

УДК К62.503.4

В. А. Селиванов, канд. техн. наук, доц., Ю. В. Селиванова**МЕТОДЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

В статье рассмотрены методы идентификации систем автоматического управления электроприводами постоянного тока, необходимые при решении задач самонастройки. Рассмотрен круг задач на различных этапах создания и функционирования САУ, получения оценок их моделей. Проведен анализ теоретических и экспериментальных методов идентификации и даны рекомендации их применения для определенных классов объектов в системах автоматического управления.

При решении задач самонастройки систем автоматического управления электроприводом (САУ) требуется определить их структуру, параметры, показатели качества и т. п., т. е. требуется определить оценки их действительных математических моделей или операторов, которыми описываются САУ. Решение широкого круга задач на различных этапах создания и функционирования САУ требует получения оценок их моделей.

Существует ряд подходов к решению задачи идентификации САУ электроприводом. При идентификации САУ оценки моделей, как правило, формируются на основе теоретических и экспериментальных исследований. Остановимся на рассмотрении экспериментальных методов идентификации, которые не исключают использования априорной информации о физических свойствах исследуемых процессов, т. к. экспериментальный и теоретический пути определения динамических характеристик объекта взаимосвязаны.

Наиболее важным этапом эксперимента идентификации является выбор математической модели системы. Этот выбор зависит от большого числа факторов: цели, преследуемые экспериментом, физическая природа процессов, априорные сведения об изучаемой системе и т. п. Математическое описание объекта следует выбирать таким образом, чтобы оно отражало физическую структуру объекта и было удобно для выбора алгоритма управления. Модели могут описываться различными способами, среди которых можно выде-

лить непараметрические представления: импульсные переходные функции, передаточные функции, АФЧХ, ряды Вольтерры и параметрические модели вида

$$\frac{dU}{dt} = f(u, x, \beta, t); \quad y = g(u, x, \beta, t),$$

где u – вектор состояния; x – входной вектор; y – выходной вектор; β – вектор параметров.

В зависимости от выбора модели методы исследования делятся на две основные группы:

- модели линеаризации объекта;
- методы, в которых характеристики объекта рассматриваются как существенно нелинейные.

При исследовании поведения системы предполагается, что неточность динамической идеализации окупается простотой получения и осмысливанием результатов анализа. Практика использования линейных методов для исследования реальных систем электроприводов выявила возможность получения результатов с погрешностью $1 \div 20$ %, что вполне приемлемо для инженерных расчетов, носящих предварительный характер [1]. На основе идентификации могут исследоваться:

- линейные системы с сосредоточенными параметрами;
- нелинейные системы в виде кусочно-линейных моделей, а также системы на основе метода гармонической

линеаризации и его применение к задачам идентификации; статистическая линеаризация и ее применение к задачам идентификации; применение рядов Вольтерры для идентификации нелинейных систем.

Более подробно остановимся на параметрических методах идентификации динамических систем.

В общем случае уравнение линейной одномерной стационарной динамической САУ имеет вид:

$$\sum_{i=1}^n a_i \cdot y^{(i)}(t) + y(t) = \sum_{j=0}^m b_j \cdot x^{(j)}(t). \quad (1)$$

Предполагается, что $m \leq n$, $y^{(i)}(t)$, $x^{(i)}(t)$ представляют собой производные i -го порядка выходных и входных переменных системы, a_i и b_j неизвестные параметры.

Дискретные САУ могут быть описаны разностным уравнением:

$$\sum_{i=1}^n a_i \cdot \Delta^i \cdot y(k) + y(k) = \sum_{j=0}^m b_j \cdot \Delta^j \cdot x(k), \quad (2)$$

где Δ^i – разности i -х порядков.

С математической точки зрения параметрами системы в общем случае являются коэффициенты уравнений (1), (2). Если уравнения записаны в абсолютных величинах, то коэффициенты представляют собой функции конструктивных параметров: сопротивление, момент инерции, число витков и т. д.

Коэффициенты вместе с априорной информацией о структуре (виде) дифференциального уравнения, которое может быть и нелинейным, целиком определяют статические и динамические свойства рассматриваемого объекта. Однако определение коэффициентов уравнений по расчетным формулам не всегда представляется возможным, так как требует знания целого ряда конструктивных параметров. Недостоверность данных и сложность расчетов приводят к большой погрешности в определении исходных данных, что особенно недопустимо при исследовании промышленных объектов [2].

Экспериментальная идентификация САУ в значительной степени зависит от вида входных сигналов, воздействующих на системы. Она может проводиться по данным, получаемым в режиме нормального функционирования объекта (пассивная идентификация), и с помощью пробных сигналов (активная идентификация). Методы пассивной идентификации являются громоздкими и требуют значительных затрат времени. Применение пробного сигнала упрощает проблему идентификации и повышает точность определения динамических характеристик объекта [3].

Однако подача на объект пробных сигналов может нарушить режим нормального функционирования объекта, происходит возбуждение собственных колебаний объекта на нежелательных частотах и т. д.

Для определения класса объектов при идентификации параметров (в адаптивных САУ электропривода) недопустимо введение пробного сигнала требуемого уровня по условиям эксплуатации. Это заставляет применять методы идентификации с использованием нормальных контролируемых входных и выходных сигналов, т. е. методы пассивной идентификации.

С математической точки зрения экспериментальную идентификацию САУ можно рассматривать как задачу определения экстремума некоторого функционала. Вид этого функционала зависит от заданных критериев точности и от математической модели системы. Следовательно, принятие критерия и принятие математической модели системы полностью предопределяют решения задачи идентификации.

По виду критериев, используемых в качестве меры приближения математической модели к реальной системе, методы идентификации делятся на следующие группы:

- методы, минимизирующие выходную ошибку;
- методы, минимизирующие ошиб-

ку в уравнениях;

– методы, использующие статистические критерии.

При минимизации ошибок выходных сигналов требуется обеспечить минимум

ошибок в модели по отношению к выходу реальной системы при условии, что на их входы поданы одинаковые возмущения. Блок-схема показана на рис. 1.

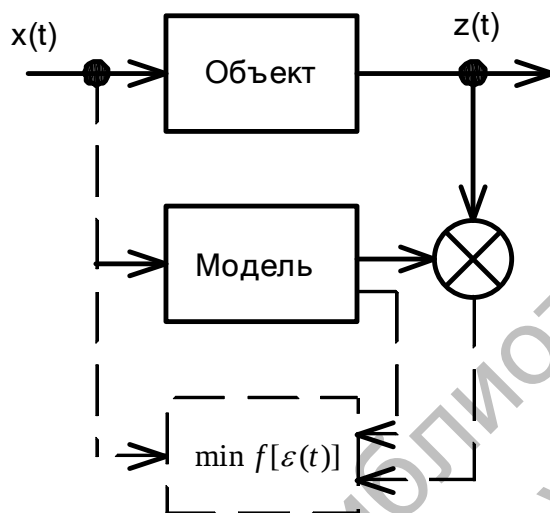


Рис.1. Блок-схема модели системы

Пусть $x(t)$ наблюдаемый входной сигнал, $z(t)$ наблюдаемый сигнал на выходе реальной системы. Можно предположить, что два эти сигнала являются стационарными случайными процессами и что система достигла своего устойчивого состояния. Принимая линейную модель системы, определим ошибку:

$$l(t) = z(t) - \int_0^{\infty} \omega_n(\tau) \cdot x(t - \tau) d\tau, \quad (3)$$

в результате можно найти минимум среднеквадратичного оптимума:

$$q = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \cdot \int_0^t l(t)^2 dt. \quad (4)$$

В этом случае импульсная переходная функция модели должна удовлетворять уравнению Винера-Колмогорова:

$$R_{xy}(t) = \int_0^{\infty} \omega_n(\tau) \cdot R_{xx}(t - \tau) d\tau, \quad t \geq 0. \quad (5)$$

Результаты идентификации, получен-

ные путем численного решения уравнения (5), имеют низкую точность. Это обусловлено чувствительностью уравнения (5) к ошибкам в определении автокорреляционной функции входного сигнала. Для определения корреляционных функций с заданной точностью требуется значительное время наблюдения, что возможно только для систем существенно стационарных. В случае даже слабой нестационарности системы увеличение времени наблюдения может привести лишь к увеличению погрешности.

Более точные результаты могут быть получены при использовании специальных тестовых сигналов, таких как псевдослучайные последовательности. Для систем с конечной памятью, подверженных влиянию чистого шума, необходимость в специальных тестовых сигналах отпадает. Наилучшую оценку $\omega(\cdot)$ в линейном случае можно получить непосредственной минимизацией функционала:

$$\int_M^L [z(t) - \int_0^n \omega(\tau) \cdot x(t - \tau) d\tau]^2 dt, \quad (6)$$

где L – длина реализации.

Аналогичный метод может использоваться и для нелинейных систем. Критерий (6) называется критерием минимума квадрата ошибки. Для дискретных систем он принимает вид:

$$z = F \cdot \beta, \quad (7)$$

что приводит к известному решению:

$$\beta = (F^T \cdot F)^{-1} \cdot F^T \cdot z, \quad (8)$$

где z – вектор наблюдений; β – вектор параметров; F – прямоугольная матрица, состоящая из элементов, зависящих от наблюдений. Особенностью этого метода является требование наличия на входе системы чистого шума, в противном случае оценки будут иметь значительное

смещение. В качестве тестовых сигналов, подаваемых на вход исследуемой системы, наиболее употребляемыми являются псевдослучайные последовательности. Основным преимуществом такого сигнала является простота вычисления для него псевдообратной матрицы. Этот сигнал легко генерировать, процедура идентификации значительно упрощается и точность результатов достаточно высока. Минимизация рассогласования для динамических систем и систем с распределенными параметрами всегда приводит к нелинейным уравнениям, даже в тех случаях, когда исходные системы линейны.

Еще одним возможным методом минимизации ошибки рассогласования выходных сигналов является использование подстраиваемых моделей (рис. 2) [3, 4].

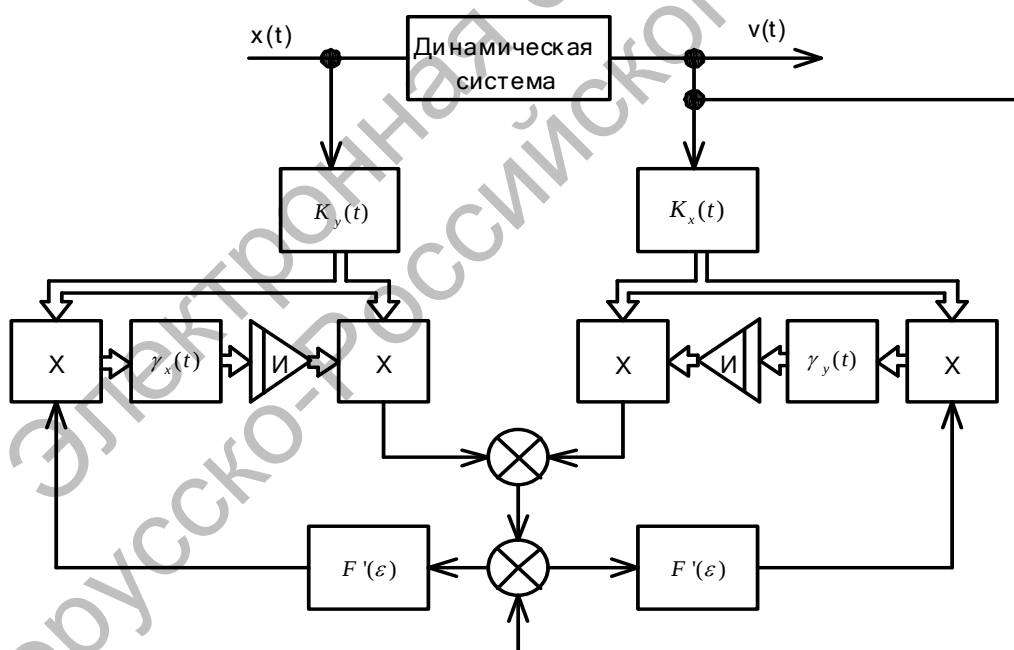


Рис. 2. Блок-схема подстраиваемой модели

Модели, способные с течением времени изменять свою структуру и параметры таким образом, чтобы по своим свойствам приблизиться к изучаемым системам,

могут использоваться как технические средства для идентификации систем [5]. Выбирая в качестве цели обучения минимум функционала:

$$J(C_y \cdot C_x) = M\{F(y(t) - C_y^T \cdot \phi_y(t) - C_x^T \cdot \phi_x(t))\}, \quad (9)$$

получим алгоритм обучения [5] в виде

$$\begin{aligned} \frac{dC_y(t)}{dt} &= \gamma_y(t) \cdot F'(y(t) - \hat{y}(t, t) \cdot \phi(t)) ; \\ \frac{dC_x(t)}{dt} &= \gamma_x(t) \cdot F'(y(t) - \hat{y}(t, t) \cdot \phi_x(t)) , \quad (10) \end{aligned}$$

где

$$\hat{y}(t, t) = C_y^T(t) \cdot \phi_y(t) + C_x(t) \cdot \phi_x(t) -$$

выходная величина модели.

Важным этапом метода идентификации является физическая реализация подстраиваемой модели и системы оптимизации неизвестных параметров.

Основными тенденциями в развитии адаптивных методов идентификации являются:

- анализ устойчивости моделей с изменяющимися параметрами;
- упрощение аппаратуры;
- анализ влияния шумов;
- увеличение чувствительности по некоторым параметрам за счет охватывания исследуемой системы некоторой известной обратной связью.

Если исследуемая система известна, то линейная обучающаяся модель после периода обучения позволит определить характеристики системы. Если исследуемая система нелинейная, то в этом случае линейная обучающаяся модель определит линейный статистический эквивалент линейной динамической системы, т. е. будет осуществлена статистическая линеаризация нелинейной динамической системы. Для нелинейных обучающихся систем число компонент вектора неизвестных параметров β увеличивается и возникает опасность, что «проклятие размерности» не позволит практически определить все эти параметры. В связи с этим особенно важным является нахождение способов преодоления этой трудности.

Предположим, что соотношения ме-

жду входными и выходными переменными описываются дифференциальным уравнением (1) и пусть истинный входной сигнал $x(t)$ и истинный выходной сигнал $y(t)$ заменены на их наблюдения $x^*(t)$ и $y^*(t)$ соответственно, а истинные параметры системы β заменены на их оценки β^* . Тогда разбаланс опишется уравнением

$$f(x^{*(n)}(t), \dots, x^*(t), y^{*(m)}(t), \dots, y(t)^*, \beta^*) = g(t). \quad (11)$$

Это уравнение может быть принято в качестве меры отклонения поведения исследуемой системы. Для наглядности применения такого критерия можно рассматривать дискретную систему автоматического управления, описываемую разностным уравнением (2). Пусть наблюдения $z(\cdot)$ представляют собой смесь истинного выходного сигнала $y(\cdot)$ и ошибок измерения $l(\cdot)$. Тогда (2) можно преобразовать к виду

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n a_i \cdot \Delta^i \cdot z(k) + z(k) - \sum_{j=0}^m b_j \cdot \Delta^j \cdot x(k) = \\ = \sum_{j=0}^m b_j \cdot \Delta^j \cdot \varepsilon(k) = g(k), \quad (12) \end{aligned}$$

где $g(k)$ можно рассматривать как ошибку в уравнениях.

Не нарушая общности, можно принять, что имеется N таких уравнений для наблюдения с номерами $k = 0, 1, \dots, N-1$, где $N > n + m + 1$. Пусть z_0 обозначает вектор-столбец с компонентами a_i и b_j соответственно. Система из N уравнений может быть заменена в матричной форме:

$$z_0 + z_a = x \cdot b = q = \varepsilon \cdot a, \quad (13)$$

где ε , z , x представляют прямоугольные матрицы; q – вектор столбец с компонентами $q(i)$.

Если через L обозначить $N \cdot (n + m + 1)$ – мерную матрицу $[-ZX]$,

а через $\beta(n+m+1)$ – мерный вектор столбец $\begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix}$, то это уравнение можно привести к виду

$$z_0 = L \cdot \beta = q = \varepsilon \cdot a. \quad (14)$$

В качестве критерия минимизации может быть выбрана квадратичная форма:

$$(z_0 - L \cdot \beta)' R (z_0 - L \cdot \beta), \quad (15)$$

где R – некоторая положительно определенная прямоугольная матрица размерности $N \times N$.

Оптимальное решение β имеет вид:

$$\hat{\beta} = (L' \cdot R \cdot L)^{-1} \cdot L' \cdot R \cdot Y_0. \quad (16)$$

После подстановки этого выражения в (15) получим:

$$\beta = \hat{\beta} = (L' \cdot R \cdot L)^{-1} \cdot L' \cdot R \cdot q. \quad (17)$$

Ошибка в β определяется вторым членом равенства (17), математическое ожидание которого не равно нулю. Следовательно, оценка по критерию минимума ошибок в уравнениях в общем случае при-

водит к смещенным оценкам. Однако, вводя искусственные приемы обработки входных и выходных сигналов системой специально подобранных скользящих модулирующих функций, в частных случаях можно получить оценки неизвестных параметров с минимальным смещением, вполне удовлетворительным для практического применения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ордынцев, В. М. Математическое описание объектов автоматизации / В. М. Ордынцев. – М. : Машиностроение, 1965. – 360 с. : ил.
2. Ямпольский, Д. С. Определение динамических параметров электроприводов постоянного тока / Д. С. Ямпольский, Р. Т. Орлова, Б. И. Решмин. – М. : Энергия, 1971. – 56 с. : ил.
3. Костюк, В. И. Беспойсковые градиентные самонастраивающейся системы / В. И. Костюк. – Киев : Техника, 1969. – 280 с. : ил.
4. Солодовников, В. В. Расчет и проектирование аналитических самонастраивающихся систем с эталонными моделями / В. В. Солодовников, Л. С. Шрашко. – М. : Машиностроение, 1972. – 320 с. : ил.
5. Цыпкин, Я. З. Основы теории обучающихся систем / Я. З. Цыпкин. – М. : Наука, 1970. – 400 с. : ил.

Белорусско-Российский университет
Государственный политехнический колледж
Материал поступил 25.06.2007

V. A. Selivanov, J. V. Selivanova
Methods of identification of direct current electric drives automated control systems
Belarusian-Russian University
State Politechnical College

In the article methods of identification of direct current electric drive automated control systems necessary for solving the tasks of auto tuning have been examined. The tasks of creation and functioning of automated control systems on different stages, the obtaining of the estimated values of the models have been examined. The analysis of theoretical and experimental methods of identification have been conducted, and recommendations of it's usage for different object's classes in automated control systems have been given given.