

DOI: 10.24412/2077-8481-2025-1-52-61

УДК 621.365:66

Т. С. ЛАРЬКИНА^{1, 2}

П. В. КАЗАКОВ¹

Д. Ю. СТУДНЕВ¹

¹Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

²Национальный исследовательский университет «МЭИ» в г. Смоленске (Смоленск, Россия)

К ВОПРОСУ РАЗРАБОТКИ РОБОТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ И УСКОРЕНИЯ ПРОВЕРКИ СЛОЖНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ

Аннотация

Рассмотрен способ создания роботизированной системы на основе её электрической и механической части. Данная система будет использована в отраслях металлургии, судостроения, нефтегазового дела и других, в которых необходимо выполнять проверку качества и нормирования металлических конструкций и сварных швов изделий. Для реализации данной задачи использовались следующие программы: Matlab Simulink, КОМПАС 3D, Arduino IDE.

Ключевые слова:

роботизированная система, робот, моделирование, Matlab Simulink, Arduino, КОМПАС 3D, Simintech, оптимизация.

Для цитирования:

Ларькина, Т. С. К вопросу разработки роботизированных систем для оптимизации и ускорения проверки сложных металлических конструкций / Т. С. Ларькина, П. В. Казаков, Д. Ю. Студнев // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2025. – № 1 (86). – С. 52–61.

Введение

В современном мире автоматизация и роботизация становятся неотъемлемой частью различных отраслей промышленности. Одним из ключевых направлений развития робототехники является создание роботов для инспекции и проверки качества металлических конструкций.

В данном исследовании рассматриваются ключевые аспекты разработки роботизированной системы, включая выбор и разработку методов передвижения по сложным поверхностям, интеграцию систем компьютерного зрения для анализа поверхности металла, а также необходимости передачи полученных данных на обрабатывающее устройство. Особое внимание уделяется вопросам надежности и точности полу-

чаемых данных, поскольку от этого напрямую зависит безопасность эксплуатации проверяемых конструкций. В работе планируется представить модель прототипа роботизированной системы, а также анализ перспектив дальнейшего развития и применения таких систем в промышленности.

Описание и принцип работы предлагаемой роботизированной системы

Проверка качества сварных швов и изучение структуры металла на различные дефекты будет производиться при помощи современного дефектоскопа на пьезоэлектрических преобразователях (ПЭП) на основе ультразвука.

Преимуществом данного метода является компактность в области скани-

рования металла за счёт использования ультразвукового сканирования на пьезоэлектрических преобразователях [1].

Концепция предлагаемой роботизированной системы приведена на рис. 1. Использование 3D-моделиро-

вания помогает проводить точное моделирование и тестирование робототехнических конструкций, что позволяет понимать реальные характеристики полученной системы.

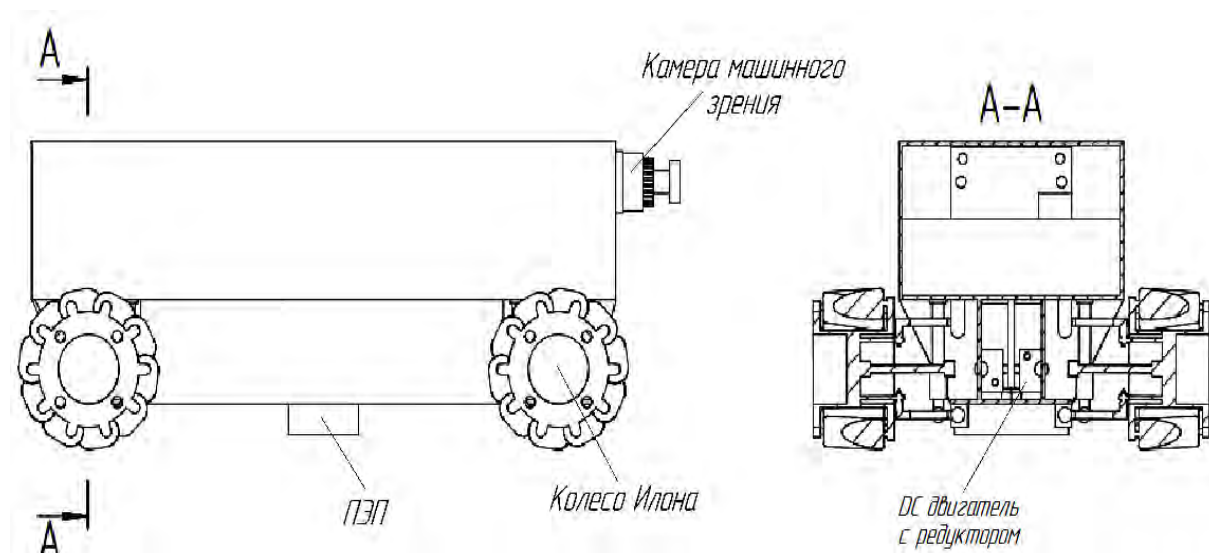


Рис. 1. Концепция роботизированной системы (КОМПАС 3D)

Передвижение будет осуществляться при помощи колес Илона с магнитными валиками для обеспечения передвижения на металлических конструкциях в различных направлениях.

Системой управляет оператор при помощи многофункционального пульта. Также устройство будет иметь камеру для кругового обзора с высоким разрешением и подсветкой для обеспечения комфортного управления оператором и хорошего позиционирования устройства.

Камера машинного зрения позволяет реализовать умную систему с использованием цифрового зрения в предлагаемой роботизированной системе [2]. Интеграция OpenCV с ROS обеспечивает расширенные возможности обработки изображений, необходимые для та-

ких задач, как обнаружение дефектов.

Для обеспечения движения применены DC-двигатели с редукторами для обеспечения оптимальной скорости сканирования.

Данные с дефектоскопа будут передаваться на встроенный экран пульта либо на аналогичное устройство для показа дефектов в металле.

Типы и устройство ПЭП проиллюстрированы на рис. 2.

Для предлагаемой системы был выбран наклонный совмещённый преобразователь П121 (см. рис. 2, б), т. к. с его применением возможно проводить контроль сварных швов и соединений под различными углами.

Принцип работы выбранного преобразователя описан на рис. 3.

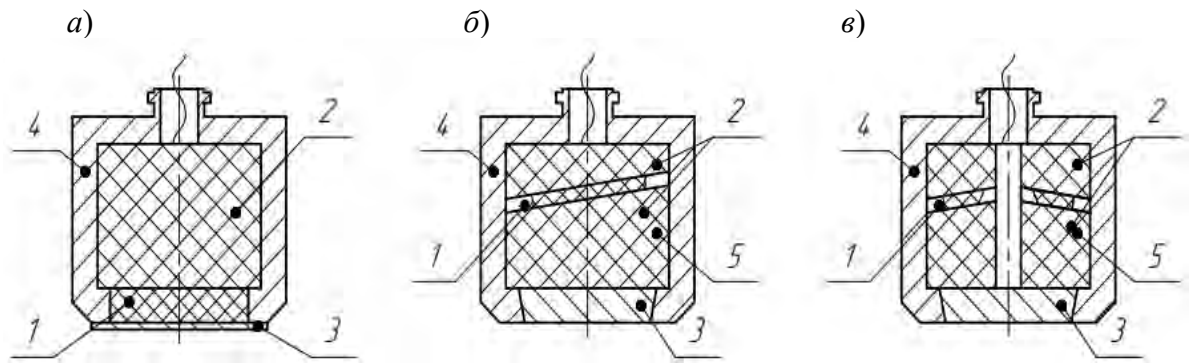


Рис. 2. Типы и устройство ПЭП: а – прямые раздельно-совмещенные ультразвуковые преобразователи П112; б – наклонные совмещенные ультразвуковые преобразователи П121; в – преобразователи контактные раздельно-совмещенные П122

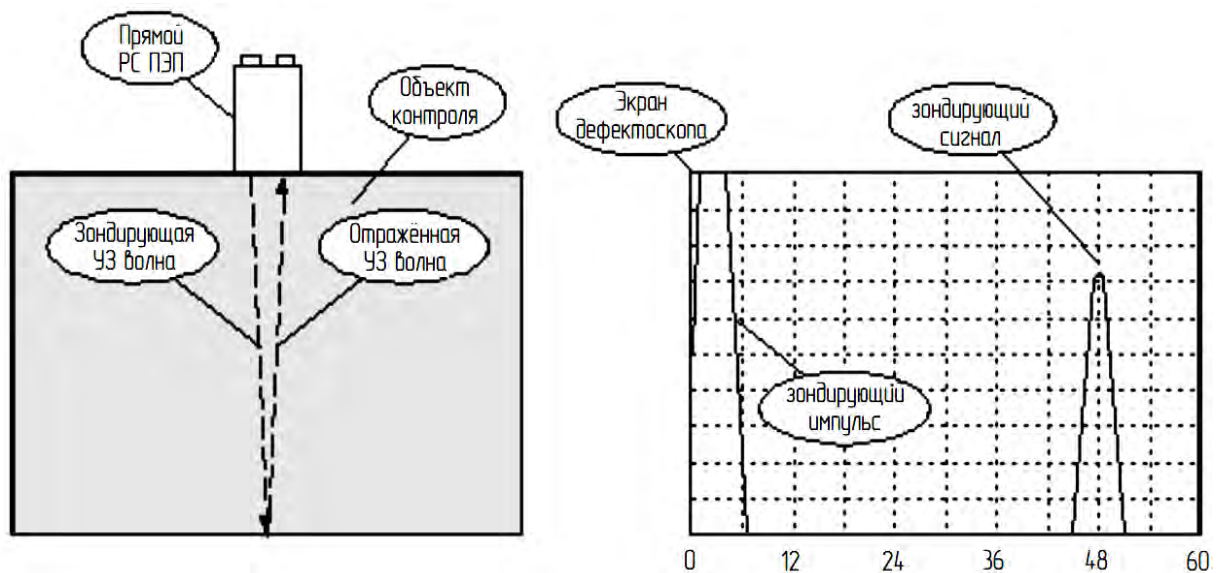


Рис. 3. Принцип работы преобразователя

Технические характеристики предлагаемой роботизированной системы

Габаритные размеры предлагаемой роботизированной системы.

1. Длина: 198 мм (без учета антенны).
2. Ширина: полная – 118,5 мм, без колес – 67 мм.
3. Высота: полная – 80 мм, может изменяться.

Устройство состоит из следующих основных элементов.

1. Плата расширения привода

двигателя L293D:

- 4-канальный драйвер;
- управление четырьмя моторами;
- максимальный ток на один мотор – 0,3 А;
- питание платы – от 4,5 до 36 В.

2. Четыре DC-мотора с передачей:

- питание – 3 В;
- максимальный ток – 0,3 А;
- скорость без нагрузки – 100 об/мин.

3. Головная плата – Arduino Uno.

4. Литийионный аккумулятор
IFP2065150AD15Ah:

- емкость – 15 А·ч, 48 Вт·ч;
- ток разряда – 15 А;
- диапазон рабочих температур – от минус 20 °С до плюс 50 °С;
- срок службы – 10 лет;
- масса – 361 г.

5. Преобразователь напряжения (повышающий) MT3608:

- вход – 2...24 В;
- выход – 4...28 В;
- регулируемое напряжение;
- максимальный ток – 2 А.

6. Модуль зарядного устройства
Li-on батареи TP4056:

- напряжение питания – от 4,5 до 8,0 В;

- разъем Type-C на плате;
- ток заряда – 1,0 А.

7. Камера машинного зрения
OpenMW H7 Plus:

- микроконтроллер STM32H743|| на ARM Cortex-M7;
- питание – от 3,6 до 5 В;
- частота кадров: QVGA (120 кадр/с), VGA (90 кадр/с), 720 p (60 кадр/с), 1080 p (30 кадр/с), QXGA (15 кадр/с).

На рис. 4 представлена предлагаемая роботизированная система на выбранных элементах.

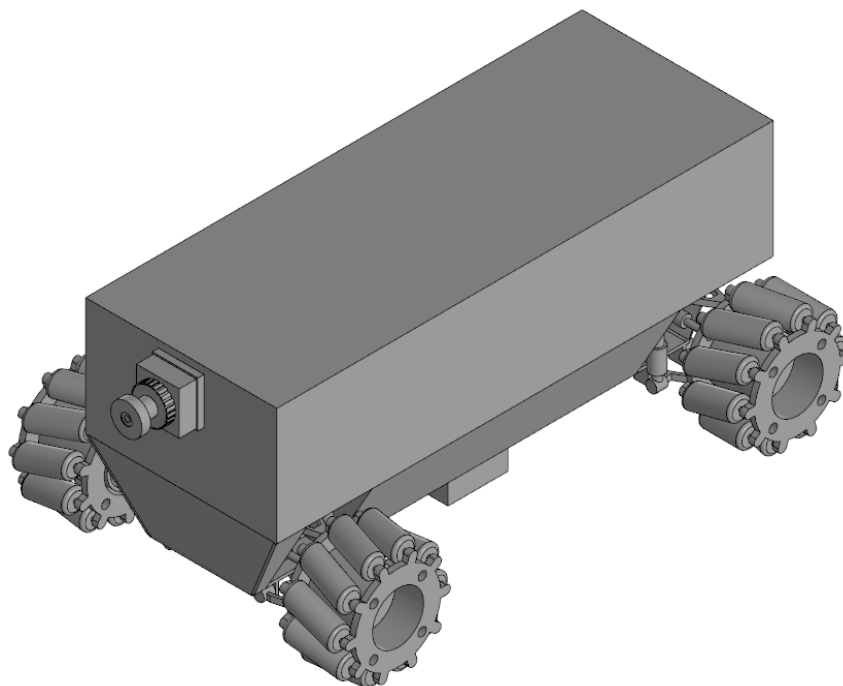


Рис. 4. Предлагаемая модель роботизированной системы (КОМПАС 3D)

Представленная трехмерная модель концепции роботизированной системы выполнена с применением КОМПАС 3D.

Составление схемы электрической

Схема электрическая роботизированной системы представлена на рис. 5.

Основные компоненты схемы:

- Arduino Uno: «мозг» системы;
- четыре всенаправленных колеса (Mecanum) с моторами;
- драйвер моторов (L293D): для управления моторами;
- камера (OpenMW H7 Plus): для видеонаблюдения;

– повышающий преобразователь напряжения (MT3608): для стабилизации питания камеры и других компо-

нентов;

– источник питания: аккумулятор для питания всей системы.

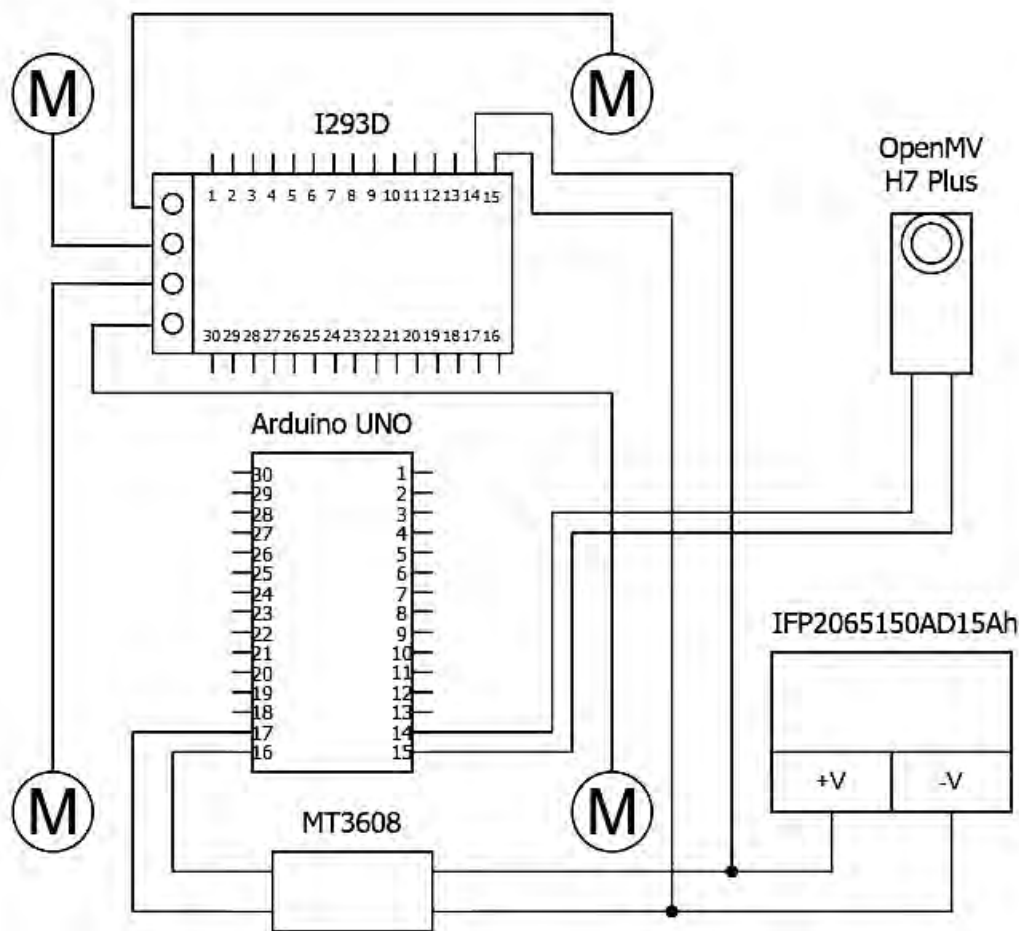


Рис. 5. Схема электрическая подключения

Принцип подключения следующий.

1. Arduino: подключается каждый мотор к драйверу моторов L298N.

Подключение пинов управления драйвера к цифровым пинам Arduino (например, IN1, IN2, IN3, IN4 к D2, D3, D4, D5).

2. Повышающий преобразователь. Вход: от аккумулятора.

Выход: к камере или другим компонентам, требующим стабилизированного питания.

3. Питание.

Arduino и драйвер питаются от аккумулятора, через преобразователь

можно питать камеру [3].

Интеграция датчиков с Arduino обеспечивает обратную связь в реальном времени для динамической корректировки в робототехнических приложениях.

Управление осуществляется посредством платы Arduino, которая запрограммирована выполнять определенные команды, приходящие от оператора с пульта управления. Их можно реализовать на уже готовых вариантах, подключенных по радиоканалу для более дальней передачи данных [4]. Математические модели в эскизах Arduino могут

оптимизировать производительность и эффективность движений робота.

Пример листинга программного

кода представлен на рис. 6.

Программный код выполнен в Arduino IDE.

```

21 void loop() {
22     // Пример движения вперед
23     move(1, 0, 0); // Вперед
24     delay(2000);   // Двигаемся 2 секунды
25
26     // Пример движения вправо
27     move(0, 1, 0); // Вправо
28     delay(2000);   // Двигаемся 2 секунды
29
30     // Пример вращения по часовой стрелке
31     move(0, 0, 1); // Вращение
32     delay(2000);   // Вращаемся 2 секунды
33
34     // Остановка
35     stop();         // Останавливаем все моторы
36     delay(2000);    // Ждем 2 секунды
37 }
38
39 // Функция для управления движением
40 void move(float forward, float sideways, float rotation) {
41     // Вычисляем скорости для каждого мотора на основе векторов движения
42     int motor1Speed = (int)((forward + sideways + rotation) * 255); // Мотор 1
43     int motor2Speed = (int)((forward - sideways - rotation) * 255); // Мотор 2
44     int motor3Speed = (int)((forward - sideways + rotation) * 255); // Мотор 3
45     int motor4Speed = (int)((forward + sideways - rotation) * 255); // Мотор 4
46
47     // Устанавливаем направление вращения для каждого мотора
48     motor1.run(motor1Speed > 0 ? FORWARD : BACKWARD); // Если скорость положительная, мотор вперед
49     motor2.run(motor2Speed > 0 ? FORWARD : BACKWARD);
50     motor3.run(motor3Speed > 0 ? FORWARD : BACKWARD);
51     motor4.run(motor4Speed > 0 ? FORWARD : BACKWARD);
52
53     // Устанавливаем абсолютное значение скорости для каждого мотора
54     motor1.setSpeed(abs(motor1Speed)); // Устанавливаем скорость для мотора 1
55     motor2.setSpeed(abs(motor2Speed)); // Устанавливаем скорость для мотора 2
56     motor3.setSpeed(abs(motor3Speed)); // Устанавливаем скорость для мотора 3
57     motor4.setSpeed(abs(motor4Speed)); // Устанавливаем скорость для мотора 4
58 }
59
60 // Функция остановки
61 void stop() {
62     // Освобождаем все моторы, останавливая их
63     motor1.run(RELEASE);
64     motor2.run(RELEASE);
65     motor3.run(RELEASE);
66     motor4.run(RELEASE);
67 }
68 void loop() {
69     // put your main code here, to run repeatedly:
70 }

```

Рис. 6. Пример листинга программного кода

Алгоритм следующий.

1. Подключение библиотеки AFMotor: необходимо для управления моторами через драйвер Adafruit.

2. Инициализация моторов: необходимо создать четыре объекта моторов, каждый из которых соответствует одному из моторов робота.

3. setup(): установление максимальной скорости (255) для всех моторов при инициализации.

4. AFMotor.h: используется для управления двигателями через Adafruit Motor Shield.

5. move(): управляет движением робота, изменяя скорость и направление каждого двигателя в зависимости от желаемого движения.

6. stop(): останавливает все двигатели.

Математический аппарат движения роботизированной системы

Чтобы описать движение роботизированной системы, необходимо составить уравнения движения в плоскостях X и Y, показав распределение сил в этих плоскостях во время разных видах движения, таких как поворот вправо, движение вперед, вращение на месте. В то же время необходимо составить данные уравнения для написания кода управления передвижением системы для точного выполнения заданных действий.

Для реализации данного аппарата приняты следующие допущения:

1) данная система предназначена для использования на близких к идеальным металлическим конструкциям;

2) система не рассчитана на движение на чрезмерно мокрых поверхностях;

3) движение не будет осуществляться по волнистым поверхностям с большой амплитудой волны.

Далее приведены уравнения, описывающие задание сил, воздействующих на систему.

Движение вправо:

$$\begin{cases} F_{N_x} = 4 f_{R_x}; \\ F_{N_y} = 0; \\ F_N = F_{N_x} + F_{N_y} = 4 f_{R_x}. \end{cases} \quad (1)$$

Движение вокруг своей оси:

$$\begin{cases} F_{N_x} = 2 f_{R_x}; \\ F_{N_y} = 2 f_{R_y}; \\ F_N = F_{N_x} + F_{N_y} = 2 f_{R_x} + 2 f_{R_y}. \end{cases} \quad (2)$$

Движение прямо:

$$\begin{cases} F_{N_x} = 0; \\ F_{N_y} = 4 f_{R_y}; \\ F_N = F_{N_x} + F_{N_y} = 4 f_{R_y}. \end{cases} \quad (3)$$

Движение по диагонали:

$$\begin{cases} F_{N_x} = 2 f_{R_x}; \\ F_{N_y} = 4 f_{R_y}; \\ F_N = F_{N_x} + F_{N_y} = 2 f_{R_x} + 4 f_{R_y}. \end{cases} \quad (4)$$

На рис. 7 представлено распределение сил во время движения робота в разных направлениях.

Моделирование движения системы в Matlab Simulink

Представим моделирование кинематики движения роботизированной системы в движении по окружности и по горизонтали.

На рис. 8 приведена модель движения робота в пакете Matlab Simulink [5].

На рис. 9 приведены результаты моделирования, которые верифицируют адекватность составленного математического аппарата и функционирования модели движения робота в пакете Matlab Simulink.

В результате реализации электрической части, математического описания движения и программы управления можно сказать, что данная роботизированная система обеспечивает выполнение поставленных задач.

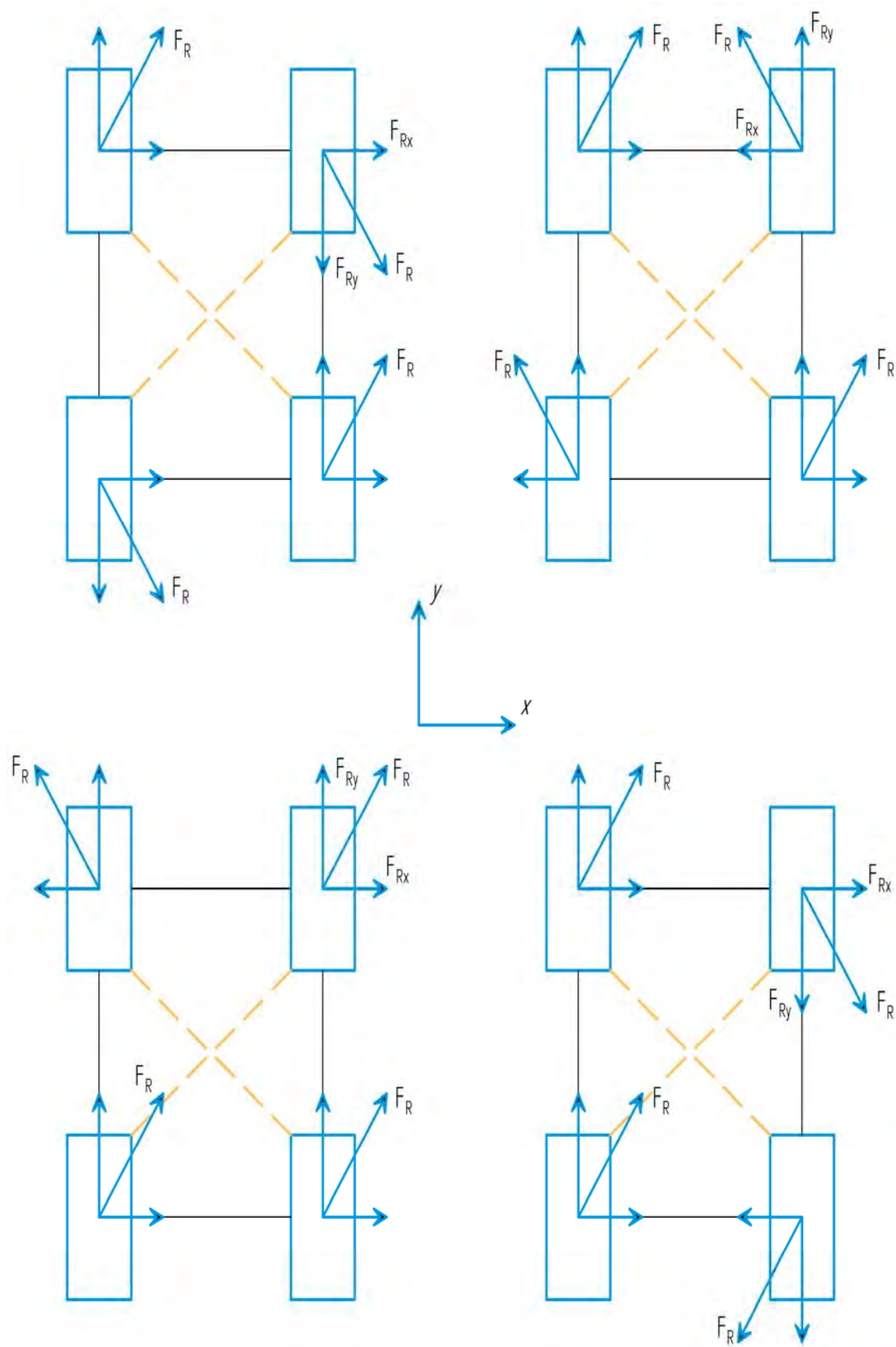


Рис. 7. Распределение сил во время движения робота в разных направлениях

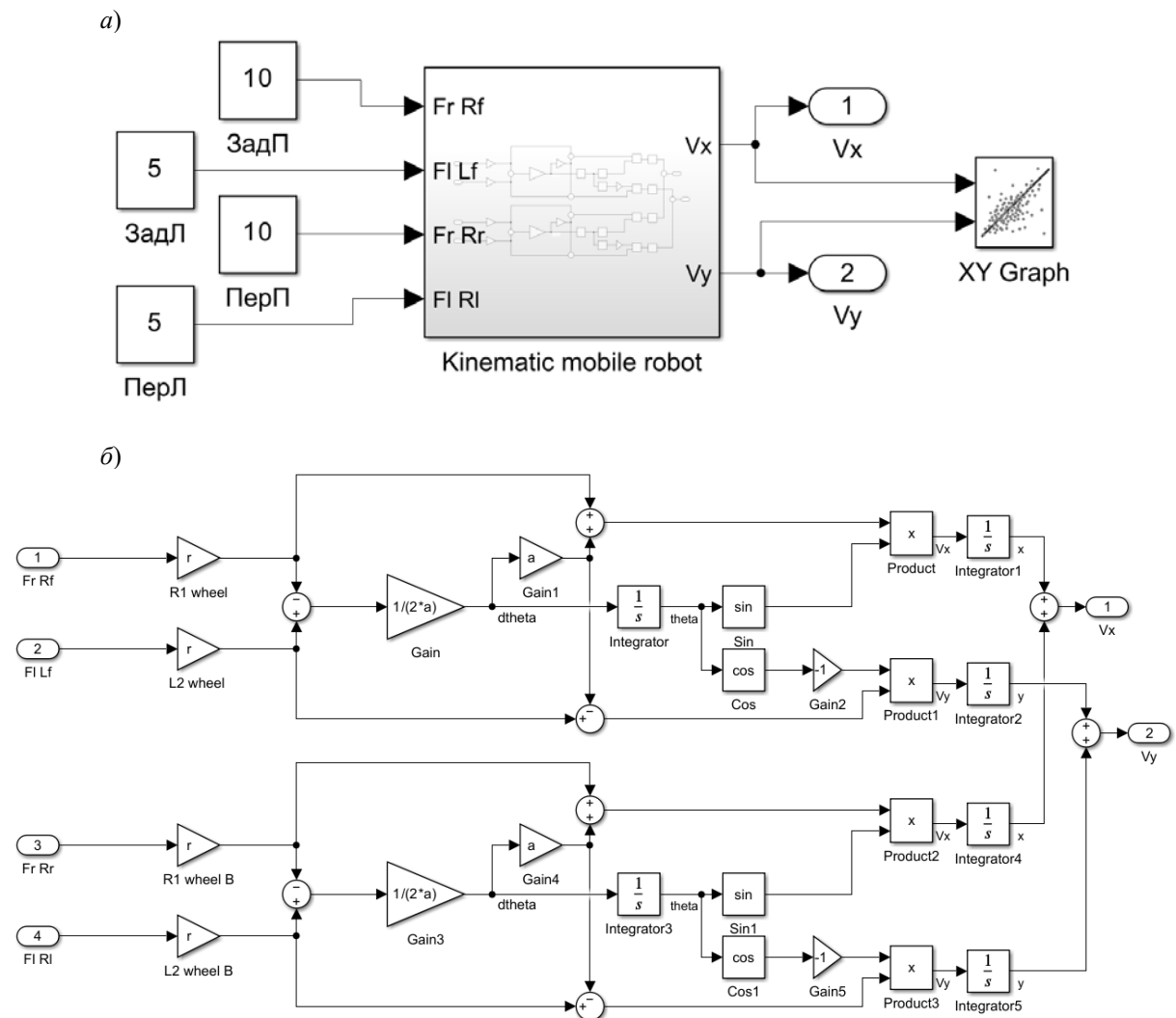


Рис. 8. Модель движения робота в пакете Matlab Simulink: *a* – полная модель; *б* – подсистема kinematic mobile system

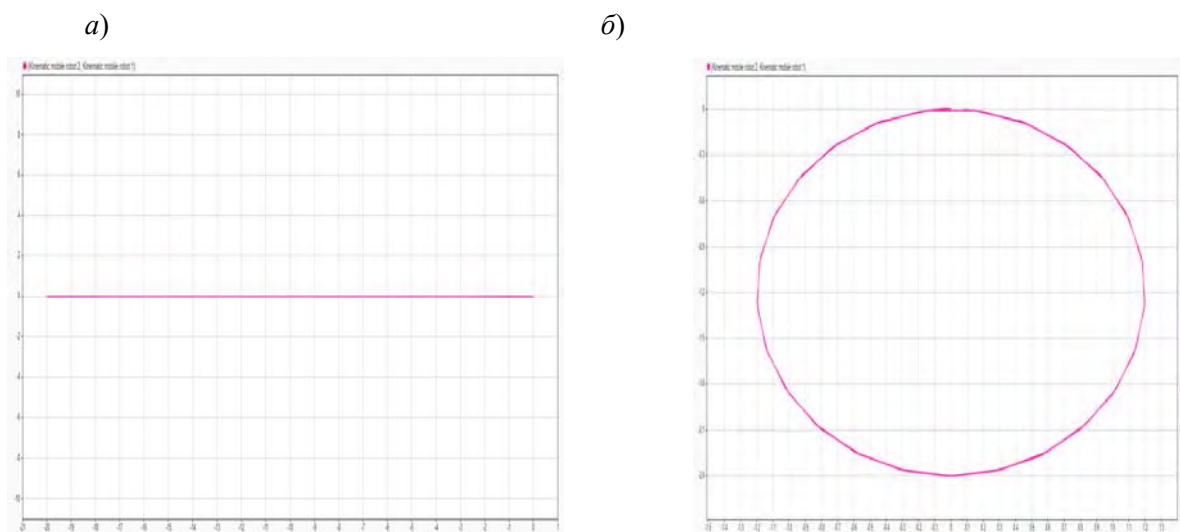


Рис. 9. Примеры движения модели в пакете Matlab Simulink: *a* – пример движения роботизированной системы по горизонтали; *б* – движение вокруг своей оси

Стоит отметить возможность применения иных программных продуктов для имитационного моделирования и автоматизации расчетов кинематики движения рассматриваемой роботизированной системы. Например, можно провести проверку функционирования системы в среде динамического и функционального моделирования технических систем Simintech [6], выполненную российскими разработчиками.

Выводы

В работе представлена роботизированная система для контроля качества металла, которая может продемонстрировать высокую эффективность и точность в обнаружении дефектов. Приведенная система позволяет ускорить и облегчить процесс выявления дефектов и других факторов, негативно сказывающихся на работе или сроке эксплуатации конструкций. Дальнейшие исследования будут направлены на расширение функциональности системы и интеграцию с другими производственными процессами.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Информационно-измерительная техника и технологии: учебник / В. И. Калашников, С. В. Нефедов, А. Б. Путилин [и др.]; под ред. Г. Г. Раннева. – М. : Высш. шк., 2002. – 454 с.
2. **Кравченко, В. Ф.** Цифровая обработка сигналов и изображений в радиофизических приложениях / В. Ф. Кравченко. – М. : Физматлит, 2007. – 544 с.
3. Arduino Programming for Visual Studio and Atmel Studio/ Arduino for Visual Studio. – URL: <http://www.visualmicro.com/>.
4. **Васильев, Е. А.** Микроконтроллеры. Разработка встраиваемых приложений / Е. А. Васильев. – СПб. : БХВ-Петербург, 2008. – 304 с.
5. **Макаров, Е.** Инженерные расчеты в Mathcad 15. Учебный курс / Е. Макаров. – М.: Питер, 2011. – 400 с.
6. **Хабаров, С. П.** Основы моделирования технических систем. Среда Simintech: учеб. пособие / С. П. Хабаров, М. Л. Шилкина. – 2-е изд., стер. – СПб. : Лань, 2024. – 120 с.: ил.

Статья сдана в редакцию 11 октября 2024 года

Контакты:

tatyana.larkina.2015@yandex.ru (Ларькина Татьяна Сергеевна);
padua.nono.00@gmail.com (Кзаков Павел Васильевич);
danila.studnev@gmail.com (Студнев Даниил Юрьевич).

T. S. LARKINA, P. V. KAZAKOV, D. YU. STUDNEV

ON THE ISSUE OF DEVELOPING ROBOTIC SYSTEMS TO OPTIMIZE AND ACCELERATE INSPECTION OF COMPLEX METAL STRUCTURES

Abstract

The article discusses a method for creating a robotic system based on its electrical and mechanical parts. This system will be of use in metallurgy, shipbuilding, oil and gas industry and other fields where it is necessary to verify quality and standardization of metal structures and welded seams of products. Matlab Simulink, KOMPAS 3D, Arduino IDE were used to implement this task.

Keywords:

robotic system, robot, modeling, Matlab Simulink, Arduino, KOMPAS 3D, Simintech, optimization.

For citation:

Larkina, T. S. On the issue of developing robotic systems to optimize and accelerate inspection of complex metal structures / T. S. Larkina, P. V. Kazakov, D. Yu. Studnev // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2025. – № 1 (86). – P. 52–61.