

АЛГОРИТМ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ДВИГАТЕЛЬ – ДВУХМАССОВЫЙ МЕХАНИЗМ

С.В. Арановский

Научный руководитель – д.т.н., профессор А.А. Бобцов

Статья посвящена проблеме идентификации параметров системы двигатель – двухмассовый механизм при известной структуре объекта и неизвестных параметрах передаточной функции. Идентификация проводится по результатам эксперимента на готовой к работе установке. Предложенный подход использует измерения только выходной переменной, не требует информации о медианных значениях параметров и не накладывает ограничений на дрейф параметров и позволяет получить высокую скорость оценивания параметров. В статье приводится пример, иллюстрирующий основные шаги предложенного алгоритма. Так же приведены результаты математического моделирования, иллюстрирующие работоспособность рассматриваемого подхода.

Ключевые слова: двигатель, двухмассовый механизм, идентификация, адаптивный идентификатор, метод наименьших квадратов

Введение

В настоящее время для решения широкого круга задач используются оптико-электронные комплексы, телескопы которых наводятся и длительное время удерживаются на объектах наблюдения с суммарной погрешностью в единицы угловых секунд. Основные функциональные характеристики таких комплексов в значительной степени определяются реальной точностью слежения за наблюдаемыми объектами. В решении подобных задач важную роль играет опорно-поворотное устройство (ОПУ), оси которого представляются в процессе моделирования и проектирования электроприводов, как правило, двухмассовыми механизмами.

При разработке подобных комплексов важной задачей является полная автоматизация процессов настройки электроприводов с требуемой точностью. Причем, эти настройки производятся как во время сборки и монтажа телескопа на испытательном стенде, так и на полигоне, в условиях случайно изменившихся вследствие транспортировки и новой сборки ОПУ параметров системы в целом. К таким параметрам относятся: люфты и зазоры, смещение центров масс нагрузок ОПУ, моменты инерции навесного оборудования, электрические параметры двигателя и др. Решение этой задачи возможно с использованием процедуры идентификации параметров подсистемы «двигатель-ось ОПУ». Суть процедуры идентификации в рамках поставленной нами задачи сводится к получению реальных, определенных в результате эксперимента на готовой к работе установке, параметров электрического двигателя, его нагрузки с учетом упругих связей, например, частот механических резонансов, моментов инерции. В дальнейшем результаты процедуры идентификации используются для автоматизации расчета параметров регуляторов. Кроме того, для придания замкнутой системе свойства адаптивности к изменениям параметров объекта следует выбрать алгоритм, позволяющий проводить идентификацию в реальном времени и на основании результатов вносить коррективы в работу регулятора.

Существуют различные подходы к решению задачи параметрической идентификации [1–3], в том числе метод локальной адаптации, метод скоростного градиента и его вариации, а так же ряд других. Несмотря на простоту реализации метода локальной адаптации, его недостатком является обеспечение сходимости только при малом отклонении идентифицируемых параметров от истинных значений, что требует повышенного внимания к начальным условиям. Так же метод локальной адаптации функционирует только в условиях квазистационарности и сильно зависит от режимов работы системы. Градиентные методы являются более развитыми, и как

следствие, более распространенными, однако они так же обладают рядом недостатков: сложность разработки, зависимость процесса идентификации и времени схождения от выбора функции качества. Кроме того, использование градиентных методов зачастую требует измерения всех переменных состояния объекта или же накладывает ограничения на объект.

Кроме указанных методов существует широкий класс подходов, основанных на предположении об известности медианных значений идентифицируемых параметров и ограниченности их дрейфа, причем данные подходы варьируются в зависимости от «широты» области дрейфа.

Предложенный в данной работе подход является развитием идей, представленных в [4, 5] и их приложением к вопросу идентификации параметров двухмассового ЭМО в реальном времени. Предложенный подход обладает следующими преимуществами:

- используются измерения только выходной переменной;
- высокое быстродействие;
- не требуется знать медианные значения параметров;
- нет ограничений на область дрейфа параметров и начальные условия за исключением их конечности;
- простота реализации.

Постановка задачи

В данной работе в качестве рассматриваемого объекта выступает система «двигатель – двухмассовый механизм». Обобщенная структурная схема такой системы приведена на рис. 1 [6].

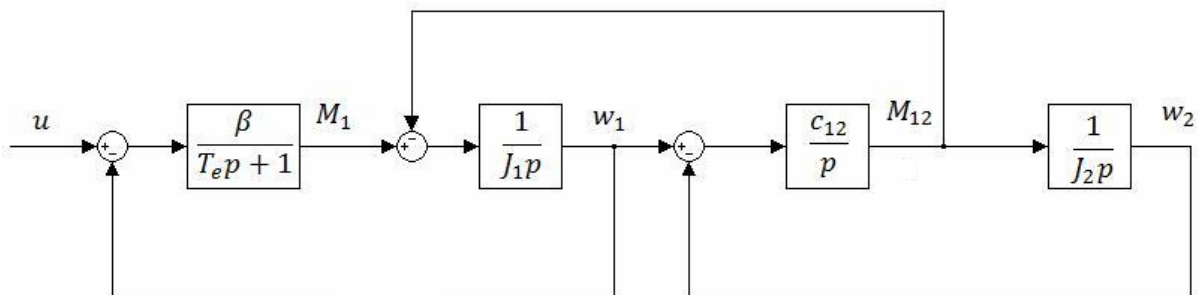


Рис. 1. Обобщенная структурная схема

Здесь w_1 – угловая скорость первой массы оси, w_2 – угловая скорость второй массы оси, u – обобщенное управляющее воздействие, имеющее размерность скорости холостого хода, M_1 – электромагнитный момент двигателя, M_{12} – момент, обусловленный нежесткостью конструкции оси, c_{12} – коэффициент жесткости, J_1 , J_2 – моменты инерции соответственно первой и второй масс, β – жесткость механической характеристики двигателя, T_e – электрическая постоянная времени двигателя.

Данное структурное описание легко может быть преобразовано к передаточной функции вида, где выходом является измеряемая угловая скорость первой массы:

$$y(t) = w_1(t) = \frac{b_2 p^2 + b_0}{p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0} u(t), \quad (1)$$

где

$$\begin{aligned}
p &= \frac{d}{dt}, \\
b_2 &= \beta / (J_1 T_e), \\
b_0 &= c_{12} \beta / (J_1 J_2 T_e), \\
a_3 &= 1 / T_e, \\
a_2 &= (T_e (J_1 + J_2) c_{12} + J_2 \beta) / (J_1 J_2 T_e), \\
a_1 &= c_{12} / (J_1 T_e), \\
a_0 &= c_{12} \beta / (J_1 J_2 T_e).
\end{aligned}$$

Сформулируем задачу идентификации параметров объекта как задачу синтеза алгоритма идентификации, обеспечивающего для любых параметров $b_2, b_0, a_3, a_2, a_1, a_0$ формирование таких оценок этих параметров, что

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow \infty} |b_i - \hat{b}_i| = 0, & i = 0, 2, \\ \lim_{t \rightarrow \infty} |a_j - \hat{a}_j| = 0, & j = \overline{0, 3}. \end{cases} \quad (2)$$

Основной результат

Перепишем выражение (1) следующим образом:

$$a(p)y = b(p)u, \quad (3)$$

где $a(p) = p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0$, $b(p) = b_2 p^2 + b_0$.

Введем в рассмотрение гурвицев полином четвертой степени с единичным коэффициентом при старшей степени:

$$\phi(p) = (p + \alpha)^4 = p^4 + \phi_3 p^3 + \phi_2 p^2 + \phi_1 p + \phi_0, \quad (4)$$

где $\alpha > 0$.

Так же сформируем следующий полином:

$$\begin{aligned}
a_1(p) &= \phi(p) - a(p) = \\
&= (\phi_3 - a_3)p^3 + (\phi_2 - a_2)p^2 + (\phi_1 - a_1)p + (\phi_0 - a_0).
\end{aligned} \quad (5)$$

Подставив (5) в (3) можно записать:

$$\begin{aligned}
\phi(p)y &= a_1(p)y + b(p)u, \\
y &= \frac{a_1(p)}{\phi(p)}y + \frac{b(p)}{\phi(p)}u.
\end{aligned} \quad (6)$$

Введем дополнительные переменные, представляющие собой пропущенные через фильтр $\frac{1}{\phi(p)}$ сигналы y и u :

$$\xi_1 = \frac{1}{\phi(p)}y, \quad \xi_2 = \frac{1}{\phi(p)}u. \quad (7)$$

Подставляя (5) и (7) в (6) получим:

$$\begin{aligned}
y &= a_1(p)\xi_1 + b(p)\xi_2 = \\
&= (\phi_3 - a_3)\xi_1^{\ddot{\cdot}} + (\phi_2 - a_2)\xi_1^{\dot{\cdot}} + (\phi_1 - a_1)\dot{\xi}_1 + \\
&+ (\phi_0 - a_0)\xi_1 + b_2\dot{\xi}_2 + b_0\xi_2 = \psi^T \theta,
\end{aligned} \quad (8)$$

где

$$\begin{cases} \psi = \text{col}\{\xi_1^{(3)}, \xi_1^{(2)}, \xi_1^{(1)}, \xi_1, \xi_2^{(2)}, \xi_2\} \\ \theta = \text{col}\{(\phi_3 - a_3), (\phi_2 - a_2), (\phi_1 - a_1), (\phi_0 - a_0), b_2, b_0\}. \end{cases} \quad (9)$$

В выражении (9) в векторе-столбце ψ собраны доступные измерению переменные, а в векторе-столбце θ – неизвестные параметры.

Замечание. Нетрудно видеть, что для идентификации параметров объекта достаточно решить задачу идентификации параметров вектора θ .

Для идентификации неизвестных параметров в модели (8) могут быть использованы различные алгоритмы. Например, в работах [5, 6] был предложен алгоритм вида

$$\begin{aligned} \hat{\theta}(t) &= K\psi(t)\psi^T(t)(\theta - \hat{\theta}(t)) = \\ &= K\psi(t)y(t) - K\psi(t)\psi^T(t)\hat{\theta}(t), \end{aligned} \quad (10)$$

где $K = K^T > 0$ – диагональная матрица постоянных коэффициентов. Для данного алгоритма была доказана его применимость для решения рассматриваемой задачи.

Так же для идентификации параметров в модели (8) может быть использован подход, известный как метод наименьших квадратов. Этот метод отличается существенно более высокая вычислительная сложность, однако он обладает высокой точностью и робастностью по отношению к возмущениям в измерениях. Рассмотрим этот метод подробнее. Предположим, что имеется N отсчетов. Тогда для выражения (8) можно записать:

$$[y_1 \ y_2 \ \dots \ y_N]^T = [\psi^T_1 \ \psi^T_2 \ \dots \ \psi^T_N]^T \theta$$

или

$$Y = \Psi^T \theta. \quad (11)$$

Тогда получаем:

$$\hat{\theta} = (\Psi\Psi^T)^{-1}\Psi Y. \quad (12)$$

С ростом числа отсчетов N выражение (12) будет обеспечивать сходимость параметров к их истинным значениям в том случае, если матрица $\Psi\Psi^T$ не вырождена. Это условие будет выполнено, если входной управляющий сигнал является «частотно богатым» (см. подробнее в [7]).

Для проведения идентификации в реальном времени может использоваться итеративная версия алгоритма (12), позволяющая обновлять оценку параметров при получении каждого нового отсчета и не требующая хранения значений всех отсчетов.

Пример

Для иллюстрации работоспособности алгоритма проведем моделирование. В качестве идентифицируемого объекта выберем систему двигатель – двухмассовый механизм со следующими параметрами:

$$c_{12} = 5.46 \cdot 10^8, J_1 = 415, J_2 = 83685, \beta = 16 \cdot 10^4, T_e = 16 \cdot 10^{-4}.$$

Данный объект можно представить в виде (1), вычислив соответствующие параметры:

$$a_3 = 625, a_2 = 1.563 \cdot 10^6, a_1 = 8.223 \cdot 10^8, a_0 = 1.572 \cdot 10^9, b_2 = 2.409 \cdot 10^5, b_0 = 1.572 \cdot 10^9.$$

Введем гурвицев полином 4-ой степени $\phi(p) = (p+1)^4 = p^4 + 4p^3 + 6p^2 + 4p + 1$. Тогда в соответствии с (5):

$$a_1(p) = (4 - a_3)p^3 + (6 - a_2)p^2 + (4 - a_1)p + (1 - a_0).$$

Теперь сформируем вектор неизвестных и подлежащих идентификации параметров:

$$\theta = \text{col}\{(4 - a_3), (6 - a_2), (4 - a_1), (1 - a_0), b_2, b_0\}.$$

Далее в соответствии с выражением (7) запишем

$$\begin{cases} \dot{\xi}_1 = \xi_2 \\ \dot{\xi}_2 = \xi_3 \\ \dot{\xi}_3 = \xi_4 \\ \dot{\xi}_4 = -\xi_1 - 4\xi_2 - 6\xi_3 - 4\xi_4 + y \end{cases} \quad \begin{cases} \dot{\zeta}_1 = \zeta_2 \\ \dot{\zeta}_2 = \zeta_3 \\ \dot{\zeta}_3 = \zeta_4 \\ \dot{\zeta}_4 = -\zeta_1 - 4\zeta_2 - 6\zeta_3 - 4\zeta_4 + u \end{cases}$$

и сформируем вектор измеряемых параметров

$$\psi = \text{col}\{\xi^{(3)}, \xi^{(2)}, \xi^{(1)}, \xi, \zeta^{(2)}, \zeta\}.$$

Для идентификации неизвестных параметров будем использовать метод наименьших квадратов: проведем моделирование объекта, представленного передаточной функцией вида (1) и параметрами, представленными выше. При моделировании будем сохранять отсчеты, соответствующие значениям ψ и y с шагом в 0.001 секунды. В качестве задающего сигнала выберем меандр с амплитудой 1 и периодом 1 секунда, время моделирования выберем равным 1 секунде. Таким образом, по окончании моделирования мы имеем 1000 отсчетов. Сформировав в соответствии с (11) матрицу Ψ^T и вектор Y , получим оценку $\hat{\theta}$ согласно выражению (12). Проведенные моделирование и вычисления показали, что все оценки параметров сходятся к своим истинным значениям, причем скорость сходимости достаточно велика. В связи с ограниченным форматом статьи приведем только два графика из шести. На рис. 2 и 3 приведены графики для параметров a_0 и b_0 соответственно, истинные значения параметров отмечены пунктиром. В целом, по результатам эксперимента можно считать, что оценка параметров достигает истинного (расчетного) значения за время, равное 50 отсчетам, т.е. в данном примере – 0.05 секунды.

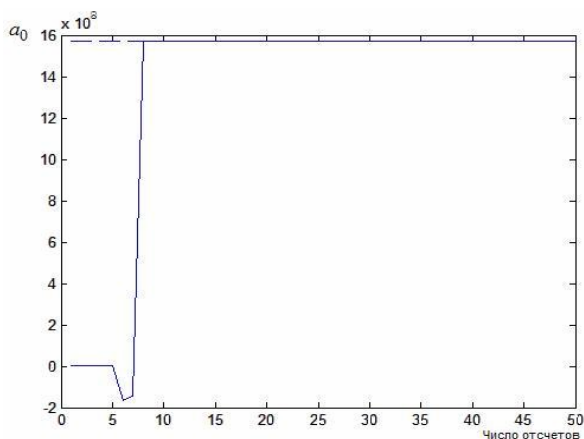


Рис. 2. Оценка параметра a_0

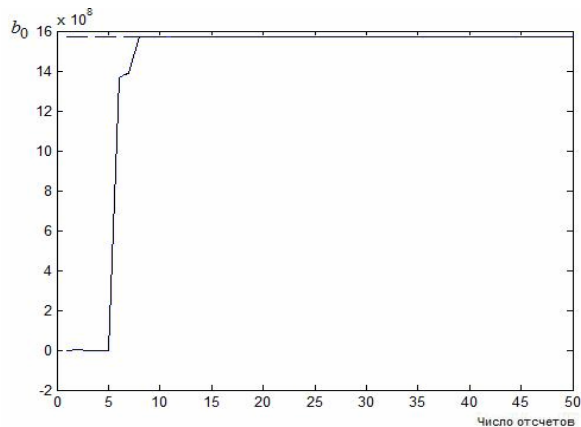


Рис. 3. Оценка параметра b_0

Заключение

В работе был предложен подход, позволяющий проводить идентификацию параметров системы «двигатель – двухмассовый механизм» при известной структуре системы по результатам эксперимента на готовой к работе установке. Результатом идентификации являются параметры передаточной функции объекта. Предложенный

подход обладает следующими преимуществами: в работе используются измерения только выходной переменной объекта, но не ее производных, высокая скорость оценивания параметров, отсутствует ограничение на область дрейфа параметров, не требуется знать медианные значения параметров. Работоспособность предложенного алгоритма подтверждается как аналитическими выкладками, так и результатами моделирования.

Литература

1. Борцов Ю.А., Поляхов Н.Д., Путов В.В. Электромеханические системы с адаптивным и модальным управлением. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние. – 1984 – 216 с.
2. Борцов Ю.А., Соколовский Г.Г. Автоматизированный электропривод с упругими связями. – Л.: Энергоатомиздат. – 1992. – 288 с.
3. Фрадков А.Л. Адаптивное управление в сложных системах. – М.: Наука. – 1990.
4. Арановский С.В., Бобцов А.А., Кремлев А.С., Лукьянова Г.В. Робастный алгоритм идентификации частоты синусоидального сигнала. //Известия РАН. Теория и системы управления. – 2007. – №3.
5. Арановский С.В., Бобцов А.А., Кремлев А.С., Лукьянова Г.В., Николаев Н.А. Идентификация частоты смещенного синусоидального сигнала. //АиТ. – 2008. – №9.
6. Ключев В.И. Теория электропривода: Учебник для вузов. – М: Энергоатомиздат. – 2001. – 704 с.
7. Мирошник И.В., Никифоров В.О., Фрадков А.Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. – СПб.: Наука. – 2000. – 549 с.