

ПРИМЕНЕНИЕ ВСТРАИВАЕМЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ИДЕНТИФИКАЦИИ

В.В. Курганкин, С.В. Замятин, А.С. Алексеев

Томский политехнический университет
E-mail: zamsv@tpu.ru

Рассматривается применение подхода идентификации на основе вещественного интерполяционного метода для построения встраиваемых систем управления. Приводится описание математического и алгоритмического аппарата идентификации объектов управления в дискретной форме. Осуществляется выбор аппаратной части встраиваемой системы управления. Приводятся результаты натурных экспериментов.

Ключевые слова:

Системы автоматического регулирования, дискретное вещественное преобразование Лапласа, встраиваемые системы.

Key words:

Control systems, discrete real valued Laplace transform, embedded systems.

Введение

Одной из актуальных задач современной теории автоматического управления является разработка подходов, применимых для построения встраиваемых систем управления. Это вызвано растущими требованиями к качеству управления объектами и, одновременно, обеспечению их автономности. Одним из путей решения такой задачи является использование встраиваемых систем управления. Однако основной проблемой применения встраиваемых систем является ограниченность их вычислительных ресурсов. В связи с этим встает необходимость использования при построении таких систем машинно-ориентированных, экономичных в вычислительном отношении подходов [1, 2]. Более предпочтительными являются те из них, которые базируются на дискретных формах представления объектов и систем. В этом плане с выгодной стороны показал себя подход, основанный на дискретном вещественном преобразовании Лапласа [3].

В качестве математического аппарата для разработки алгоритмического и программного обеспечения встраиваемых систем был выбран вещественный интерполяционный метод, позволяющий работать с системами не только в непрерывной [4], но и дискретной форме.

В работе рассматривается построение локальной системы управления для идентификации двигателя постоянного тока, реализованной на микроконтроллере.

1. Математические основы построения системы

Объект управления будем рассматривать как одномерный по входу и выходу (рис. 1).

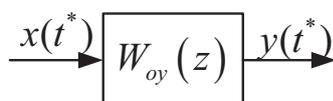


Рис. 1. Модель объекта управления

На рисунке: $x(t^*)$ – входной тестовый сигнал (например: ступенчатый, трапецидальный и т. п.); $y(t^*)$ – отклик объекта управления на входное воздействие (здесь и в дальнейшем знак * означает дискретность сигнала); $W_{oy}(z)$ – дискретная передаточная функция (ПФ) объекта.

Задача идентификации состоит в нахождении структуры и параметров дискретной передаточной функции объекта в дробно-рациональном виде

$$W_{oy}(z) = \frac{b_m z^m + b_{m-1} z^{m-1} + \dots + b_1 z + b_0}{a_n z^n + a_{n-1} z^{n-1} + \dots + a_1 z + a_0} = \frac{\sum_{i=0}^m b_i z^i}{\sum_{i=0}^n a_i z^i}, \quad (1)$$

где z – оператор Лапласа для дискретных систем; a_i и b_i – коэффициенты полиномов знаменателя и числителя дискретной передаточной функции; n и m – степени этих полиномов.

2. Вещественное дискретное преобразование

Вещественное дискретное преобразование является обобщением вещественного интегрального преобразования [4] на решетчатые функции $f(kT_0)$, где $f(t)$ – преобразуемая функция времени, T_0 – период квантования, $k=1,2,\dots$

Вещественное изображение $F^*(\delta)$ функции-оригинала $f(kT_0)$ определено формулой прямого преобразования

$$F^*(\delta) = \sum_{k=0}^{\infty} f(kT_0) e^{-\delta k T_0}, \quad \delta \in [c_\delta, \infty), \quad c_\delta \geq 0. \quad (2)$$

Значение параметра c_δ выбирается из условия сходимости ряда. В практическом отношении более удобно вместо формулы (2) использовать преобразование

$$F(v) = \sum_{k=0}^{\infty} f(kT_0) v^{-k}, \quad v \in [c_v, \infty), \quad (3)$$

в которое трансформируется (2) при подстановке $v = \exp(\delta T_0)$.

При этом необходимо обеспечить сходимость ряда, то есть наложить ограничение на нижнюю границу изменения переменной v : $c_i \geq 1$.

Формулы (2) и (3) можно рассматривать как частные случаи соответственно дискретного преобразования Лапласа и z -преобразования. Это позволяет использовать таблицы соответствий оригиналов и их изображений по Лапласу $F^*(p)$ и z -изображений при обращении вещественных изображений $F(\delta)$ и $F(v)$, находить изображения $F(\delta)$ и $F(v)$ по функциям $F^*(p)$ и $F(z)$ путем формальных замен $p \rightarrow \delta$ или $z \rightarrow v$, решать более простым образом другие задачи.

Для представления вещественных изображений в вычислительных системах привлекаются модели в виде численных характеристик (ЧХ). В случае использования формы $F(v)$ такой характеристикой будет множество $\{F(v_i)\}_\eta = \{F(v_1); F(v_2); \dots; F(v_\eta)\}$, определяемое значениями функции $F(v)$ на сетке $c \leq v_1 < v_2 < \dots < v_\eta$. Формирование ЧХ обычно выполняется в рамках равномерной сетки, так что поиск узлов сводится к определению значений первого и последнего узлов v_1 и v_η , а остальные находятся из условия их равномерного распределения

$$v_i = v_1 + \frac{v_\eta - v_1}{\eta - 1} (i - 1), \quad i = \overline{2, \eta - 1}. \quad (4)$$

Значение первого узла для устойчивых систем (а именно такие будут рассматриваться далее) в общем случае целесообразно принять равным единице. Для этого есть по крайней мере две причины. Во-первых, для принятого класса систем при $v_1 = 1$ сохраняется сходимость ряда в (3). Во-вторых, такой выбор v_1 обеспечивает формирование уравнения. Для определения значения последнего узла v_η рекомендуется воспользоваться расчетной формулой [4]

$$(0, 1 \dots 0, 2) [F(v_i) - F(\infty)] + F(\infty) = F(v_\eta). \quad (5)$$

Приведенные сведения позволяют найти элементы ЧХ $\{F(v_i)\}_\eta$ по заданному аналитическому выражению (3)

$$F(v_i) = \sum_{k=0}^{\infty} f(kT_0) v_i^k, \quad i = \overline{1, 2, \dots, \eta}.$$

При использовании ЧХ приходится решать не только прямую задачу ее формирования, но и обратную ей – получение передаточной функции. Для решения обратной задачи составляется система уравнений

$$F(v_i) = \frac{b_m v_i^m + b_{m-1} v_i^{m-1} + \dots + b_1 v_i + b_0}{a_n v_i^n + a_{n-1} v_i^{n-1} + \dots + a_1 v_i + 1}, \quad i = \overline{1, \eta}, \quad (6)$$

в которой число уравнений η , определяемое размерностью ЧХ, должно быть равно числу неизвестных коэффициентов: $\eta = m + n + 1$.

Вещественное дискретное преобразование имеет свойства, которые создают некоторые преимущества в задачах расчета систем автоматического управления. Выделим некоторые из них:

- переход к вещественной форме осуществляется значительно проще по сравнению, например, с частотным подходом;
- существует простая взаимная связь между вещественными изображениями и z -формами;
- математические модели в форме вещественных функций и ЧХ ориентированы на применение численных методов;
- получение ЧХ возможно как по вещественным функциям-изображениям, так и по их оригиналам.

Кроме того, следует отметить, что идентификация объекта управления в дискретной форме (1) имеет ряд преимуществ по отношению к непрерывным моделям. Во-первых, во встраиваемых микропроцессорных системах снимаемая с объекта характеристика является дискретной. Во-вторых, упрощается численный расчет оценки успешности идентификации, вследствие того, что отпадает необходимость использовать обратное преобразование Лапласа для получения функции-оригинала в пространстве времени.

3. Параметрическая идентификация объекта управления

Пусть задана характеристика выходного сигнала $y(kT_0)$ объекта для входного сигнала $x(kT_0)$. Задача состоит в следующем. Задана структура модели объекта в виде

$$W(z) = \frac{b_m z^m + b_{m-1} z^{m-1} + \dots + b_1 z + b_0}{a_n z^n + a_{n-1} z^{n-1} + \dots + a_1 z + 1}, \quad m \leq n, \quad (7)$$

параметры m и n которой известны. Требуется найти коэффициенты $b_m, \dots, b_0, a_n, \dots, a_1$, обеспечивающие выполнение заданного критерия приближения функции $y_M(kT_0) = W(z) \cdot x(kT_0)$ к исходной $y(kT_0)$. В качестве критерия адекватности модели используется оценка вида

$$\Delta y = \max \frac{|y_M(kT_0) - y(kT_0)|}{y_{ycm}}, \quad (8)$$

где y_{ycm} – установившееся значение снятой характеристики.

При этом важно найти такое решение, при котором

$$\Delta y \rightarrow \min. \quad (9)$$

Для решения этой задачи представим (7) в вещественной форме

$$W(v) = \frac{b_m v^m + b_{m-1} v^{m-1} + \dots + b_1 v + b_0}{a_n v^n + a_{n-1} v^{n-1} + \dots + a_1 v + 1}, \quad m \leq n. \quad (10)$$

Необходимо получить значения коэффициентов выражения (10). Предварительно необходимо определить размерность ЧХ η и значения узлов интерполирования $v_i, i = \overline{1, 2, \dots, \eta}$. Для размерности η используется расчетная формула: $\eta = m + n + 1$. В рамках данного исследования будем рассматривать устойчивые объекты, вследствие чего, можно принять $v \in [1, \infty)$ и определить значение первого

узла интерполирования $v_1=1$. Узел v_η найдется из соотношения (5), значения остальных $(\eta-2)$ узлов – по формуле (4).

Заключительная операция – непосредственное вычисление элементов $W(v_i)$. За основу принимается выражение (3), которое с учетом дискретизации переменной v и принятых обозначений принимает вид

$$W(v_i) = \frac{\sum_{k=0}^{\infty} y(kT_0)v_i^{-k}}{\sum_{k=0}^{\infty} x(kT_0)v_i^{-k}} \cong \frac{\sum_{k=0}^N y(kT_0)v_i^{-k}}{\sum_{k=0}^N x(kT_0)v_i^{-k}}, \quad v_i = \overline{1, \eta}.$$

Введенный параметр N определяет время окончания переходного процесса, то есть момент времени, с которого можно пренебрегать значениями $y(kT_0)v_i^{-k}$ и $x(kT_0)v_i^{-k}$ ввиду их малости.

Далее необходимо найти коэффициенты ПФ (10) по ЧХ $\{W(v_i)\}_\eta$. Эта задача сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений (6). В данной задаче система уравнений имеет вид

$$W(v_i) = \frac{b_m v_i^m + b_{m-1} v_i^{m-1} + \dots + b_1 v_i + b_0}{a_n v_i^n + a_{n-1} v_i^{n-1} + \dots + a_1 v_i + 1}, \quad i = 1, 2, \dots, \eta = m + n + 1.$$

Существование и единственность решения системы уравнений обеспечивается выбором узлов v_i и принятой формой (10).

Полученные в результате решения коэффициенты ПФ (10) являются в то же время коэффициентами z -формы $W(z)$. Это позволяет сформировать ПФ $W(z)$ и найти реакцию модели объекта $y_M(kT_0)$ на входной сигнал $x(kT_0)$.

Решение задачи параметрической идентификации завершается проверкой точности полученного решения с помощью оценки (8). Если ошибка оказалась недопустимо большой, ее можно уменьшить путем смещения узла v_η , который в свою очередь определяет пропорциональные изменения других узлов.

4. Структурно-параметрическая идентификация

В рамках данного исследования при решении задачи структурной идентификации рассматриваются модели в виде ПФ с равными порядками полиномов в числителе и знаменателе. Это допущение позволяет снизить вычислительные затраты.

Задача структурно-параметрической идентификации состоит в следующем. Для модели объекта в виде

$$W(z) = \frac{b_m z^m + b_{m-1} z^{m-1} + \dots + b_1 z + b_0}{a_m z^m + a_{m-1} z^{m-1} + \dots + a_1 z + 1},$$

требуется найти параметр m и коэффициенты $b_m, \dots, b_0, a_m, \dots, a_1$, обеспечивающие выполнение заданного критерия приближения функции $y_M(kT_0)$ к исходной $y(kT_0)$. Показателем успешности идентификации является оценка (8).

Первый этап идентификации основывается на простом переборе структур модели, т.е. $m=1, 2, \dots, M$, где M – максимальный рассматриваемый порядок модели.

Далее для каждого значения m производится параметрическая идентификация. Если находится решение лучше, чем для прошлых структур, то полученная модель проверяется на устойчивость. Если для данного решения модель устойчива, такое решение запоминается. Устойчивость модели оценивается по расположению корней характеристического уравнения на комплексной плоскости.

Результатом идентификации является та модель устойчивого объекта, для которой выполняется условие (9).

5. Практическая реализация

Устройство идентификации реализовано на базе микроконтроллера STM32F103. Данный микроконтроллер обладает 32-разрядным ядром процессора с максимальной частотой 72 МГц. Объем ПЗУ микроконтроллера составляет 512 кб, а ОЗУ – 64 кб. Микросхема STM32F103 имеет встроенный 12-разрядный АЦП с временем выборки 1 мкс, а также интерфейсные модули USB, CAN, USART и др. [5].

В качестве объекта идентификации используется двигатель постоянного тока «Дунамо» Sliven PIVT6-25/3A со встроенным тахогенератором. Основные характеристики объекта идентификации: максимальное напряжение питания – 30 В; пусковой ток – 6 А; момент вращения – 0,1 Н·м; частота вращения – 3000 об/мин.

На основе изложенных теоретических основ идентификации объекта управления было разработано программное обеспечение, реализованное на вычислительной платформе STM32F103.

Натурный эксперимент проводился при нулевых начальных условиях. В качестве тестового сигнала на якорную обмотку двигателя подается напряжение в форме ступенчатого воздействия с уровнем, составляющим 75 % от величины максимального напряжения. Максимальный рассматриваемый в эксперименте порядок модели $M=5$. Результаты параметрической идентификации для каждой структуры представлены в таблице.

Таблица. Результаты идентификации объекта управления

Порядок структуры m	Оценка Δy , %
1	13,8
2	6,48
3	8,78
4	>100 (неустойчивая модель)
5	>100 (неустойчивая модель)

Из таблицы видно, что решением структурной идентификации является модель с $m=2$ ($\Delta y=6,48$ %). Дискретная ПФ модели для $m=2$ имеет вид

$$W(z) = \frac{270,0923 z^2 - 501,0923 z + 249,3615}{z^2 - 1,8615 z + 0,8676}.$$

На рис. 2 приведены характеристики объекта управления, полученной модели и оценка адекватности модели.

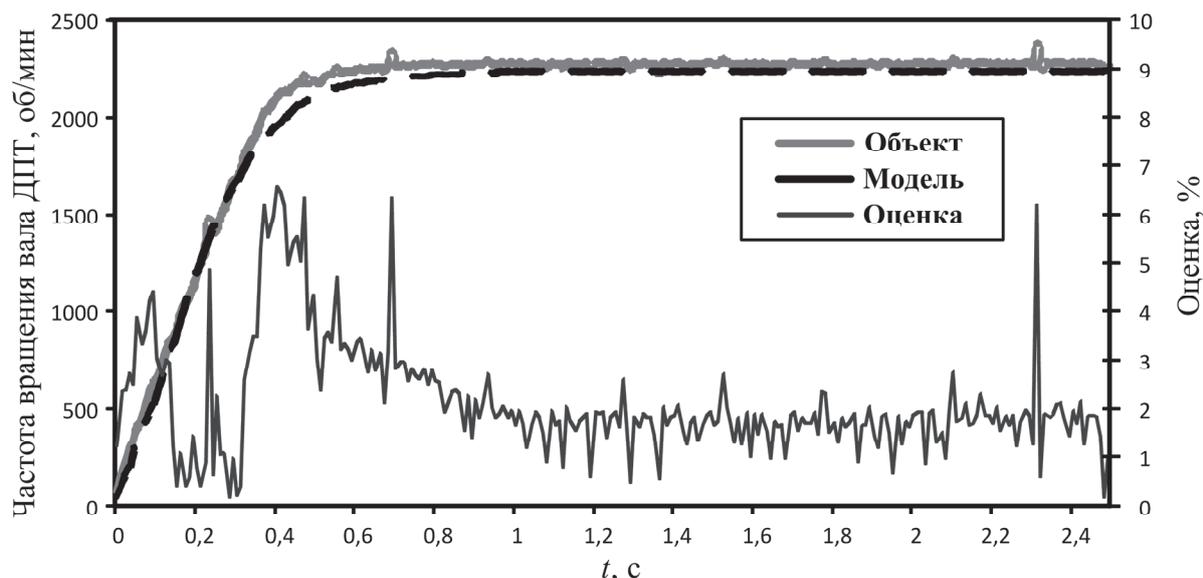


Рис. 2. Результат идентификации объекта

Как следует из графиков (рис. 2), максимальное значение оценки Δu не превышает 7%. Отметим, что в статическом режиме для идентифицированной модели среднее значение оценки Δu находится на уровне 2%. Локальные выбросы на графике оценки Δu обусловлены наличием шумов в питающей сети.

Таким образом, эксперимент показал, что разработанные алгоритмы и программное обеспечение позволяют решать задачу структурно-параметрической идентификации с достаточно высокой эффективностью, используя в качестве вычислительной платформы встраиваемой системы управления микроконтроллер STM32F103.

Выводы

Рассмотрена практическая реализация алгоритмов идентификации объектов для построения

встраиваемых систем управления. Модель объекта определяется в дискретной форме на основе вещественного интегрального преобразования. В качестве аппаратной части использован микроконтроллер STM32F103.

Результаты экспериментальной проверки устройства продемонстрировали необходимость применения фильтрации измеряемых сигналов исследуемого объекта с целью уменьшения влияния шумов на значение оценки успешности идентификации модели объекта.

Экспериментально показано, что алгоритмы, основанные на дискретном вещественном интегральном преобразовании, могут быть использованы при построении встраиваемых систем управления.

Работа выполнена в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Longhua M., Feng X., Zhe P. Integrated Design and Implementation of Embedded Control Systems with Scilab // Sensors. – 2008. – V. 8. – № 9. – P. 5501–5515.
2. Hristu-Varsakelis D., Levine W. Handbook of networking and embedded control systems // Springer. 2008. URL: <http://www.springer.com/birkhauser/engineering/book/978-0-8176-3239-7> (дата обращения: 10.08.2011).
3. Alexeev A., Zamyatin S., Pushkarev M. Structure and parametric definition of linear dynamic object via identification based on real interpolation method // Proc. 18th Intern. Conf. on Process Contr. – Tatranská Lomnica, 2011. – P. 216–220.
4. Алексеев А.С., Антропов А.А., Гончаров В.И., Замятин С.В., Рудницкий В.А. Вещественный интерполяционный метод в задачах автоматического управления. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 217 с.
5. STM32F103 datasheet // STM32F103 datasheet and application note, data sheet, circuit, pdf, cross. 2011. URL: <http://datasheetarchive.com/STM32F103-datasheet.html> (дата обращения: 12.08.2011).

Поступила 12.09.2011 г.