью которых значения корреляционных функций и идентифицируемых параметров уточняются на каждом шаге поступления информации о выходной переменной системы и управляющем воздействии.

Рассмотрим решение системы алгебраических уравнений (18) для определения коэффициентов ρ_i и q_i на некотором интервале корреляции $\theta = \theta_0, \dots, \theta_C$, параметры которого определяются соотношениями: $\theta_0 > n_0 + n_\Phi$, $\theta_C = \theta_0 + 2n_\Phi + m_0 + n_0$. В процессе решения данной задачи могут встретиться два варианта: избыточная система уравнений и избыточная система уравнений. Первый случай предполагает, что число уравнений рассматриваемой системы равно числу определяемых коэффициентов. Способы решения таких систем делятся на две группы: точные методы (метод Крамера, метод Гаусса, метод главных элементов, метод квадратных корней и др.), представляющие собой конечные алгоритмы для определения корней системы, и итерационные методы, позволяющие получать корни системы с заданной точностью путем использования сходящихся вычислительных процессов (метод итерации, метод Зейделя, метод релаксации и др.).

Рассмотрим вначале случай, когда матрица системы уравнений (17) квадратная:

$$R_{xx}(\theta) = - \sum_{i=1}^{n_0+n_\Phi} \hat{\rho}_i R_{xx}(\theta-i) + \sum_{i=\tau}^{m_0+n_\Phi+\tau} \hat{q}_i R_{xi}(\theta-i). \quad (21)$$

Заменив в (22) выражение для корреляционных функций их оценками, получим систему уравнений

$$x_t x_{t-\theta} = - \sum_{i=1}^{n_0+n_\Phi} \hat{\rho}_{i,t} x_t x_{t-(\theta-i)} + \sum_{i=\tau}^{m_0+n_\Phi+\tau} \hat{q}_{i,t} x_t u_{t-(\theta-i)}. \quad (22)$$

Введем обозначения:

$$X_t^T = [x_t, \dots, x_{t-N}], \quad \hat{C}^T = [-\hat{\rho}_{1,t} \dots -\rho_{n_0+n_\Phi,t} q_{\tau,t}, \dots, q_{\tau+m_0+n_\Phi,t}],$$

$$S_{1,t} = \begin{bmatrix} x_{t-\theta_0} & \dots & x_{t-\theta_C} \\ \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots \\ x_{t-\theta_0-N} & \dots & x_{t-\theta_C-N} \end{bmatrix}, \quad S_{2,t} = \begin{bmatrix} x_{t-1} & \dots & x_{t-n_0-n_\Phi} & u_{t-\tau} & \dots & u_{t-\tau-m_0-n_\Phi} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{t-1-N} & \dots & x_{t-n_0-n_\Phi-N} & u_{t-\tau-N} & \dots & u_{t-\tau-m_0-n_\Phi-N} \end{bmatrix}.$$

В результате получим новую систему уравнений

$$S_{1,t}^T X_t = S_{1,t}^T S_{2,t} \hat{C}_t. \quad (23)$$

Выражение (23) представляет собой систему нормальных уравнений. Поскольку матрица $S_{1,t}$ имеет ранг N и матрица $S_{2,t}$ имеет ранг N , то матрица $S_{1,t}^T S_{2,t}$ также имеет ранг N и является невырожденной и положительно определенной. Следовательно, для нее существует обратная матрица $(S_{1,t}^T S_{2,t})^{-1}$. Тогда из соотношения (23) оценку вектора коэффициентов $\hat{C}_t$ можно представить в виде

$$\hat{C}_t = (S_{1,t}^T S_{2,t})^{-1} S_{1,t}^T x_t. \quad (24)$$

Используя соотношение (25), можно получить итеративную процедуру для вычисления вектора искомых оценок неизвестных коэффициентов $\hat{C}_t$ на основе метода наименьших квадратов.

Положим

$$B_{t-1}^{-1} = (s_{1,t-1}^T s_{2,t-1})^{-1}, \quad B_t^{-1} = B_{t-1}^{-1} + s_{1,t}^T s_{2,t}, \quad (25)$$

где $s_{1,t}^T = [x_{t-\theta_0} \dots x_{t-\theta_N}]$, $s_{2,t}^T = [x_{t-1} \dots x_{t-n_0-n_\Phi} u_{t-\tau} \dots u_{t-\tau-m_0-n_\Phi}]$.

Тогда с учетом (25) и (26) следует

$$B_t = B_{t-1} - B_{t-1} s_{1,t} (1 + s_{2,t}^T B_{t-1} s_{1,t})^{-1} s_{2,t}^T B_{t-1}. \quad (26)$$

Используя зависимости (25) и (27), по аналогии с выводом, предложенным в работе [4], получим общую рекуррентную формулу для определения вектора искомых оценок коэффициентов:

$$\hat{C}_t = \hat{C}_{t-1} + B_{t-1} (1 + s_{2,t}^T B_{t-1} s_{1,t})^{-1} (x_t - s_{2,t}^T B_{t-1}), \quad (27)$$

$$B_0 = \gamma^2 I,$$

где $\gamma = \text{const}$, I – единичная матрица.

Таким образом, в виде зависимостей (26) и (27) выведены общие рекуррентные формулы для вычисления текущих оценок $\hat{\rho}_i$ и $\hat{q}_i$ коэффициентов ρ_i и q_i . Итеративная процедура (27), как показано в [3], дает несмещенные и состоятельные оценки исходного разностного уравнения. Для перехода к оценкам коэффициентов передаточной функции объекта и фильтра можно воспользоваться соотношениями (8) – (10).

5. Пример

Для проверки сходимости алгоритма идентификации проведен вычислительный эксперимент. Simulink-модель, имитирующая функционирование системы регулирования (рис. 4), включает объект с передаточной функцией $0,1 \frac{(1+0,4z^{-1})}{(1+0,1z^{-1})(1+0,2z^{-1})}$, фильтр с передаточной функцией $(1+0,3z^{-1})^{-1}$ и регулятор, описываемый соотношением $U_t = 0,3x_t + 0,6x_{t-1}$. Дискретный регулятор находится в составе системы регулирования в виде подсистемы PIDm.

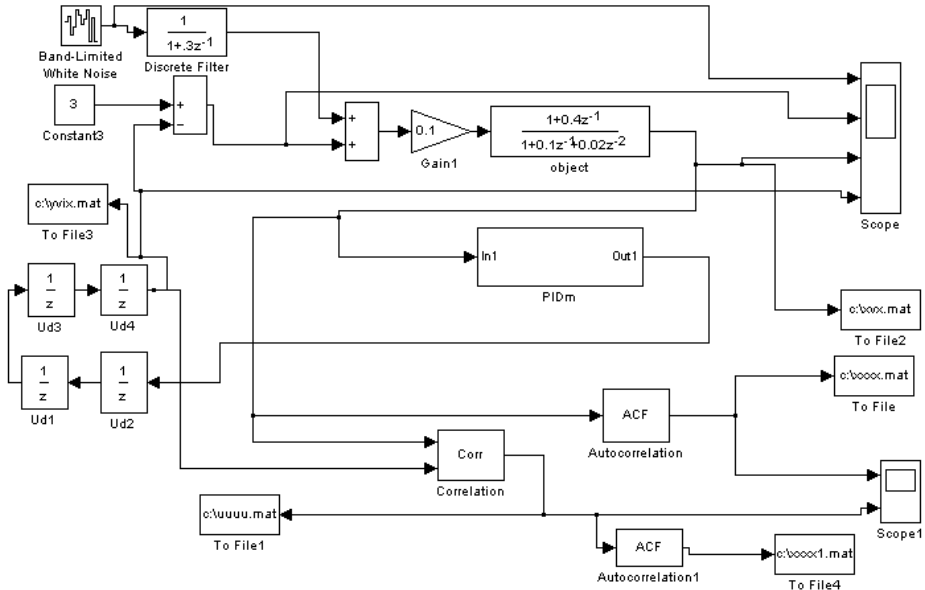


Рис. 4. Simulink-модель системы регулирования

С помощью Simulink-модели системы регулирования формируются значения входного и выходного сигнала объекта q_i . Использование итеративного соотношения (27) позволило получить несмещенные и состоятельные оценки разностного уравнения. Начальные оценки коэффициентов разностного уравнения приняты равными $\hat{C} = (0, 0, 0, 0, 0, 0)^T$. На основе соотношений (8) – (10) выполнено разделение коэффициентов передаточной функции объекта и фильтра. Результаты вычислений, иллюстрирующие сходимость алгоритма, представлены на рис. 5. Здесь изображены графики текущих оценок параметров замкнутой системы, содержащей ПИ-регулятор в обратной связи, при значении запаздывания $\tau = 4$.

Как видно из рис. 5, оценки параметров

$$[\hat{k}_0, \hat{a}_{0,1}, \dots, \hat{a}_{0,n_0}, \hat{a}_{1,1}, \dots, \hat{a}_{1,m_0}, \hat{b}_{0,1}, \dots, \hat{b}_{1,n_\phi}]$$

сходятся к истинным значениям

$$[k_0, a_{0,1}, \dots, a_{0,n_0}, a_{1,1}, \dots, a_{1,m_0}, b_{0,1}, \dots, b_{1,n_\phi}],$$

что согласуется со сформулированными ранее условиями идентифицируемости.

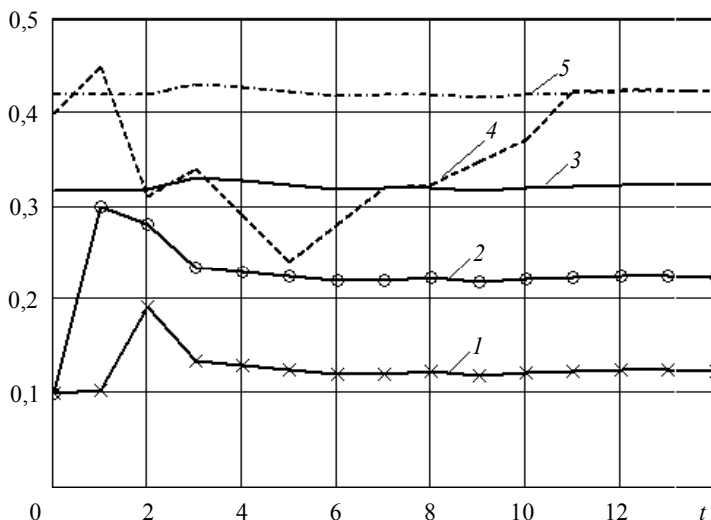


Рис. 5. Графики изменения оценок коэффициентов: кр. 1 – изменение значения оценки коэффициента $a_{0,1}$; кр. 2 – изменение значения оценки коэффициента $a_{0,2}$; кр. 3 – изменение значения оценки коэффициента $b_{0,1}$; кр. 4 – изменение значения оценки коэффициента $a_{1,1}$; кр. 5 – изменение значения оценки коэффициента k_0

Заключение

1. Рассмотрена задача идентификации объектов управления и формирующего фильтра возмущения в замкнутых системах регулирования, функционирующих в режиме нормальной эксплуатации при наличии возмущающих воздействий. Проведено исследование возможности применения корреляционного подхода к решению поставленной задачи.

2. Установлено, что идентифицируемость в замкнутой системе определяется видом авто- и взаимно корреляционных функций случайных процессов на входе и выходе объекта, а также величиной запаздывания по каналу передачи управляющих воздействий и передаточной функцией регулятора. Определены условия идентифицируемости в замкнутой системе, при которых по наблюдениям выходной переменной системы может быть решена задача параметрической идентификации передаточной функции объекта и формирующего фильтра возмущения.

3. Разработанный алгоритм идентификации позволяет на основе текущей информации о выходной переменной определять параметры передаточной функции формирующего фильтра возмущения и передаточной функции объекта. Результатом практической реализации алгоритма является получение несмещенных и состоятельных оценок искомых параметров передаточных функций. Предложенный алгоритм может найти применение при синтезе замкнутых систем регулирования и настройке регуляторов в процессе нормальной эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Яковлев В.Б. Адаптивные системы автоматического управления. Л.: Изд-во ЛГУ, 1984. 368 с.
2. Штейнберг Ш.Е. Идентификация в системах управления. М.: Энергоатомиздат. 1987. 197 с.

3. Семенов А.Д. , Артамонов Д.В. , Брюхачев А.В. Идентификация объектов управления. учеб. пособие. Пенза.: Изд-во ПГУ, 2003. 68 с.
4. Ли Р. Оптимальные оценки. Определение характеристик и управление. М.: Наука. 1964. 200 с.

Дюнова Диана Николаевна

Рутковский Александр Леонидович

Северо-Кавказский горно-металлургический институт

(государственный технологический университет),

E-mail: Dunova_dn@mail.ru; Rutkowski@mail.ru

Поступила в редакцию 21 ноября 2011 г.

Dyunova Diana N., Rutkovsky Alexander L. (North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy). Parametric identification of the control objects functioning in closed systems.

Keywords: identification in closed systems, algorithm of identification, an identifiability condition.

The task of identification of control objects and the perturbation shaping filter in the closed systems of regulation functioning in a mode of normal maintenance in the presence of perturbing influences is considered. The composition of system of regulation includes the linear object which output variable is stabilized concerning constant value by means of feedback.

As criterion of identification the condition of equality of mutually correlative function of an observable output signal and perturbing influence and correlative function of an observable output signal and a reset estimation of perturbing influence is accepted. Identifiability conditions in closed system at which on observations of output variable system the task of parametric identification of transmitting function of object and the perturbation shaping filter can be solved are defined. The developed algorithm of identification allows on the basis of the current information on an output variable to define parameters of the shaping filter of perturbation and transmitting function of object. Result of practical implementation of algorithm is obtaining of unbiased and consistent estimations of required parameters of transmitting functions which can find application at synthesis of closed systems of regulation and adjustment of regulators in the course of normal maintenance.