

УДК 519.654:629.035

МЕТОД ИДЕНТИФИКАЦИИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДВИЖИТЕЛЕЙ ПОДВОДНОГО РОБОТА С УЧЕТОМ НАБЕГАЮЩЕГО ПОТОКА

Д.А. Юхимец

Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН
Севастопольский государственный университет,
Россия, 690041, Владивосток, ул. Радио, 5
E-mail: undim@iacp.dvo.ru

А.С. Губанков

Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН
МГУ им. адм. Г.И. Невельского
Россия, 690059, Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а
E-mail: gubankov@dvo.ru

Ключевые слова: подводный робот, движитель, математическая модель, идентификация, метод наименьших квадратов.

Аннотация: В работе описан метод идентификации параметров математической модели движителей подводных роботов (ПР), в которых используются бесколлекторные двигатели постоянного тока, управляемые специальными регуляторами скорости, с учетом влияния набегающего потока жидкости. Для реализации указанного метода был предложен подход к созданию экспериментальной установки, позволяющей выполнять измерения силы тяги движителя в процессе его движения в воде с заданной скоростью. Полученные экспериментальные данные используются для идентификации параметров математической модели движителя ПР. В работе представлены результаты выполненных экспериментов.

1. Введение

Одним из важных устройств подводного робота (ПР) являются его движители, свойства которых существенно влияют на точность работы их систем управления движением. При этом производители движителей и разработчики АНПА обычно получают только швартовые характеристики движителей, то есть зависимость между тягой, создаваемой движителем, и скоростью вращения винта при неподвижном движителе. Однако при движении ПР, когда на движители набегают потоки воды, тяга, создаваемая ими, уменьшается и их реальная характеристика уже не будет соответствовать исходной швартовой характеристике [1].

Кроме того, часто в движителях ПР используются бесколлекторные двигатели постоянного тока, управление которыми осуществляется с помощью специальных устройств (Electronic Speed Control — ESC), на вход которых подается импульсный сигнал управления. В [2] предложен метод идентификации математической модели таких движителей, который основан на использовании данных о влиянии набегающего потока на тягу движителя, полученных с помощью моделирования в специальном программном обеспечении, и информацию о текущей скорости вращения винта,

поступающей от устройств управления таких движителей. Однако это часто невозможно обеспечить на практике для типовых движителей из-за отсутствия точных САД-моделей винтов движителей, и использования типовых устройств управления, не предоставляющих информацию о текущей скорости вращения винта.

Поэтому в работе решается задача идентификации математической модели движителя ПР, в котором используется бесколлекторный двигатель и ESC для его управления, учитывающая скорость набегающего потока и не использующая данных о текущей скорости вращения движителя.

2. Описание метода сбора данных для идентификации

Ключевым этапом для процедуры идентификации является этап сбора данных о силе тяги движителя при различных значениях скорости набегающего потока. Провести измерения указанных величин на движущемся ПР практически невозможно, поэтому для выполнения указанного этапа была создана и использована специальная экспериментальная установка, общий вид которой показан на рис. 1.

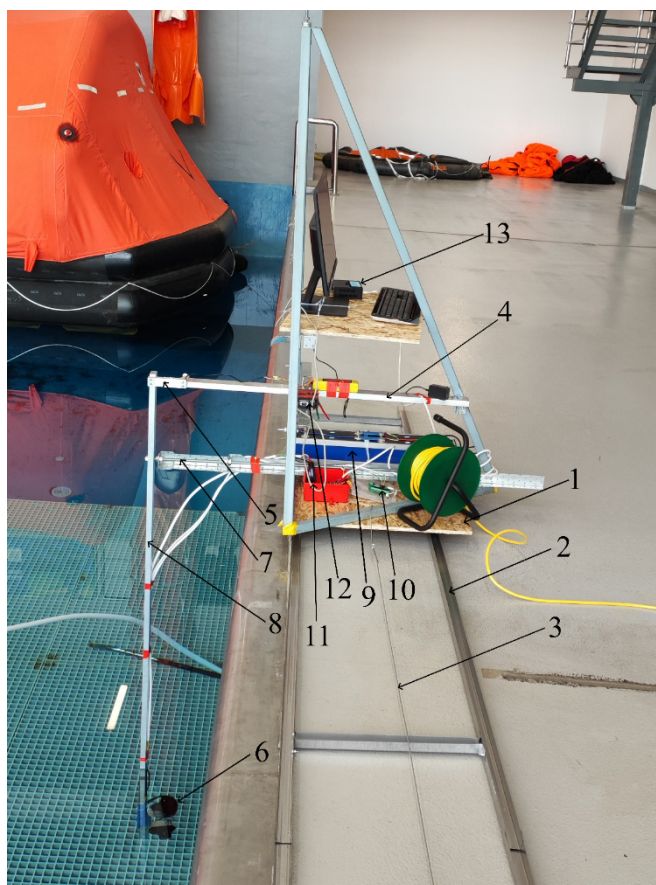


Рис.1. Общий вид экспериментальной установки для сбора исходных данных для идентификации математической модели движителей ПР.

Экспериментальная установка представляет собой конструкцию, которая может передвигаться прямолинейно вдоль края бассейна. Для этого на основании установки 1 расположены ролики, которые двигаются в проложенных вдоль края бассейна рельсах 2. Равномерное движение платформы обеспечивается с помощью неподвижно закрепленного привода, который с помощью троса 3 тянет экспериментальную установку. На экспериментальной платформе над основанием жестко закреплена балка

4, свободный конец которой выходит за границы платформы и находится над водной поверхностью бассейна. К этому свободному концу жестко прикреплен один край тензодатчика 5, который регистрирует величину силы тяги двигателя 6. Ниже указанной балки на основании платформы жестко закреплен стержень 7. Двигатель 6 неподвижно закреплен на конце штанги 8, который опускается в воду, а второй его конец крепится к свободной стороне тензодатчика 5. При этом стержень 7 проходит через штангу 8, обеспечивая ему опору. На платформе также дополнительно установлены: батарея 9, питающая двигатель, контроллер 10, формирующий входной сигнал для блока 11 управления двигателя, внешний высокоточный блок АЦП 12, ко входу которого подключен выход тензодатчика 5, регистрирующий компьютер 13, к которому подключен АЦП 12.

При работе двигателя 6, он создаёт силу тяги, которая через штангу 8 передаётся на тензодатчик 5, сигнал которого через АЦП 12 регистрируется и сохраняется в компьютере 13. При этом перемещение платформы позволит определить влияние скорости набегающего потока на силу тяги, создаваемой двигателем.

Сбор данных, необходимых для идентификации состоит из нескольких шагов.

1) Включение регистрирующего компьютера 14 и загрузка необходимого программного обеспечения.

2) Подача от контроллера 12 на двигатель сигнала управления заданного уровня.

3) Перемещение установки от исходного положения в конечное с заданной постоянной скоростью и запись данных, поступающих от тензодатчика 7.

4) Выключение двигателя и перемещение установки в исходное положение.

5) Если скорость движения платформы меньше, чем максимальная, то изменить ее на некоторую величину и перейти на шаг 2. В противном случае перейти на шаг 6.

6) Если сигнал управления меньше максимального, то увеличить его на заданную величину, а заданную скорость перемещения платформы установить нулевой и перейти на шаг 2. В противном случае закончить эксперимент.

Также в процессе получения данных необходимо учесть влияние силы сопротивления среды при движении погруженных частей установки на показания тензодатчика 7.

Для этого проводится отдельная серия экспериментов, заключающаяся в перемещении установки с разными скоростями и неработающим двигателем и регистрации силы, которая действует на тензодатчик. По полученным данным строится аппроксимирующая функция, которая описывает зависимость указанной силы от скорости перемещения платформы. Полученная зависимость далее используется для вычисления силы тяги двигателя по показаниям тензодатчика 7.

3. Метод идентификации параметров математической модели двигателя

На основе снятых переходных процессов в двигателе, анализе экспериментальной швартовой характеристики и теоретической модели двигателя, учитывающей набегающий поток [1], эмпирически была выбрана следующая модель двигателя:

$$\dot{U} = (U^* - U)/T_d,$$

$$(1) \quad \tau_d = K_1 U^3 + K_2 U|U| + K_3 U|v_l| + K_4 v_l|v_l|,$$

где U^* – сигнал, поступающий на вход системы управления бесколлекторным двигателем; T_d – постоянная времени двигателя; K_1, K_2, K_3, K_4 – постоянные коэффициенты.

Модель (1) может быть использована для расчета сигнала управления движителями в процессе движения ПР, а также для синтеза его системы управления. Коэффициенты этой модели формируются с помощью процедуры идентификации, использующей собранные в процессе экспериментов данные, собранные в следующие массивы:

- $V \in R^N$ – массив данных, содержащих величины скоростей набегающего потока (скоростей движения платформы);
- $U \in R^M$ – массив данных, содержащих величины управляющих сигналов;
- $T, \in R^{N \times M}$ – массив значений силы тяги, полученных при соответствующих значениях управляющих сигналов и скоростях набегающего потока.

Для каждого элемента массива T с учетом принятой модели (1) можно записать:

$$(2) \quad T_k = K_1 U_j^3 + K_2 U_j |U_j| + K_3 V_i |U_j| + K_4 V_i |V_i|, k = (\overline{1, ij}), i = (\overline{1, N}), j = (\overline{1, M}).$$

где T_k – измеренное значение силы тяги при V_i и U_j значениях скорости набегающего потока и сигнала управления, соответственно.

Выражение (2) в матричном виде, включающем все измерения, можно записать:

$$(3) \quad T = \Phi K,$$

где Φ – матрица, каждая строка которой имеет вид: $\Phi_k = [U_j^3, U_j |U_j|, V_i |U_j|, V_i |V_i|]$ – k -я строка матрицы Φ ; $K = [K_1, K_2, K_3, K_4]^T$ – вектор коэффициентов модели (1).

Так как выражение (3) является линейным относительно вектора параметров K , то для его идентификации можно использовать метод наименьших квадратов, то есть оценка этого вектора может быть вычислена по следующему выражению:

$$(4) \quad \hat{K} = [\Phi^T \Phi]^{-1} \Phi^T T.$$

В результате можно идентифицировать модель движителя ПР, который реализован на основе бесколлекторного двигателя постоянного тока со встроенной закрытой системой управления, имеющей заранее неизвестные характеристики. Эту модель можно будет использовать для расчета желаемого сигнала управления, формирующего заданную тягу движителя.

3. Результат идентификации параметров математической модели движителя

Для идентификации параметров движителя была проведена серия экспериментов, в которой использовалось следующее оборудование: движитель ROVMaker T200, который управлялся регулятором скорости TigerShark40A, модуль АЦП ZetLab200 разрешением 24 бит, тензодатчик с пределом измерения 20 кг и чувствительностью 2mV/V.

В процессе проведения экспериментов на модуль управления движителями TigerShark40A подавались управляющие сигналы с шириной импульса 1500, 1600, 1700, 1800 и 1900 мкс. Сигнал 1500мкс соответствует нулевой скорости вращения, а сигнал 1900 мкс – максимальной скорости вращения. При этом сигнал управления в модели (3) представлялся в виде: $U = (U_c - 1500)/100$, где U_c – сигнал управления, подаваемый на модуль управления: $U_c \in [1500, 1900]$ мкс.

В результате использования выражения (4) была получена следующая модель движителя:

$$\begin{aligned} \dot{U} &= 3.33(U^* - U), \\ \tau_d &= -0.7157U^3 + 4.4268U|U| - 1.5648v_l|U| - 2.001v_l|v_l|. \end{aligned}$$

На рис. 2 графически представлены экспериментальные данные (синие точки) и их аппроксимация (поверхность) с помощью идентифицированной модели.

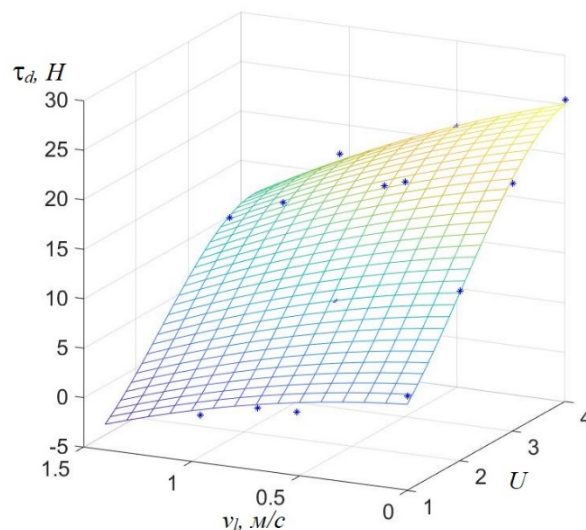


Рис.2. Графическое представление экспериментальных данных и полученной аппроксимации.

Как видно из представленного рисунка отклонение полученной аппроксимации от экспериментальных данных не превышает 10%, что говорит о достаточно высокой точности полученной модели и возможности ее использования для синтеза систем управления ПР.

4. Заключение

В работе описан метод идентификации параметров математической модели движителей ПР, в которых используются бесколлекторные двигатели постоянного тока, управляемые специальными регуляторами скорости, с учетом влияния набегающего потока жидкости. Для реализации указанного метода был предложен подход к созданию экспериментальной установки, позволяющей выполнять измерения силы тяги движителя в процессе его движения с заданной скоростью. Полученные экспериментальные данные используются для идентификации параметров математической модели движителя ПР. В работе представлены результаты выполненных экспериментов.

Работа поддержана Российским научным фондом (грант 22-19-00392).

Список литературы

1. Агеев М.Д. Упрощенная методика расчета движителей для АПА. Подводные роботы и их системы // Отв. ред. Л.В. Киселев. Под общ. ред. М.Д.Агеева, Владивосток: Дальнаука, 1995. С. 33-49.
2. Костенко В.В., Толстоногов А.Ю. Оценка характеристик маршевого движителя подводного аппарата по результатам нагрузочных испытаний электропривода // Подводные исследования и робототехника. 2022. Т. 40. №. 2. С. 4-12.