

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ИНСТИТУТ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ
И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Кафедра "Информатика и управление в технических системах"

МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРОЩЕННОГО УРАВНЕНИЯ КИНЕМАТИКИ ПОДВОДНОГО АППАРАТА MIDDLE AUV

Методические указания
к выполнению лабораторной работы
по дисциплине "Моделирование робототехнических систем"
для студентов направления подготовки
27.04.04 – «Управление в технических системах»
15.04.06 – «Мехатроника и робототехника»
дневной формы обучения



Севастополь
СевГУ
2025

УДК 004.942:[531.1:[629.584:007.52]](076.5)

ББК 39.427.5-05в63-5*я73

М74

Р е ц е н з е н т :

А. А. Кабанов - канд. техн. наук, доцент

Составители: В.А. Крамарь, А.Д. Ляшко, Р.Д. Якунин

М74 Моделирование упрощенного уравнения кинематики подводного аппарата Middle AUV : методические указания к выполнению лабораторной работы по дисциплине "Моделирование робототехнических систем" для студентов направления подготовки 27.04.04 «Управление в технических системах», 15.04.06 «Мехатроника и робототехника» дневной формы обучения / Севастопольский государственный университет ; сост.: В. А. Крамарь, А. Д. Ляшко, Р. Д. Якунин. – Севастополь : СевГУ, 2025. – 14 с. – Текст : электронный.

Приводится описание лабораторной работы, целью которой является овладение умениями и практическими навыками Моделирование упрощенного уравнения кинематики подводного аппарата Middle AUV. Методические указания предназначены для студентов дневной формы обучения направления подготовки 27.04.04 «Управление в технических системах», 15.04.06 «Мехатроника и робототехника»

УДК 004.942:[531.1:[629.584:007.52]](076.5)

ББК 39.427.5-05в63-5*я73

Рассмотрены и рекомендованы к изданию на заседании кафедры информатики и управления в технических системах, протокол № 5 от 28 января 2025 г.

© Крамарь В. А., Ляшко А. Д.,

Якунин, Р. Д., сост., 2025

© ФГАОУ ВО «Севастопольский

государственный университет», 2025

СОДЕРЖАНИЕ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ.....	4
2. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ	4
3. ЗАДАНИЕ НА ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ	11
4. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА И ПОРЯДОК ЗАЩИТЫ РАБОТЫ	12
5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	12
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	13
ПРИЛОЖЕНИЕ А	14
А1. Пример выполнения задания 3	14

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью лабораторной работы является исследование кинематики подводного аппарата в трех степенях свободы (3 DOF) путем разработки математической модели, описывающей его движение. Проведение численного моделирования для анализа траектории движения и проверки адекватности модели.

Все вычислительные процедуры и построения предлагается проводить с помощью математических пакетов MathCAD, MatLab, Octave, которые обеспечивают высокую точность расчетов и удобство визуализации результатов. Для отработки и тестирования алгоритмов рекомендуется использовать среду разработки PyCharm, MuRIDE со встроенным симулятором, позволяющий моделировать движение подводных аппаратов в условиях, близких к реальным. Такой подход обеспечивает комплексную проверку корректности работы алгоритмов их готовность к практическому внедрению.

2. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) и телеуправляемые необитаемые подводные аппараты (ТНПА), широко используются для исследования подводной среды. Понимание их кинематики необходимо для создания эффективных алгоритмов управления и обеспечения точной навигации. Кинематика изучает движение объектов без учета сил, вызывающих это движение.

Кинематическое уравнение связывает скорость подводного аппарата (ПА) в связанной системе координат с его положением и ориентацией в инерциальной системе. Связанная система координат привязана к подводному аппарату, начало координат находится в его центре масс. Схема расположения движителей MiddleAUV относительно центра масс показана на рисунке 2.1

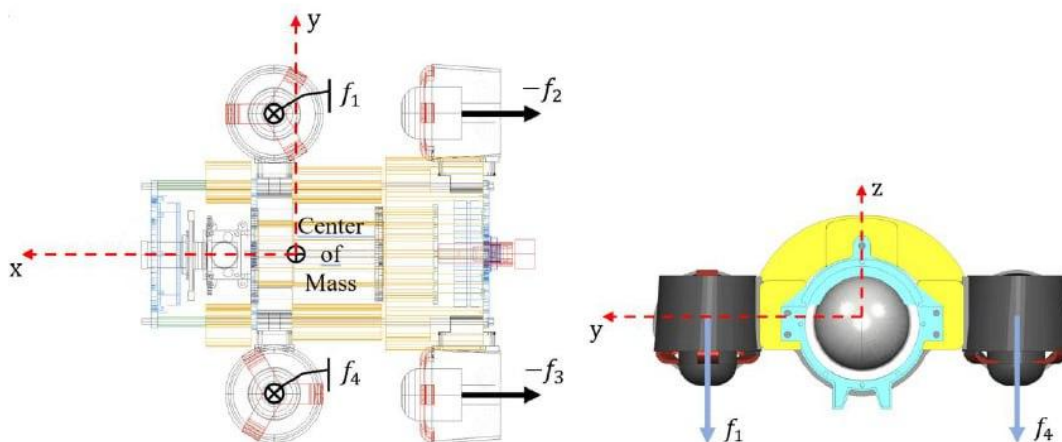


Рисунок 2.1 – Расположение движителей MiddleAUV

Инерциальная система координат привязана к Земле, используется для описания глобального положения и ориентации аппарата. Положение ПА определяется его линейным перемещением $\eta_1 = [x \ y \ z]^T$ и ориентацией $\eta_2 = [\varphi \ \theta \ \psi]^T$.

Общее кинематическое уравнение движения ПА с шестью степенями свободы определяется выражением [1]

$$\dot{\eta} = J(\eta)v, \quad (2.1)$$

где $\eta = [x, y, z, \varphi, \theta, \psi]^T = [\eta_1^T, \eta_2^T]^T$ – вектор положения;

$\eta_1 = [x, y, z]^T$ положение и углы Эйлера угловой ориентации;

$\eta_2 = [\varphi, \theta, \psi]^T$ в земной системе координат;

$v = [u, v, w, p, q, r]^T$ – вектор скоростей, включающий векторы линейных $v_1 = [u, v, w]^T$ и угловых скоростей $v_2 = [p, q, r]^T$;

$J(\eta)$ – матрица преобразования скорости ПА, заданной в связанной системе координат в координаты положения ПА в земной системе координат.

Из уравнения (2.1), можно получить модель горизонтального ПА движения, сохраняя продольные, поперечные движения и рыскание, то есть, полагая, $\eta = [x \ y \ \psi]^T$ и $v = [u \ v \ r]^T$, получая, таким образом, систему с тремя степенями свободы:

$$\dot{\eta} = R(\eta)v \quad (2.2)$$

где

$$R(\psi) = \begin{pmatrix} c\psi & -s\psi & 0 \\ s\psi & c\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix};$$

Принятые обозначения: $s\psi = \sin(\psi)$; $c\psi = \cos(\psi)$.

Переходя в (2.2), к скалярной форме получим выражение (2.3)

$$\begin{cases} \dot{x} = c\psi (u) - s\psi (v), \\ \dot{y} = s\psi (u) + c\psi (v), \\ \dot{\psi} = r, \end{cases} \quad (2.3)$$

где

x, y – координаты положения ПА,

ψ – угол рыскания,

u, v – линейные скорости (вдоль осей x, y),

r – угловая скорость.

Добавим в выражение (2.3) течение. Уравнение кинематики в горизонтальной плоскости с учетом течения имеет вид

$$\begin{cases} \dot{x} = c\psi (u + u_{current}) - s\psi (v + v_{current}), \\ \dot{y} = s\psi (u + u_{current}) + c\psi (v + v_{current}), \\ \dot{\psi} = r, \end{cases} \quad (2.4)$$

где

$u_{current}$ — скорость течения вдоль оси X,

$v_{current}$ — скорость течения вдоль оси Y.

Установка симулятора MUR IDE (Python)

MUR IDE — бесплатная среда разработки, предназначенная для работы с аппаратами [MiddleAUV](#) (рисунок 2.2), а также во встроенном симуляторе.



Рисунок 2.2 – ПА MiddleAUV

В среде MUR IDE (рисунок 2.3) предоставляются широкие возможности для разработки, тестирования и внедрения современных алгоритмов управления подводными аппаратами. Среда позволяет инженерам и исследователям реализовывать системы управления, навигации и адаптации в условиях подводной среды.

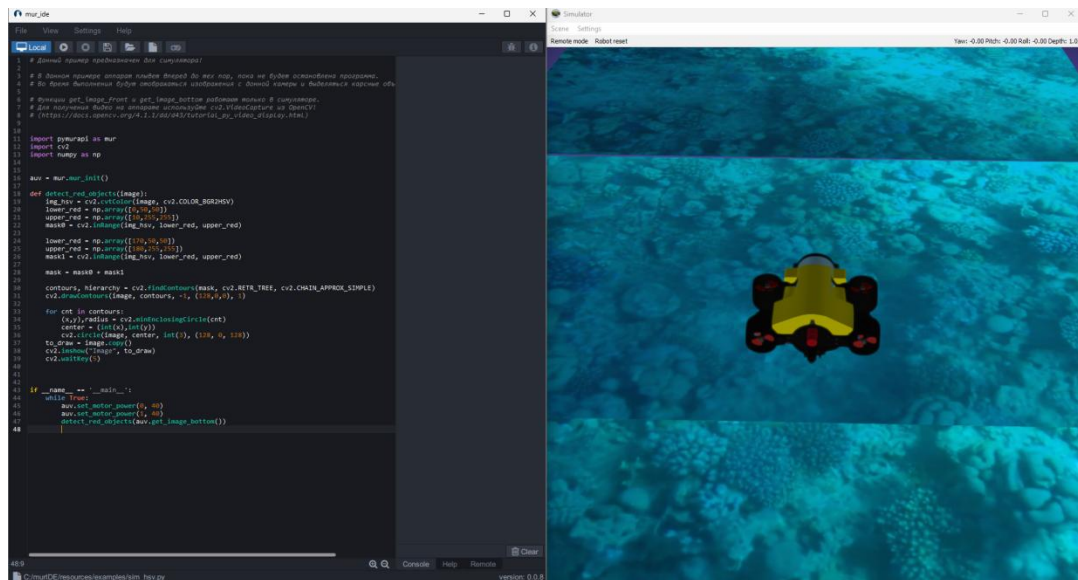


Рисунок 2.3 – Среда MUR IDE

Возможности работы в среде MUR IDE:

- Разработка алгоритмов стабилизации и управления курсом;
- Разработка алгоритмов планирования траекторий;
- Разработка алгоритмов навигации и локализации;
- Разработка алгоритмов управления движением;
- Разработка алгоритмов на основе нейронных подходов;
- Разработка алгоритмов компьютерного зрения.

MUR IDE может быть установлена только на 64-битную операционную систему. Для проверки вашей операционной системы на Windows 10, нужно нажать на клавиатуре WIN + R и в открывшемся окне набрать слово «winver». И там уже написано какая у вас версия. Или кликнуть правой кнопкой мыши по значку «Мой компьютер» и выбрать свойства и там тоже написано какая версия Windows у вас на компьютере. Windows 11 не поддерживает 32-битные системы. Эта операционная система предназначена только для работы с 64-битными системами. Также стоит проверить графический драйвер. Чтобы проверить драйвер в Windows, нужно выполнить следующие шаги:

1. Откройте «Диспетчер устройств» на «панели управления».
2. Найдите видеоадаптеры и дважды нажмите на него, затем дважды нажмите на показанное устройство.
3. Выберите вкладку «Драйвер». Здесь будет указана версия драйвера.

Чтобы скачать MUR IDE вам необходимо перейти на сайт «<https://murproject.com/>» в раздел «Программное обеспечение» и нажать кнопку скачать (рисунок 2.4).



Рисунок 2.4 – Программное обеспечение MUR IDE

В загрузках открываем «mur_installer_0_1_0.exe» и нажимаем далее.

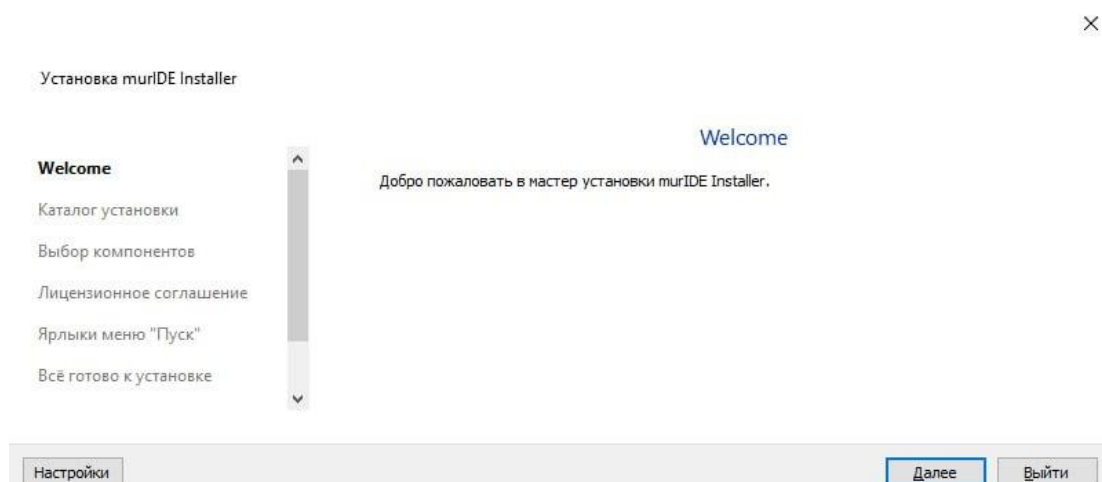


Рисунок 2.5 – Установка MUR IDE

Выбирает каталог для установки MUR IDE.

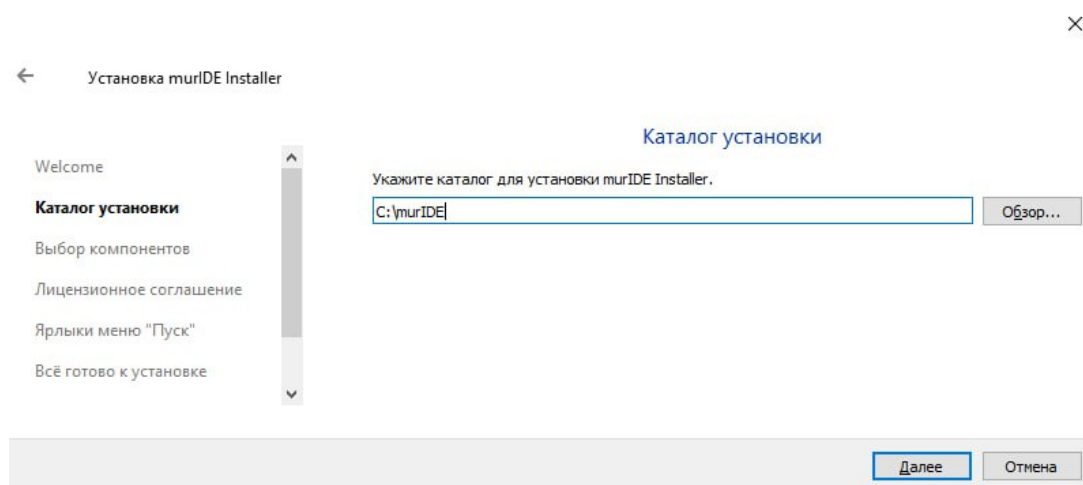


Рисунок 2.6 – Выбор каталога для установки MUR IDE

Выбираем компоненты, которые представлены на рисунке 2.7

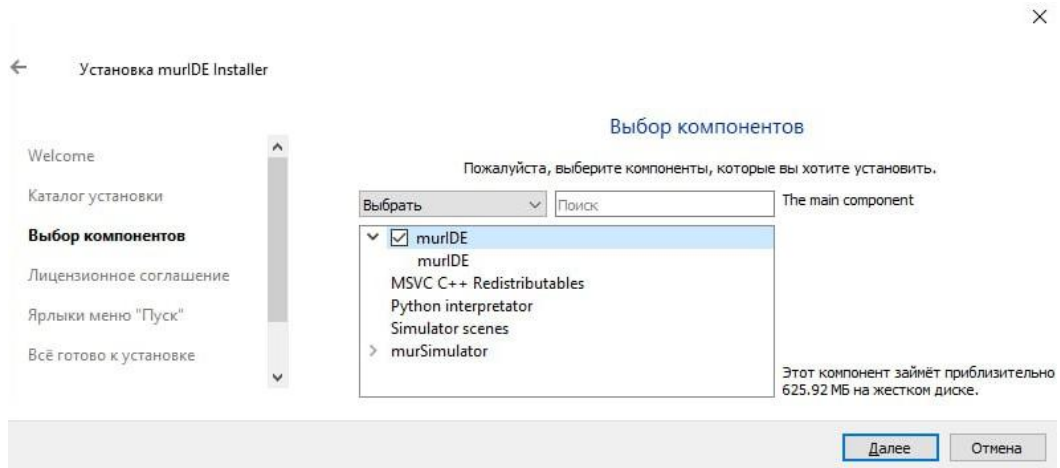


Рисунок 2.7 – Выбор компонентов для установки MUR IDE

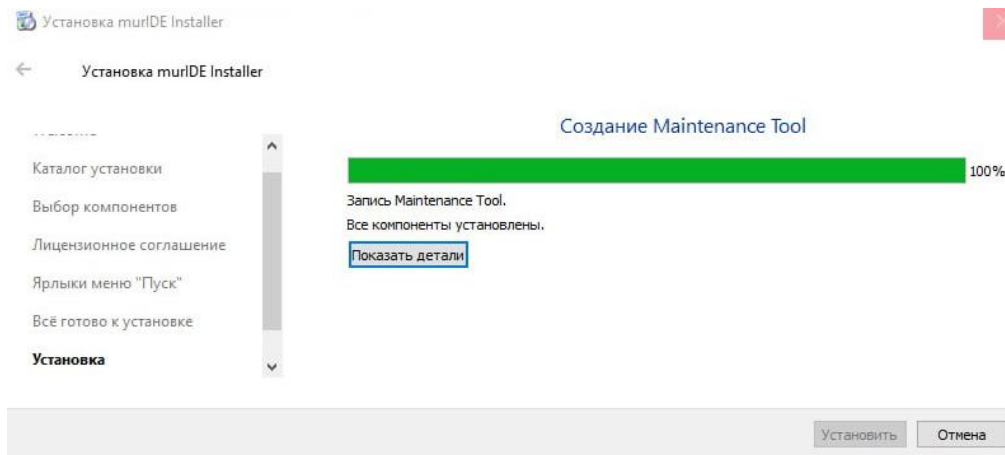


Рисунок 2.8 – Установка MUR IDE

Далее нужно установить Microsoft Visual C ++

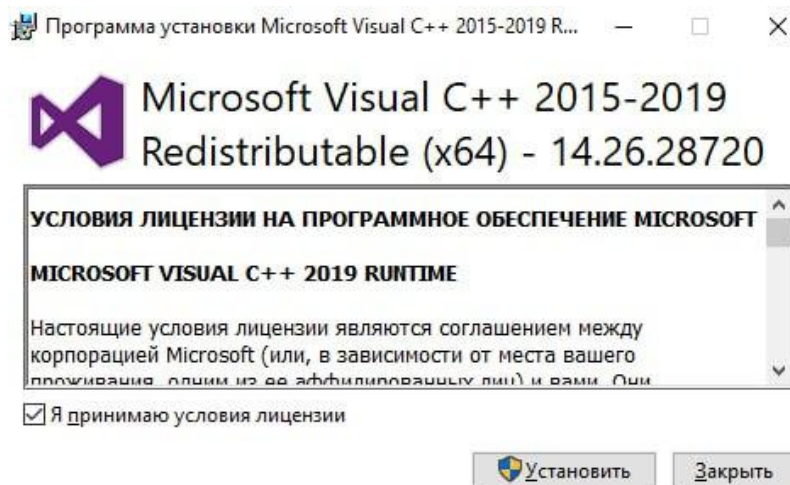


Рисунок 2.9 – Установка Microsoft Visual C++

Работа в среде MUR IDE

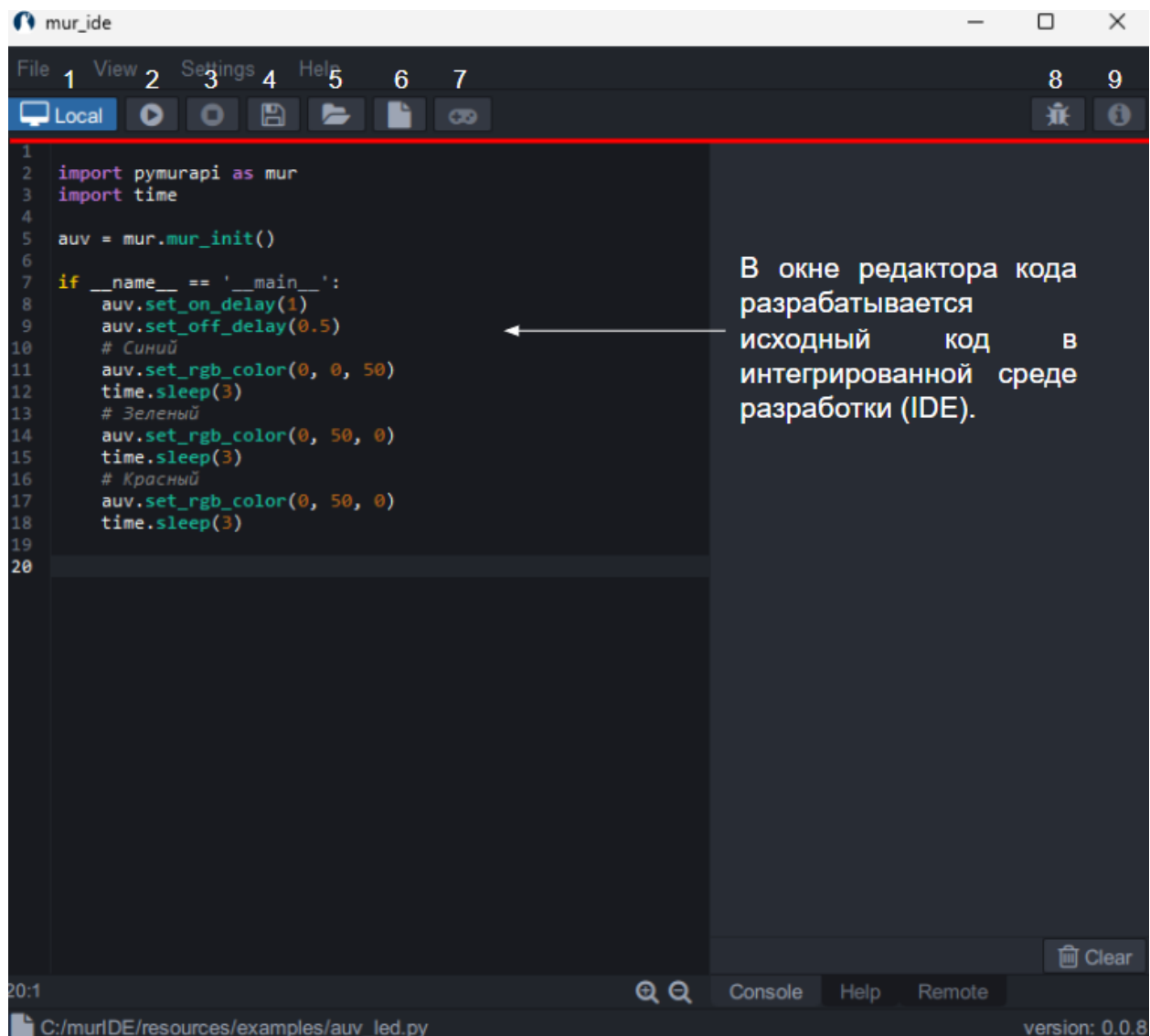


Рисунок 2.10 – Среда MUR IDE

Над окном кода расположена рабочая панель, состоящая из 9 элементов, которая выделенная красной линией на рисунке 2.10.

1 элемент – Два режима работы (Local/Robot). Для работы в симуляторе необходим режим Local.

2 элемент – Запуск программы.

3 элемент – Остановка программы.

4 элемент – Сохранение программы.

5 элемент – Открытие программы.

6 элемент – Создание нового окна.

7 элемент – Управление с геймпада.

8 элемент – Запуск симулятора.

9 элемент – Запуск телеметрии.

3. ЗАДАНИЕ НА ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

1. Реализовать прямолинейное движение ПА в горизонтальной плоскости согласно уравнению (2.3) в Matlab. Начальное положение задается как $x = 0, y = 0, \psi = 0$. Параметры u, v, r, t представлены в таблице 3.1.

2. Реализовать прямолинейное движение ПА с учетом течений в горизонтальной плоскости согласно уравнению (2.4) в Matlab. Начальное положение задается как $x = 0, y = 0, \psi = 0$. Параметры $u, v, r, t, u_{current}, v_{current}$ представлены в таблице 3.2.

3. Реализовать движение ПА в горизонтальной плоскости с учетом течения и без на основе уравнений (2.3) и (2.4). Необходимо провести визуализацию траекторий движения в форме фигур согласно варианту из таблицы 3.3. Параметры $u, v, r, u_{current}, v_{current}$ остаются такие же, как и во втором задании. Время моделирования можно выбрать произвольное. Примеры результатов представлены в Приложении А.

4. Реализовать движение ПА в горизонтальной плоскости согласно уравнению (2.3) в среде MUR IDE. Необходимо провести визуализацию траекторий движения в форме фигур согласно варианту из таблицы 3.3.

Таблица 3.1 – Варианты исходных данных для первого задания

№ п/п	u (м/с)	v (м/с)	r	t
1	0,5	0,2	0,1	10
2	0,6	0,4	0,1	15
3	0,4	0,8	0,1	20
4	0,2	1	0,1	25
5	1	0,3	0,1	30
6	0,5	0,2	0,1	30
7	0,4	0,8	0,1	25
8	0,6	1	0,1	20
9	1	0,4	0,1	15
10	0,7	0,8	0,1	10

Таблица 3.2 – Варианты исходных данных для второго задания

№ п/п	u (м/с)	v (м/с)	r	t	$u_{current}$	$v_{current}$
1	0,5	0,2	0,1	10	0,5	0,4
2	0,6	0,4	0,1	15	0,4	0,8
3	0,4	0,8	0,1	20	0,1	0,3
4	0,2	1	0,1	25	0,4	0
5	1	0,3	0,1	30	0,9	0,2
6	0,5	0,2	0,1	30	0,3	0,4
7	0,4	0,8	0,1	25	1	0,2
8	0,6	1	0,1	20	0,5	0,6
9	1	0,4	0,1	15	0,3	0,3
10	0,7	0,8	0,1	10	0,4	0,7

Таблица 3.3 – Варианты исходных данных для третьего и четвертого задания

№	Фигура
1	Квадрат
2	Треугольник
3	Круг
4	Квадрат
5	Треугольник
6	Круг
7	Квадрат
8	Треугольник
9	Круг
10	Квадрат

4. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА И ПОРЯДОК ЗАЩИТЫ РАБОТЫ

Отчёт должен включать в себя следующие разделы:

- цель работы;
- постановка задачи – номер варианта, исходные данные, формула вычисления и значения входных переменных;
- краткие теоретические сведения, содержащие описания используемых функций MatLab, Python (назначение функции, перечень и назначение входных и выходных параметров, основные варианты вызова функции);
- тексты программ;
- результаты работы программ – числовые данные, графики;
- общие выводы по работе;
- перечень использованной литературы.

Выполнение и защита лабораторной работы производится каждым студентом индивидуально. Защита результатов лабораторной работы осуществляется при наличии работающих программ, полностью оформленного отчёта и состоит в следующем:

- представление работающих программ на компьютере;
- предъявление отчёта, оформленного в соответствии с указанными требованиями;
- ответы на вопросы преподавателя по теоретической и практической части работы.

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

При сдаче лабораторной работы необходимо уметь выполнять все задания, приведённые в методических указаниях без использования справочной литературы. Уметь сформулировать все основные понятия, используемые в работе.

1. Что такое модель кинематики?
2. Какие системы отсчета используются для моделирования кинематики подводных аппаратов?
3. Для чего используются матрицы поворотов?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Fossen T. I. Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control / T. I. Fossen - 2nd ed. - Chichester ; New York : Wiley, 2021. - ISBN-13: 978-1119575054.

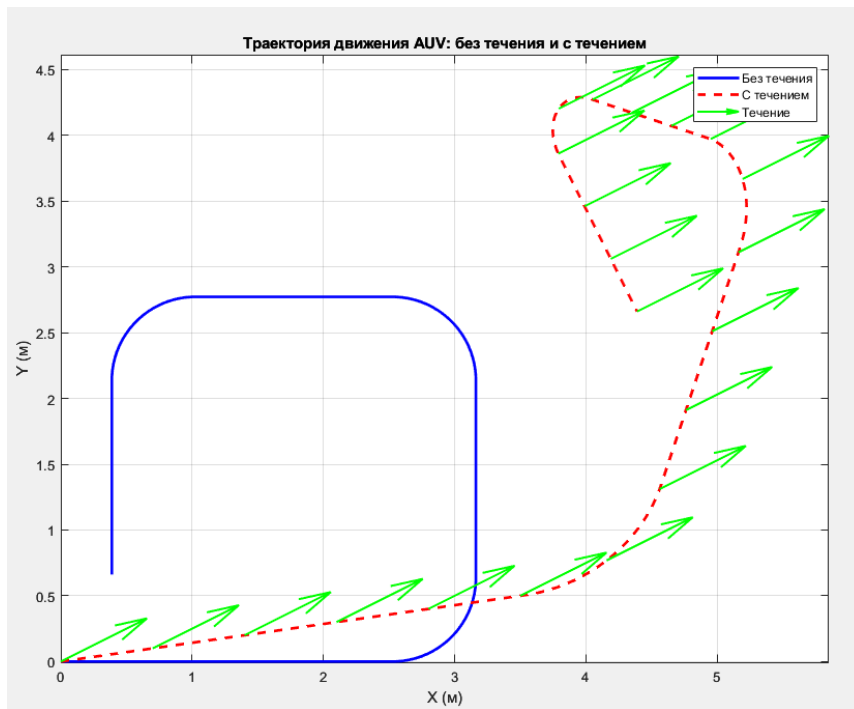
2. Antonelli G. Underwater robots: motion and force control of vehicle manipulator systems / G. Antonelli, G. Antonelli. – 2nd ed. - Berlin [u.a.] : Springer, 2006.

3. Fossen T. I. Guidance and control of ocean vehicles / T. I. Fossen. - Chichester ; New York : Wiley, 1994. - 480 с.

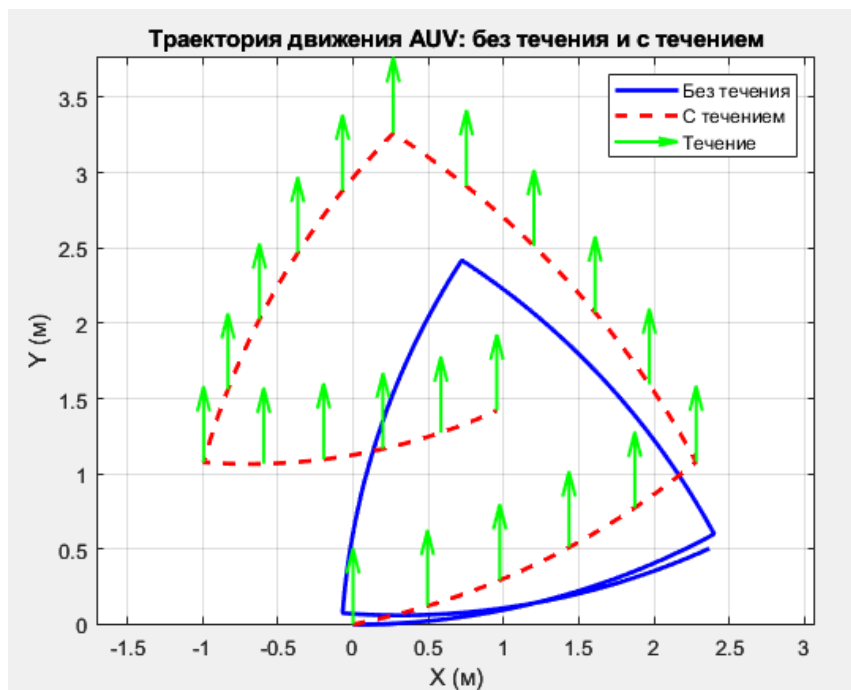
ПРИЛОЖЕНИЕ А

А1. Пример выполнения задания 3

Траектория движения в форме фигуры (квадрат)



Траектория движения в форме фигуры (треугольник).



МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРОЩЕННОГО УРАВНЕНИЯ КИНЕМАТИКИ ПОДВОДНОГО АППАРАТА MIDDLE AUV

Методические указания

Составители: **Крамарь** Вадим Александрович,
Ляшко Александр Дмитриевич, **Якунин** Роман Денисович

В авторской редакции

Изд. № 78/2025. Объем 1 п.л. Усл. печ. л. 0,93. Уч.-изд. л. 0,98.
Издательский центр ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»