

## АНАЛИЗ МЕТОДИКИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА В РАМКАХ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИИ В ВИДЕ ПЕРЕВЕРНУТОГО МАЯТНИКА

Градзявичус В.В., студент; Суков С.Ф., доц., к.т.н.

(ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк, Украина)

Системы стабилизации и динамического равновесия становятся в наше время все более сложными и распространенными не только на производстве, но также и в повседневной жизни и вопрос стабилизации физически неустойчивых объектов является одной из частых проблем теории автоматического управления, с которой сталкиваются инженеры этой области. Одной из самых распространенных систем динамического равновесия является САУ робота в виде инверсного маятника. Обобщенная структурная схема данной системы представлена на рисунке ниже.



Рисунок 1 – Обобщенная структурная схема системы балансировки

В качестве объекта управления выступает конструкция перевернутого маятника, которая имеет следующий вид: на единой колесной оси находится груз, центр массы которого находится значительно выше оси. Роль исполнительного механизма играет двигатель постоянного тока со встроенным энкодером, в системе присутствуют два двигателя. Задачи регулирования и вычислений управляющий воздействий возложены на микроконтроллер, а закон управления реализуется и задается программно.

Выходом системы является угол отклонения маятника от нормали к поверхности, который измеряется микроэлектромеханической системой (МЭМС). Целью системы является поддержание угла отклонения маятника от нормали к поверхности равным нулю. МЭМС представляет собой объединение акселерометра и гироскопа, сигналы с которых пропускаются через систему комплементарных фильтров, которая изображена на рисунке 2.

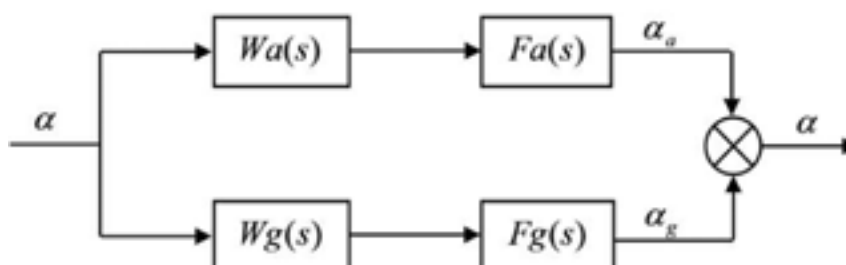


Рисунок 2 – Система комплементарных фильтров

где  $W_a(s)$  – передаточная функция акселерометра;  $W_g(s)$  – передаточная функция гироскопа;  $F_a(s)$  – передаточная функция фильтра акселерометра;  $F_g(s)$  – передаточная функция фильтра гироскопа;  $\alpha$  – измеряемый угол.

Целью системы комплементарных фильтров является поддержка равенства входного и выходного сигналов. Но на низких частотах изменения угла наклона система отдает предпочтение показаниям акселерометра, поскольку когда конструкция находится в состоянии, близком к состоянию покоя, его данные наиболее соответствуют действительности, а на высоких частотах – показаниям гироскопа, который не чувствителен к резким движениям конструкции. Каждый датчик «Доминирует» на частоте сигнала, на которой влияние его недостатков является минимальным. Данный подход обеспечивает достаточно высокую точность измерений при относительной простоте реализации. Существуют альтернативные методы обработки показаний датчиков, например с использованием фильтра Калмана.

Целью идентификации параметров является получение наиболее точного математического описания системы в целом, а также синтез алгоритмов обработки показаний датчиков и энкодеров для определения таких параметров как угол отклонения маятника от нормали к поверхности, перемещение и текущая координата объекта.

Рассмотрим методику идентификации параметров двигателя постоянного тока. В результате должна быть получена передаточная функция двигателя, которая в дальнейшем будет учтена в синтезе закона управления.

Двигатель постоянного тока (ДПТ) независимого возбуждения описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} u(t) &= e(t) + R \cdot i(t) + L \frac{di(t)}{dt}; \\ M_{\hat{y}}(t) &= M_c(t) + J \frac{d\omega(t)}{dt}; \\ M(t) &= C_m \hat{O} \cdot i(t); \\ e(t) &= C_\omega \cdot \hat{O} \cdot \omega(t). \end{aligned} \quad (1)$$

Где  $u(t)$  – напряжение на якорной обмотке двигателя;  $e(t)$  – э.д.с. якоря;  $i(t)$  – ток якоря;  $\hat{O}$  – поток, который создается обмоткой возбуждения;  $M_{\hat{y}}(t)$  – электромагнитный момент двигателя;  $M_c(t)$  – момент сопротивления движения;  $\omega(t)$  – скорость вращения вала двигателя;  $R$  – активное сопротивление якорной цепи;  $L$  – индуктивное сопротивление якорной цепи;  $J$  – суммарный момент инерции якоря и нагрузки;  $C_\omega$  – электромагнитная постоянная двигателя;  $C_m$  – механическая постоянная двигателя.

Для создания модели двигателя необходимо получить передаточные функции, применив к дифференциальным уравнениям преобразования Лапласа. Передаточная функция, которая характеризует ток якоря и падения напряжения на якоре:

$$i(s) = \frac{u(s) - e(s)}{Ls + R} \quad (2)$$

Передаточная функция, которая связывает динамический момент и скорость вращения вала двигателя:

$$\omega(s) = (M_{\hat{y}}(s) - M_c(s)) \cdot \frac{1}{Js} \quad (3)$$

Используя полученные передаточные функции можно составить структурную схему модели двигателя постоянного тока, которая представлена на рисунке 3.

Поскольку динамические характеристики двигателя заранее не известны, зададимся произвольными данными и выполним моделирование скорости вращения двигателя.

$$L = 0.001 \text{ Гн}, R = 61 \text{ Ом}, \tilde{N}_\delta \cdot F_i = 0.22, J = 0.0004 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

Моделирование проведем в программном приложении Simulink, которое является частью программного пакета MATLAB.

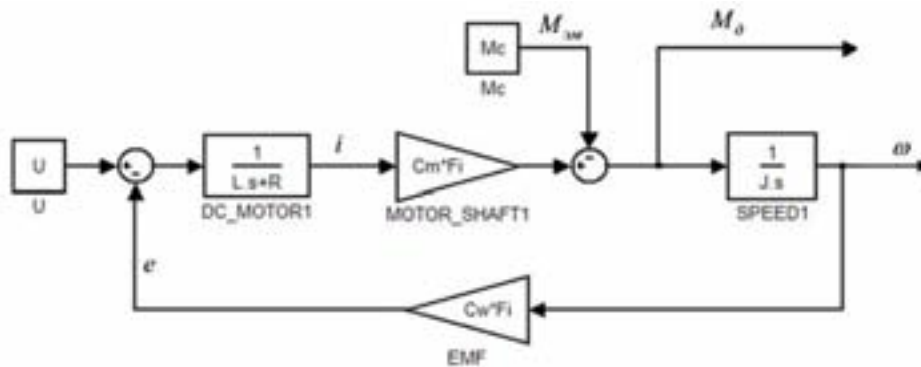


Рисунок 3 – Структурная схема двигателя постоянного тока

Промоделировав работу системы с входным воздействием равным 18 вольт был получен график переходного процесса скорости вращения вала двигателя.

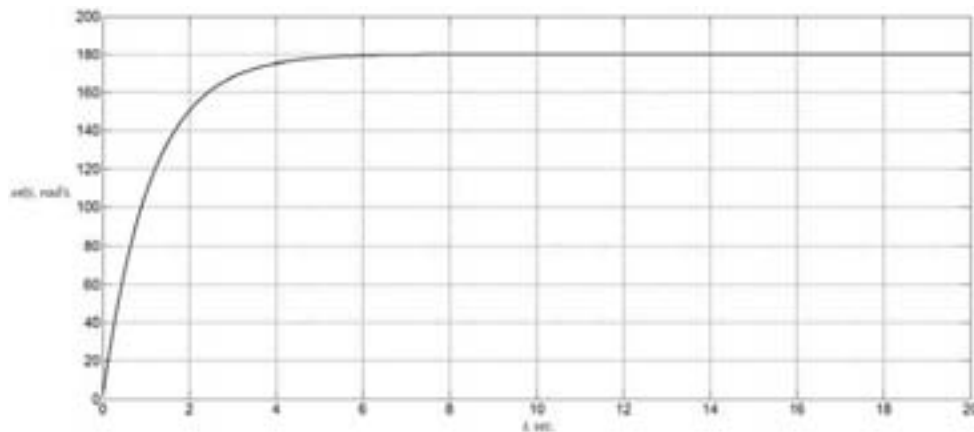


Рисунок 4 – График переходного процесса скорости вращения вала  $\omega(t)$

Предположив, что кривая разгона на рисунке 4 была получена экспериментально, т.е. были обработаны показания встроенного в двигатель энкодера, проведем идентификацию динамических характеристик двигателя методом Симою[1]. Данный метод является одним из наиболее удобных при использовании ЭВМ для идентификации объекта управления в условиях проведения активного эксперимента. Предполагается, что объект может быть описан линейным дифференциальным уравнением с постоянными коэффициентами:

$$a_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = b_m \frac{d^m x(t)}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x(t)}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{dx(t)}{dt} + x(t) \quad (4)$$

где  $a_1, a_2, \dots, a_n$ ;  $b_1, b_2, \dots, b_n$  – постоянные коэффициенты.

Задача состоит в том, чтобы определить неизвестные коэффициенты  $a_i$  и  $b_i$  используя специальную систему уравнений:

$$a_1 = F_1 + b_1, \quad (5)$$

$$a_2 = F_2 + b_2 + b_1 F_1, \quad (6)$$

$$a_i = F_i + b_i + \sum_{j=1}^{i-1} b_j F_{i-j}. \quad (7)$$

Параметры  $F_i$ , входящие в эту систему уравнений имеют аналитические выражения:

$$F_1 = \int_0^{\infty} [1 - y(t)] dt \quad (8)$$

$$F_2 = F_1^2 \int_0^{\infty} [1 - y(t)] \cdot [1 - \theta(t)] d\theta \quad (9)$$

$$F_3 = F_1^3 \int_0^{\infty} [1 - y(t)] \cdot (1 - 2\theta + \frac{\theta^2}{2}) d\theta \quad (10)$$

где  $\theta = \frac{t}{F_1}$  – измененный масштаб по времени

Для вычисления коэффициентов  $F_i$  необходимо придерживаться определенной последовательности расчета:

1. Ось абсцисс разбивается на отрезки с интервалами времени  $\Delta t$ , исходя из условия, что на протяжении всего графика,  $y_{\hat{a}\hat{u}\hat{o}}(t)$  в пределах  $2\Delta t$  мало отличается от прямой.

2. Значения вектора  $y_{\hat{a}\hat{u}\hat{o}}(t)$  в конце каждого интервала  $\Delta t$  делятся  $y(\infty)$ . В результате получается вектор  $\sigma_i = \frac{y_{\hat{a}\hat{u}\hat{o}}(t_i)}{y(\infty)}$ .

3. Определяются коэффициенты  $F_1, F_2, F_3$  по формулам:

$$F_1 \approx \Delta t \left[ \sum_{i=0}^n [1 - \sigma(i\Delta t)] - 0,5[1 - \sigma(0)] \right] \quad (11)$$

$$F_2 = F_1^2 \Delta \theta \left[ \sum_{i=0}^n [1 - \sigma(i\Delta\theta)] [1 - i\Delta\theta] - 0,5[1 - \sigma(0)] \right] \quad (12)$$

$$F_3 = F_1^3 \Delta \theta \left[ \sum_{i=0}^n [1 - \sigma(i\Delta\theta)] [1 - 2i\Delta\theta + \frac{(i\Delta\theta)^2}{2}] - 0,5[1 - \sigma(0)] \right] \quad (13)$$

Для оценки погрешности рассчитывается среднеквадратическое отклонение:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_p^i - y_{\hat{e}\hat{c}\hat{i}}^i)^2}{n}} \quad (14)$$

где  $y_p^i$  –  $i$ -тый расчетный элемент выборки;  $y_{\hat{e}\hat{c}\hat{i}}^i$  –  $i$ -тый измеренный элемент.

Проанализировав кривую разгона на рисунке 4, можно заметить, что данная кривая напоминает типовую кривую разгона аperiodического звена 2-го порядка с передаточной функцией:

$$W(s) = \frac{k}{a_2 s^2 + a_1 s + 1} \quad (15)$$

Конечную модель объекта будем искать в виде передаточной функции (14).

Следуя вышеприведенному алгоритму рассчитываются коэффициенты  $F_i$ . В результате получаем итоговую передаточную функцию:

$$W(s) = \frac{180}{0.01198s^2 + 1.0815s + 1} \quad (16)$$

Поскольку  $b_i = 0$ , то  $a_i = F_i$ . Коэффициент передачи  $k = 180$ .

Значения коэффициентов и СКО:  $F_1 = 1.0815$ ,  $F_2 = 0.1198$ ,  $F_3 = 0.0185$ ,  $\sigma = 2.2971$ .

Используя передаточную функцию (15) проведем моделирование в программном пакете MATLAB и сравним полученную кривую с исходной кривой на рисунке 4.

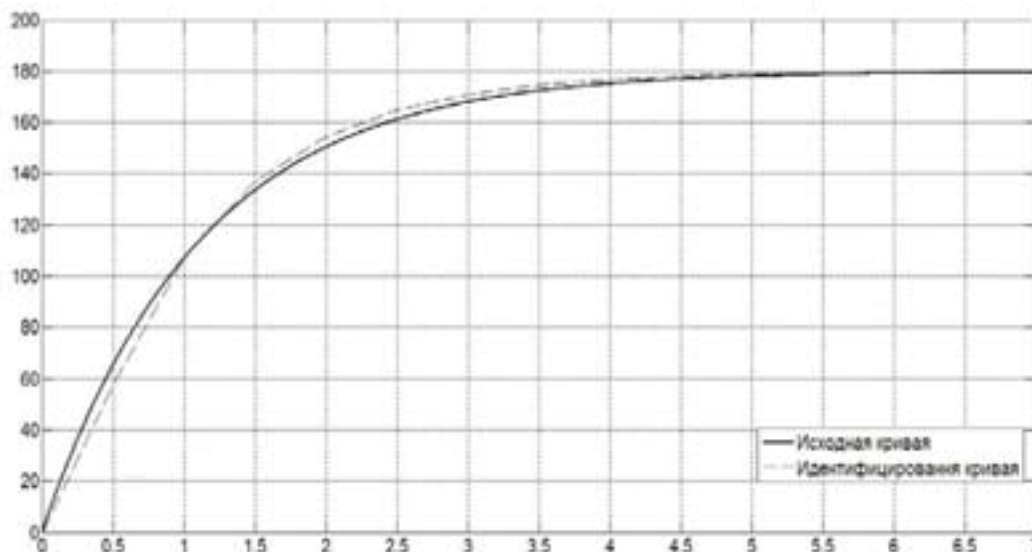


Рисунок 5 – Исходная и идентифицированная кривые переходных процессов скорости вращения вала двигателя

Метод площадей Симою является одним из самых простейших алгоритмов определения параметров передаточных функций моделей объектов по кривой разгона. Однако в силу своей простоты, данная методика довольно часто может давать неудовлетворительные результаты – идентифицированные параметры моделей объектов могут иметь большое отклонение в сравнении с реальными динамическими характеристиками. В связи с этим возникает необходимость в поисках и синтезе альтернативных методик идентификации параметров ДПТ.

К существующим альтернативным методам идентификации динамических характеристик относятся метод Стрейца, графоаналитический метод, методика Корбина. Также одним из эффективных методов идентификации параметров ДПТ является использование фильтра Калмана[4], который позволяет оценивать вектор состояния и параметров исследуемой модели, с использованием ряда неполных и зашумленных измерений. Все эти методики требуют детального исследования в рамках существующей системы стабилизации инверсного маятника.

На практике характеристики двигателей постоянного тока одной и той же модели могут отличаться. Также могут отличаться кривые разгона одного и того же ДПТ, при вращении вала в разных направлениях. Для построения качественной системы управления эти особенности должны быть учтены.

В дальнейшем планируется исследовать другие методы идентификации параметров двигателей постоянного тока, работающего в различных режимах, в рамках системы стабилизации.

#### Перечень ссылок

1. Симою М.П. Определение коэффициентов передаточных функций линеаризованных звеньев систем регулирования. Автоматика и телемеханика, 1957г., №6. С. 514-527
2. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя: М.: Наука, 1991г., 432 с.
3. Ерофеев А.А. Теория автоматического управления: Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Политехника, 2001. – 302 с.: ил. С. 34
4. Эйкхофф П. Основы идентификации систем управления. Оценивание параметров и состояния.–М.: Мир, 1975г., 687 с.