**ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ ПОДВОДНОГО АППАРАТА**

Общие координаты автономного подводного транспортного средства (AUV) определяются в геоцентрической системе координат по SNAME-нотации:

где определяет расположение при продольном, боковом и вертикальном перемещении, соответственно, а вектор определяет углы Эйлера: крен, тангаж и рыскание, соответственно.



Рисунок 1 – Схема подводного робота с углами Эйлера

Вектор скоростей выражается в системе координат, связанной с телом. Скорости по объявленной выше нотации следует записывать как

При условии отсутствия гидродинамических эффектов, создаваемых водной средой, возможно записать выражение для динамики подводного аппарата в следующей форме

где – матрица инерции твердого тела ( – число степеней свободы),

– матрица присоединенных масс,

– матрица Кориолиса твердого тела ,

– матрица присоединенных масс Кориолиса,

– матрица диссипативных сил (сил рассеивания),

– вектор гравитационных сил и моментов,

– вектор (сил и моментов) управлений, приложенных телу,

– вектор (сил и моментов) внешних возмущений, приложенных телу

В реальных системах рассчитывается с учетом моделей движителей при помощи Thruster Allocation Matrix () как

где – вектор, описывающий нагрузку движителей ( – число движителей), а матрица связывает нагрузку движителей и вектор сил/моментов .

Уравнение кинематики, связующее (1) и (2), записывается в форме

где – матрица поворота, полученная из углов Эйлера,

– Якобиан, связующий угловые скорости мировой системы отсчета и системы тела.

Матрица поворота определяется следующему выражением

Принимая , возможно записать вектор состояния

Последнее уравнение может быть представлено в форме пространства состояний, зависящей от состояния (State-Dependent Coefficients (SDC форма))

,

, .

где – матрица динамики системы,

– матрица управления,

– матрица управления ( – число выходов системы),

– матрица связи входа и выхода,

– вектор управляющих сигналов, включающий в себя вектор внешних возмущений .

**ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ ФИЛЬТРА КАЛМАНА**

Рассмотрим задачу построения фильтра для нелинейной динамической системы, получившего название обобщенного фильтра Калмана. Он позволяет оценивать состояние объекта управления, даже если размерность вектора состояния исследуемой системы превосходит количество измеряемых параметров. Для расчёта текущего состояния априорно известной динамической системы необходимо знать ее текущее измеренное состояние, а также состояние фильтра в момент предыдущего измерения. Задачей фильтра является минимизация суммы квадратов погрешностей оценки вектора состояния.

Запишем систему в SDC-форме с учетом белого шума системы и белого шума измерений :

Оценка вектора состояния для фильтра Калмана определяется как

где – это оценка ковариации состояния, – начальное значение оценки ковариации состояния, – это матрица усиления фильтра Калмана, и представляют собой матрицы штрафов уравнения Риккати.

Шумы и при этом должны удовлетворять условиям:

При рассмотрении дискретных случаев систем, модель должна быть представлена в дискретном виде:

где – вектор состояния динамической системы, – вектор управления, – вектор шума системы, – вектор измерений, – вектор шумов измерений. и – в общем случае нелинейные функции.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ MMT-300**

**Thruster Allocation Matrix**

Зная геометрические и физические параметры движителей, возможно определить Thruster Allocation Matrix (4) по следующему выражению

где – это сила, создаваемая -м движителем,

– это геометрическое положение точки создаваемой силы -го движителя относительно центра масс подводного аппарата.

Стоит отметить, что силы, создаваемые движителями ММТ-300, зависят от программного управления, что приводит выражение (9) к параметрической форме

где – это программный код управления.

По рис. 2 возможно определить значения , которые представлены в таблице 1.



Рисунок 2 – Геометрические параметры центра масс MMT-300

Таблица 1 – Moment arms of 6 thruster of MMT-300

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Thruster № | , (mm) | | |
| , (mm) | , (mm) | , (mm) |
| 1 | -1330 | 0 | 189 |
| 2 | -1330 | 159 | 30 |
| 3 | -1330 | 0 | -129 |
| 4 | -1330 | -159 | 30 |
| 5 | 1330 | 0 | 30 |
| 6 | 882 | 0 | 30 |

Так как все движители одинаковы по строению, то они создают единую силу, зависящую от программного кода управления . При этом определяются с учетом геометрии объекта управления как

, ,

, ,

, .

По статической характеристике движителей (рис. 3) возможно записать функциональную зависимость между кодом управления и создаваемой силой, например при помощи полинома шестого порядка



Рисунок 3 – Статическая характеристика движителей MMT-300

Имея определенные выше зависимости, возможно определить из выражения (10), что позволит определить выражение для сил и моментов (4) уже в параметрической форме . Причем здесь определяет процентаж нагрузки движителей. При полной работоспособности .

**Матрица инерции и присоединенных масс**

Матрица в уравнении (6) константная, симметричная и положительно определенная (). Величины, наполняющие ее, во многом зависят от формы рассматриваемого объекта и в самом общем случае имеет следующий вид

где – масса твердого тела,

– это единичная матрица размерности ,

– это тензор инерции в системе отсчета данного тела,

– вектор от начала координат до центра тяжести твердого тела,

– оператор преобразования вектора в кососимметричную матрицу:

в развернутом виде:

Тензор инерции для полнотелого цилиндра определяется как

Матрица представляет собой производные от элементов внешних сил и моментов, и в компонентном виде записывается как

,

где , и т.д.

Учитывая аппроксимацию подводного аппарата симметричной формой, запись матрицы сильно упростится и примет диагональный вид:

Единственного верного способа вычисления элементов матрицы нет, поэтому, как правило, используют ряд оценочных методов. Для полнотелого цилиндра массой , длиной , радиусом присоединенные массы (15) определяются как

**Матрица Кориолиса**

По Фоссену матрица в общем случае определяется из блоков матрицы инерции . В данном случае , тогда

Помимо этого, возможен аналогичный, более комплексный способ расчета , без знания матрицы инерции :

Матрица с учетом упрощений записывается следующим образом:

Нетрудно заметить, что здесь состоит из диагональных элементов матрицы и компонентов вектора скоростей.

По Фоссену матрица в общем случае определяется из блоков матрицы инерции . В данном случае , тогда

**Вектор гравитации и плавучести**

В работе [Fossen] для расчета автор использует выражение

где – масса судна включая воду в пространстве,

– ускорение свободного падения,

– выталкивающая сила,

где – плотность жидкости,

– объем жидкости, вытесняемой судном,

, , – компоненты вектора от начала координат до центра плавучести твердого тела.

**Демпфирующие силы**

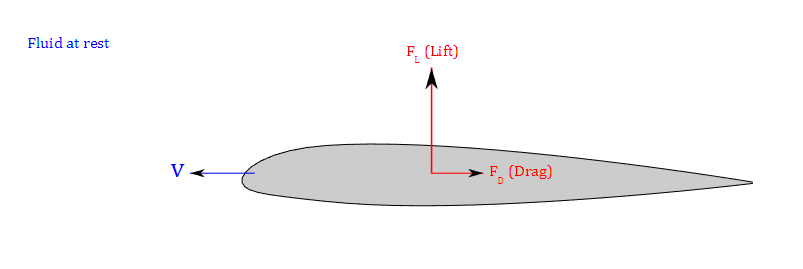


Рисунок 4 – Схема распределения демпфирующих сил

The drag/lift force is calculated using

– is a dimensionless number known as the drag coefficient,

– is a dimensionless number known as the lift coefficient,

– плотность среды,

– скорость тела в жидкости,

– площадь поверхности, относительно течения,

– площадь поверхности, перпендикулярной течению,

Таблица 2 – Коэффициенты

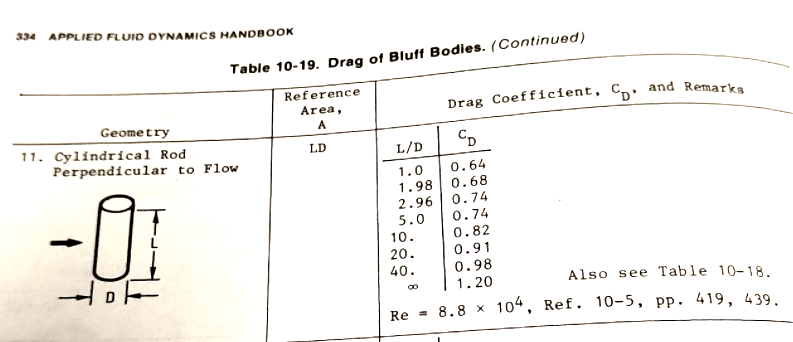
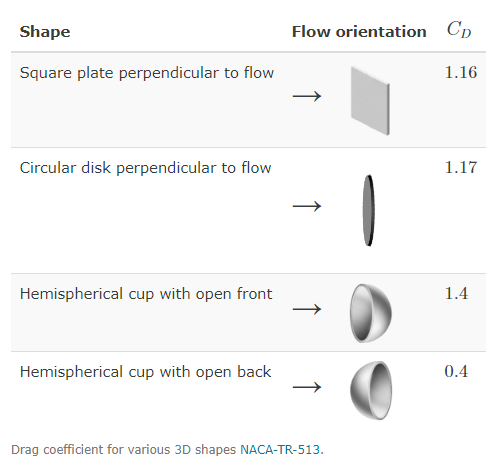


Таблица 3 – Коэффициенты



Коэффициент переноса: .

Коэффициент подъема: .

Фронтальная площадь: (м2).

Боковая площадь: (м2).

Силы, создаваемые при движении цилиндрического тела , приблизительно определяются как

Моменты, создаваемые при движении цилиндрического тела, приблизительно определяются как

Силы демпфирования, с учетом рассчитанных параметров определяются как

[https://kdusling.github.io/teaching/Applied-Fluids/Notes/DragAndLift]

**ПРИЛОЖЕНИЕ А**

**Параметры модели подводного аппарата MMT-300**

Масса аппарата [кг]: .

Радиус аппарата [м]: .

Длина аппарата [м]: .

Вектор до центра масс в системе отсчета аппарата [м]: .

Вектор до центра плавучести в системе отсчета аппарата [м]: .

Плавучесть аппарата [Н]:.

**Параметры среды**

Плотность среды [кг/м3]: .

Гравитационное ускорение [м/с2]: .