

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



НГУЕН ВАН ЛИНЬ

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ
АВТОМАТИЧЕСКОЙ СБОРКИ НЕЖЕСТКИХ ДЕТАЛЕЙ НА ОСНОВЕ
ПОЗИЦИОННО-СИЛОВОГО УПРАВЛЕНИЯ**

Специальность: **2.5.6 – Технология машиностроения**

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Вартанов Михаил Владимирович

Москва 2024

СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК ОСНОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	5
ВВЕДЕНИЕ	6
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ МЕТОДОВ СБОРКИ НЕЖЕСТКИХ ДЕТАЛЕЙ И СТРАТЕГИЙ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ СБОРКИ	12
1.1 Классификация нежестких деталей в машиностроении	12
1.2 Технологические возможности сборки нежестких деталей.....	17
1.3 Анализ эффективности стратегий и алгоритмов управления	26
1.4 Технические средства дооснащения промышленных роботов.....	31
1.5 Формирование стратегии управления процессом сборки	35
1.6 Выводы по главе 1.....	39
ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СБОРКИ НЕЖЕСТКИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ	41
2.1 Исходные данные и основные допущения	41
2.2 Расчет деформаций вала при различных схемах нагружения.....	47
2.3 Анализ сил при контакте по фаскам	58
2.4 Анализ сил при одноточечном контакте	61
2.5 Анализ сил при двухточечном контакте.....	64
2.6 Определение условий заклинивания, соотношение сил и моментов	70
2.7 Выводы и результаты по главе 2	74
ГЛАВА 3. АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СБОРКИ НЕЖЕСТКИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ	76
3.1 Распознавание состояний контакта на основе машины опорных векторов	76
3.2 Развертывание модели классификации состояний контактов с помощью машины опорных векторов	79
3.3 Алгоритм управления процессом сопряжения	84
3.4 Выводы и результаты по главе 3	88
ГЛАВА 4. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ	90

4.1	Описание экспериментальной установки.....	90
4.2	Определение задачи процесса сборки и методика проведения эксперимента.....	96
4.3	Результаты экспериментальных исследований	98
4.4	Идентификация положения, анализ сил и моментов при активной роботизированной сборке нежесткого вала	109
4.5	Оценка теоретических и экспериментальных результатов, полученных с помощью модели машины опорных векторов	114
4.6	Анализ сил и моментов в процессе сопряжения с использованием алгоритма	118
4.7	Выводы и результаты по главе 4	120
ГЛАВА 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА РОБОТИЗИРОВАННОЙ СБОРКИ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ.....		122
5.1	Определение варьируемых параметров, выбор вида модели.....	122
5.2	Обработка результатов эксперимента и определение функции.....	124
5.3	Исследование влияния входных параметров на сборочную силу и момент	131
5.4	Апробация алгоритма на промышленном изделии	136
5.5	Выводы и результаты по главе 5	138
ЗАКЛЮЧЕНИЕ		139
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ		141
ПРИЛОЖЕНИЕ А: Описание экспериментальных образцов.....		154
ПРИЛОЖЕНИЕ Б: Программа алгоритма силово-позиционного управления в среде RobotStudio при сборке нежестких цилиндрических деталей		160
ПРИЛОЖЕНИЕ В: Фрагменты кода в среде MatLab для расчета коэффициента трения		167
ПРИЛОЖЕНИЕ Г: Фрагменты кода в среде MatLab для анализа условий заклинивания		170

ПРИЛОЖЕНИЕ Д: Фрагменты кода в среде MatLab для идентификации контактного состояния в сборочных операциях типа «нежесткий вал-жесткая втулка».....	174
ПРИЛОЖЕНИЕ Е: Фрагменты кода в среде MatLab для расчета значений деформаций и идентификации положения нежесткого вала и жесткой втулки ..	177
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж: Протоколы экспериментов	183
ПРИЛОЖЕНИЕ З: Свидетельство о государственной регистрации программы	186
ПРИЛОЖЕНИЕ И: Акт внедрения.....	187

СПИСОК ОСНОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АС – автоматическая сборка;

АУ – алгоритма управления;

СS – контактное состояние;

ПЭ – планирование эксперимента;

ПСУ – позиционно-силовое управление;

ПР – промышленный робот;

РС – роботизированная сборка;

СМД – силомоментный датчик;

ТН – технологическая надежность;

ЭВМ – электронная вычислительная машина;

GMM – (Gaussian mixture model) Гауссова смесь распределения;

SVM – (support vector machine) машина опорных векторов;

TCP – (Tool Center Point) центральная точка инструмента.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы Сборка считается важным этапом жизненного цикла изделия. Процесс является трудоемким из-за специфики окружающей среды и жестких требований к качеству. В настоящее время сборка соединений типа «вал - втулка» является типовой задачей в процессах сборки, на долю которой приходится примерно 40% от общего объема работ при сборке. Исследования обычно проводились на деталях, которые считались абсолютно жесткими. Однако в последние годы в различных механизмах машин используется все больше гибких и нежестких деталей. В связи с этим для повышения точности расчетов при сопряжении подобных деталей необходимо оценивать параметры деформирования конкретных деталей с учетом их материалов.

В контексте автоматизации сборочных операций, промышленный робот уверенно занимает лидирующие позиции среди перспективных технических средств автоматизации. Его универсальность, высокая точность и способность выполнять разнообразные манипуляции делают его незаменимым в современном производстве. Роботизированные системы легко адаптируются к изменениям в производственном процессе и обеспечивают стабильное качество сборки изделий.

Роботизированная сборка (РС) часто сопровождается осевыми и угловыми ошибками положения деталей, вызванными различными факторами: неточность движений робота; деформации деталей и невысокая повторяемость робота. Для коррекции этих ошибок применяется адаптация движения, осуществляемая активно, пассивно или активно-пассивными средствами. Активная адаптация включает адаптивное управление с обратной связью на основе измерений положений и контактных усилий для автоматической регулировки процесса сборки и положения деталей. В этом случае используют датчик одного типа или комбинацию нескольких датчиков для определения положения деталей и контроля процесса сопряжения. Метод активной адаптации измеряет силу/момент в контакте и передает ее в контроллер для формирования необходимой траектории выходного звена робота. Метод активной адаптации помогает преодолеть недостатки

пассивных адаптивных устройств.

Возникновение заклинивания может быть обусловлено значительными силами трения скольжения, возникающими в местах контакта деталей при небольших зазорах. При разработке технологии сборки необходимо определить условия заклинивания нежестких деталей. Применение алгоритма управления (АУ) промышленным роботом на основе силомоментного очувствления является неотъемлемым элементом расширения технологических возможностей процесса сопряжения. Комбинированное позиционно-силовое управление (ПСУ) предотвращает заклинивание при возможных погрешностях положения деталей. Такой подход также помогает определять деформации и корректировать положение деталей, повышая технологическую надежность (ТН) процесса.

Степень разработанности темы. На данный момент автоматическая сборка (АС) исследована с различных точек зрения. Российские и зарубежные ученые внесли значительный вклад в развитие науки о автоматической и роботизированной сборке: Андреев А.Г., Балакшин Б.С., Безъязычный В.Ф., Божкова Л.В., Березин С.Я., Вартанов М.В., Герасимов А.Г., Гусев А.А., Гориневский Д.М., Житников Ю.З., Зенкевич С.Л., Замятин В.К., Кристаль М.Г., Кузнецова С.В., Лебедевский М.С., Прейс В.В., Павлов В.В., Симаков А.Л., Федотов А.И., Черняховская Л.Б., Шуваев В.Г., Штриков Б.Л., Abegg F., Baykal I.C., Bdiwi. M, Chang W., Cho H.S., Debus T.J., Dietrich F., Fukukawa T., Gamez J.G., Jasim I.F., Jakovljevic Z., Jiang J., Kim J.Y., Kraus W., Li B., Monguzzi A., Matsuno F., Nakagaki H., Park J., Sasaki K., Simunovic S., Skubic M., Son C., Whitney D.E., Xia Y., Yang Z., Yoshida M., Zhang K. и др.

К настоящему времени позиционно-силовое управление продемонстрировало большой потенциал в управлении промышленными роботами. Очевидным преимуществом является то, что сила и положение учитываются одновременно. Потенциал позиционно-силового управления был подтверждён теоретически, однако его практическое применение всё ещё сталкивается с определёнными трудностями. В работах Jasim I.F [64; 65] представлена модель распределения контактных состояний с использованием меры

подобия Гауссовых смесей для моделирования процессов роботизированной сборки гибких резиновых деталей с активным управлением. Zhang K. и др. [109] проведен анализ состояний контакта, анализ заклинивания и разработаны стратегии управления усилием для сборки нежестких вала со втулкой. Однако эти работы не учитывают деформацию деталей и основываются на предварительном обучении. В работе Bdiwi. M [44] предложен алгоритм управления усилием на основе положения и усовершенствования алгоритма поиска отверстия втулки с помощью генерируемого спирального движения для реализации процесса автоматической зарядки электромобилей. В данном исследовании также рассматриваются абсолютно жесткие детали.

Целью работы является обеспечение технологической надежности автоматической сборки нежестких деталей на основе исключения заклинивания в процессе сборки. Основной предмет исследований - разработка эффективного АУ роботом при сборке нежестких цилиндрических деталей с активным управлением.

В диссертационной работе решены следующие задачи:

1. Разработка математической модели деформации нежестких цилиндрических деталей на этапах сопряжения.
2. Создание математической модели идентификации положения нежесткой цилиндрической детали с использованием силомоментного датчика (СМД).
3. Построение математической модели идентификации контактного состояния (CS) при автоматической сборке нежестких цилиндрических деталей на основе машины опорных векторов (SVM).
4. Создание АУ промышленным роботом (ПР) при автоматической сборке на основе силомоментного оучувствления.
5. Разработка методики и проведение физического эксперимента.
6. Планирование эксперимента (ПЭ), обработка и анализ результатов экспериментов.
7. Апробация алгоритма на промышленном изделии.

Объектом исследования являются соединения нежестких цилиндрических валов с жесткими втулками в машиностроении.

Предметом исследования является разработка операции автоматической сборки нежестких цилиндрических деталей.

Научная новизна заключается в:

1. Математических моделях процесса сборки нежестких цилиндрических деталей на основе расчета деформаций вала и идентификации выходных сигналов с использованием СМД.
2. Идентификаторе положения нежесткого цилиндрического вала в процессе сопряжения.
3. Математической модели машины опорных векторов для определения текущего контактного состояния в процессе сборки.
4. Алгоритме корректировки траектории нежесткого вала с использованием позиционно-силового управления.
5. Экспериментальных взаимосвязях параметров процесса, сборочной силы и момента.

Теоретическая значимость. Исследование включает построение математической модели процесса сборки нежестких цилиндрических деталей, определение их деформаций и состояния контакта для разработки АУ с целью обеспечения технологической надежности операции.

Практическая значимость заключается в:

- создании экспериментальной установки для сборки нежестких деталей;
- разработке рекомендаций по назначению технологических режимов сборки нежестких валов;
- создании программного обеспечения для автоматической сборки нежестких валов на основе позиционно-силового управления.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Математические модели деформации нежестких цилиндрических валов на основе идентификации выходных сигналов с использованием СМД.
2. Математические модели этапов процесса сборки для идентификации положения нежестких цилиндрических валов.

3. Идентификатор CS нежестких цилиндрических валов на различных этапах процесса сопряжения с использованием SVM.

4. Алгоритм ПСУ сборочным роботом при выполнении операции сборки цилиндрических нежестких валов.

5. Экспериментальные взаимосвязи сборочных сил и моментов, положения деталей и параметров соединений.

Методы исследования. Диссертационное исследование выполнено на основе методов теоретической механики, теории сопротивления материалов, научных основ технологии машиностроения, линейной алгебры и аналитической геометрии, вычислительной математики, теории планирования эксперимента, а также программных средств MatLab и RobotStudio.

Степень достоверности и апробация результатов работы. Достоверность научных выводов обеспечивается применением методов теоретической механики, сопротивления материалов, технологии машиностроения, теории автоматической сборки и использованием современного оборудования при проведении эксперимента.

Основные положения диссертационной работы обсуждались на международных научно-технических конференциях и семинаре: Международный научный симпозиум «Фундаментальные основы физики, химии и механики наукоёмких технологических систем формообразования и сборки изделий» (тема доклада: Модель поведения нежесткой детали при роботизированной сборке) Сентябрь 2022 г.; Национальная научно-техническая конференция «Автоматизация: проблемы, идеи, решения (АПИР-27)» (тема доклада: Анализ методов идентификации положения нежесткого вала во втулке при роботизированной сборке) Ноябрь 2022 г.; II международная научно-практическая конференция «Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов» (тема доклада: Эффективность стратегий поиска при роботизированной сборке) Апрель 2022 г.; Международная научно-техническая конференция «Пром-Инжиниринг» (тема доклада: Determination of the friction coefficient using a force torque sensor during the robotic assembly of a non-rigid shaft with a rigid sleeve) Май 2023 г.;

Международная научно-техническая конференция «СМИС-2023. Технологии управления качеством» (тема доклада: Определение значений деформации нежестких валов при одноточечном контакте в условиях роботизированной сборки с использованием силомоментного датчика) Май 2023 г.; VIII международный научно-технический семинар «Современные технологии сборки» (тема доклада: Математическая модель значений деформации нежесткого вала при роботизированной сборке на основе активной адаптации) Октябрь 2023 г.; Международная научно-практическая конференция «Индустрия 4.0» (темы докладов: Evaluating the Use of Support Vector Machine Models for Contact State Identification of Non-Rigid Cylindrical Parts during Robotic Assembly; Analysis of Deformability of Non-Rigid Cylindrical Parts during Robotic Assembly Using a Force Torque Sensor) Март 2024 г.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Работа соответствует паспорту научной специальности 2.5.6 – «Технология машиностроения» в пунктах 3 «Математическое моделирование технологических процессов и методов изготовления деталей и сборки изделий машиностроения»; 8 «Проблемы управления технологическими процессами в машиностроении».

Публикации. По теме диссертации опубликовано 20 статей в журналах, 9 из которых рекомендованы перечнем ВАК, 7 статей в журналах, индексируемых в базах данных Scopus, 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура диссертации. Диссертация содержит введение, пять глав, заключение и список литературы. Объем диссертации – 188 страниц машинописного текста с 64 рисунками, 34 таблицами и 35 страниц приложений. Список цитируемой литературы включает 110 наименований.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ МЕТОДОВ СБОРКИ НЕЖЕСТКИХ ДЕТАЛЕЙ И СТРАТЕГИЙ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ СБОРКИ

1.1 Классификация нежестких деталей в машиностроении

В настоящее время промышленные роботы широко используются в машиностроении, в том числе в сборочном производстве. Ожидается, что дальнейшее совершенствование методов сборки повысит надежность выполнения сборочных операций, сократит трудозатраты и, в конечном счете, обеспечит возможность автоматизации выполнения высокоточных соединений. В рамках данной концепции инновационных приложений для роботов многие промышленные задачи связаны с манипулированием деформируемыми деталями. Выполненные ранее исследования обычно относились к сборке деталей, которые считались абсолютно жесткими. Теоретические основы сборки подобных деталей в настоящее время разработаны достаточно хорошо. Однако в последние годы в различных машинах используется все больше нежестких деталей из неметаллических материалов. Необходимость учета деформаций детали, вследствие ее малой жесткости, существенно усложняет решение задачи АС. В этой связи изучение возможности АС подобных деталей весьма актуально.

Нежесткие детали могут быть классифицированы по различным признакам: материал, геометрия, размеры и др. Классификация нежестких деталей может помочь определить необходимые параметры для выбора эффективного схвата и определения необходимых технологий и систем контроля для работы с подобными деталями. В работе Saadat M. [86] нежесткие материалы подразделяются на три категории линейных, листовых и трехмерных объектов на основе их геометрической формы. В работах [16; 21; 29; 32] нежесткость деталей оценивают количественным соотношением размеров. Так, например, к подобным деталям относят: круглые пластины $H \ll (0,2 \div 0,3)D$; гладкие и ступенчатые валы $L \geq 10D$; детали типа полых цилиндров $t \leq 0,05D$ (t – толщина стенки, H – высота детали, D – наружный диаметр).

С технологической точки зрения, общим критерием для классификации

валов как нежестких является соотношение длины заготовки и ее диаметра. В случае, если данное соотношение превышает $10 \div 12$, то валы считаются нежесткими [16; 21; 22; 29; 32; 86]. Согласно результатам, приведенным в работе [27], до 12% выпускаемой продукции может быть отнесено к типу нежестких валов.

Методической основой для классификации нежестких деталей высокой точности может быть принята количественная взаимосвязь жесткости и массы. С этой целью размеры деталей типа тел вращения (рисунок 1.1) характеризуют безразмерными коэффициентами: $\beta \geq H/D$ и $\alpha \geq d/D$ (где H , D , d – высота, наружный и внутренний диаметры цилиндрических деталей). Тогда высота $H = \beta D$, внутренний диаметр $d = \alpha D$. При анализе жесткости конструкции можно показать, что при $\beta \leq 2$ и $\alpha \rightarrow 0$ диск будет массивной деталью, а при $\beta \leq 0,2$ и $\alpha \leq 0,9$ нежесткой. Если $\beta = 1 \div 1,5$, то стержень массивен, а при $\beta > 15$ его относят к нежестким деталям. Нежесткая труба характеризуется коэффициентом $\alpha \leq 0,9$ [21].

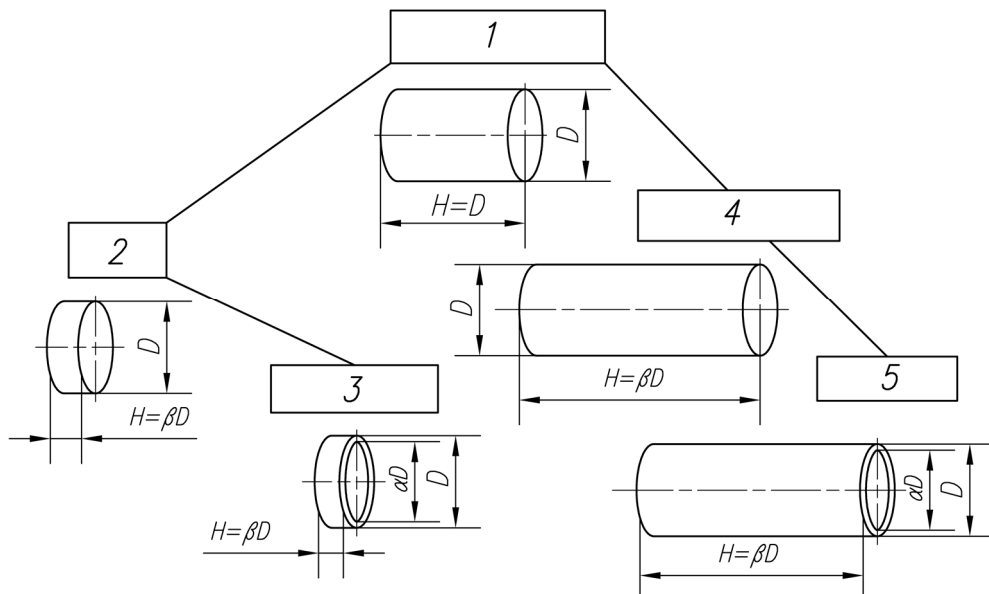


Рисунок 1.1 – Детали типа тел вращения: 1 – цилиндр; 2 – диск; 3 – кольцо; 4 – стержень; 5 – труба

Пластмассы или полимеры, представляют собой неметаллические материалы, производимые на основе органических полимерных связей. Они образуют отдельный класс конструкционных материалов в области машиностроения, характеризующийся специфическими физико-механическими и технологическими свойствами (рисунок 1.2) [14]. Пластмассы представляют собой

относительно новые материалы, чье применение в машиностроении непрерывно расширяется. Современные достижения в области высокомолекулярных соединений позволяют получать материалы, обладающие различными ценными характеристиками, такими как низкая плотность, высокая прочность, тепло- и электроизоляция, стойкость к агрессивным средам, фрикционные или антифрикционные свойства [24].

Детали можно классифицировать по модулю упругости. В работе [30] показано, как проводится классификация пластических материалов по модулю упругости. Существуют так называемые жесткие пластики с модулем упругости $E > 10^4$ кгс/см²; полужесткие $E \geq 4 \cdot 10^3$ кгс/см²; мягкие $E \geq 2 \cdot 10^2$ кгс/см² и эластичные $E < 2 \cdot 10^2$ кгс/см².

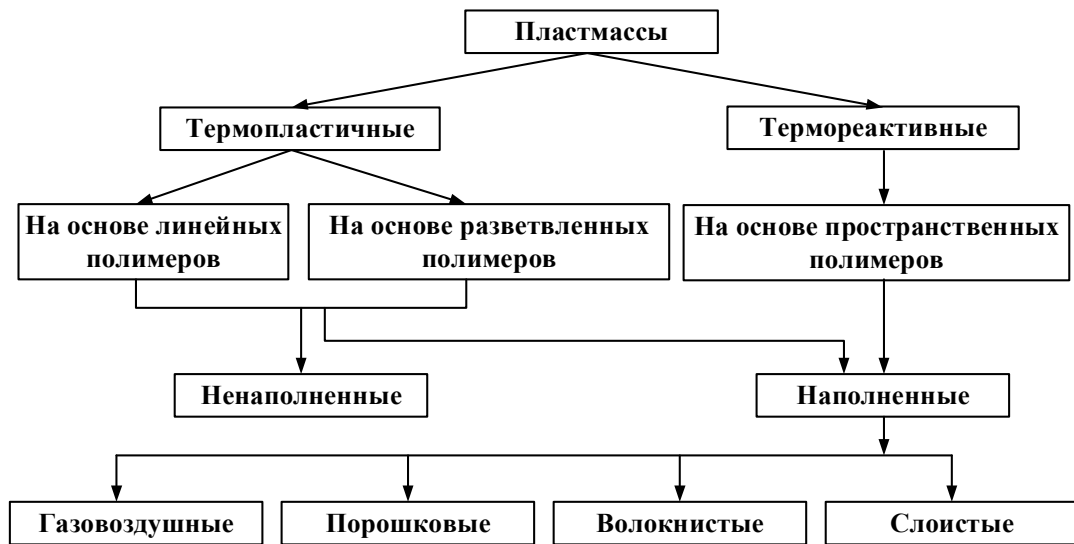


Рисунок 1.2 – Классификация деталей из пластмасс

Экономическая эффективность внедрения пластмасс в машиностроении обуславливается значительным снижением массы механизмов, улучшением их эксплуатационных характеристик, а также экономией ресурсов, в частности цветных металлов и сталей. Замена металлических материалов пластмассами способствует сокращению трудоемкости и снижению стоимости производства машиностроительной продукции. Замена черных металлов полимерами приводит к снижению трудоемкости изготовления деталей в среднем в 5÷6 раз, а себестоимости – в 2÷6 раз. В случае замены цветных металлов полимерами себестоимость уменьшается в 4÷10 раз [24]. Таблица 1.1 содержит сравнительные характеристики основных полимеров.

Термопластичные пластмассы, включающие полиэтилен, полипропилен, полистирол, поливинилхлорид, фторопласты, полиамиды и прочие полимеры широко применяются в различных областях [37]. Пластмассы являются распространенным материалом в машиностроении ввиду их низкой плотности, высокой прочности и удобства обработки. В работе [37] рассмотрены основные виды пластмасс, применяемых в машиностроении.

Таблица 1.1 – Физико-механические свойства полимеров

Полимер	Плотность, г/см ³	T _c , [°C]	Полное удлинение ε, %	σ _в , МПа	E, (20°C) ГПа
Полиэтилен (высокой плотности)	0,96	30	15-100	20-37	0,55-1,0
Полиэтилен (низкой плотности)	0,92	0	90-800	7-17	0,15-0,24
Поливинилхлорид	1,39	80	2-30	40-60	2,4-3,0
Полистирол	1,06	100	1-2	35-68	3,0-3,3
Полипропилен	0,90	-20	10-700	50-70	1,2-1,7
Полиэстер	-	70	0	45-85	1,3-4,5
Полиамид	1,14	70	60	60-110	2,0-3,5
Фенол-формальдегидная смола	1,40	-	0	35-55	8
Эпоксидная смола	1,60	80	0	40-85	2,1-5,5

Полиамиды – это синтетический полимер, изготовленный из пластмасс на нефтяной основе, которые удерживаются вместе амидными связями. Молекулы, входящие в состав полиамида, чрезвычайно длинные и тяжелые, что обеспечивает прочность и эластичность. Полиамид обладает высокой устойчивостью к истиранию и износу. Это качество делает его исключительно прочным в местах с высокой степенью контакта. В автомобильной промышленности полиамид часто используется для изготовления воздухозаборных труб, крышек двигателя, клапанов и контейнеров для подушек безопасности, а также внешних деталей, таких как ручки, решетка радиатора, крышки и топливные баки.

Полиэтилен – легкая универсальная синтетическая смола, получаемая в результате полимеризации этилена. Полиэтилен относится к важной группе

полиолефиновых смол. Это наиболее широко используемый пластик в мире. Основными привлекательными характеристиками полиэтилена являются его низкая цена, отличная электрическая изоляция в широком диапазоне частот, очень хорошая химическая стойкость, хорошая обрабатываемость, ударная вязкость, гибкость. Применение полиэтилена включает производство уплотнительных прокладок, крышек подшипников, гаек, деталей вентиляторов и насосов, шайб.

Полипропилен – это разновидность полиолефина, который немного тверже полиэтилена. Макромолекула полипропилена выражается следующей химической формулой: $[-\text{CH}(\text{CH}_3)-\text{CH}_2-]$. Это товарный пластик с низкой плотностью и высокой термостойкостью. Применение полипропилена охватывает изготовление корпусов автомобилей и аккумуляторов, прокладок, труб, фланцев.

Полистирол – это тип полимера, который является прозрачным, жестким, хрупким и умеренно прочным в своем неизменном состоянии. Макромолекула полистирола представляет собой последовательность $[-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{C}_6\text{H}_5)-]_n$. Полистирол используется в различных областях применения: от бытовой техники до медицинских изделий и автомобильных деталей. Бытовая техника использует пенополистирол в качестве изоляции, в то время как его жесткая форма используется для корпусов.

Фторопласты характеризуется отличной химической стойкостью, отличной термостойкостью, хорошими электрическими свойствами и отличной износостойкостью. Фторопласт-4, известен также как политетрафторэтилен или тефлон, получил наибольшее распространение. Молекула тефлона имеет структурную формулу $[\text{CF}_2-\text{CF}_2-]_n$. Фторопласты широко применяются в электро- и радиотехнической промышленности для изготовления различных химически стойких изделий и конструкций, таких как насосы, трубы, мембраны, подшипники и детали медицинской техники.

Полиуретаны представляют собой наиболее ценные и широко применяемые в промышленности термопластичные полимеры. Структура полиуретанов включает уретановую группу $[-\text{NH}-\text{COO}-]_n$. Полиуретан – прочный и устойчивый материал, хорош для изоляции, фильтров и парашютов.

Акрилонитрилбутадиенстирол (АБС) представляет собой легкий и ударопрочный полимер, применяемый для изготовления деталей, обладающих высокой прочностью и привлекательным внешним видом. Материал широко применяется при изготовлении внешних панелей автомобилей и бытовых приборов.

1.2 Технологические возможности сборки нежестких деталей

Средства автоматизации сборочных операций играют ключевую роль в производственных процессах, обеспечивая высокую точность, скорость и надежность сборки изделий. В зависимости от сложности задач и типов изделий, используются различные средства автоматизации. Основные средства автоматизации сборочных операций: роботизированные сборочные системы, автоматизированные сборочные линии, автоматизированные монтажные станции, системы автоматической инспекции и контроля качества. Роботизированные сборочные системы играют ключевую роль в области автоматической сборки, обеспечивая высокую эффективность, точность и гибкость производственных процессов. Их внедрение позволяет обеспечить стабильность качества продукции, снизить производственные затраты и повысить безопасность на производстве.

Разработка системы автоматической загрузки и сборки нежестких деталей требует решения следующих вопросов [58]:

- применения датчиков и системы обработки информации;
- создания эффективных схватов роботов;
- применения технологий искусственного интеллекта.

Датчики и системы обработки информации. Датчики и обработка данных играют критическую роль в роботизированной сборке, обеспечивая точность, эффективность и гибкость процессов. Различные подходы, которые могут быть применены при роботизированном манипулировании нежесткими деталями, должны обрабатывать информацию из окружающей среды, от робота, собираемого объекта или взаимодействия элементов системы. Манипуляции с нежесткими объектами могут быть классифицированы в зависимости от используемых

технологий, а именно зрительных, силомоментного оцувствления или их комбинаций.



Рисунок 1.3 – Сборка гибких резиновых объектов с помощью роботов

В работе Jasim I.F [64] предлагается основанная на мере подобия распределения модель Гауссовых смесей (GMM) для моделирования CS в процессах РС гибких резиновых деталей с активным управлением (рисунок 1.3). Сигналы силы и момента от манипулируемого объекта фиксируются для различных состояний процесса сборки. Схема моделирования состояния контакта модели GMM, основанная на измерении подобия распределения, используется для моделирования полученных сигналов силы и момента для различных CS.

Zhang K. и др. [109] проводит анализ CS, анализ заклинивания и стратегии управления усилием для установки гибкого вала в отверстие втулки (рисунок 1.4). Выявлены контактные состояния при больших и малых величинах деформации. Во-вторых, выводится взаимосвязь между силами и моментами и анализируются состояния заклинивания для различных стадий процесса сопряжения. В-третьих, представлены стратегии контроля. Наконец, результаты экспериментов подтвердили эффективность анализа состояния контакта, анализа помех и стратегий управления усилием.

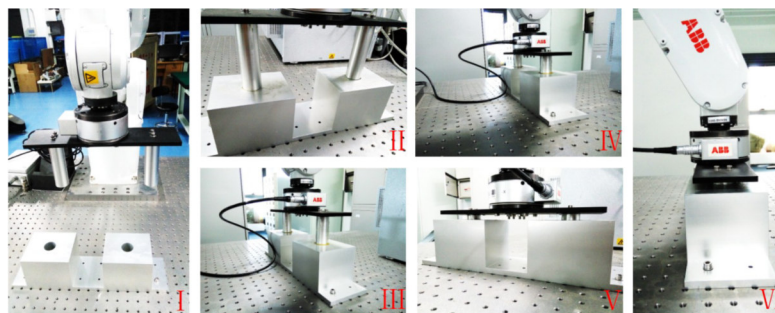


Рисунок 1.4 – Процесс сборки связного соединения

Типовая операция сборки нежесткого объекта с использованием СМД исследована в работах [60; 70; 75; 108; 110]. Рассматривалась схема нежесткого

вала при соединении с жесткой втулкой. Проанализировано поле деформаций; геометрические, кинематические и динамические ограничения с учетом деформаций вала. Из-за нелинейности гибкой детали системе сложно анализировать геометрические и силовые характеристики, что может привести к невозможности получения аналитического решения. Для упрощения анализа длинный эластичный вал рассматривался как консольная балка. Основываясь на гипотезе о материале, механизме и геометрических характеристиках деформации вала анализируется и проверяется стратегия установки вала в отверстие (рисунок 1.5). В работе W. Kraus Jr. [70], унифицированный метод планирования и контроля задачи, связанной с нежесткими деталями, применяется к двум тематическим исследованиям: изгиб листового металла и установка вала в отверстие с трением. В качестве объекта исследования принята нежесткая балка, сопрягаемая с жесткой втулкой [110]. Во-первых, изучалось поведение деформируемой балки при отклонении. Затем рассматривались геометрические и силовые условия для успешной сборки нежестких деталей. Nakagaki H. [80] обсуждается задача установки гибкого вала в отверстие, когда сила трения достаточно велика, чтобы изогнуть вал. Авторы анализируют форму изгиба балки, внешние силы и моменты, действующие на вал при выполнении задачи сборки с условием, что потенциальная энергия стержня сведена к минимуму.

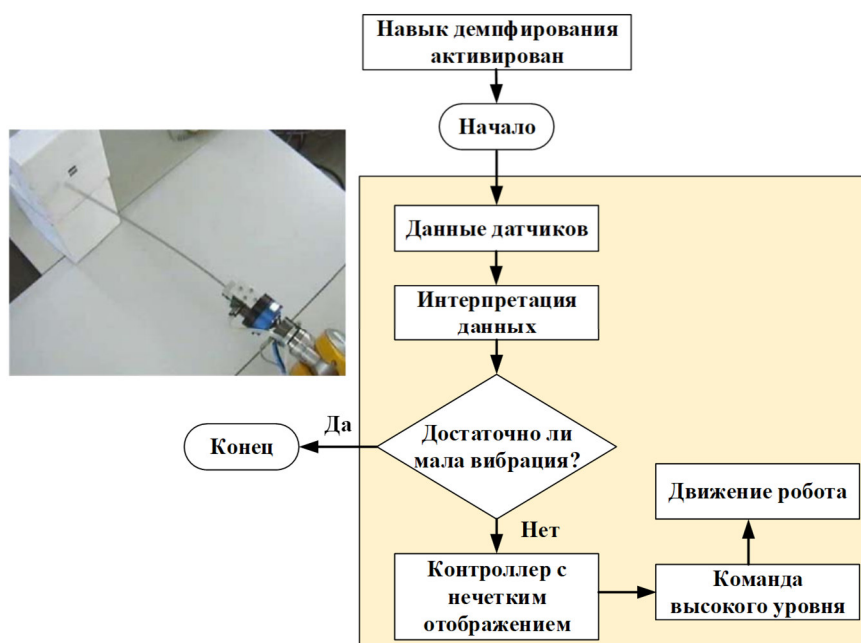


Рисунок 1.5 – Задача установки стержня в отверстие

Установка жесткого вала в эластичную втулку сопровождается переменной деформацией (рисунок 1.6). В работе [88], авторы предлагают метод, при котором создается качественная модель, которая соответствует происходящему процессу. Навыки реализуются правилами движения, используемыми на основе сенсорной информации. Основываясь на качественной оценке, правила движения разрабатываются с учетом переменных состояния модели. Используя накопленный опыт, моделируются навыки установки цилиндра со скольжением его внутри эластичной втулки. В работе Sasaki K. [87] обсуждается установка вала в отверстие гибкой резиновой пластины. Авторы показывают, что величина прилагаемой силы выражает параболическое поле в трехмерном пространстве, которое определяется положением вала и деформацией пластины.

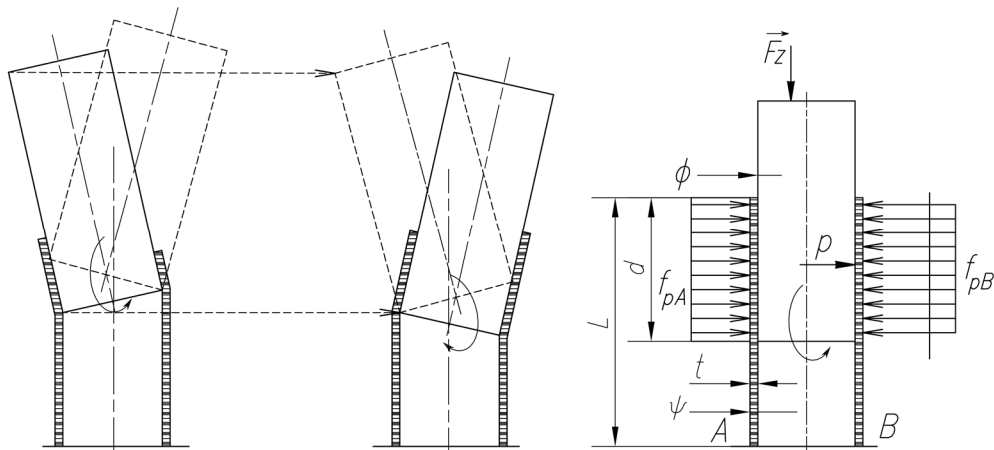


Рисунок 1.6 – Установка вала в эластичную втулку

К настоящему времени известен ряд подходов, реализующих различные задачи визуально управляемой роботизированной системы. Однако существует лишь несколько решений применительно к манипулированию и сборке деформируемых объектов, хотя известно множество промышленных задач. Все известные подходы к визуальному управлению деформируемыми линейными объектами до сих пор представляют собой решение только одной узкой задачи. В работе [47; 79; 81] гибкий вал устанавливается в отверстие. Nakagaki H. и др. [79; 81] дополнительно интегрируют СМД, в то время как Chen C. и Zheng Y.F. [47] используют только визуальный датчик. Визуальный датчик используется для определения величин деформации гибких стержней.

В работе [41; 48] предлагается система визуального зондирования для

измерения деформации деталей в любом направлении и перекосах при сборке нежестких деталей. Предлагаемая система состоит из камеры и ряда зеркал и может преодолевать ситуации, при которых отверстие перекрывается сопряженными деталями (рисунок 1.7). Однако очевидно, что датчики зрения хорошо подходят для наблюдения за характерными изменениями формы деформируемых объектов. Таким образом, информация, предоставляемая датчиками зрения, дополняет информацию других датчиков, например силомоментных. В работе [41] представлен новый системный подход к манипулированию нежесткими линейными объектами на основе машинного зрения и СМД. Подобный подход уменьшает вычислительные потребности за счет использования простой модели объектов, ориентированной на текущее состояние.

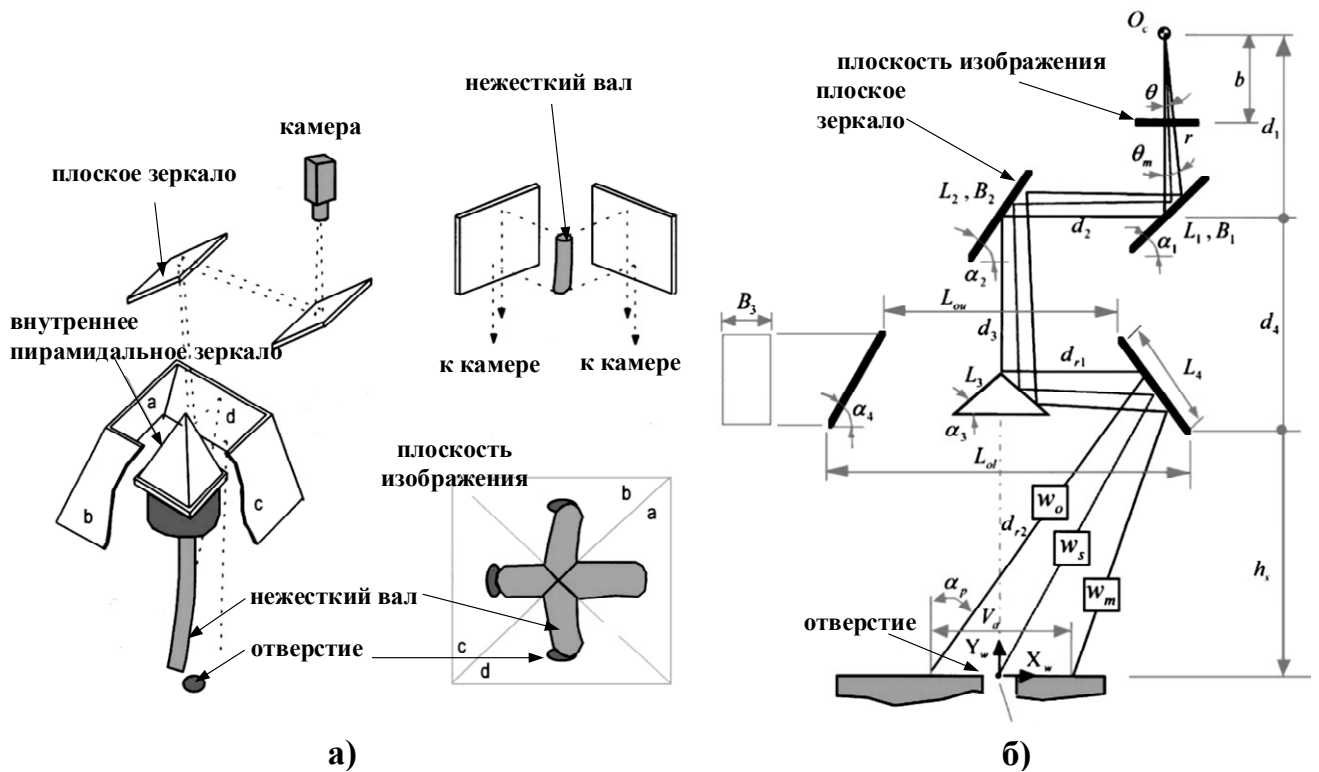


Рисунок 1.7 – Система визуального контроля для измерения деформаций и перекосов нежестких деталей при сборке: а – схема установки датчиков системы; б – конструктивные параметры системы

В работе Miura J. [76] описан новый подход к сборке гибких объектов, управляемых техническим зрением. Операция, рассматриваемая в этой работе, заключается в сборке резинового ремня с неподвижными шкивами. Анализируя возможные состояния ремня на основе эмпирических знаний, можно разработать

метод, позволяющий осуществлять не только планирование действий, но и планирование визуальной проверки.

Роботизированная система для сборки жгутов проводов, основанная на датчиках зрения и СМД, создана для осуществления сопряжения электрических разъемов [51; 97]. В этой системе камеры сначала используются для определения положения захваченного разъема, а затем грубо вычисляется соответствующее смещение, чтобы гарантировать, что соединитель может соприкоснуться с другой противоположной частью. После этого СМД используется для обнаружения и оценки CS, чтобы помочь системе в применении стратегий поиска и сборки (рисунок 1.8).

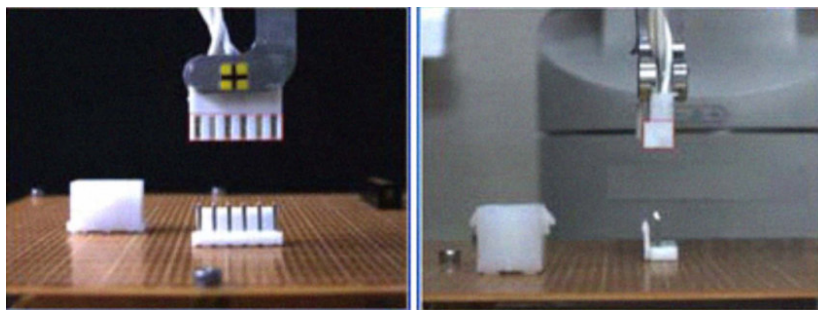


Рисунок 1.8 – Система визуального контроля для измерения деформаций и сборки

Разработка схватов и вспомогательных устройств. Разработка схватов и вспомогательных устройств – это важная часть автоматизации, направленная на создание устройств, которые могут захватывать, перемещать и удерживать объекты. Работа Fukukawa T. и др. [55] рассматривает автоматизацию установки пластикового кольца на вал с зазором в несколько микрометров с помощью робота-манипулятора. Во-первых, потеря кольца в схвате может ослабить деформирующую силу, поскольку кольцо замкнуто в пространстве схвата. Замкнутое кольцо сопрягается и устанавливается плавно без управления роботом. Во-вторых, верхняя часть схвата имеет угол наклона. Эффект заключается в исправлении ошибки позиционирования кольца относительно вала, поскольку угол создает горизонтальное усилие на кольцо. В-третьих, верхняя часть схвата также создает вращательный момент для кольца, чтобы исправить угловые погрешности положения кольца (рисунок 1.9). В работе [98] предлагается метод согласования, основанный на принципе пассивного центрирования для решения проблемы

деформации.

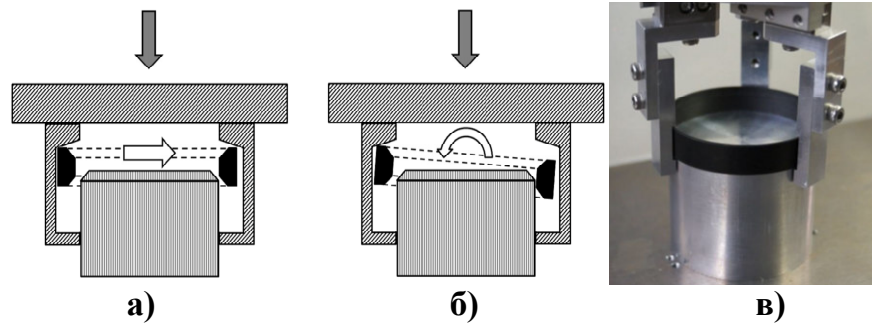


Рисунок 1.9 – Сборка кольца роботом-манипулятором: а – линейная коррекция; б – угловая коррекция; в – сопряжение

В работе [77], представлено решение для установки кольцеобразных эластичных деталей различных размеров во внешние пазы деталей кончиками пальцев базового приспособления. Датчики, специальные схваты и специальные роботы не требуются, поскольку единственные задачи, которые должен выполнять робот – это выбор и ориентация эластичных объектов и манипулирование жесткими деталями. Представленное приспособление просто в изготовлении, реализации и не требует датчиков, так как оно оснащено пневматическим схватом двойного действия с тремя губками, двумя пропорциональными регуляторами для контроля величины давления, подаваемого на схват, а также специальными пальцами (рисунок 1.10).

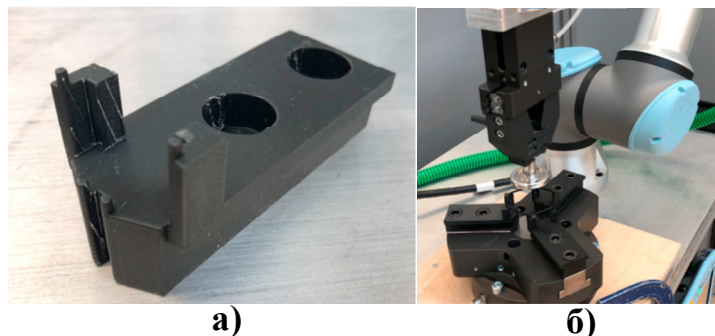


Рисунок 1.10 – Установка уплотнительного кольца в канавку поршня: а – специальный палец для приспособления; б – уплотнительное кольцо

Искусственный интеллект и нейронные сети. Искусственный интеллект и нейронные сети играют все более важную роль в области автоматической сборки, способствуя созданию интеллектуальных и адаптивных систем, которые могут значительно улучшить производственные процессы. Эти технологии позволяют

роботизированным системам и автоматическим линиям становится более гибкими, точными и эффективными, что открывает новые возможности для автоматизации. В работе Kim J.Y. [68] представлена система вывода на основе нейронной сети, которая может вывести сложную взаимосвязь между корректирующим движением и полученной информацией о деформации и смещениях деталей. Смещение и угол наклона детали задаются в качестве входного слоя, а корректирующее движение задается в качестве выходного слоя нейронной сети (рисунок 1.11).

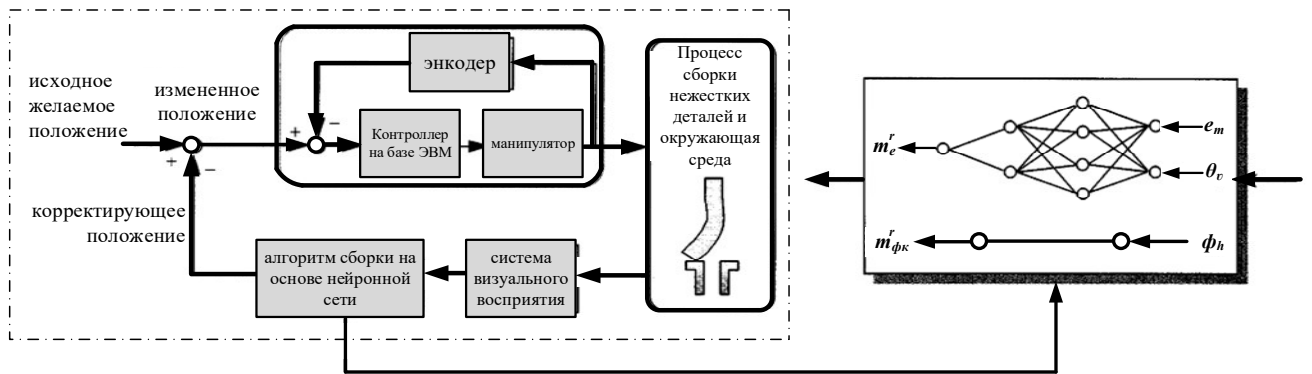


Рисунок 1.11 – Система визуального восприятия сборки на основе нейронной сети

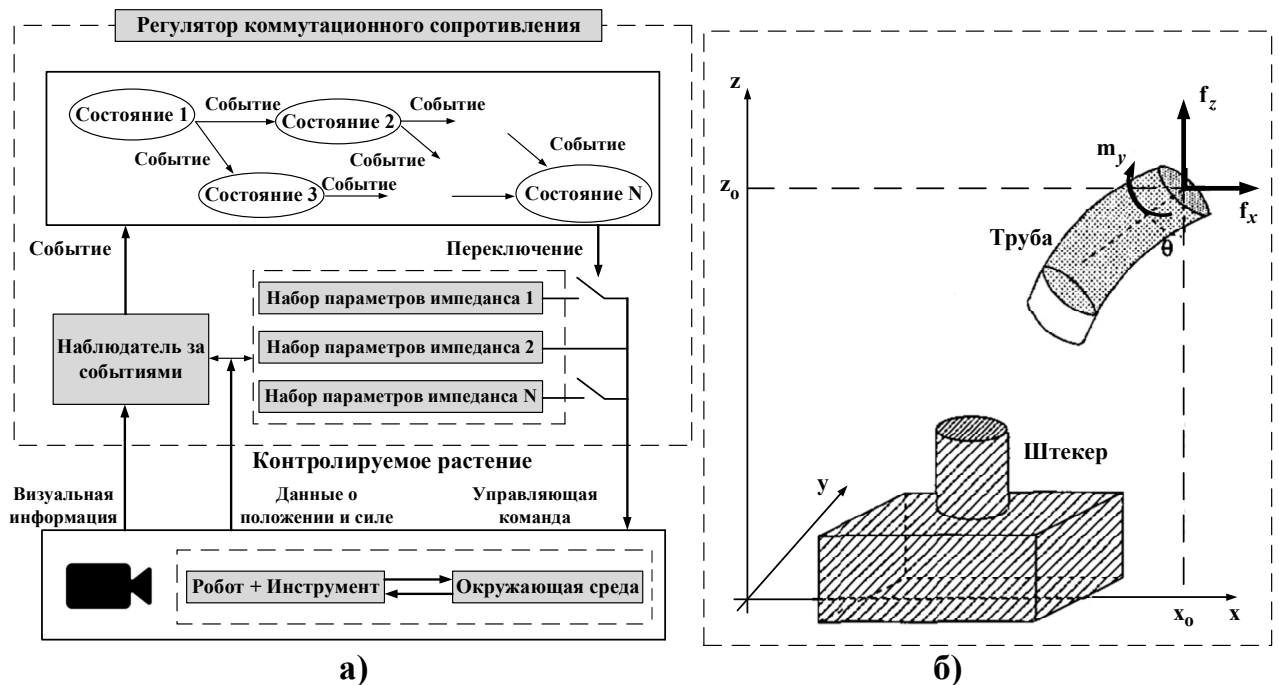


Рисунок 1.12 – Реализация контроллером навыков манипулирования деформируемыми объектами: а – структурная схема предлагаемого контроллера; б – задача установки гибкой трубы

Hirana S. и др. [59] представил метод создания контроллера для задач сборки,

который включает манипулирование деформируемыми объектами. Предлагаемый метод использует динамику, которую человек-сборщик демонстрирует при выполнении задачи и реализует ее в гибридном контроллере. В системе управления наблюдатель событий оценивает изменение состояния на основе силы и визуальной информации и соответствующим образом переключает динамику в соответствии с состоянием задачи (рисунок 1.12).

Пассивные адаптивные устройства – это сочетание упругости и демпфирования упругой детали. Они реагируют на внешние силы, используя деформируемые элементы для перемещения и коррекции положения деталей. В этих устройствах компоненты размещены таким образом, что силы в точках контакта корректируют положение деталей [38; 66]. Работы [55; 77; 98] указывают на использование пассивно-адаптивного метода в разработке схватов и вспомогательных устройств.

Активные адаптивные устройства используют управление с обратной связью для автоматического регулирования процесса сборки и положения деталей путем измерения положения и контактных усилий. В данном методе обычно используют датчик одного типа или комбинацию нескольких датчиков для определения положения деталей и протекания процесса. При активной адаптации измеряют силу/момент в контакте и передают информацию в контроллер для формирования необходимой траектории выходного звена автомата. В работах [64; 80; 87; 110 и др.] классифицируют работы, использующие датчики как активно-адаптивный метод. Метод активной адаптации помогает преодолеть недостатки пассивных адаптивных устройств. Таким образом, активное управление имеет очень широкую перспективу применения. В соответствии с характеристиками реализации стратегии метод активной адаптации можно разделить на две категории [66]: метод активной адаптации управления импедансом; метод активной адаптации управления силой/положением.

Изделия машиностроения характеризуются большим количеством разнообразных видов соединений деталей. Исходя из классификации нежестких деталей, можно выделить несколько типов задач при сборке нежестких деталей:

- соединения вала и втулки [60; 70; 75; 80; 81; 26; 110 и др.];
- соединения уплотнительного кольца с канавкой [55; 77; 98];
- соединения нежесткой трубы с жестким валом [59; 88];
- соединения электрических разъемов [51; 97];
- соединения нежесткого вала с жесткой втулкой [41; 47; 48; 65; 109 и др.];
- соединения плоских пластин (пазовые соединения) [43; 46; 94];

В настоящее время установка вала в отверстие втулки является наиболее типовой задачей сборки, на долю которой приходится примерно 40% всех сборочных операций. Форма вала может быть различной, включая простую цилиндрическую, сложную форму, ступенчатый вал и изгибающийся вал. Кроме того, существуют проблемы с регулированием усилия и положения, вызванные поверхностным контактом с отверстием. Многие исследователи изучали задачу установки вала во втулку. Кроме того, исследования по сборке валов важны для разработки технологии автоматической сборки.

1.3 Анализ эффективности стратегий и алгоритмов управления

Сборочные роботы широко используются в машино- и приборостроении. Одной из наиболее сложных технических задач является выбор стратегии поиска для повышения точности позиционирования при сборке. Стратегии поиска оцениваются с точки зрения времени выполнения, точности, стабильности, а также зависят от геометрии и точности деталей. Стратегия сборки основана на информации, поступающей с датчиков. Количество и типы датчиков, алгоритмы обработки данных, а также интеграция датчиков и стратегий поиска являются основными критериями, определяющими ТН, стабильность и скорость выполнения роботизированных сборочных операций [10; 67].

1.3.1 Стратегии поиска с одним типом датчиков

Стратегии поиска с датчиком зрения. Движения могут управляться системой визуального сервопривода на основе изображений и системы визуального сервопривода на основе положения. В зависимости от того, получает

ли система зрения информацию об изображении из двумерной плоскости или информацию о положении и ориентации детали из трехмерного пространства, полученная информация преобразуется в цифровую информацию для управления движением, которую можно разделить на метод 2D-поиска и метод 3D-поиска [10].

Плоские цели. Основным принципом метода 2D-поиска заключается в использовании монокулярной камеры для получения информации об изображении целевого объекта в 2D плоскости, передачи информации об изображении в систему обработки изображений, а затем в соответствии с информацией об изображении, такой как цвет, яркость и распределение пикселей, она преобразуется в цифровой сигнал и отправляется на контроллер движения, который управляет роботом для выполнения задачи сборки. В работе Yang Z. [107] решается задача поиска и сборки на сложных трехмерных деталях. Предложен алгоритм, который сочетает локализацию робота с несколькими функциями и коаксиальное машинное зрение, с целью взаимодействия с монокулярной камерой (метод 2D-поиска) для визуального позиционирования. Чтобы четко зафиксировать край отверстия, алгоритм использует преобразование для обнаружения верхней поверхности отверстия и объединяет алгоритм обнаружения края [10] (рисунок 1.13).

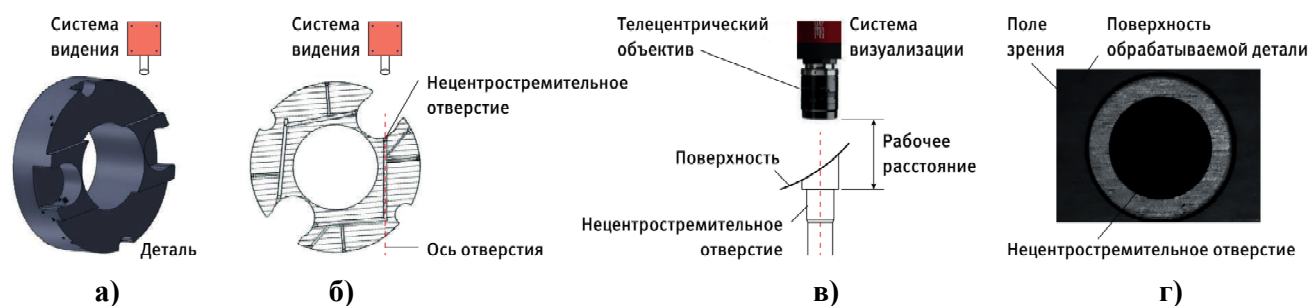


Рисунок 1.13 – Стратегия поиска при сборке соединения «вал-втулка», основанная на методе 2D-поиска

Метод трехмерного поиска является основным принципом использования видеокамер для фиксации объектов в трехмерном пространстве. Информация о трехмерном изображении через систему обработки изображений и компьютер преобразуется и отправляется роботу.

В работе [43], оптимизирован процесс калибровки визуальной системы,

использующей красный куб для калибровки и контроля, что улучшает метод измерения краев куба (рисунок 1.14а). В работе Chang W. [46] используется откалиброванная система стереовидения, алгоритм определения угла, основанный на изменении уровня серого для обнаружения объектов. Трехмерная позиция корпуса мобильного телефона реконструируется в соответствии с обнаруженными объектами (рисунок 1.14б).

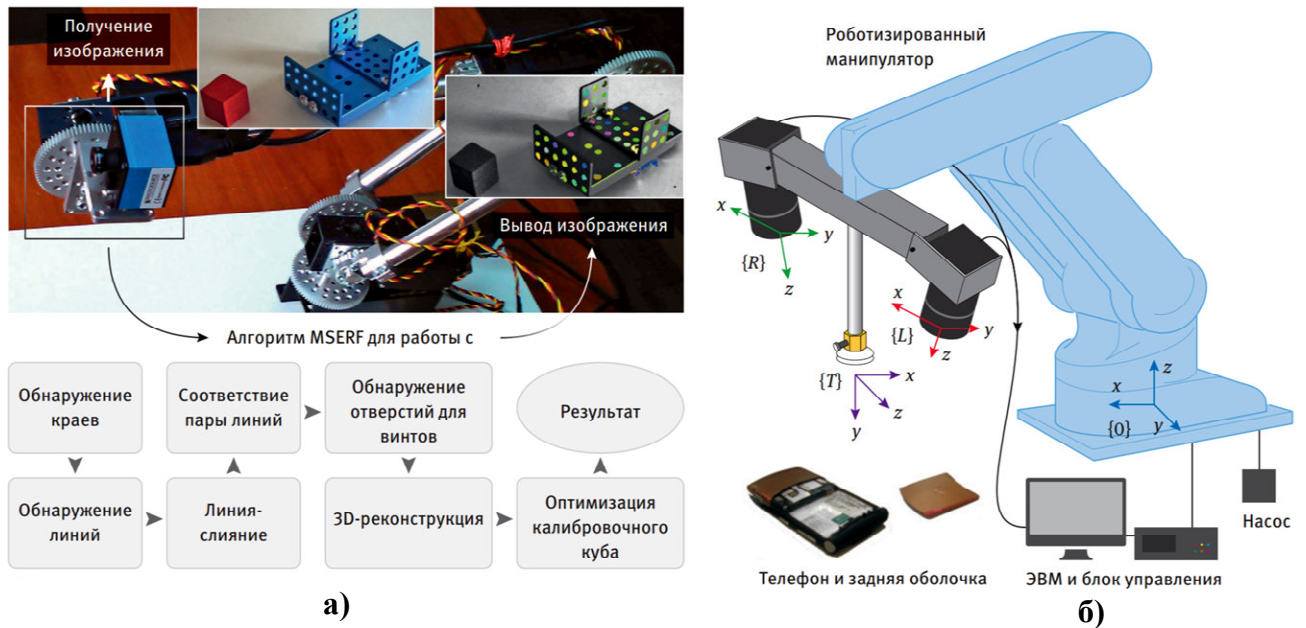


Рисунок 1.14 – Стратегия поиска и сборки деталей, основанная на методе трехмерного поиска

Стратегии поиска с датчиком силы. На выходном звене робота устанавливается СМД для получения информации о силе и крутящем моменте. СМД используется либо для определения состояния контакта между роботом и объектом [10; 44; 57; 71], либо для идентификации инерционных параметров роботизированной манипуляционной системы [10; 53]. Подобные датчики широко изучались в течение длительного времени и многие из них использовались в задачах высокоточных манипуляций, таких как сборка вала со втулкой.

Основной принцип метода сканирования на плоскости состоит в том, чтобы оценить относительное положение вала и втулки, используя крутящий момент, создаваемый отклонением положения между валом и втулкой во время сборки, а затем переместить вал по расчетной траектории. Данная процедура выполняется до тех пор, пока нижний торец вала не попадет в отверстие втулки. В методе поиска

на плоскости различают три основные схемы: метод поиска по траектории; метод расчета с СМД и разделение контактной зоны (рисунок 1.15).

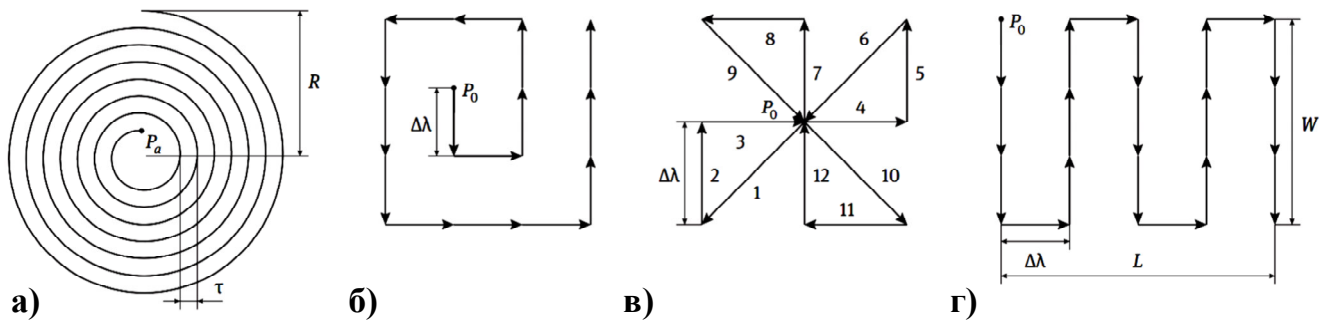


Рисунок 1.15 – Стратегии плоского поиска: а – поиск по спирали Архимеда; б – по квадратной спирали; в – поиск по ветряной мельнице; г – поиск по растру

Метод стереоскопического поиска – это своего рода антропоморфный метод поиска отверстия, основной принцип которого заключается в следующем. Посредством анализа процесса сборки можно обнаружить, что, если отверстие повернуть методом стереоскопического поиска вдоль осей X, Y и Z на определенный угол, начальное состояние контакта при поиске сборки «вал – втулка» может быть упрощено до уникального режима контакта. Работа Takahashi J. и др. [98] нацелена на точность и деформацию тонкого кольца, которое легко деформируется во время поиска собираемых деталей. Предложен принцип пассивного центрирования, основанный на напряжении Герца для уменьшения ошибки позиционирования робота (рисунок 1.16) [10].

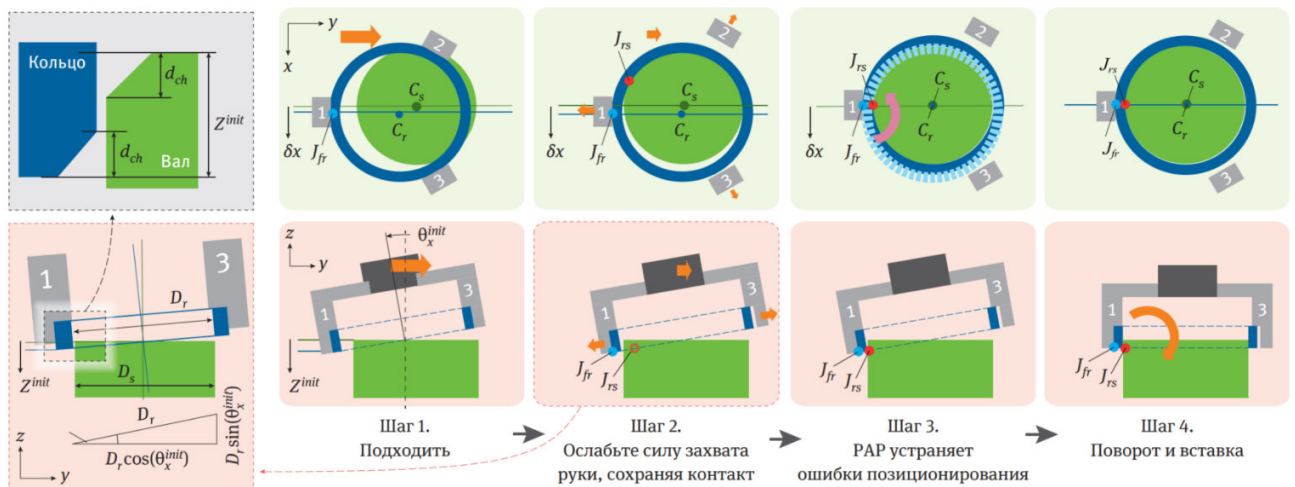


Рисунок 1.16 – Распознавание состояния контакта и алгоритм поиска собираемого узла

1.3.2 Интеграция визуальных и кинестетических датчиков

С целью преодоления ограничений стратегий поиска на основе датчиков силы и зрения, в работе [10; 41; 48] реализовали стратегию поиска, основанную на датчиках зрения и датчиках силы.

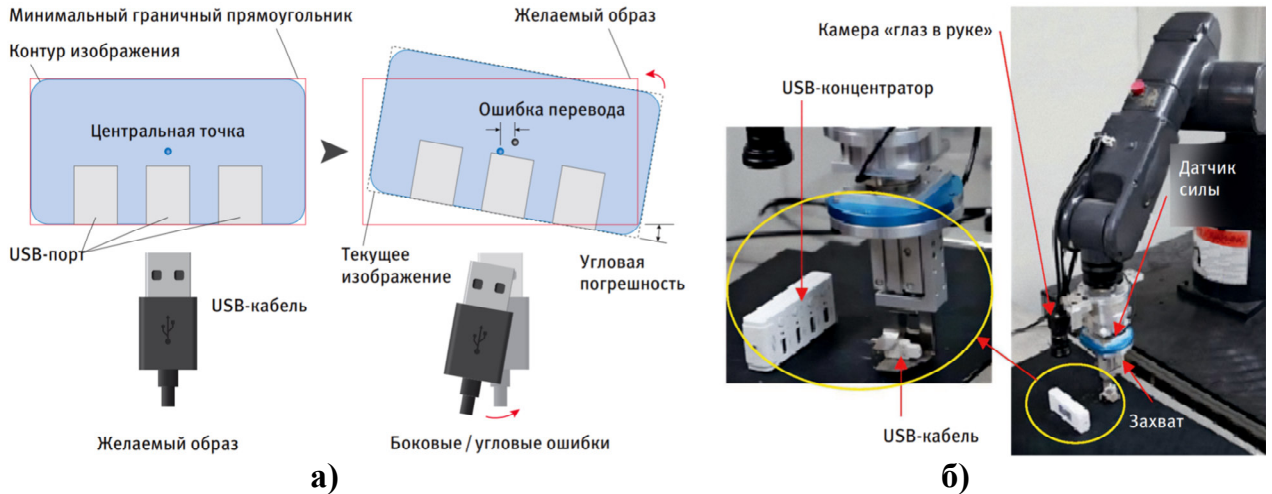


Рисунок 1.17 – Стратегия совместного поиска, основанная на датчиках зрения и силы: а – процесс относительного ориентирования при сборке USB; б – робот для сборки USB

В работе Song H.C и др. [94] представлена схема АС с использованием датчиков зрения и датчиков сил и моментов для решения проблемы сборки разъёма USB. Определяя силу контакта с помощью датчика сил и моментов, можно определить выполнение задачи сборки (рисунок 1.17).

1.3.3 Интеграция с другими источниками информации

Основываясь на обычном поведении человека при поиске деталей, исследователи предлагают стратегию поиска, основанную на визуальных датчиках и датчиках силы. В работе [85] использован «контроллер шагового движения». Контроллер записывает траекторию человеческой руки при установке гибкого круглого кольца на вал, а затем из полученной траектории извлекаются опорные точки положения и ориентации вала. В планировщике движений, основанном на оптимизации, эти точки используются в качестве целевых точек для создания траекторий движения руки робота, которая минимально деформирует объект [10] (рисунок 1.18).

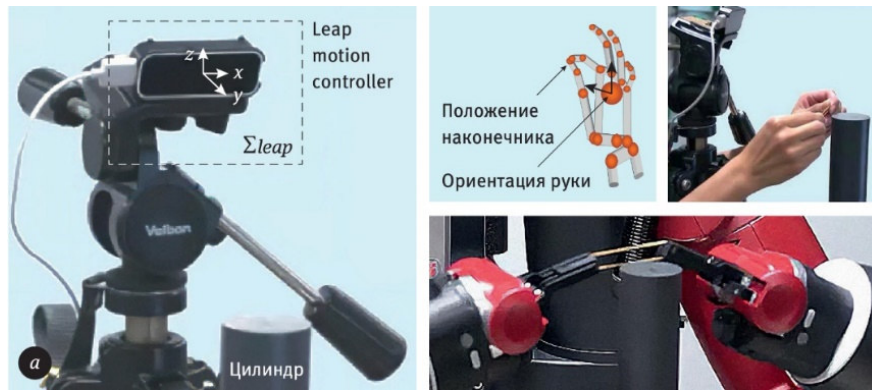


Рисунок 1.18 – Стратегия поиска гибкой сборки на основе контроллера шагового движения

1.4 Технические средства дооснащения промышленных роботов

Схват промышленного робота предназначен для захвата предмета манипулирования и удержания его в процессе перемещения. Вид схвата определяется конфигурацией, размером, массой и свойствами манипулируемого предмета обработки, а также специфическими требованиями технологического процесса [34].

Для захвата, установки и извлечения нежестких деталей используются различные виды схватов, включая вакуумные, магнитные, вакуумно-магнитные, магнитно-механические, электростатические, адгезионные и другие. Это разнообразие схватов обусловлено различными формами, размерами и поверхностными характеристиками деталей, а также требованиями к точности и скорости обработки процесса захвата (рисунок 1.19) [40].

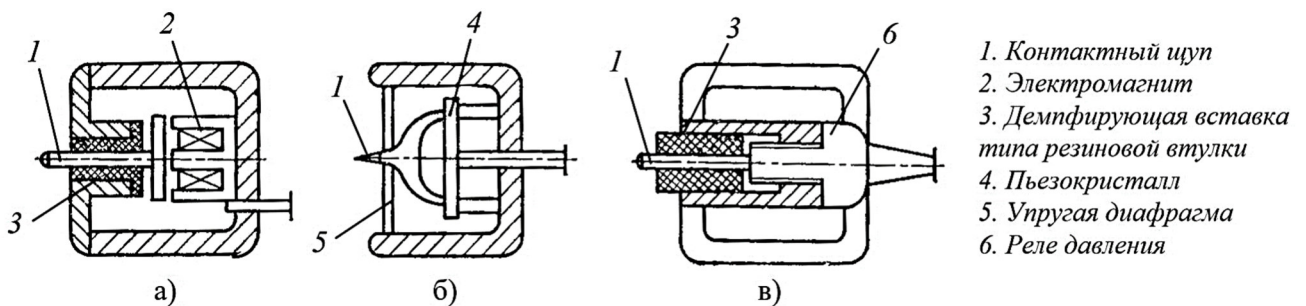


Рисунок 1.19 – Схемы различных преобразователей, встраиваемых в схваты роботов: а – магнитного; б – пьезоэлектрического; в – пневматического преобразователей

Поскольку нежесткие детали легко деформируются при воздействии больших усилий зажима, необходимо точно контролировать усилие зажима во время сборки. С целью измерения сил, прикладываемых при манипулировании легко деформируемыми деталями, в схват робота встраивают различные преобразователи с чувствительными элементами, обеспечивающими захват нежестких изделий с минимальным усилием.

Пневматические схваты включают в себя элементы, которые расширяются или изгибаются и выполнены в форме камер из эластичного материала, такого как резина. При подаче сжатого воздуха в их полость происходит изменение размера этих элементов схвата, что обеспечивает сжатие детали для надежного захвата. В работе [42] представлен ряд пневматических зажимных устройств, пригодных для работы с нежесткими предметами (рисунок 1.20).

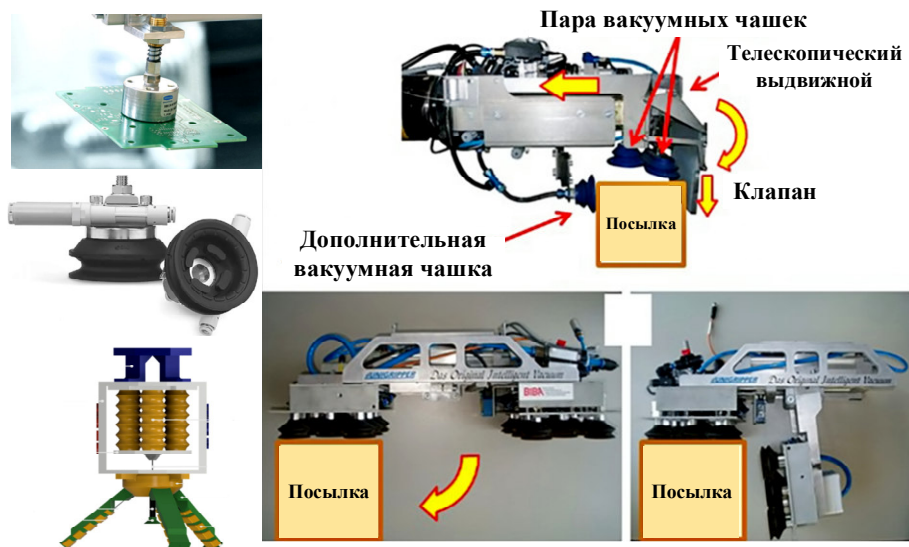


Рисунок 1.20 – Схемы расположения пневматических захватных устройств

Внешний датчик – это устройство, которое может воспринимать результаты измерений и затем преобразовывать их в выходной сигнал в соответствии с определенными правилами. Типовые датчики, используемые в задачах роботизированного манипулирования, включают визуальный датчик, датчик дальности и СМД [74].

Зрение формирует самую обширную информацию. Глаза получают почти от 80% до 90% внешней информации. Аналогичным образом, визуальный датчик (рисунок 1.21, позиция 1 и 2) может играть важную роль в роботизированных

технологиях [74]. Датчик расстояния (рисунок 1.21, позиции 3÷6) используется в роботизированных манипуляциях для измерения объекта и оценки положения. Датчик расстояния определяет расстояние между целевой точкой и датчиком. Датчики расстояния подразделяются на одноточечные, линейные и матричные в зависимости от их количества и расположения.



Рисунок 1.21 – Типовые датчики, применяемые в задачах роботизированного манипулирования: 1 – высокоскоростная промышленная камера; 2 – интеллектуальная промышленная камера; 3 – лазерный датчик дальности; 4 – стереокамера; 5 – датчик освещенности; 6 – камера времени полета; 7 – датчик крутящего момента в суставе; 8 – силомоментный датчик; 9 – датчик давления пальца; 10 – пальцевая тактильная матрица

В задачах роботизированного манипулирования информация о силе, моменте широко используется для устранения небольшой ошибки позиционирования деталей. На рисунок 1.21 позициями 7÷10 показаны датчики, обычно используемые при манипуляциях роботами, включая шестикомпонентный СМД и тактильный датчик. СМД обычно устанавливается на суставах или запястьях робота. Он воспринимает силу и момент на объекте при жестком контакте. Датчик давления пальца и тактильная матрица в основном устанавливаются на кончиках пальцев или ладонях.

Решающим аспектом эффективности автоматизированных роботизированных систем является программирование роботов. Производители и разработчики используют разнообразные подходы, охватывающие основные системы и средства управления, специализированные под конкретные задачи. Существуют две основные категории программирования роботов: онлайн и оффлайн. При онлайн-программировании рука робота перемещается через

заданную последовательность положений, которые затем записываются и хранятся в системах робота. Оффлайн-программирование подразумевает создание программы на отдельном компьютере для управления движениями робота, после чего программа загружается в систему управления робота.

Онлайн-программирование промышленных роботов имеет недостатки, включая простой рабочего процесса. В этом случае программирование выполняется на роботе, что приводит к временному отключению его от производства. Автономное программирование устраняет этот недостаток, перенося процесс программирования в виртуальную среду. Программист пишет код для робота не непосредственно на нем, а в виртуальной среде, где можно создать виртуального двойника робота для тестирования программы.

Автономное программирование позволяет создавать программы и траектории движения роботов непосредственно из САД-моделей. Этот метод наиболее полезен в сложных приложениях, где требуется длительное время программирования вручную.

Автономное программирование обеспечивает непрерывность производства, поскольку после загрузки программы в робот, в большинстве случаев требуется лишь небольшие корректировки для начала производства новых изделий. Существуют различные подходы к автономному программированию, начиная с простой генерации траекторий и заканчивая полным проектированием системы, программированием и внедрением в виртуальной среде.

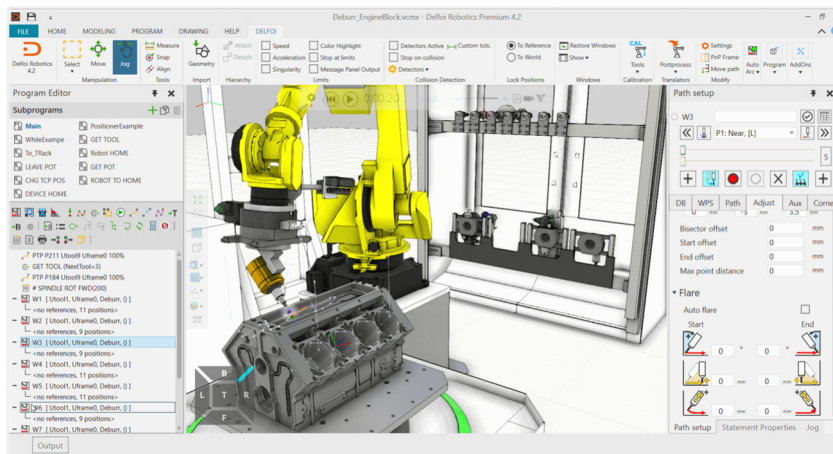


Рисунок 1.22 – Среда программирования Delfoi ARC, работающая с 3D-моделями

Программное обеспечение Delfoi ARC является быстрым и удобным инструментом для автономного программирования роботов основных производителей. С использованием выбранных параметров и функций, программа эффективно работает с 3D CAD-моделями (рисунок 1.22). Delfoi ARC совместимо с роботами от таких производителей, как ABB, Fanuc, KUKA, Yaskawa, Motoman, Kawasaki и др.

RobotStudio от ABB робототехника – это мощный автономный инструмент программирования и моделирования роботов, который использует графическое программирование для создания движений робота, редактирования и отладки роботизированных систем, а также моделирования и оптимизации существующих программ для роботов (рисунок 1.23).

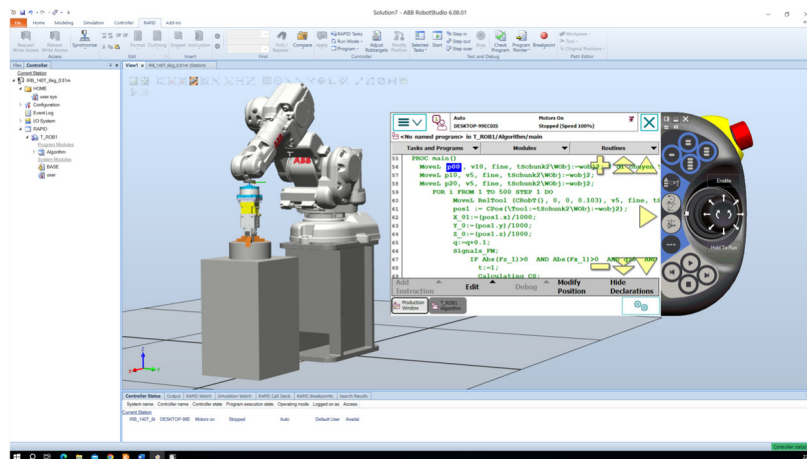


Рисунок 1.23 – Манипулирование 3D-объектами и автономное программирование в программной среде Robotstudio

Кроме того, RobotStudio используется для удаленного обслуживания и устранения неполадок, позволяя подключиться к работающей системе для мгновенного создания виртуальной копии и затем перейти в автономный режим для более детального анализа ситуации.

1.5 Формирование стратегии управления процессом сборки

1.5.1 Выбор метода сборки нежестких деталей

При автоматической сборке деталей в окружающей среде неизбежно присутствуют неопределенности. Эти неопределенности приводят к ошибкам при

выполнении точных манипуляций. Ошибки могут быть геометрическими (например, допуски на детали, положение объекта в окружающей среде, положение схвата робота, проскальзывание детали в схвате) и динамическими (например, жесткость системы, эластичность сопрягаемых деталей, неопределенности в модели трения). Наиболее эффективным решением при сопряжении деталей является активное податливое движение робота. В контексте реализации стратегии широкое применение находит принцип адаптивного управления с использованием СМД для контроля силы и положения.

Активный контроль соответствия при роботизированной сборке реализуется на основе предположения, что каждая контактная ситуация будет характеризоваться определенным набором значений сил и моментов. Информация о силе и моменте может быть получена и классифицирована для идентификации соответствующего CS, которое характеризуется уникальной пространственной конфигурацией движущегося объекта и объекта окружающей среды [61]. В активной системе для согласованного движения контроллер получает набор точек от планировщика, сравнивает его с измерениями из системы управления роботом и вычисляет соответствующие команды для приводов звеньев. Эти методы часто используются в комбинации для создания более гибких и интеллектуальных систем управления, способных адаптироваться к сложным условиям и выполнять задачи с высокой точностью и эффективностью.

1.5.2 Определение метода идентификации состояния контакта

В рамках формирования навыков робота для распознавания контактных ситуаций в окружающей среде, основанных на сигналах силомоментного датчика, распознавание контактных состояний представляется одним из важнейших элементов реализации концепции программирования в активном податливом движении робота.

Исследования в области распознавания CS проводятся на основе двух подходов. Одна группа исследователей использует аналитические модели процесса сопряжения деталей и с помощью статистических методов определяет

адекватность фактической и смоделированной ситуаций [50; 56]. Другой подход основан на большом наборе экспериментальных данных для изучения CS с использованием различных методов мягких вычислений (нейронных сетей, нечеткой логики, скрытых Марковских моделей) [52; 62; 82]. Работы [50; 78] основаны на разделяющих (многогранно выпуклых) конусах, полученных из геометрических и квазистатических моделей процесса сопряжения. Другой подход основан на поиске возможных контактов путем построения многогранных объектов с использованием расчетной неопределенности местоположения контактов [96; 106].

В работах [49; 72] рассматривалась оценка геометрических параметров с использованием фильтров Калмана. Геометрические параметры были оценены в предположении, что состояние контакта всегда соответствовало плану движения. Переход между состояниями контакта можно было бы распознать, используя несоответствие измеренных значений текущей модели [72]. Развитие данной работы представлено в [56], где были предложены фильтры переходных частиц для распознавания CS. Основным ограничением метода является то, что CS могут быть распознаны только после того, как они были хорошо идентифицированы.

Нейронные сети и методика обучения с подкреплением были применены при изучении задачи сопряжения цилиндрических деталей [82]. Skubic M. и др. [91] предлагают метод, который может быть использован для изучения процесса размещения куба на плоскости. Они представили два классификатора – один на основе нечеткой логики, а другой на основе нейронных сетей и показали, что классификатор, основанный на нечеткой логике, превзошел классификатор на основе нейронных сетей. В работе [54] предложен метод восстановления характеристик классификации, но результаты были очень ограниченными в отношении изменения размеров деталей.

Теория нечетких множеств и нейронных сетей для распознавания CS были интегрированы [83], где в качестве признаков использовались нормализованные значения составляющих силы. Другой подход, предполагающий комбинацию нечеткой логики и нейронных сетей, предложен в работах [92; 93]. В этих работах

автор фокусируется на выборе плана движения (из всех возможных планов движения), который привел бы к успешному сопряжению без заклинивания. В качестве основы для обучения были выбраны равномерно дискретные объекты, полученные из диаграммы заклинивания [105].

Недавние исследовательские усилия были сосредоточены на разработке машин распознавания CS, которые используют модель процесса [89; 95]. Su J. и др. [95] представлена стратегия закрепления в незафиксированном отверстии узла поршневого штока с использованием податливого робота. При таком подходе робот изменяет свою траекторию в соответствии с силой сопряжения и сопрягает детали итеративно, основываясь на области притяжения, образованной контактными ограничениями. Способ распознавания CS при регулировке высоты цилиндрической нижней пары основан на измерениях усилий [89]. Jasim I.F. [65] предложена основанная на мере подобия распределенная модель GMM для моделирования CS в процессах PC гибких резиновых деталей с принудительным управлением. Сигналы СМД с объекта, которым манипулируют, регистрируются для различных состояний данного процесса сборки.

Jakovljevic Z. и др. [61] представили подход к проектированию машин распознавания CS для различных типов задач сопряжения деталей. Авторы выбрали обобщенную силу сопряжения в качестве основной характеристики процесса. Начиная с измерения силы, онлайн-распознавание осуществляется с использованием границ классов и отображений преобразования, полученных во время автономного обучения. Основой для предлагаемой процедуры автономного обучения являются не экспериментальные данные, а механическая модель процесса сопряжения деталей.

Binbin Li и др. [73] предложен метод моделирования процесса сборки, основанный на регрессии опорных векторов, который строит модель путем анализа взаимосвязей между параметрами сборки и процессом сборки. В работе представлена SVM для распознавания CS на основе входных сигналов, таких как скорость, усилие установки, соответствующих выходным отклонениям без учета неопределенного процесса входных и выходных значений при сопряжении.

Таким образом, подходящий метод классификации должен быть применим в режиме реального времени с хорошими свойствами обобщения. Таковы основные причины использования SVM для классификации. SVM рассматривают проблему обучения как проблему минимизации фактического риска [99]. Фактический риск ограничен суммой эмпирического риска и доверительного интервала. С увеличением сложности машины распознавания эмпирический риск снижается, но доверительный интервал увеличивается. Минимизация эмпирического риска не обязательно приводит к минимизации фактического риска. В отличие от других машин распознавания (например, нейронных сетей), SVM исходят из минимизации структурного риска, которая одновременно минимизирует эмпирический риск и доверительный интервал. Следовательно, полученные машины распознавания обладают хорошими обобщающими свойствами. Свойство обобщения машины распознавания представляет собой ее способность правильно принимать решения относительно неизвестных данных, основываясь на знаниях, полученных из обучающего набора. Поскольку процесс сопряжения деталей полон неопределенностей, превосходные обобщающие свойства SVM эффективны для их использования в машине распознавания CS.

1.6 Выводы по главе 1

1. В современном машиностроении в различных машинах используется все больше нежестких деталей из неметаллических материалов. Необходимость учета деформаций деталей, вследствие их малой жесткости, существенно усложняет решение задачи АС.

2. Роботизированная сборка является эффективным и надежным средством автоматизации процессов сборки. Роботизированная сборка может быть эффективно реализована в операциях сопряжения нежестких деталей.

3. Выполнение задач сборки нежестких деталей представляет собой серьезную проблему для роботов из-за многочисленных источников неопределенности, таких как степень деформации деталей и приспособления, точность положения выходного звена робота и базирующих приспособлений.

4. Соединения типа «цилиндрический вал–втулка» являются наиболее широко используемыми в машиностроении. Задача установки нежесткого вала во втулку является типовой задачей в технологии сборки изделий.

5. Дооснащение промышленного робота средствами осязания позволяет расширить условия собираемости и повысить ТН операций АС нежестких деталей.

6. Применение информации о величинах сборочной силы и крутящего момента позволяет идентифицировать положение деталей и реализовать условия автоматического выполнения сборки нежестких деталей.

7. Использование сигналов силы и момента необходимо в соединениях нежестких деталей с малым зазором и создает возможности для преодоления недостатков технического зрения и контроля возникающих деформаций.

8. Алгоритм активного адаптивного управления со стратегией управления сборкой реализует возможность обеспечения технологической надежности РС.

ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СБОРКИ НЕЖЕСТКИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

При автоматической сборке детали обычно рассматриваются как абсолютно жесткие. Данная операция изучалась в течение длительного времени, так как установка жесткого вала во втулку является весьма распространенной в машиностроении. В последние годы в различных механизмах (автомобилях, приборах, электронных устройствах) используется все больше нежестких и гибких деталей. Данная работа направлена на исследование сборки нежесткого вала и жесткой втулки.

Необходимость учета деформаций детали, вследствие ее малой жесткости, существенно усложняет решение задачи АС. Поэтому задача построения закона управления при сборке нежестких деталей является весьма актуальной.

В главе 1 поставлена задача разработки метода автоматической сборки с использованием активной адаптации на основе применения силомоментного очувствления для обеспечения ТН процесса сопряжения нежесткого вала с жесткой втулкой. В данной главе решается задача определения условий контактного взаимодействия нежесткого вала с жесткой втулкой на основных этапах процесса сопряжения.

В этой связи решаются задачи определения усилий контактного взаимодействия в зависимости от текущего положения нежесткого вала на различных этапах процесса сопряжения. Построены соответствующие математические модели сборки нежестких деталей.

Выполнен анализ заклинивания нежесткого вала в процессе установки его во втулку и дано построение общих условий, позволяющих исключить это явление.

2.1 Исходные данные и основные допущения

Рассматриваемый процесс сборки цилиндрических деталей характеризуется относительным расположением оси вала и втулки на позиции сборки, при котором возникает угол перекоса θ , удовлетворяющий условию $\theta \leq \arccos \frac{d}{D}$ (рисунок

2.1). При создании подобного перекоса детали соприкасаются друг с другом в двух точках, находящихся в плоскости симметрии. Однако, когда применяется данный способ для сборки деталей, угол между осями которых на позиции сборки $\theta > \arccos d/D$, имеет место контакт между деталями в трех точках [39]. В момент первоначального контакта при сопряжениях с малым зазором угол отклонения θ также мал, поэтому допустимо рассматривать только случай двухточечного контакта вала и втулки. В процессе установки нежесткого вала в жесткую втулку в соответствии с теорией АС [6; 27; 34; 39] целесообразно рассмотреть три последовательных этапа, показанные на рисунке 2.1: б – контакт по фаскам; в – одноточечный контакт; г – двухточечный контакт.

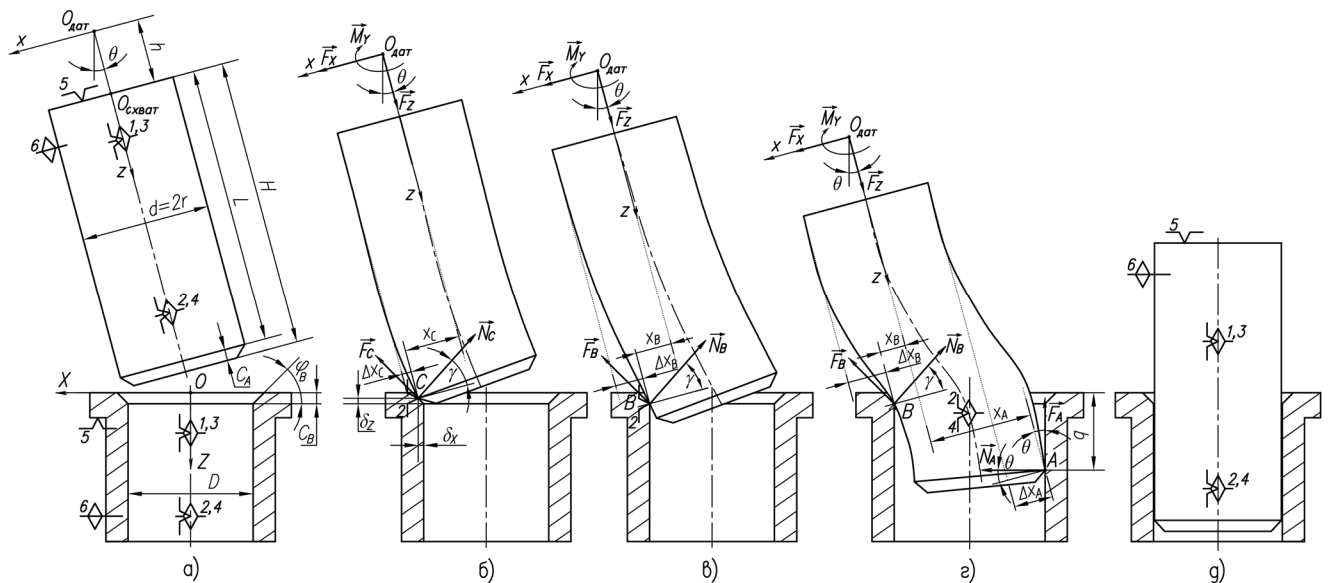


Рисунок 2.1 – Схема базирования и действия сил на основных этапах процесса сопряжения: а – начало процесса сопряжения; б – контакт по фаскам; в – одноточечный контакт; г – двухточечный контакт; д – окончание процесса сопряжения

где D – диаметр втулки;

$d=2r$ – диаметр нежесткого вала;

h – расстояние от края схвата до центра СМД ($O_{дат}$ $O_{схват}$);

H – расстояние от торца вала до края схвата;

θ – угол перекоса оси нежесткого вала и втулки;

φ_B – угол фаски в отверстии втулки;

C_A, C_B – высота фаски на сопрягаемых поверхностях;

γ – угол поворота поперечного сечения;

$\Delta x_{A,B,C}$ – соответственно прогиб вала в точках A, B, C ;

q – глубина сопряжения;

μ – коэффициент трения;

F_X, F_Z, M_Y – значения силы и моментов, формируемые СМД;

$\bar{R}: [O, X, Y, Z]$ – исходная (глобальная) система координат;

$\bar{R}_1: [O_{дат}, x, y, z]$ – локальная система координат, связанная с СМД;

$\bar{R}_0: [O, X', Y', Z']$ – система координат, связанная со втулкой и

первоначально задаваемая при настройке инструмента.

$O_{дат}xz$ – плоскость изгиба вала;

$O_{дат}x, O_{дат}z$ – соответственно продольная ось вала и перпендикулярная ей ось.

Как показано на рисунке 2.1, начало локальной системы координат совпадает с центральной точкой $O_{дат}$ силомоментного датчика, ось $O_{дат}z$, совпадает с продольной осью схвата, а $O_{дат}x$ выбирается так, чтобы нежесткий вал и втулка были симметричны относительно плоскости $O_{дат}xz$. Начало глобальной системы координат находится в точке пересечения продольной оси симметрии втулки с перпендикулярной ей наружной поверхностью втулки.

В момент первоначального касания нежесткого вала с жесткой втулкой в точках касания вала возникают реакции, направленные по нормали к поверхности в точках контакта. Эти реакции определяются из условия равновесия вала. В результате, в момент первоначального касания упруго-деформируемый вал подвергается воздействию продольной сжимающей силы, приложенной со стороны схвата робота, а на другом торце – воздействию поперечных сил реакции, то есть подвергается плоскому изгибу (а в случае, если размеры поперечного сечения вала сопоставимы с длиной детали, то и поперечному сдвигу). При дальнейшем сопряжении вала со втулкой возникает двухточечный контакт.

При решении рассматриваемой задачи принимались следующие допущения:

- рассматривается только один вид деталей, а именно упругий однородный цилиндрический стержень кругового сечения с постоянной изгибной жесткостью;
- скорость сопряжения детали со втулкой считается малой, поэтому применим квазистатический анализ;
- коэффициент трения предполагается постоянным;
- справедливы классические гипотезы сопротивления материалов [31].

Допущение о квазистатической постановке задачи, при котором силы инерции считаются незначительными, гарантирует, что силы на валу либо равны нулю, либо должны находиться в равновесном состоянии. В соответствии с этим предположением неравновесная ситуация мгновенно, благодаря движению детали, перейдет в состояние равновесия. Таким образом, если приложенной силой можно управлять таким образом, чтобы создать неравновесную конфигурацию, деталь будет скользить, чтобы поддерживать предельное равновесие.

Предполагается, что вал должен соответствовать диапазону схвата робота. Компоненты силы и момент F_X , F_Z , M_Y измеряются СМД. Силы реакции определяются из условий равновесия [1].

Контакт вала и втулки осуществляется в точках A , B и C . Тогда координаты точек контакта A , B , C в локальной $[\bar{R}_1]$ и глобальной $[\bar{R}]$ системах координат записываются в виде:

$$\begin{aligned} A[\bar{R}_1] &= (x_A; 0; z_A); A[\bar{R}] = (X_A; 0; Z_A); B[\bar{R}_1] = (x_B; 0; z_B); B[\bar{R}] = (X_B; 0; Z_B); \\ C[\bar{R}_1] &= (x_C; 0; z_C); C[\bar{R}] = (X_C; 0; Z_C) \end{aligned}$$

Поворачивая $[\bar{R}_1]$ на угол θ относительно оси, проходящей через $O_{\text{дат}}$ с направляющим вектором \mathbf{z} , добьемся совмещения продольной оси детали (вала) с продольной осью симметрии втулки.

Следует иметь в виду, что при использовании силомоментного датчика показания снимаются в виде сил и моментов, направленных вдоль трех осей координат: ось $O_{\text{дат}}z_{\text{дат}}$ направлена вдоль оси вала, а оси $O_{\text{дат}}x_{\text{дат}}$ и $O_{\text{дат}}y_{\text{дат}}$ перпендикулярны ей и лежат в плоскости, перпендикулярной оси вала. С СМД фактически снимаются проекции вектора силы на оси координат F_{X1} , F_{Y1} , F_{Z1} , и проекции вектора момента M_{X1} , M_{Y1} , M_{Z1} . Для решения поставленной задачи

необходимо представить силу в виде двух составляющих: осевой – \vec{F}_z и радиальной \vec{F}_x , лежащей в плоскости контакта [5; 7; 6; 25; 26]:

$$\vec{F}_z = \vec{k}F_{z1} \quad (2.1)$$

где \vec{k} – орт оси $O_{дат}z_{дат}$.

Модуль силы \vec{F}_x можно определить как:

$$|\vec{F}_x| = \sqrt{F_{x1}^2 + F_{y1}^2} \quad (2.2)$$

Направление вектора \vec{F}_x определяется направляющими косинусами углов между вектором силы и положительными направлениями осей координат, которые определяют положение точек контакта A и B относительно осей $O_{дат}x_{дат}$ и $O_{дат}y_{дат}$.

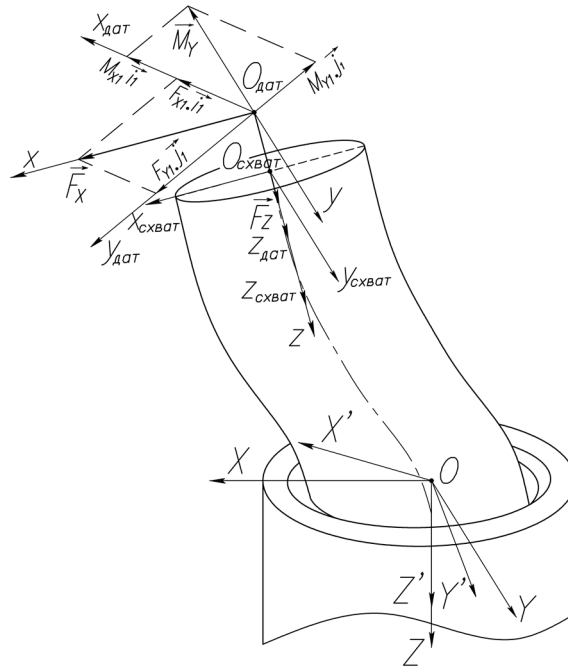


Рисунок 2.2 – Схема сил и моментов, действующих на нежесткий вал в системе координат силомоментного датчика

Модуль момента \vec{M}_y можно определить соотношением:

$$|\vec{M}_y| = \sqrt{M_{x1}^2 + M_{y1}^2} \quad (2.3)$$

При расчетах было установлено, что необходимо повернуть вал на угол θ относительно оси $O_{дат}y_{дат}$. Этот поворот представим угловыми перемещениями относительно осей $O_{дат}x_{дат}$ и $O_{дат}y_{дат}$ с помощью направляющих косинусов:

$$\theta_{x1} = \theta \cos(\vec{M}_y, \vec{i}_1) = \theta \frac{M_{x1}}{M_y}; \quad \theta_{y1} = \theta \cos(\vec{M}_y, \vec{j}_1) = \theta \frac{M_{y1}}{M_y} \quad (2.4)$$

Координаты центра СМД в двух системах координат $OX'Y'Z'$ и $OXYZ$ определяются выражением:

$$\Delta_{\Sigma} = \left| X_{O_{\text{дат}}} \right| = \sqrt{X'_{O_{\text{дат}}}{}^2 + Y'_{O_{\text{дат}}}{}^2}; Z_{O_{\text{дат}}} = Z'_{O_{\text{дат}}} \quad (2.5)$$

Направляющие косинусы позволяют определить корректирующее перемещение вала в системе координат $O_{\text{дат}}x_{\text{дат}}y_{\text{дат}}$. Предположим, что в результате расчетов необходимо переместить вал вдоль оси $O_{\text{дат}}x$ на величину Δ_{Σ} , тогда проекции вектора перемещения на оси $O_{\text{дат}}x_{\text{дат}}$ и $O_{\text{дат}}y_{\text{дат}}$ определяются выражениями [6; 25; 26]:

$$\Delta_{\Sigma X1} = \Delta_{\Sigma} \frac{F_{X1}}{F_X}; \Delta_{\Sigma Y1} = \Delta_{\Sigma} \frac{F_{Y1}}{F_Y} \quad (2.6)$$

$O_{\text{схват}}x_{\text{схват}}y_{\text{схват}}z_{\text{схват}}$ – система координат, совмещенная с точкой $O_{\text{схват}}$, ось $O_{\text{схват}}z_{\text{схват}}$ совпадает с $O_{\text{дат}}z$, ось $O_{\text{схват}}x_{\text{схват}}$ направлена в том же направлении $O_{\text{дат}}x$ ($O_{\text{дат}}O_{\text{схват}}=h$).

Для удобства будем использовать однородные координаты. Перемещение системы координат $O_{\text{дат}}xyz$ на расстояние h вдоль оси $O_{\text{дат}}z$. Матрица, описывающая смещение h :

$$O_{\text{дат}/h} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & h \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

Сила \vec{F} в системе координат $O_{\text{схват}}x_{\text{схват}}y_{\text{схват}}z_{\text{схват}}$ определяется как:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & h \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_X \\ F_Y \\ F_Z \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_X \\ F_Y \\ F_Z \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.8)$$

Сила \vec{F}_1 в системе координат $O_{\text{схват}}x_{\text{схват}}y_{\text{схват}}z_{\text{схват}}$ определяется как:

$$\begin{pmatrix} F_{X1} \\ F_{Y1} \\ F_{Z1} \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_X \\ F_Y \\ F_Z \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_X \\ 0 \\ F_Z \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.9)$$

Моменты \vec{M}_1 измеряемые в точке $O_{\text{схват}}$:

$$\begin{pmatrix} M_{XI} \\ M_{YI} \\ M_{ZI} \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_X \\ M_Y \\ M_Z \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & -z & y & 0 \\ z & 0 & -x & 0 \\ 0 & x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_X \\ F_Y \\ F_Z \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.10)$$

$$\begin{pmatrix} M_{XI} \\ M_{YI} \\ M_{ZI} \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ M_Y \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & -h & 0 & 0 \\ h & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_X \\ 0 \\ F_Z \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ M_Y + F_X h \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

2.2 Расчет деформаций вала при различных схемах нагружения

В данном разделе рассмотрены различные случаи деформирования нежесткого вала при сборке, для которых возможно получить точные аналитические решения.

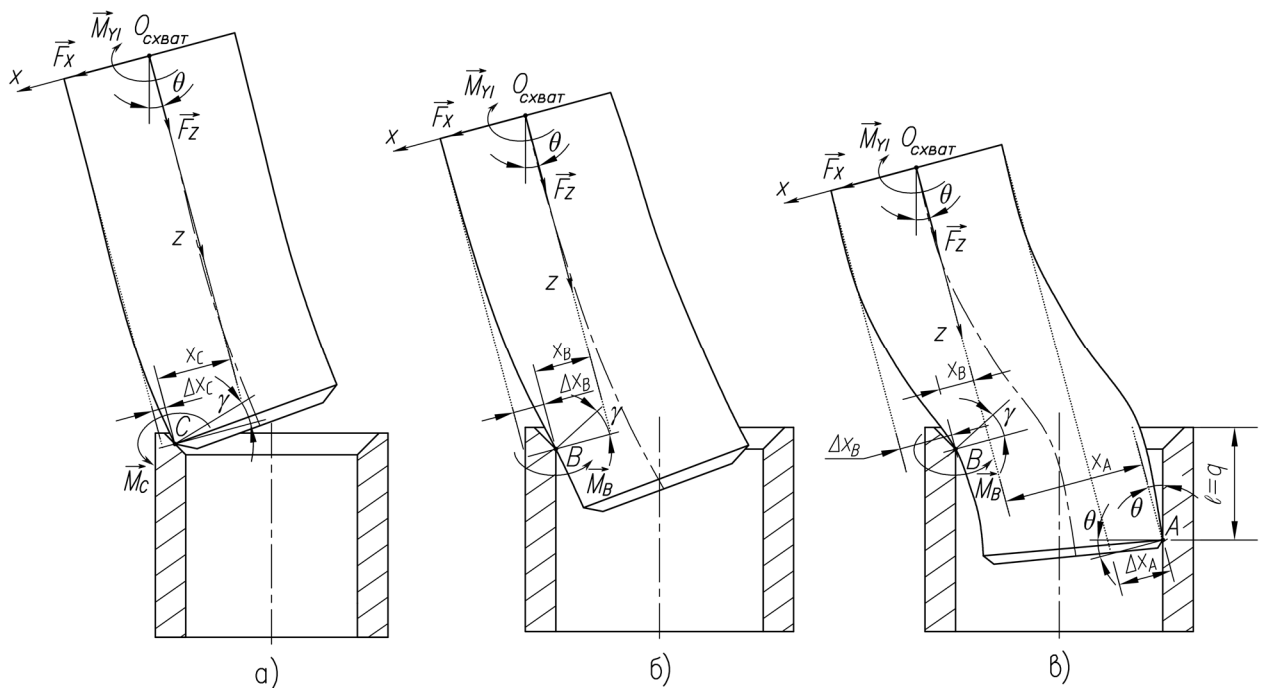


Рисунок 2.3 – Схема контактных состояний: а – контакт по фланцам; б – одноточечный контакт; в – двухточечный контакт

Поскольку использование множества систем координат приводит к появлению множества символов, не поддающихся обобщению, модель расчета значений деформации будет построена в системе координат $O_{схват}xz$ (совпадающей с системой координат $O_{схват}x_{схват}z_{схват}$). Используя значения силы и момента согласно выражениям (2.9), (2.10), геометрическая интерпретация представлена на

рисунке 2.3. Рассмотрим далее различные случаи деформирования вала при сборке, для которых получены точные аналитические решения.

2.2.1 Расчет детали на изгиб с учетом деформации поперечного сдвига

Если длина вала соизмерима с характерными размерами его поперечного сечения, то необходимо учесть влияние деформаций поперечного сдвига на его прогиб. Общее решение этой задачи для стержня переменного поперечного сечения по длине приведено в литературе [2]. В приближенной постановке угол сдвига сечения определяют соотношением:

$$\gamma_{\text{сд}} = \lambda(z) \frac{Q_x(z)}{GA(z)} \quad (2.11)$$

где $\gamma_{\text{сд}}$ – угол сдвига поперечного сечения;

$\lambda(z)$ – безразмерный коэффициент;

G – модуль сдвига материала;

$Q_x(z)$ – перерезывающая сила в сечении z ;

$A(z)$ – площадь поперечного сечения стержня;

На основании усреднения энергии сдвига можно приближенно принять:

$$\lambda(z) = \frac{A(z)}{I_Y^2} \int_A \frac{S_y^2}{b^2} dA(z) \quad (2.12)$$

где b – характерный размер поперечного сечения вала;

I_Y – момент инерции поперечного сечения вала;

E – модуль упругости материала вала на растяжение;

$S_y(x) = \int_A x dA$ – статический момент относительно оси отсеченной

части сечения.

Для стержня сплошного кругового сечения $A = \pi d^2/4$, $I_Y = \pi d^4/64$, $\lambda = 10/9$ [2].

Связь дополнительного прогиба оси стержня от сдвига $x_{\text{сд}}$ и угла сдвига:

$$\gamma_{\text{сд}} = -\frac{dx_{\text{сд}}(z)}{dz} = \lambda(z) \frac{Q_x(z)}{GA(z)} \quad (2.13)$$

Прогиб стержня $x_M(z)$ под воздействием изгибающих моментов может быть вычислен с использованием известных формул [2]:

$$\frac{d^2 x_M(z)}{dz^2} = \frac{M_Y(z)}{EI_Y(z)} \quad (2.14)$$

Суммарный прогиб вала (смещение центра тяжести сечения по оси $O_{\text{хват}}z$) находится как сумма прогибов от изгиба x_B и от касательной силы x_T :

$$x(z) = x_M(z) + x_{\text{сд}}(z) \quad (2.15)$$

Из уравнений (2.13), (2.14) и (2.15), дифференциальное уравнение упругой линии стержня с учетом влияния деформации поперечного сдвига имеет вид:

$$\frac{d^2 x}{dz^2} = \frac{M_Y(z)}{EI_Y} - \frac{\lambda}{GA} \frac{dQ_x(z)}{dz} \quad (2.16)$$

Уравнение упругой линии стержня может быть представлено в интегральной форме [2; 17; 35; 69]:

$$x(z) = x(0) + \frac{dx}{dz}(0)z + \lambda \frac{Q_x(0)}{GA(0)}z - \frac{\lambda}{GA} \int_0^z Q_x(z_1) dz_1 + \frac{1}{EI_Y} \int_0^z \int_0^{z_1} M_Y(z_2) dz_2 dz_1 \quad (2.17)$$

Прогиб стержня только от действия перерезывающих сил определяется соотношением:

$$x_{\text{сд}}(z) = x_{\text{сд}}(0) - \frac{\lambda}{GA} \int_0^z Q_x(z_1) dz_1 \quad (2.18)$$

так как:

$$\frac{dx_{\text{сд}}}{dz}(0) = -\lambda \frac{Q_x(0)}{GA} \quad (2.19)$$

Для консольно защемленного вала (в схвате робота) при односточном контакте суммарный изгибающий момент $M(z)$ в произвольном поперечном сечении стержня с абсциссой z от всех сил, действующих на деталь, равен:

$$M_z = M_{YI} - zF_x + xF_z \quad (2.20)$$

$$Q_x(0) = F_x \quad (2.21)$$

Поэтому из уравнения (2.17) с учетом (2.20) и (2.21) находим прогиб стержня при изгибе с учетом деформации поперечного сдвига:

$$x(z) = -\frac{\lambda F_x}{GA} z + \int_0^z \int_0^{z_1} \frac{M_{YI} + xF_z - zF_x}{EI_Y} dz_2 dz_1 \quad (2.22)$$

Поэтому из уравнения (2.13) с учетом (2.17) и (2.21) находим прогиб стержня при изгибе с учетом деформации поперечного сдвига:

$$\begin{aligned}
 x(z) = & -\frac{\lambda F_X}{GA} z + \int_0^z \int_0^{z_1} \frac{M_\gamma + xF_Z - zF_X}{EI_Y} dz_2 dz = -\frac{\lambda F_X}{GA} z + \\
 & + \int_0^z \frac{M_\gamma + xF_Z}{EI_Y} z_2 dz_2 - \int_0^z \frac{F_X}{EI_Y} \frac{z_2^2}{2} dz_2 = -\frac{\lambda F_X}{GA} z + \frac{M_\gamma + xF_Z}{EI_Y} \frac{z^2}{2} - \frac{F_X}{EI_Y} \frac{z^3}{6}
 \end{aligned} \quad (2.23)$$

2.2.2 Расчет на изгиб консольно защемленного упругого стержня

Если деталь представляет собой нежесткий цилиндрический вал, диаметр которого d мал по сравнению с его длиной, то деформированное состояние детали принято рассчитывать без учета поперечного сдвига $\lambda Q_x(z) / GA(z)$.

На начальном этапе сборки, когда имеет место односточный контакт вала со втулкой, его можно рассматривать как консольно защемленный упругий стержень. Решение применимо для двух случаев: контакта по фаскам и односточного контакта (рисунок 2.3а, б).

Тогда дифференциальное уравнение изогнутой оси стержня (2.22) запишется в виде:

$$\frac{d^2 x}{dz^2} + \frac{x F_Z}{EI_Y} + \frac{M_{\gamma I} - z F_X}{EI_Y} = 0 \quad (2.24)$$

Полагая $k^2 = F_Z/EI_Y$, получим:

$$\frac{d^2 x}{dz^2} + k^2 x + k^2 \frac{M_{\gamma I} - z F_X}{F_Z} = 0 \quad (2.25)$$

Общее решение линейного неоднородного дифференциального уравнения (2.25) имеет вид: $x(z) = x_0(z) + x_r(z)$.

Общее решение однородного уравнения: $x_0(z) = C_1 \cos kz + C_2 \sin kz$; C_1 и C_2 – произвольные постоянные.

Частное решение $x_r(z)$ находим методом подбора, принимая: $x_r(z) = Az + B$.

Так как $x_r'(z) = A$, $x_r''(z) = 0$, то подставляя эти значения в уравнение (2.25) и приравнявая коэффициенты в левой и правой частях получающегося равенства, находим неизвестные коэффициенты A и B . В результате получаем:

$$x_r(z) = \frac{F_X}{F_Z} z - \frac{M_{\gamma I}}{F_Z} \quad (2.26)$$

Следовательно, общее решение дифференциального уравнения (2.25) примет вид:

$$x(z) = C_1 \cos kz + C_2 \sin kz + \frac{F_X}{F_Z} z - \frac{M_{YI}}{F_Z} \quad (2.27)$$

Поэтому:

$$x'(z) = -C_1 k \sin kz + C_2 k \cos kz + \frac{F_X}{F_Z} \quad (2.28)$$

Из граничных условий на верхнем торце вала (в области схвата робота) $x(0) = 0; \frac{dx}{dz}(0) = 0$ находим:

$$C_1 = \frac{M_{YI}}{F_Z}; C_2 = -\frac{F_X}{kF_Z} \quad (2.29)$$

Тогда уравнение упругой линии изогнутого стержня окончательно запишется в виде [17]:

$$x(z) = -\frac{M_{YI}}{F_Z} (1 - \cos kz) + \frac{F_X}{F_Z} \left(z - \frac{\sin kz}{k} \right) \quad (2.30)$$

Угол поворота поперечного сечения в зависимости от $O_{\text{схват}}xz$ будет равен:

$$\gamma(z) = \frac{dx(z)}{dz} = -\frac{M_{YI}}{F_Z} k \sin kz + \frac{F_X}{F_Z} (1 - \cos kz) \quad (2.31)$$

В системе координат $O_{\text{дат}}xz$ значения деформации в точке контакта примет вид:

$$\Delta x(z) = x(z) = -\frac{M_Y + hF_X}{F_Z} [1 - \cos k(z - h)] + \frac{F_X}{F_Z} \left[(z - h) - \frac{\sin k(z - h)}{k} \right] \quad (2.32)$$

$$\gamma(z) = \frac{dx(z)}{dz} = -\frac{M_Y + hF_X}{F_Z} k \sin k(z - h) + \frac{F_X}{F_Z} [1 - \cos k(z - h)] \quad (2.33)$$

2.2.3 Решение методом начальных параметров для стержня в случае двухточечного контакта

При двухстороннем контакте со втулкой вал можно рассматривать как упругий стержень, жестко защемленный на одном торце (в зоне схвата) и имеющий скользящее защемление на другом торце, подверженный продольно-поперечному изгибу от продольной сжимающей силы F_Z и изгибающего момента M_{YI} [17] (рисунок 2.3в).

Рассматривая, как это принято в сопротивлении материалов [37], дифференциально малый элемент стержня на расстоянии z от начала координат и считая угол поворота сечения γ малой величиной, составим уравнения равновесия [15]:

$$-M_{YI} - x_B F_Z + z_B F_X + M_B = 0 \quad (2.34)$$

Для определения прогибов в произвольном поперечном сечении стержня при изгибе воспользуемся универсальным уравнением упругой линии стержня [31]:

$$x(z) = x_0 + x'_0 kz + x''_0(1 - \cos kz) + x'''_0(kz - \sin kz) + f(z) \quad (2.35)$$

где $x_0, x'_0, k, x''_0, x'''_0$ – соответственно прогиб, угол поворота, вторая и третья производные в начале отсчета;

$$k = \sqrt{F_Z / EI_Y};$$

F_Z – продольная сила;

EI_Y – жесткость при изгибе;

$f(z)$ – функция влияния поперечных нагрузок, приложенных к детали.

Для рассматриваемого случая нагружения выражение для функции $f(z)$ приведено в [31]:

$$f(z) = \frac{M_B}{F_Z} [1 - \cos k(z - a)] \quad (2.36)$$

Так как для защемленного стержня на левом торце $x_0 = x(0) = 0$; $x'_0 = x'(0) = 0$, то с учетом (2.36):

$$x(z) = x''_0(1 - \cos kz) + x'''_0(kz - \sin kz) + \frac{M_B}{F_Z} [1 - \cos k(z - a)] \quad (2.37)$$

Находим x''_0, x'''_0 из граничных условий на правом торце стержня: $x(L) = 0$, $x'(L) = 0$, $l = q$. В результате получаем систему уравнений:

$$(1 - \cos kL)x''_0 + (kL - \sin kL)x'''_0 = -\frac{M_B}{F_Z}(1 - \cos kq) \quad (2.38)$$

$$k \sin kL x''_0 + k(1 - \cos kL)x'''_0 = -\frac{M_B}{F_Z} k \sin kq \quad (2.39)$$

Разрешая ее, находим:

$$x_0'' = -\frac{M_B (1 - \cos kq)(1 - \cos kL) - k \sin kq(kL - \sin kL)}{F_Z k} \quad (2.40)$$

$$x_0''' = -\frac{M_B (1 - \cos kL) \sin kq - \sin kL(1 - \cos kq)}{F_Z k} \quad (2.41)$$

Подставляя (2.40), (2.41) в (2.35), получаем окончательное выражение для прогибов в произвольном сечении стержня [17]:

$$x'(z) = x_0'' k \sin kz + kx_0'''(1 - \cos kz) + \frac{M_B k}{F_Z} \sin k(z - a) \quad (2.42)$$

В точке контакта B согласно системе координат $O_{\text{дат}}xz$, уравнения (2.40), (2.41) имеют вид:

$$x_0'' = -\frac{[M_Y + x_B F_Z - (z_B - h) F_X][(1 - \cos kq)(1 - \cos kL) - k \sin kq(kL - \sin kL)]}{F_Z k [2(1 - \cos kL) - kL \sin kL]} \quad (2.43)$$

$$x_0''' = -\frac{[M_Y + x_B F_Z - (z_B - h) F_X][(1 - \cos kL) \sin kq - \sin kL(1 - \cos kq)]}{F_Z k [2(1 - \cos kL) - kL \sin kL]} \quad (2.44)$$

В системе координат $O_{\text{дат}}xz$, прогиб и угол поворота поперечного сечения стержня в точке контакта B определяются выражениями:

$$\Delta x_B = x(z_B) = x_0'' [1 - \cos k(z_B - h)] + x_0''' [k(z_B - h) - \sin k(z_B - h)] \quad (2.45)$$

$$\gamma = x'(z_B) = x_0'' k \sin k(z_B - h) + kx_0''' [1 - \cos k(z_B - h)] \quad (2.46)$$

2.2.4 Учет неидеальной формы тонкостенного упругого стержня

Задача представляет практический интерес, так как небольшое начальное искривление оси стержня обычно имеет место при изготовлении тонкостенных маложестких стержней [17; 69].

Из-за сложности задачи она рассматривается в упрощенной постановке, а именно принимается, что небольшое начальное искривление оси стержня наблюдается в одной из главных плоскостей, и все силы действуют в плоскости кривизны. Стержень при двухточечном контакте может рассматриваться как жестко защемленный на торцах (и, следовательно, подвержен сжимающим продольным усилиям) и нагружен также поперечной силой реакции в точке контакта B (рисунок 2.3в). Для случая шарнирного опирания стержня решение задачи получено С.П. Тимошенко [35]. В аналогичной постановке решение

построено далее для жестко заземленного упругого стержня. Существенно, что оно позволяет аналитически оценить возможность потери устойчивости стержня.

Предполагается, что ось стержня мало искривлена в одной из главных плоскостей стержня, и все силы действуют в плоскости кривизны. Пусть:

$$x(z) \approx x_0(z) + x_1(z) \quad (2.47)$$

где $x_0(z)$ – начальный прогиб;

$x_1(z)$ – прогиб, обусловленный действием внешних сил.

Изменение кривизны (при малых искривлениях):

$$\frac{d^2 x_1}{dz^2} = \frac{d^2 x}{dz^2} - \frac{d^2 x_0}{dz^2} \quad (2.48)$$

Дифференциальное уравнение, определяющее изменение кривизны оси стержня:

$$EI_Y \frac{d^2 x_1}{dz^2} = -M \quad (2.49)$$

Воспользуемся представлением изогнутой оси стержня в форме тригонометрического ряда, принимая [36]:

$$x_1 = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \left[1 - (-1)^n \cos \frac{2n\pi z}{L} \right] \quad (2.50)$$

Начальное искривление задается в форме такого же ряда:

$$x_0 = \sum_{n=1}^{\infty} b_n \left[1 - (-1)^n \cos \frac{2n\pi z}{L} \right] \quad (2.51)$$

Ограничиваясь одночленной аппроксимацией решения, получим:

$$x_1 = a \left(1 - \cos \frac{2\pi z}{L} \right) \quad (2.52)$$

$$x_0 = b \left(1 - \cos \frac{2\pi z}{L} \right) \quad (2.53)$$

При этом обращаются в нуль прогибы $x_i(z)$ и углы поворота $x_i'(z)$ на торцах стержня (при $z=0, z=L$).

Для определения неизвестных коэффициентов в (2.52), (2.53) воспользуемся началом возможных перемещений [35], в соответствии с которым, если деформируемая система находится в равновесии под действием приложенных к ней внешних сил, то сумма работ внешних и внутренних сил на

возможных бесконечно малых перемещениях точек системы равна нулю.

$$V = \frac{EI_Y}{2} \int_0^L \left(\frac{d^2 x_1}{dz^2} \right)^2 dz = \frac{EI_Y}{2} \left(\frac{2\pi}{L} \right)^4 a^2 \int_0^L \cos^2 \frac{2\pi z}{L} dz = \frac{4\pi^4 EI_Y}{L^3} a^2 \quad (2.54)$$

В качестве поперечной нагрузки, действующей на стержень, рассматривается сосредоточенная сила N_B , приложенная на расстоянии $(L-l)$ от верхнего торца стержня.

Работа, совершаемая поперечной силой на перемещении, соответствующем приращению δa в выражении (2.52), равна:

$$N_B \left[1 - \cos \frac{2\pi(L-l)}{L} \right] \delta a \quad (2.55)$$

Найдем работу сжимающей продольной силы F_z . Сближение торцов при изгибе (разность между длиной искривленной оси стержня после деформации и длиной хорды, соединяющей торцы стержня) будет равно:

$$\begin{aligned} \delta L &= \frac{1}{2} \int_0^L \left(\frac{dx}{dz} \right)^2 dz = \frac{1}{2} \int_0^L \left(\frac{dx_0}{dz} + \frac{dx_1}{dz} \right)^2 dz = \frac{1}{2} \int_0^L \left(\frac{2\pi}{L} b \sin \frac{2\pi z}{L} + \frac{2\pi}{L} a \sin \frac{2\pi z}{L} \right)^2 dz \\ &= \frac{1}{2} \left(\frac{2\pi}{L} \right)^2 \int_0^L (b+a)^2 \sin^2 \frac{2\pi z}{L} dz = \frac{\pi^2}{L} (a+b)^2 \end{aligned} \quad (2.56)$$

Та же разность до деформации:

$$\delta L_0 = \frac{1}{2} \int_0^L \left(\frac{dx_0}{dz} \right)^2 dz = \frac{1}{2} \int_0^L \left(\frac{2\pi}{L} b \sin \frac{2\pi z}{L} \right)^2 dz = \frac{\pi^2}{L} b^2 \quad (2.57)$$

Следовательно, изгиб стержня сопровождается изменением расстояния между его концами, равным:

$$\delta L - \delta L_0 = \frac{\pi^2}{L} (a+b)^2 - \frac{\pi^2}{L} b^2 = \frac{\pi^2}{L} (a^2 + 2ab) \quad (2.58)$$

Если коэффициенту a дать приращение δa , то ему будет соответствовать изменение расстояния между торцами:

$$\frac{\partial(\delta L - \delta L_0)}{\partial a} \delta a = \frac{2\pi^2}{L} (a+b) \delta a \quad (2.59)$$

При этом работа сжимающих сил:

$$\delta A = F_z \frac{2\pi^2}{L} (a+b) \delta a \quad (2.60)$$

В результате, уравнение для определения коэффициент a с учетом (2.54)÷(2.60) запишется в виде:

$$N_B \left[1 - \cos \frac{2\pi(L-l)}{L} \right] \delta a + F_Z \frac{2\pi^2}{L} (a+b) \delta a = \frac{\partial V}{\partial a} \delta a \quad (2.61)$$

Однако:

$$V = \frac{4\pi^4 EI_Y}{L^3} a^2 \Rightarrow \frac{\partial V}{\partial a} = \frac{8\pi^4 EI_Y}{L^3} a \quad (2.62)$$

С учетом (2.62) из (2.61) после преобразований находим:

$$a = N_B \left(1 - \cos \frac{2\pi(L-l)}{L} \right) \frac{1}{\frac{2\pi^2}{L} \left(\frac{4\pi^2 EI_Y}{L^2} - F_Z \right)} + \frac{F_Z b}{\frac{4\pi^2 EI_Y}{L^2} - F_Z} \quad (2.63)$$

Введем далее обозначение:

$$\alpha^2 = \frac{F_Z L^2}{4\pi^2 EI_Y} \quad (2.64)$$

Величина α^2 характеризует отношение сжимающей силы к величине Эйлеровой критической нагрузки для стержня с заземленными концами. Тогда:

$$F_Z = \frac{4\pi^2 EI_Y}{L^2} \alpha^2 \quad (2.65)$$

С учетом (2.64) выражение (2.63) приводится к виду:

$$a = N_B L^3 \left(1 - \cos \frac{2\pi(L-l)}{L} \right) \frac{1}{8\pi^4 EI_Y (1 - \alpha^2)} + \frac{F_Z b L^2}{4\pi^2 EI_Y (1 - \alpha^2)} \quad (2.66)$$

Подставляя (2.66) в (2.61), находим:

$$x_1(z) = \frac{N_B L^3 \left[1 - \cos \frac{2\pi(L-l)}{L} \right]}{8\pi^4 EI_Y (1 - \alpha^2)} \left(1 - \cos \frac{2\pi z}{L} \right) + \frac{F_Z b L^2}{4\pi^2 EI_Y (1 - \alpha^2)} \left(1 - \cos \frac{2\pi z}{L} \right) \quad (2.67)$$

В полученном решении первое слагаемое представляет собой прогиб прямого стержня, вторым слагаемым оценивается влияние начального искривления. Как видно, дополнительный прогиб не зависит от поперечной нагрузки и его можно найти, задавшись коэффициентом b .

Чтобы найти b , воспользуемся приемом, примененным в [35]. Рассмотрим случай жестко заземленного стержня, нагруженного равномерно распределенной поперечной нагрузкой интенсивности p . Выражение искривленной оси стержня при такой нагрузке представляется в виде [36].

$$x(z) = \frac{pL^4}{8\pi^4 EI_Y} \sum_{n=1}^{\infty} \left[1 - (-1)^n \cos \frac{2n\pi z}{L} \right] \quad (2.68)$$

Ограничиваясь только первым членом ряда, получим:

$$x(z) = \frac{pL^4}{8\pi^4 EI_Y} \left(1 - \cos \frac{2\pi z}{L} \right) \quad (2.69)$$

Максимальный прогиб при этом в середине пролета равен:

$$x_{\max} = x\left(\frac{L}{2}\right) = \frac{pL^4}{4\pi^4 EI_Y} \approx \frac{pL^4}{396 EI_Y} \quad (2.70)$$

С другой стороны, точное решение для этого прогиба дает стрелу прогиба f :

$$x_{\max} = x\left(\frac{L}{2}\right) = f = \frac{pL^4}{384 EI_Y} \quad (2.71)$$

Будем предполагать, что форма начального искривления стержня с заземленными краями такая же, как и при изгибе внешней поперечной равномерно распределенной нагрузкой со стрелой f . Тогда получим:

$$\frac{pL^4}{8\pi^4 EI_Y} \left(1 - \cos \frac{2\pi z}{L} \right) \Big|_{x=L/2} = \frac{pL^4}{384 EI_Y} = f \quad (2.72)$$

Следовательно, начальное искривление стержня может быть представлено в виде:

$$x_0 = b \left(1 - \cos \frac{2\pi z}{L} \right) = \frac{48}{\pi^4} \frac{pL^4}{384 EI_Y} \left(1 - \cos \frac{2\pi z}{L} \right) = \frac{48}{\pi^4} f \left(1 - \cos \frac{2\pi z}{L} \right) \quad (2.73)$$

откуда следует: $b = \frac{48f}{\pi^4}$. Тогда окончательно получим:

$$\begin{aligned} x_1(z) &= \frac{N_B L^3 \left[1 - \cos \frac{2\pi(L-l)}{L} \right] \left(1 - \cos \frac{2\pi z}{L} \right)}{8\pi^4 EI_Y (1 - \alpha^2)} + \frac{48 F_Z L^2 f}{4\pi^6 EI_Y (1 - \alpha^2)} \left(1 - \cos \frac{2\pi z}{L} \right) \\ &= \left\{ \frac{N_B L^3}{8} \left[1 - \cos \frac{2\pi(L-l)}{L} \right] + \frac{12}{\pi^2} F_Z f \right\} \frac{1 - \cos \frac{2\pi z}{L}}{\pi^4 EI_Y (1 - \alpha^2)} \end{aligned} \quad (2.74)$$

Полученное решение позволило аналитически оценить возможность потери устойчивости упругого нежесткого стержня. Если параметр α^2 близок к единице, то будет происходить существенное возрастание прогиба, то есть потеря устойчивости стержня. Неограниченное возрастание прогиба при $\alpha^2 \rightarrow 1$ является следствием математической идеализации задачи.

2.3 Анализ сил при контакте по фаскам

Итак, первый шаг закона управления должен состоять в том, чтобы найти край отверстия втулки. При этом вал наклонен относительно вертикальной оси втулки на угол θ . Точкой соприкосновения с краем отверстия будет точка C (рисунок 2.4). В точке контакта C возникают нормальная сила \vec{N}_C и сила трения \vec{F}_C .

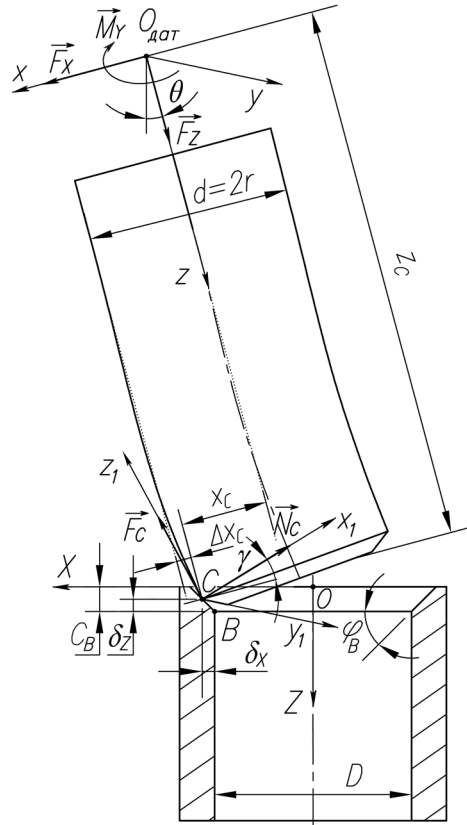


Рисунок 2.4 – Схема действия сил на нежесткий вал при контакте по фаскам

где $Cx_1y_1z_1$ – система координат, совмещенная с точкой C , ось Cz_1 совпадает с \vec{F}_C , ось Cx_1 совпадает с \vec{N}_C .

Координаты точки C в системе координат $Cx_1y_1z_1$:

$$(x_{1c} \quad y_{1c} \quad z_{1c} \quad p)^T = (0 \quad 0 \quad 0 \quad 1)^T \quad (2.75)$$

Матрица перехода T_1 от $Cx_1y_1z_1$ к $O_{дат}xyz$ имеет вид:

$$T_1 = \begin{pmatrix} \cos \gamma & 0 & -\sin \gamma & x_c \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \gamma & 0 & \cos \gamma & z_c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.76)$$

Координаты точки C в системе координат $O_{дат}xyz$:

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \gamma & 0 & -\sin \gamma & x_C \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \gamma & 0 & \cos \gamma & z_C \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_C \\ 0 \\ z_C \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.77)$$

Определим нормальную силу \vec{N}_C в системе координат $Cx_1y_1z_1$:

$$(N_{x_1,C} \quad N_{y_1,C} \quad N_{z_1,C} \quad 0)^T = (N_C \quad 0 \quad 0 \quad 0)^T \quad (2.78)$$

Тогда сила трения \vec{F}_C в системе координат $Cx_1y_1z_1$:

$$(F_{x_1,C} \quad F_{y_1,C} \quad F_{z_1,C} \quad 0)^T = (0 \quad 0 \quad F_C \quad 0)^T \quad (2.79)$$

Нормальная сила \vec{N}_C в системе координат $O_{дат}xyz$ определяется как:

$$\begin{pmatrix} N_{x,C} \\ N_{y,C} \\ N_{z,C} \\ 0 \end{pmatrix} = T_1 \begin{pmatrix} N_{x_1,C} \\ N_{y_1,C} \\ N_{z_1,C} \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \gamma & 0 & -\sin \gamma & x_C \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \gamma & 0 & \cos \gamma & z_C \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} N_C \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} N_C \cos \gamma \\ 0 \\ N_C \sin \gamma \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.80)$$

Сила трения \vec{F}_C в системе координат $O_{дат}xyz$ определяется как:

$$\begin{pmatrix} F_{x,C} \\ F_{y,C} \\ F_{z,C} \\ 0 \end{pmatrix} = T_1 \begin{pmatrix} F_{x_1,C} \\ F_{y_1,C} \\ F_{z_1,C} \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \gamma & 0 & -\sin \gamma & x_C \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \gamma & 0 & \cos \gamma & z_C \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ F_C \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -F_C \sin \gamma \\ 0 \\ F_C \cos \gamma \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.81)$$

Моменты, возникающие от силы \vec{N}_C в точке $O_{дат}$:

$$\begin{pmatrix} M_{x,N_C} \\ M_{y,N_C} \\ M_{z,N_C} \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -z_C & 0 & 0 \\ z_C & 0 & -x_C & 0 \\ 0 & x_C & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} N_C \cos \gamma \\ 0 \\ N_C \sin \gamma \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ N_C (z_C \cos \gamma - x_C \sin \gamma) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.82)$$

Моменты, возникающие от силы трения \vec{F}_C в точке $O_{дат}$:

$$\begin{pmatrix} M_{x,F_C} \\ M_{y,F_C} \\ M_{z,F_C} \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -z_C & 0 & 0 \\ z_C & 0 & -x_C & 0 \\ 0 & x_C & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -F_C \sin \gamma \\ 0 \\ F_C \cos \gamma \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -F_C (z_C \sin \gamma + x_C \cos \gamma) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.83)$$

Объединив выражения для сил и моментов (2.80)÷(2.83), получаем уравнения равновесия в точке C :

$$-N_C \sin \gamma - F_C \cos \gamma + F_Z = 0 \quad (2.84)$$

$$-N_C \cos \gamma + F_C \sin \gamma + F_X = 0 \quad (2.85)$$

$$N_C(z_C \cos \gamma - x_C \sin \gamma) - F_C(z_C \sin \gamma + x_C \cos \gamma) - M_Y = 0 \quad (2.86)$$

Так как углы θ и γ предполагаются малыми, то справедливо допущение:

$$\sin \gamma \approx \gamma, \cos \gamma \approx 1 - \gamma^2/2 \approx 1 \quad (2.87)$$

Тогда приближенные уравнения равновесия примут вид:

$$-N_C \gamma - N_C \mu + F_Z = 0 \quad (2.88)$$

$$-N_C + N_C \mu \gamma + F_X = 0 \quad (2.89)$$

$$N_C(z_C - x_C \gamma) - N_C \mu(z_C \gamma + x_C) - M_Y = 0 \quad (2.90)$$

Разрешая первые два уравнения (2.88) и (2.89), находим значения N_C :

$$N_C = \frac{F_X + F_Z \gamma}{1 + \gamma^2} \quad (2.91)$$

Из третьего уравнения (2.90) следует:

$$z_C(1 - \gamma \mu) - x_C(\gamma + \mu) - \frac{M_Y(1 + \gamma^2)}{F_X + F_Z \gamma} = 0 \quad (2.92)$$

При этом прогиб и угол поворота в точке C определяются из решения задачи об изгибе консольно защемленного упругого стержня (2.32), (2.33):

$$\begin{cases} \Delta x_C = x(z_C) = -\frac{M_Y + hF_X}{F_Z} [1 - \cos k(z_C - h)] + \frac{F_X}{F_Z} \left[(z_C - h) - \frac{\sin k(z_C - h)}{k} \right] \\ \gamma_C = -\frac{M_Y + hF_X}{F_Z} k \sin k(z_C - h) + \frac{F_X}{F_Z} [1 - \cos k(z_C - h)] \end{cases} \quad (2.93)$$

Абсцисса точки C в локальной системе координат определяется из равенства (2.93):

$$\begin{aligned} x_C &= r - \Delta x_C \\ &= r + \left\{ \frac{M_Y + hF_X}{F_Z} [1 - \cos k(z_C - h)] - \frac{F_X}{F_Z} \left[(z_C - h) - \frac{\sin k(z_C - h)}{k} \right] \right\} \end{aligned} \quad (2.94)$$

Решая уравнения (2.92), (2.93) и (2.94) получаем значения x_C , z_C , γ_C .

Координаты точки C в глобальной системе отсчета равны:

$$X_C = X_{O_{\text{дат}}} + x_C \cos \theta - z_C \sin \theta \quad (2.95)$$

$$Z_C = Z_{O_{\text{дат}}} + x_C \sin \theta + z_C \cos \theta \quad (2.96)$$

Из геометрического соотношения на рисунке 2.4, имеем:

$$\delta_x = \delta_z \tan \varphi_B \Rightarrow \delta_x = (C_B - Z_C) \tan \varphi_B \quad (2.97)$$

Так как $X_C = X_B + \delta_x$, а угол θ мал, из уравнения (2.96), (2.97) получим угол перекоса осей нежесткого вала и жесткой втулки:

$$\theta = \frac{X_{O_{дат}} - X_B + x_C + \tan \varphi_B (Z_{O_{дат}} + z_C - C_B)}{z_C - x_C \tan \varphi_B} \quad (2.98)$$

Тогда погрешности положения осей сопрягаемых поверхностей в сборочном устройстве рассчитывают по формулам (2.4), (2.5) и (2.6), включающим следующие значения: $\theta_{X1}, \theta_{Y1}, \Delta_{\Sigma X1}, \Delta_{\Sigma Y1}$.

Выполнив поворот на угол θ_{X1}, θ_{Y1} и смещения $\Delta_{\Sigma X1}, \Delta_{\Sigma Y1}$ для устранения погрешностей положения при сопряжении, вал под действием приложенного усилия движется вниз вдоль оси OZ и касается крайней точки B фаски втулки. В данный момент возникает состояние одноточечного контакта.

2.4 Анализ сил при одноточечном контакте

Координаты точки B в глобальной системе отсчета $OXYZ$ в предположении, что угол θ мал, связаны с локальными координатами соотношениями:

$$X_B = X_{O_{дат}} + x_B \cos \theta - z_B \sin \theta \Rightarrow X_B = X_{O_{дат}} + x_B - z_B \theta \quad (2.99)$$

$$Z_B = Z_{O_{дат}} + x_B \sin \theta + z_B \cos \theta \Rightarrow Z_B = Z_{O_{дат}} + x_B \theta + z_B \quad (2.100)$$

Обозначим контакт в точке на нежестком валу (точка B). В этой точке действуют нормальная сила \vec{N}_B и сила трения \vec{F}_B (рисунок 2.5).

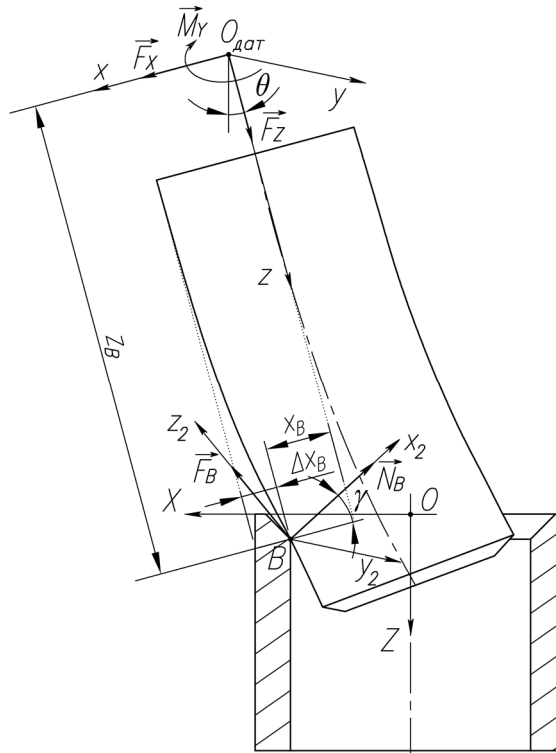


Рисунок 2.5 – Схема действия сил на вал при одноточечном контакте

где $Bx_2y_2z_2$ – система координат, совмещенная с точкой B , ось Bz_2 совпадает с силой трения \vec{F}_B , ось Bx_2 совпадает с нормальной силой \vec{N}_B .

Определим координаты точки B в системе координат $Bx_2y_2z_2$:

$$(x_{2B} \quad y_{2B} \quad z_{2B} \quad p)^T = (0 \quad 0 \quad 0 \quad 1)^T \quad (2.101)$$

Матрица перехода T_2 от $Bx_2y_2z_2$ к $O_{дат}xyz$ имеет вид:

$$T_2 = \begin{pmatrix} \cos \gamma & 0 & -\sin \gamma & x_B \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \gamma & 0 & \cos \gamma & z_B \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.102)$$

Определим координаты точки B в системе координат $O_{дат}xyz$:

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \gamma & 0 & -\sin \gamma & x_B \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \gamma & 0 & \cos \gamma & z_B \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_B \\ 0 \\ z_B \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.103)$$

Определим нормальную силу \vec{N}_B в системе координат $Bx_2y_2z_2$:

$$(N_{X2,B} \quad N_{Y2,B} \quad N_{Z2,B} \quad 0)^T = (N_B \quad 0 \quad 0 \quad 0)^T \quad (2.104)$$

Тогда сила трения \vec{F}_B в системе координат $Bx_2y_2z_2$:

$$(F_{X2,B} \quad F_{Y2,B} \quad F_{Z2,B} \quad 0)^T = (0 \quad 0 \quad F_B \quad 0)^T \quad (2.105)$$

Нормальная сила \vec{N}_B в системе координат $O_{дат}xyz$ определяется как:

$$\begin{pmatrix} N_{X,B} \\ N_{Y,B} \\ N_{Z,B} \\ 0 \end{pmatrix} = T_2 \begin{pmatrix} N_{X2,B} \\ N_{Y2,B} \\ N_{Z2,B} \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \gamma & 0 & -\sin \gamma & x_B \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \gamma & 0 & \cos \gamma & z_B \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} N_B \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} N_B \cos \gamma \\ 0 \\ N_B \sin \gamma \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.106)$$

Сила трения \vec{F}_B в системе координат $O_{дат}xyz$ определяется как:

$$\begin{pmatrix} F_{X,B} \\ F_{Y,B} \\ F_{Z,B} \\ 0 \end{pmatrix} = T_2 \begin{pmatrix} F_{X2,B} \\ F_{Y2,B} \\ F_{Z2,B} \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \gamma & 0 & -\sin \gamma & x_B \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \gamma & 0 & \cos \gamma & z_B \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ F_B \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -F_B \sin \gamma \\ 0 \\ F_B \cos \gamma \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.107)$$

Моменты, возникающие от силы \vec{N}_B в точке $O_{дат}$:

$$\begin{pmatrix} M_{X, N_B} \\ M_{Y, N_B} \\ M_{Z, N_B} \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -z_B & 0 & 0 \\ z_B & 0 & -x_B & 0 \\ 0 & x_B & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} N_B \cos \gamma \\ 0 \\ N_B \sin \gamma \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ N_B (z_B \cos \gamma - x_B \sin \gamma) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.108)$$

Моменты, возникающие от силы трения \vec{F}_B в точке $O_{\text{дат}}$:

$$\begin{pmatrix} M_{X, F_B} \\ M_{Y, F_B} \\ M_{Z, F_B} \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -z_B & 0 & 0 \\ z_B & 0 & -x_B & 0 \\ 0 & x_B & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -F_B \sin \gamma \\ 0 \\ F_B \cos \gamma \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -F_B (z_B \sin \gamma + x_B \cos \gamma) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.109)$$

С учетом выражений для сил и моментов (2.106)–(2.109), уравнения равновесия деформированного стержня под действием приложенных к нему сил и сил реакции в точке контакта B принимают вид:

$$-N_B \sin \gamma - F_B \cos \gamma + F_Z = 0 \quad (2.110)$$

$$-N_B \cos \gamma + F_B \sin \gamma + F_X = 0 \quad (2.111)$$

$$N_B (z_B \cos \gamma - x_B \sin \gamma) - F_B (z_B \sin \gamma + x_B \cos \gamma) - M_Y = 0 \quad (2.112)$$

Сила трения в точке B по закону Кулона определяется соотношением:

$$F_B = \mu N_B \quad (2.113)$$

С учетом (2.87) приближенные уравнения равновесия запишутся в виде:

$$-N_B \gamma - N_B \mu + F_Z = 0 \quad (2.114)$$

$$-N_B + N_B \mu \gamma + F_X = 0 \quad (2.115)$$

$$N_B (z_B - x_B \gamma) - N_B \mu (z_B \gamma + x_B) - M_Y = 0 \quad (2.116)$$

Решая первые два уравнения (2.114) и (2.115), находим значения N_B и γ :

$$N_B = \frac{F_X + F_Z \gamma}{1 + \gamma^2} \quad (2.117)$$

Из третьего уравнения (2.116) следует:

$$z_B (1 - \gamma \mu) - x_B (\gamma + \mu) - \frac{M_Y (1 + \gamma^2)}{F_X + F_Z \gamma} = 0 \quad (2.118)$$

При этом x_B , γ_B определяется из решения задачи об изгибе консольно защемленного упругого стержня:

$$\begin{cases} \Delta x_B = -\frac{M_Y + hF_X}{F_Z} [1 - \cos k(z_B - h)] + \frac{F_X}{F_Z} \left[(z_B - h) - \frac{\sin k(z_B - h)}{k} \right] \\ \gamma_B = -\frac{M_Y + hF_X}{F_Z} k \sin k(z_B - h) + \frac{F_X}{F_Z} [1 - \cos k(z_B - h)] \end{cases} \quad (2.119)$$

Абсцисса точки B в локальной системе координат определяется из равенства (2.119):

$$x_B = r + \left\{ \frac{M_Y + hF_X}{F_Z} [1 - \cos k(z_B - h)] - \frac{F_X}{F_Z} \left[(z_B - h) - \frac{\sin k(z_B - h)}{k} \right] \right\} \quad (2.120)$$

Решая уравнения (2.118), (2.119) и (2.120) получаем значения x_B , z_B , γ_B .

Определив величины x_B и z_B , можно найти угол перекоса θ осей вала и втулки из уравнения (2.99):

$$\theta = \frac{X_{O_{\text{дат}}} - X_B - x_B}{z_B} \quad (2.121)$$

Тогда погрешности положения осей сопрягаемых поверхностей в сборочном устройстве рассчитывают по формулам (2.4), (2.5) и (2.6), включающим следующие переменные: θ_{X1} , θ_{Y1} , $\Delta_{\Sigma X1}$, $\Delta_{\Sigma Y1}$.

После выполнения поворотов на углы θ_{X1} , θ_{Y1} и смещений $\Delta_{\Sigma X1}$, $\Delta_{\Sigma Y1}$ для устранения погрешностей положения при сопряжении, вал под действием приложенного усилия движется вниз вдоль оси OZ и возникает состояние двухточечного контакта.

2.5 Анализ сил при двухточечном контакте

При сопряжении в состоянии двухточечного контакта нежесткого вала и жесткой втулки, вал подвергается воздействию продольной сжимающей силы, приложенной со стороны схвата робота, а на другом торце – воздействию поперечных сил реакции, что приводит в общем случае к продольно-поперечному изгибу вала (рисунок 2.6). Пусть A - нижняя точка контакта торца вала и отверстия втулки, а B - верхняя точка контакта (между фаской втулки и стенкой вала). На точках контакта A и B проявляются нормальные силы \vec{N}_A и \vec{N}_B , а также силы трения \vec{F}_A и \vec{F}_B .

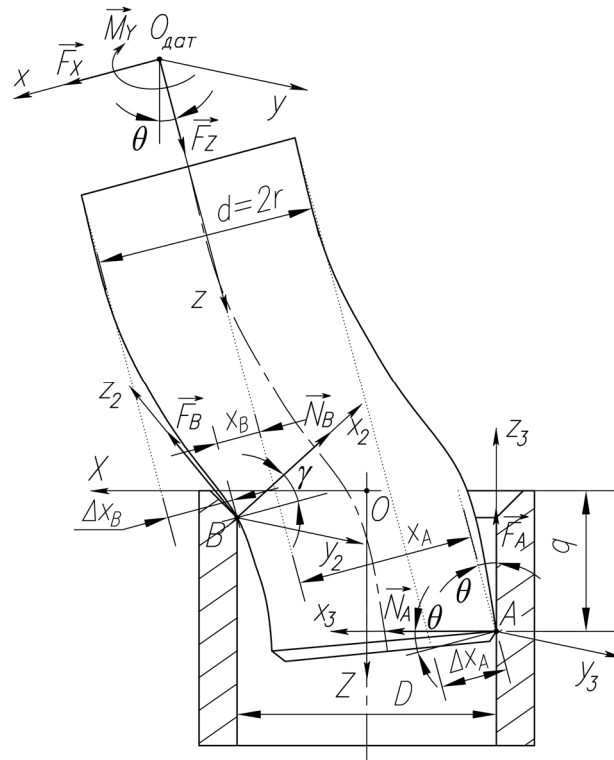


Рисунок 2.6 – Схема действия сил на вал при двухточечном контакте

где $Bx_2y_2z_2$ – система координат, совмещенная с точкой B , ось Bz_2 совпадает с \vec{F}_B , ось Bx_2 совпадает с \vec{N}_B ;

$Ax_3y_3z_3$ – система координат, совмещенная с точкой A , ось Az_3 совпадает с \vec{F}_A , ось Ax_3 совпадает с \vec{N}_A .

Матрица перехода T_2 от $Bx_2y_2z_2$ к $O_{\text{дар}}xyz$ (рисунок 2.6) имеет вид:

$$T_2 = \begin{pmatrix} \cos \gamma & 0 & -\sin \gamma & x_B \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \gamma & 0 & \cos \gamma & z_B \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.122)$$

Координаты точки B в системе координат $O_{\text{дар}}xyz$:

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \gamma & 0 & -\sin \gamma & x_B \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \gamma & 0 & \cos \gamma & z_B \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_B \\ 0 \\ z_B \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.123)$$

Тогда можно найти нормальную силу \vec{N}_B в системе координат $Bx_2y_2z_2$:

$$\begin{pmatrix} N_{x_2, B} & N_{y_2, B} & N_{z_2, B} & 0 \end{pmatrix}^T = \begin{pmatrix} N_B & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}^T \quad (2.124)$$

Силу трения \vec{F}_B в системе координат $Bx_2y_2z_2$ определим из соотношения:

$$\begin{pmatrix} F_{x_2, B} & F_{y_2, B} & F_{z_2, B} & 0 \end{pmatrix}^T = \begin{pmatrix} 0 & 0 & F_B & 0 \end{pmatrix}^T \quad (2.125)$$

Нормальная сила \vec{N}_B в системе координат $O_{\text{дат}}xyz$ определяется как:

$$\begin{pmatrix} N_{X,B} \\ N_{Y,B} \\ N_{Z,B} \\ 0 \end{pmatrix} = T_2 \begin{pmatrix} N_{X2,B} \\ N_{Y2,B} \\ N_{Z2,B} \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \gamma & 0 & -\sin \gamma & x_B \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \gamma & 0 & \cos \gamma & z_B \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} N_B \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} N_B \cos \gamma \\ 0 \\ N_B \sin \gamma \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.126)$$

Сила трения \vec{F}_B в системе координат $O_{\text{дат}}xyz$ определяется как:

$$\begin{pmatrix} F_{X,B} \\ F_{Y,B} \\ F_{Z,B} \\ 0 \end{pmatrix} = T_2 \begin{pmatrix} F_{X2,B} \\ F_{Y2,B} \\ F_{Z2,B} \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \gamma & 0 & -\sin \gamma & x_B \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \gamma & 0 & \cos \gamma & z_B \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ F_B \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -F_B \sin \gamma \\ 0 \\ F_B \cos \gamma \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.127)$$

Моменты, возникающие от силы \vec{N}_B в точке $O_{\text{дат}}$:

$$\begin{pmatrix} M_{X,N_B} \\ M_{Y,N_B} \\ M_{Z,N_B} \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -z_B & 0 & 0 \\ z_B & 0 & -x_B & 0 \\ 0 & x_B & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} N_B \cos \gamma \\ 0 \\ N_B \sin \gamma \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ N_B (z_B \cos \gamma - x_B \sin \gamma) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.128)$$

Моменты, возникающие от силы трения \vec{F}_B в точке $O_{\text{дат}}$:

$$\begin{pmatrix} M_{X,F_B} \\ M_{Y,F_B} \\ M_{Z,F_B} \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -z_B & 0 & 0 \\ z_B & 0 & -x_B & 0 \\ 0 & x_B & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -F_B \sin \gamma \\ 0 \\ F_B \cos \gamma \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -F_B (z_B \sin \gamma + x_B \cos \gamma) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.129)$$

Матрица перехода T_3 от $Ax_3y_3z_3$ к $O_{\text{дат}}xyz$ имеет вид:

$$T_3 = \begin{pmatrix} -\cos \theta & 0 & \sin \theta & x_A \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta & z_A \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.130)$$

Координаты точки A в системе координат $O_{\text{дат}}xyz$ определим из соотношения:

$$\begin{pmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\cos \theta & 0 & \sin \theta & x_A \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta & z_A \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_A \\ 0 \\ z_A \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.131)$$

Нормальная сила \vec{N}_A в системе координат $Ax_3y_3z_3$ определяется из соотношения:

$$(N_{X3,A} \quad N_{Y3,A} \quad N_{Z3,A} \quad 0)^T = (N_A \quad 0 \quad 0 \quad 0)^T \quad (2.132)$$

Силу трения \vec{F}_A в системе координат $Ax_3y_3z_3$ находим из соотношения:

$$(F_{X3,A} \quad F_{Y3,A} \quad F_{Z3,A} \quad 0)^T = (0 \quad 0 \quad F_A \quad 0)^T \quad (2.133)$$

Нормальная сила \vec{N}_A в системе координат $O_{\text{дат}}xyz$ определяется как:

$$\begin{pmatrix} N_{X,A} \\ N_{Y,A} \\ N_{Z,A} \\ 0 \end{pmatrix} = T_3 \begin{pmatrix} N_{X3,A} \\ N_{Y3,A} \\ N_{Z3,A} \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\cos\theta & 0 & \sin\theta & x_A \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta & z_A \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} N_A \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -N_A \cos\theta \\ 0 \\ N_A \sin\theta \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.134)$$

Сила трения \vec{F}_A в системе координат $O_{\text{дат}}xyz$ определяется как:

$$\begin{pmatrix} F_{X,A} \\ F_{Y,A} \\ F_{Z,A} \\ 0 \end{pmatrix} = T_3 \begin{pmatrix} F_{X3,A} \\ F_{Y3,A} \\ F_{Z3,A} \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\cos\theta & 0 & \sin\theta & x_A \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta & z_A \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ F_A \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_A \sin\theta \\ 0 \\ F_A \cos\theta \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.135)$$

Моменты, возникающие от силы \vec{N}_A в точке $O_{\text{дат}}$:

$$\begin{pmatrix} M_{X,N_A} \\ M_{Y,N_A} \\ M_{Z,N_A} \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -z_A & 0 & 0 \\ z_A & 0 & x_A & 0 \\ 0 & x_A & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -N_A \cos\theta \\ 0 \\ N_A \sin\theta \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -N_A (z_A \cos\theta - x_A \sin\theta) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.136)$$

Моменты, возникающие от силы трения \vec{F}_A в точке $O_{\text{дат}}$:

$$\begin{pmatrix} M_{X,F_A} \\ M_{Y,F_A} \\ M_{Z,F_A} \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -z_A & 0 & 0 \\ z_A & 0 & x_A & 0 \\ 0 & x_A & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_A \sin\theta \\ 0 \\ F_A \cos\theta \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ F_A (z_A \sin\theta + x_A \cos\theta) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.137)$$

Уравнения мгновенного (квазистатического) равновесия деформированного стержня под действием приложенных к нему сил и сил реакции в случае двухточечного контакта имеют вид:

$$F_Z - N_B \sin\gamma - F_B \cos\gamma - F_A \cos\theta - N_A \sin\theta = 0 \quad (2.138)$$

$$F_X - N_B \cos\gamma + F_B \sin\gamma - F_A \sin\theta + N_A \cos\theta = 0 \quad (2.139)$$

$$N_B (z_B \cos\gamma - x_B \sin\gamma) - F_B (z_B \sin\gamma + x_B \cos\gamma) + F_A (z_A \sin\theta + x_A \cos\theta) - N_A (z_A \cos\theta - x_A \sin\theta) - M_Y = 0 \quad (2.140)$$

Сила трения в точке A и B определится соотношением вида:

$$F_B = \mu N_B; F_A = \mu N_A \quad (2.141)$$

С учетом (2.87) уравнения (2.138)÷(2.140) принимают вид:

$$F_Z - F_A - N_A \theta - N_B \gamma - F_B = 0 \quad (2.142)$$

$$F_X - F_A \theta + N_A - N_B + F_B \gamma = 0 \quad (2.143)$$

$$F_A (z_A \theta + x_A) - N_A (z_A - x_A \theta) + N_B (z_B - x_B \gamma) - F_B (z_B \gamma + x_B) - M_Y = 0 \quad (2.144)$$

Разрешая первые два уравнения (2.142) и (2.143), находим значения реакций N_A и N_B :

$$N_B = \frac{F_X (\mu + \theta) + F_Z (1 - \mu \theta)}{(\theta + \mu)(1 - \mu \gamma) + (\mu + \gamma)(1 - \mu \theta)} \quad (2.145)$$

$$N_A = -\frac{F_X (\gamma + \mu) - F_Z (1 - \mu \gamma)}{(\theta + \mu)(1 - \mu \gamma) + (\mu + \gamma)(1 - \mu \theta)} \quad (2.146)$$

Используя полученное решение (2.45) и учитывая (2.43), (2.44), можно записать абсциссу точки B в локальной системе координат в виде:

$$x_B = r - \Delta x_B = r - \left\{ x_0'' [1 - \cos k(z_B - h)] + x_0''' [k(z_B - h) - \sin k(z_B - h)] \right\} \quad (2.147)$$

Неизвестные x_B , z_B , θ далее находятся из уравнений (2.99), (2.100):

$$x_B = X_B - X_{O_{\text{дат}}} + z_B \theta \quad (2.148)$$

$$z_B = Z_B - Z_{O_{\text{дат}}} - x_B \theta \quad (2.149)$$

Из уравнений (2.148) с учетом (2.147) следует:

$$\theta = \frac{X_{O_{\text{дат}}} - X_B + x_B}{z_B} = \frac{\theta_B^*}{z_B} \quad (2.150)$$

где $\theta_B^* = X_{O_{\text{дат}}} - X_B + r - \left\{ x_0'' [1 - \cos k(z_B - h)] + x_0''' [k(z_B - h) - \sin k(z_B - h)] \right\}$.

Подставляя (2.148) и (2.150) в (2.149), получим уравнение относительно z_B :

$$z_B^2 + (Z_{O_{\text{дат}}} - Z_B) z_B + (X_{O_{\text{дат}}} - X_B) \theta_B^* + \theta_B^{*2} = 0 \quad (2.151)$$

Уравнение (2.151) – это квадратное алгебраическое уравнение относительно z_B , точное решение которого имеет вид:

$$(z_B)_{1,2} = \frac{Z_{O_{\text{дат}}} - Z_B \pm \sqrt{\zeta}}{2} \quad (2.152)$$

где $\zeta = (Z_{O_{\text{дат}}} - Z_B)^2 - 4[(X_{O_{\text{дат}}} - X_B) \theta_B^* + \theta_B^{*2}]$ - дискриминант уравнения.

На данном этапе найдены 4 неизвестных: x_B , z_B , θ , γ . Пусть X_A – координаты точки A в абсолютной системе отсчета. Во время сопряжения X_A является константой. Таким образом:

$$X_A = X_{O_{\text{дат}}} + x_A - z_A \theta \quad (2.153)$$

$$D = X_B - X_A \Rightarrow X_A = -D/2 \quad (2.154)$$

Уравнения (2.153) и (2.154) дают:

$$x_A = z_A \theta + X_B - D - X_{O_{дат}} \quad (2.155)$$

Из геометрических соотношений на рисунке 2.6, находим координаты точки A :

$$z_A \approx \frac{q - C_B}{\cos \theta} + z_B \approx \frac{q - C_B}{\theta} + \frac{Z_B - Z_{O_{дат}} \pm \sqrt{\zeta}}{2} \quad (2.156)$$

Полученные соотношения позволяют определить все параметры, определяющие деформированное состояние нежесткого вала при сопряжении со втулкой: силы реакции и трения в точках контакта, прогибы и углы поворота сечений $N_A, N_B, F_A, F_B, x_A, z_A, x_B, z_B, \theta, \gamma$.

Влияние коэффициента трения на процесс сборки составляет существенный фактор, поскольку выбор значения коэффициента трения осуществляется на основе данных, представленных в справочниках. Следовательно, для повышения точности расчетов, связанных со сборкой нежесткого вала и жесткой втулки, необходимо решить задачу определения коэффициента трения, учитывающего специфику конкретных деталей и используемых материалов.

Для повышения точности расчетов, связанных с сопряжением нежесткого вала со втулкой, представлялось целесообразным уточнить значение коэффициента трения μ . Определение коэффициента трения важно для последующего создания алгоритмов позиционно-силового управления сборочным роботом. Предлагается методика определения коэффициента трения с помощью СМД в процессе сборки. Коэффициент трения зависит от качества поверхности деталей и характера их контакта. Знание коэффициента трения необходимо для определения величин сил взаимодействия деталей при сборке [18; 19]. В работе [101] представлена методика определения коэффициента трения абсолютно жестких деталей при сборке. Однако для нежестких деталей необходимость учета деформации детали значительно усложняет решение задачи определения коэффициента трения при автоматическом сопряжении. Поскольку процесс двухточечного контакта занимает большую часть времени сопряжения, определение коэффициента трения на этом этапе является крайне важным. Преобразовав уравнение (2.144), получим:

$$N_A [z_A (\mu\theta - 1) + x_A (\mu + \theta)] + N_B [z_B (1 - \mu\gamma) - x_B (\gamma + \mu)] = M_Y \quad (2.157)$$

Подставляя значения x_B , z_B , θ , γ , x_A , z_A в уравнения (2.145), (2.146), (2.157) получаем коэффициент трения μ .

2.6 Определение условий заклинивания, соотношение сил и моментов

Процесс сборки фактически представляет собой настройку в условиях геометрических и силовых ограничений. Если эти ограничения не являются корректными, то могут возникать неблагоприятные ситуации, такие как заедание и заклинивание [3; 5; 90]. Для того, чтобы прогнозировать успешность реализации сборочной операции, следует рассматривать не только геометрические параметры деталей, но и условия контактного взаимодействия непосредственно в сборочной зоне.

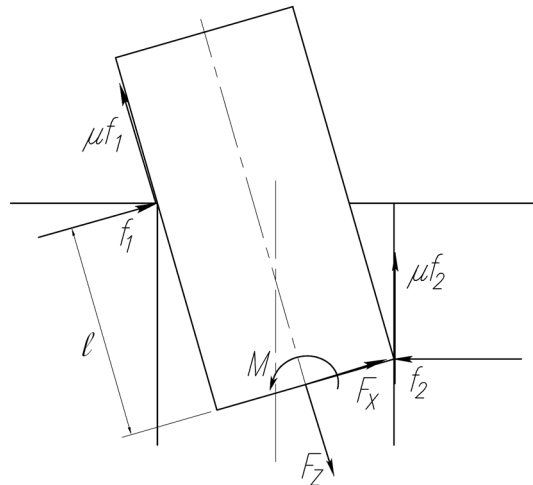


Рисунок 2.7 – Силы, действующие на жесткий стержень

Заклинивание – это состояние, при котором вал неподвижен вследствие того, что внешние силовые воздействия на вал в осевом направлении не превосходят сил сопротивления в контактной зоне. Соотношения между силовыми факторами, при которых возникает заклинивание абсолютно жестких деталей, впервые были сформулированы Simunovic S. [28; 90; 104].

Рассмотрим вал с двумя контактными точками. Simunovic S. установил критерий заклинивания для жесткого стержня (рисунок 2.7) [90]. Во избежание заклинивания жесткого вала при его двухточечном контакте со втулкой следует соблюдать неравенства [104]:

$$\begin{cases} \left| \frac{F_X}{F_Z} \right| \leq \frac{1}{\mu} \\ \left| \frac{M}{rF_Z} + \frac{\mu(1+\lambda)F_X}{F_Z} \right| \leq \lambda \end{cases} \quad (2.158)$$

где $\lambda = l/(2r\mu)$ – безразмерная глубина сопряжения;

$2r$ – диаметр вала; μ – коэффициент трения;

l – длина зоны сопряжения деталей;

F_X, F_Z, M – компоненты внешних усилий и момента, приложенных к валу.

Заклинивание, как правило, происходит на этапе двухточечного контакта. Рассмотрим контактную ситуацию на данном этапе сопряжения. На данном этапе нежесткий вал подвергается воздействию продольной сжимающей силы, приложенной со стороны схвата робота, а на другом торце – воздействию поперечных сил реакции, что приводит в общем случае к продольно-поперечному изгибу вала [3; 5] (рисунок 2.6).

Из условий квазистатического равновесия (2.142)÷(2.144) и соотношения (2.141) следует [3; 5; 109]:

$$F_Z = N_A(\mu + \theta) + N_B(\gamma + \mu) \quad (2.159)$$

$$F_X = N_A(\mu\theta - 1) + N_B(1 - \mu\gamma) \quad (2.160)$$

$$M_Y = N_A[\mu(z_A\theta + x_A) - (z_A - x_A\theta)] + N_B[(z_B - x_B\gamma) - \mu(z_B\gamma + x_B)] \quad (2.161)$$

Как видно из уравнений (2.159)÷(2.161), F_X , F_Z и M_Y являются линейными функциями N_A и N_B .

Чтобы корректно описать состояние двухточечного контакта, важно установить взаимосвязь между состоянием одноточечного контакта и состоянием двухточечного контакта. Так как процесс сопряжения вала со втулкой является непрерывным, то соотношения для одноточечного контакта должны получаться как предельные случаи из соотношений для двухточечного контакта.

Докажем справедливость следующего утверждения: соотношение сил и моментов в состоянии равновесия при двухточечном контакте может быть представлено линейной функцией двух предельных состояний одноточечного контакта.

Чтобы установить данный предельный переход, выполним следующее преобразование уравнений (2.159)÷(2.161), записав их в виде:

$$F_Z = k_{Z1}N_A + k_{Z2}N_B \quad (2.162)$$

$$F_X = k_{X1}N_A + k_{X2}N_B \quad (2.163)$$

$$M_Y = k_{M1}N_A + k_{M2}N_B \quad (2.164)$$

где $k_{Z1} = \mu + \theta$; $k_{Z2} = \gamma + \mu$;

$$k_{X1} = \mu\theta - 1; k_{X2} = 1 - \mu\gamma;$$

$$k_{M1} = \mu(z_A\theta + x_A) - (z_A - x_A\theta);$$

$$k_{M2} = (z_B - x_B\gamma) - \mu(z_B\gamma + x_B).$$

Тогда соотношения сил и моментов в общем случае двухточечного контакта могут быть представлены в виде:

$$\frac{F_X}{F_Z} = \frac{k_{X1}N_A + k_{X2}N_B}{k_{Z1}N_A + k_{Z2}N_B} \quad (2.165)$$

$$\frac{M_Y}{rF_Z} = \frac{1}{r\Delta_0} \left[- \left(\frac{k_{Z2}}{k_{Z1}} - \frac{k_{M2}}{k_{M1}} \right) \frac{k_{M1}}{k_{X1}} \frac{F_X}{F_Z} + \left(\frac{k_{X2}}{k_{X1}} - \frac{k_{M2}}{k_{M1}} \right) \frac{k_{M1}}{k_{Z1}} \right] \quad (2.166)$$

или:

$$\frac{M_Y}{rF_Z} = -a \frac{F_X}{F_Z} + b \quad (2.167)$$

$$\text{где } \Delta_0 = \frac{k_{X2}}{k_{X1}} - \frac{k_{Z2}}{k_{Z1}}; a = \left(\frac{k_{Z2}}{k_{Z1}} - \frac{k_{M2}}{k_{M1}} \right) \frac{k_{M1}}{r\Delta_0 k_{X1}}; b = \left(\frac{k_{X2}}{k_{X1}} - \frac{k_{M2}}{k_{M1}} \right) \frac{k_{M1}}{r\Delta_0 k_{Z1}}$$

Из (2.167) следует, что в координатах F_X/F_Z , M_Y/rF_Z выражение (2.167) действительно представляет собой линейную функцию.

Если контакт односточечный в точке B (рисунок 2.5), то при значениях k_{Z1} , k_{X1} , k_{M1} равных нулю, получим:

$$\begin{aligned} \frac{F_X}{F_Z} &= \frac{k_{X2}}{k_{Z2}} = \frac{1 - \mu\gamma}{\gamma + \mu}; \\ \frac{M_Y}{rF_Z} &= \frac{k_{M2}}{rk_{Z2}} = \frac{(1 - \mu\gamma)z_B}{r(\gamma + \mu)} - \frac{x_B}{r} \end{aligned} \quad (2.168)$$

Аналогично, для случая односточечного контакта в точке A , если k_{Z2} , k_{X2} , k_{M2} равны нулю, то:

$$\begin{aligned} \frac{F_X}{F_Z} &= \frac{k_{x1}}{k_{z1}} = -\frac{1-\mu\theta}{\theta+\mu}; \\ \frac{M_Y}{rF_Z} &= \frac{k_{M1}}{rk_{z1}} = -\frac{(1-\mu\theta)z_A}{r(\theta+\mu)} + \frac{x_A}{r} \end{aligned} \quad (2.169)$$

Малость углов γ и θ позволяет получить оценку параметров, входящих в уравнение (2.166): $k_{x2}/k_{x1} < 0$, $k_{z2}/k_{z1} > 0$, $k_{M2}/k_{M1} < 0$. Поэтому возможные предельные случаи левостороннего и правостороннего односторонних контактов будут в зависимости от знака b определять предельные точки (вершины) диаграммы заклинивания. Соединяющие их отрезки описывают состояние равновесия при двухточечном контакте. Точки и отрезки образуют замкнутую область, которая делит всю плоскость на две части: внешнюю и внутреннюю области. Внешние области соответствуют состоянию заклинивания, поскольку возникающие при этом силы и моменты, а также силы трения превосходят силы, приложенные к детали со стороны привода робота [90; 104; 109]. Внутренняя область параллелограмма характеризует собой состояния, при которых сборка обеспечивается. На рисунке 2.8 представлена диаграмма заклинивания при сопряжении нежесткого вала с жесткой втулкой.

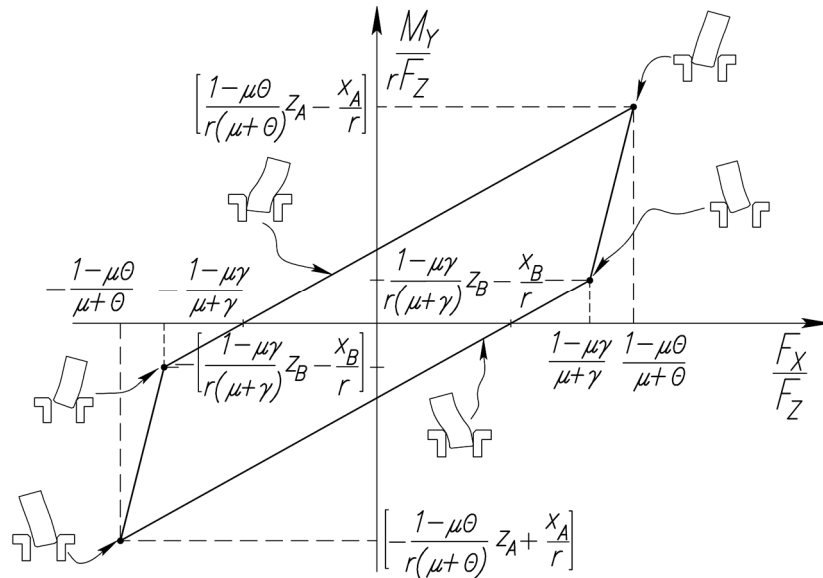


Рисунок 2.8 – Диаграмма заклинивания при соединении нежесткого вала с жесткой втулкой

Так как параметры z_B , x_B и z_A , x_A относящиеся к глубине сопряжения и положению детали не являются постоянными, то диаграммы заклинивания

отражают непрерывный характер процесса сборки. В ходе экспериментов измеренные величины силы/момента должны сравниваться с расчетными величинами с диаграммы заклинивания, на основе чего и должны формироваться параметры управления [3; 5].

Таким образом, чтобы избежать заклинивания нежесткого вала, следует выполнять условия [5]:

$$\begin{cases} \left| \frac{F_x}{F_z} \right| \leq \frac{1 - \mu\gamma}{\gamma + \mu} = f(\gamma) \\ b' = \left| \frac{M_y}{rF_z} + a \frac{F_x}{F_z} \right| \leq b \end{cases} \quad (2.170)$$

Полученные условия являются обобщением условий заклинивания Simunovic S. (2.158), полученных для жесткого вала.

Действительно, первое условие (2.170) при $\gamma = 0$ принимает вид первого соотношения системы (2.158). Второе условие системы (2.158) следует из приближенных уравнений равновесия сил при двухточечном контакте абсолютно жесткого стержня, полученных в предположении, что вследствие малости угла θ наклона детали к продольной оси втулки его можно принять равным нулю [90; 105]. При таком условии уравнения равновесия (2.142)÷(2.144) будут совпадать с уравнениями равновесия, приведенными в [28; 105]. Поэтому и второе условие системы (2.170) в предельном случае абсолютно жесткого стержня (при $E \rightarrow \infty, k \rightarrow 0$) приводится к второму условию системы (2.158).

2.7 Выводы и результаты по главе 2

1. Разделение процесса сопряжения на этапы позволяет создать математические модели для каждого этапа, что необходимо для разработки АУ роботом с использованием силомоментного оцувствления, обеспечивающего надежность технологических операций.

2. Разработаны математические модели определения величин деформации нежесткого вала на основе идентификации выходных сигналов с силомоментного датчика. Полученные аналитические решения позволяют определить значения

прогибов и углов поворота упругого вала и координаты точек контакта вала со втулкой при роботизированной сборке.

3. С использованием выходных сигналов силомоментного датчика построена математическая модель заклинивания нежестких деталей при сборке, позволяющая определять состояние заклинивания упругого вала в случае двухточечного контакта в процессе сопряжения вала с жесткой втулкой.

В предельном случае абсолютно жесткого вала полученные условия совпадают с известными условиями Simunovic S. Экспериментальная проверка условий заклинивания подтверждает адекватность построенной математической модели и позволяет корректировать программную траекторию выходного звена робота в процессе сопряжения.

4. Математическое моделирование автоматического выполнения сопряжения нежесткого вала позволяет определить положение точек контакта при роботизированной сборке.

ГЛАВА 3. АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СБОРКИ НЕЖЕСТКИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

Разработанные математические модели для определения положения детали на различных этапах сборки, разработанные в главе 2, являются основой для разработки алгоритма корректировки движения робота в процессе сопряжения. При сопряжении деталей неизбежно возникают неопределенности окружающей среды. Следовательно, важно, чтобы система распознавания CS, работающая в такой среде, могла принимать решения о состоянии контакта в конкретный момент на основе данных, характеризующихся неопределенностью. Данные о усилии, получаемые системой промышленного робота, определяют текущее состояние контакта. Как только текущее состояние контакта будет определено, алгоритм рассчитывает параметры сопряжения, необходимые для продолжения технологической операции.

3.1 Распознавание состояний контакта на основе машины опорных векторов

3.1.1 Архитектура машины распознавания состояний контракта

Метод машины опорных векторов определяется как алгоритм машинного обучения, который использует модели обучения с учителем для решения сложных задач классификации, регрессии и обнаружения выбросов путем выполнения оптимальных преобразований данных, которые определяют границы между точками на основе заранее определенных классов, меток или выходных данных [45]. Это алгоритмы обучения с учителем, которые отображают каждый элемент данных в n -мерном пространстве, где n - количество признаков. Каждое значение признака связано с координатным значением, что упрощает отображение признаков.

Основная цель машины SVM заключается в определении гиперплоскости, которая отделяет сигналы разных классов. Гиперплоскость позиционируется таким образом, чтобы максимально корректно разделить классы. Гиперплоскость представляет собой линию, которая максимизирует разрыв между двумя

ближайшими метками или классами. Расстояние от гиперплоскости до ближайшей точки является наибольшим, что упрощает классификацию данных. В математическом контексте SVM использует ядерные функции для преобразования признаков данных с использованием специальных ядер. Эти ядра позволяют отобразить сложные наборы данных в более высокие измерения, что способствует более эффективному разделению точек. Ядровая функция помогает упростить установление границы данных для нелинейных задач, добавляя дополнительные измерения для представления сложных данных.

В данном разделе представлена машина распознавания CS. Машина SVM состоит из двух модулей: модуля, используемого для автономного обучения и модуля для онлайн распознавания. Как правило, точное относительное положение движущегося объекта нестабильно и распознать состояние контакта нелегко. Однако информация о значениях силы и момента от СМД может быть получена онлайн. Следовательно, в предлагаемой машине распознавания CS был выбран шестикомпонентный вектор обобщенной силы и момента $F_{x1}, F_{y1}, F_{z1}, M_{x1}, M_{y1}, M_{z1}$ полученные непосредственно в процессе сопряжения [103].

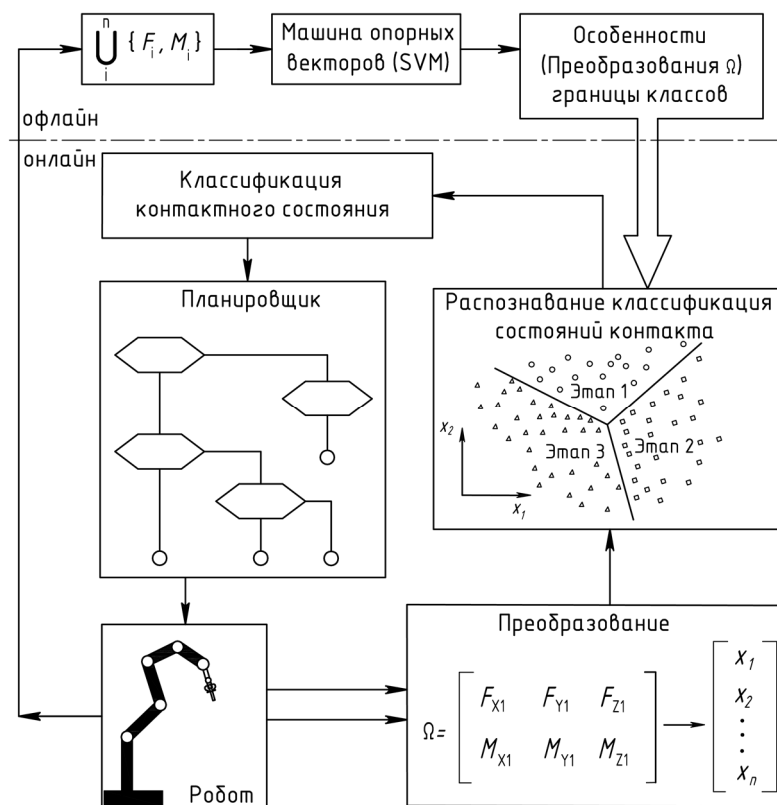


Рисунок 3.1 – Архитектура машины для распознавания контактных состояний

Архитектура предлагаемой машины онлайн-распознавания CS представлена на рисунке 3.1. Используя преобразования Ω , компоненты силы и момента преобразуются в шаблон-векторы признаков x_i . После преобразования выполняется классификация для получения класса шаблона, соответствующего состояния контакта, возникающего в данный момент в зоне сборки. Информация о текущем состоянии контакта передается планировщику. Планировщик, основываясь на плане движения и текущем состоянии контакта, формирует команды системе управления роботом для дальнейших манипуляций. Преобразования Ω , а также границы классов, используемые при классификации, определяются в процессе автономного обучения.

3.1.2 Выбор значений параметров модели

На основе математической модели, приведенной в главе 2, можно выделить три CS для сопряжения нежесткого вала с жесткой втулкой: этап 1 – контакт по фаске; этап 2 – одноточечный контакт; этап 3 – двухточечный контакт. Из всех заданных CS наиболее значимым является распознавание на этапе 3. Этап 3 характеризуется возникновением условий для заедания или заклинивания, что может привести к отказу при выполнении АС операции.

Значения составляющих сил и моментов формирует СМД. Анализ всех вышеперечисленных факторов приводит к тому, что пространство становится многомерным. Наряду с некоторыми значениями, которые не несут в себе значимых характеристик процесса, это приводит к появлению SVM с низкой эффективностью классификации и высоким коэффициентом шума или даже к неправильной классификации. Выбор и извлечение признаков являются наиболее важными процедурами любого процесса распознавания образов [84].

Сборочное движение происходит в направлении OZ . Поэтому выбираем значение характеристики $x_1 = F_{Z1}$ в качестве первого компонента вектора признаков модели SVM. На основе исследований других авторов [3; 22; 23; 24; 27; 34 и др.] составляющая сборочной силы F_{Z1} оказывает наиболее значимое влияние на процесс сопряжения. Анализ квазистатических моделей процесса сопряжения,

разработанных в главе 2, позволяет выбрать в качестве второго компонента вектора признаков соотношение $x_2 = F_{X1}/M_{Y1}$ [63; 104; 105].

3.2 Развертывание модели классификации состояний контактов с помощью машины опорных векторов

3.2.1 Офлайн обучение: создание границ классов

SVM – это надежный инструмент машинного обучения, впервые представленный Vapnik и Cortes [99] для решения задач классификации и регрессии. SVM запускается из обучающего набора данных: $\{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_r, y_r)\}$, где:

- x_i обозначает шаблоны, причем каждый x_{ij} является вектором в n -мерном пространстве, например, $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})^T$. Каждое измерение представляет собой атрибут;

- $y_i = \{-1, +1\}$, обозначает переменные решения, которые определяют принадлежность каждого шаблона к одному из классов: «+1» – положительный класс; «-1» – отрицательный класс.

Для случая линейно разделяемых данных возможно разделить данный обучающий набор бесконечным множеством способов, используя гиперплоскости:

$$y_i[\langle \mathbf{w}, \mathbf{x}_i \rangle - b] \geq 1, i = 1, 2, \dots, r \quad (3.1)$$

где \mathbf{w} – весовой вектор; b – вещественное число (смещение).

Такой, что для каждого x_i :

$$y_i = \begin{cases} 1: \text{если } \langle \mathbf{w}, \mathbf{x}_i \rangle + b \geq 0 \\ -1: \text{если } \langle \mathbf{w}, \mathbf{x}_i \rangle + b < 0 \end{cases} \quad (3.2)$$

Гиперплоскость H_0 , которая отделяет положительный класс от отрицательного, имеет вид:

$$\langle \mathbf{w}, \mathbf{x}_i \rangle + b = 0 \quad (3.3)$$

Гиперплоскость известна также как граница принятия решения. SVM определяет оптимальную гиперплоскость из множества всех возможных гиперплоскостей. Эта гиперплоскость разделяет данные без ошибок и обеспечивает

максимальный запас $\Delta=1/\|\mathbf{w}\|$ между гиперплоскостью и ближайшим образцом в обучающем наборе (рисунок 3.2).

Расстояние от точки \mathbf{x}_i до гиперплоскости H_0 ($\langle \mathbf{w}, \mathbf{x} \rangle + b = 0$) вычисляется как:

$$\frac{|\langle \mathbf{w}, \mathbf{x}_i \rangle + b|}{\|\mathbf{w}\|} \quad (3.4)$$

где $\|\mathbf{w}\| = \sqrt{\langle \mathbf{w}, \mathbf{w} \rangle} = \sqrt{w_1^2 + w_2^2 + \dots + w_n^2}$

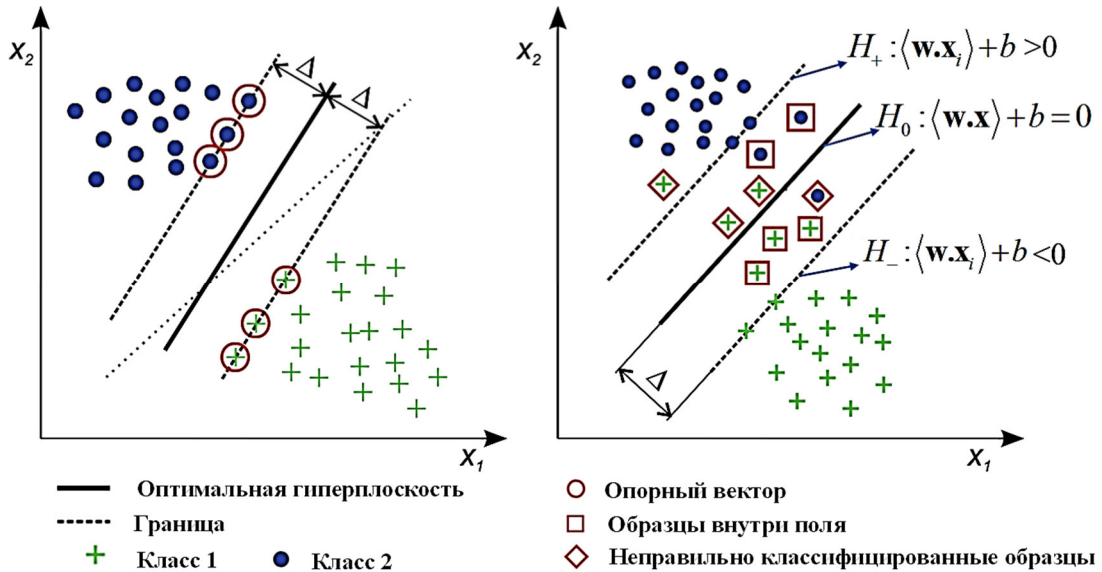


Рисунок 3.2 – Классификационная гиперплоскость в модели опорных векторов

Для линейно неразделимых значений положительные переменные провисания ξ_i вводятся в границу принятия решения (3.1). В случае ошибки классификации $\xi_i \geq 1$. Нарушение условия разделения (3.1) выражается следующим образом:

$$y_i[\langle \mathbf{w}, \mathbf{x}_i \rangle - b] \geq 1 - \xi_i, i = 1, 2, \dots, r \quad (3.5)$$

Для того чтобы определить оптимальную гиперплоскость, необходимо минимизировать целевой функционал:

$$\Phi(\mathbf{w}, \xi) = \frac{1}{2} \langle \mathbf{w}, \mathbf{w} \rangle + C \sum_{i=1}^r \xi_i \quad (3.6)$$

В функционале Φ добавлено слагаемое $C \sum_{i=1}^r \xi_i$, где C – определяемый пользователем параметр, назначающий дополнительную стоимость ошибки классификации. Более высокое значение для C приводит к более высокой стоимости ошибки.

Изучение SVM эквивалентно следующей задаче минимизации:

$$\begin{cases} \frac{\langle \mathbf{w}, \mathbf{w} \rangle}{2} - \text{Минимизировать} \\ y_i (\langle \mathbf{w}, \mathbf{x}_i \rangle + b) \geq 1, \forall i = 1..r \end{cases} \quad (3.7)$$

Данную задачу относят к оптимизационным задачам с ограничениями. Рассмотрим задачу минимизации $f(x)$ при условии, что $g_i(x) \leq 0$. Необходимое условие решения \mathbf{x}_i будет удовлетворять условию:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} \left(f(\mathbf{x}) + \sum_{i=1}^r \alpha_i g_i(\mathbf{x}) \right) \Big|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}_0} = 0 \\ g_i(\mathbf{x}) \leq 0, \forall i = 1..r \end{cases} \quad (3.8)$$

где $\alpha_i \geq 0$ является множителем Лагранжа; $L = f(\mathbf{x}) + \sum_{i=1}^r \alpha_i g_i(\mathbf{x})$ -

называется функцией Лагранжа.

Функция Лагранжа для (3.7) равна:

$$L(\mathbf{w}, b, \alpha) = \frac{1}{2} \langle \mathbf{w}, \mathbf{w} \rangle - \sum_{i=1}^r \alpha_i [y_i (\langle \mathbf{w}, \mathbf{x}_i \rangle + b) - 1] \quad (3.9)$$

Решение (3.7) и (3.9) эквивалентно следующей минимаксной задаче:

$$\arg \min_{\mathbf{w}, b} \max_{\alpha \geq 0} L(\mathbf{w}, b, \alpha) = \arg \min_{\mathbf{w}, b} \max_{\alpha \geq 0} \left\{ \frac{1}{2} \langle \mathbf{w}, \mathbf{w} \rangle - \sum_{i=1}^r \alpha_i [y_i (\langle \mathbf{w}, \mathbf{x}_i \rangle + b) - 1] \right\} \quad (3.10)$$

Двойственная задача может быть получена путем решения:

$$\min_{\mathbf{w}, b} L(\mathbf{w}, b, \alpha) = \min_{\mathbf{w}, b} \left\{ \frac{1}{2} \langle \mathbf{w}, \mathbf{w} \rangle - \sum_{i=1}^r \alpha_i [y_i (\langle \mathbf{w}, \mathbf{x}_i \rangle + b) - 1] \right\} \quad (3.11)$$

Известно, что оптимальное решение уравнения (3.7) будет удовлетворять некоторым условиям, которые называются условиями Karush–Kuhn–Tucker (ККТ) [45]:

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial \mathbf{w}} = \mathbf{w} - \sum_{i=1}^r \alpha_i y_i \mathbf{x}_i = 0; \\ \frac{\partial L}{\partial b} = - \sum_{i=1}^r \alpha_i y_i = 0; \alpha_i \geq 0; \\ y_i (\langle \mathbf{w}, \mathbf{x}_i \rangle + b) - 1 \geq 0, \forall \mathbf{x}_i (i = 1..r); \\ \alpha_i (y_i (\langle \mathbf{w}, \mathbf{x}_i \rangle + b) - 1) = 0. \end{cases} \quad (3.12)$$

Найдя градиент $L(\mathbf{w}, b, \alpha)$ в переменных (\mathbf{w}, b) и обнулив его, можно найти

следующую двойственную функцию:

$$L_D(\alpha) = \sum_{i=1}^r \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^r \alpha_i \alpha_j y_i y_j \langle \mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j \rangle \quad (3.13)$$

Решение (3.7) эквивалентно решению следующей двойственной задачи:

$$\begin{cases} \text{Max} L_\alpha(\alpha) = \sum_{i=1}^r \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^r \alpha_i \alpha_j y_i y_j \langle \mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j \rangle \\ \sum_{i=1}^r \alpha_i y_i = 0, \alpha_i \geq 0. \end{cases} \quad (3.14)$$

Из условий (3.12) следует, что только для ряда векторов признаков \mathbf{x}_i соответствующие множители Лагранжа α_i отличаются от нуля. Эти векторы называются опорными векторами. Решение двойной задачи (3.14) имеет вид:

$$\mathbf{w} = \sum_{i=1}^m \alpha_i y_i \mathbf{x}_i \quad (3.15)$$

где m - представляет собой количество опорных векторов.

Наконец, граница принятия решения имеет вид:

$$f(\mathbf{x}) = \text{sign} \left(\sum_{i=1}^m \alpha_i y_i \langle \mathbf{x}_i, \mathbf{x} \rangle + b \right) \quad (3.16)$$

Представленная методология может быть применена для нелинейных классификаторов путем отображения данных из входного пространства в пространство объектов высокой размерности. Стоит отметить, что для минимизации функционала (3.13) достаточно знать только внутреннее произведение в многомерном пространстве объектов. Следовательно, нет необходимости определять многомерное пространство объектов в явном виде. Скорее наоборот, его можно определить с помощью функции ядра $K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j)$, которое представляет внутреннее произведение в пространстве объектов высокой размерности. Вводя $K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j)$, двойственная задача (3.14) принимает вид:

$$\text{Max}_\alpha L(\alpha) = \sum_i \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i,j} \alpha_i \alpha_j y_i y_j K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) \quad (3.17)$$

Граница принятия решения определяется выражением:

$$f(\mathbf{x}) = \text{sign}(\langle \mathbf{w}, \mathbf{x} \rangle + b) = \text{sign} \left(\sum_{i=1}^m \alpha_i y_i K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) + b \right) \quad (3.18)$$

Данное выражение определяет гиперплоскость в многомерном пространстве

признаков. Ядром может быть любая функция, удовлетворяющая условиям теоремы Mercer [45]. Например, это полиномиальные ядра (в данном случае SVM эквивалентны полиномиальным обучающимся машинам), линейное ядро, ядро Гаусса (SVM эквивалентны машинам с радиальными базисными функциями), сигмовидное ядро (SVM эквивалентны двухслойным нейронным сетям) и некоторые вейвлеты.

При выборе функции ядра необходимо использовать определенные априорные знания о рассматриваемой проблеме. После выбора ядра остается выбрать только один дополнительный параметр – стоимость ошибки C . Как проанализировано выше, было выбрано 2D-пространство с линейным функционалом ядра, состоящими из векторных признаков $\mathbf{x} = [x_1, x_2] = [F_{Z1}, F_{X1}/M_{Y1}]$, чтобы начать обучение модели SVM.

3.2.2 Определение состояния контакта в онлайн-режиме

На основе математической модели, представленной в работах [3; 4; 5; 11; 25 и др.], можно выделить в общей сложности три CS для цилиндрического соединения нежесткого вала с жесткой втулкой: этап 1 – контакт по фаскам; этап 2 – одноточечный контакт по боковой поверхности вала; этап 3 – двухточечный контакт.

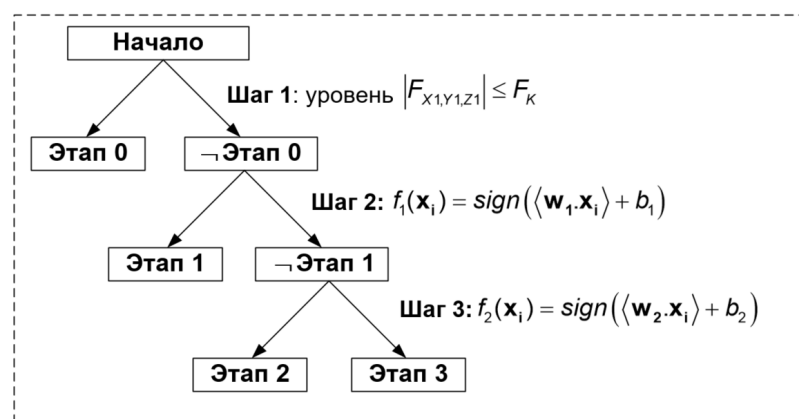


Рисунок 3.3 – Бинарная иерархическая классификация

Следуя предложенному автономному обучению для машины распознавания CS (рисунок 3.1), разделим принятое пространство состояний с помощью SVM. Для простоты и применимости в реальном времени принято решение использовать

линейную функцию ядра. SVM – это бинарные классификаторы, классифицирующие все шаблоны на два класса. Для классификации на несколько классов предложен подход иерархической классификации. На каждом уровне классификации одно CS отделяется от остальных CS (рисунок 3.3).

3.3 Алгоритм управления процессом сопряжения

Экспериментальная установка включает в себя промышленный робот ABB IRB 140T, оснащенный силомоментным датчиком, контроллер робота IRC5 и стандартный компьютер, подключенный к контроллеру робота через сеть Ethernet (рисунок 3.4). На компьютере было установлено программное обеспечение, включая Visual Studio.Net, компоненты ABB PC SDK (ABB Robotics), Robot Application Builder (RAP) и ABB RobotWare, веб-страницы Ethernet FT-AXIA 80 (для настройки датчика) и демонстрационное приложение Java (для просмотра и сбора значений силы и момента). Контроллер робота IRC5 был интегрирован с опцией PC-Interface, необходимой для связи с внешним компьютером. Манипуляции с отслеживанием траектории выполнялись путем последовательного обновления структур данных *RobTarget* и передачей их в программу RAPID для обработки и инициирования соответствующих инструкций *MoveL*.

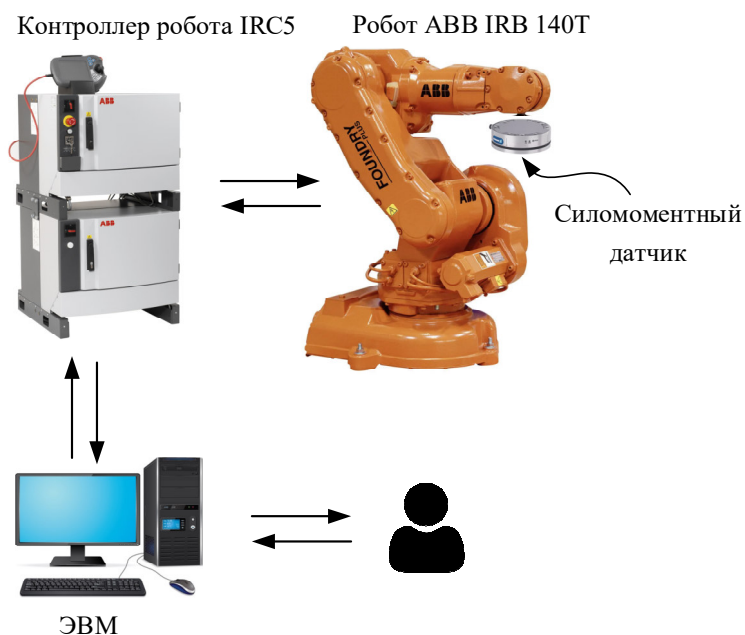


Рисунок 3.4 – Интеграция промышленного робота с контроллером IRC5 и силомоментным датчиком

Датчик FT-AXIA 80 Ethernet способен передавать информацию со скоростью до 7912 Гц (при выборе из возможных значений в конфигурации: 488, 976, 1953, 3906 или 7912 Гц) по Ethernet. Данный метод быстрого сбора данных называется передачей необработанных данных (RDT). RDT обеспечивает простой способ получения сил, моментов и кодов состояния датчика FT-AXIA 80 Ethernet. По умолчанию при включении питания устанавливается частота дискретизации, которую пользователь указал перед отключением питания. Данная частота дискретизации сохраняется в памяти. Однако для большинства промышленных робототехнических приложений не требуются высокие требования и обычно достаточно частоты от 200 до 500 Гц. Благодаря частоте дискретизации 488 Гц обеспечивается непрерывное обновление сигнала с силомоментного датчика, чтобы предотвратить несоответствие в сигналах управления роботом.

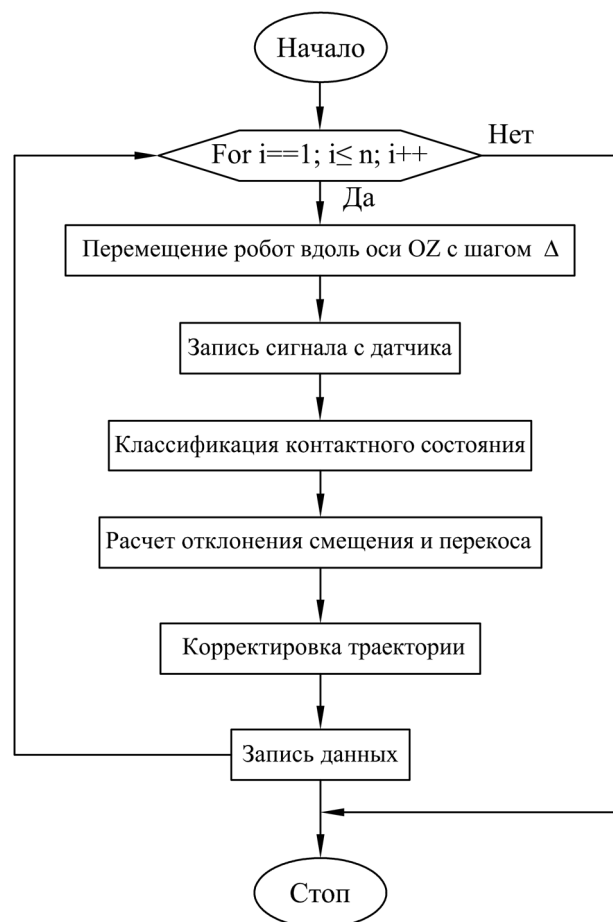


Рисунок 3.5 –Блок-схема алгоритма управления движением робота

При получении инструкций робот не будет прерываться для получения следующего сигнала с датчика. Основная программа содержит отдельные

функциональные блоки. Использован цикл, позволяющий основной программе выполняться до тех пор, пока не будет достигнута требуемая глубина сопряжения. В каждом цикле система управления записывает сигналы силомоментного датчика только один раз: при окончании перемещения. Блок, вычисляющий и записывающий значения сигналов силы и момента, выполняется только один раз в каждом цикле. Это гарантирует, что робот получит только одно значение сигнала силы и момента, выполнит следующие шаги в цикле на основе этого сигнала. Затем система выполняет классификацию контактного состояния и переходит к выполнению следующих функциональных блоков (рисунок 3.5). Система выдает команду на коррекцию траектории перемещения робота и переходит к повторению цикла до достижения глубины сопряжения.

На рисунке 3.6 показан алгоритм управления роботом при сборке нежестких цилиндрических деталей, интегрированный с системой распознавания CS машиной опорных векторов. Робот запрограммирован на пошаговое перемещение вала с требуемой скоростью по траектории. Сигнал рассогласования между программной траекторией и корректирующим воздействием, подаваемым контроллером, приводит робот к требуемому положению. Контроллер, используемый для управления манипулятором робота, реализует оригинальный алгоритм, представляющий собой П-контроллер.

Схема алгоритма включает в себя 3 основных блока: блок идентификатора; блок расчета значения отклонения и блок привода сборочного робота. Сигналы с величинами значений сил и моментов, формируемые СМД передаются в блок классификации CS для обновления текущего CS (блок «Идентификатор»). Блок идентификатора включает в себя векторные параметры ранее рассмотренной модели SVM. Здесь происходит процесс онлайн-классификации CS. Алгоритм выполняет расчеты значений угла перекоса θ и погрешности положения осей $\Delta_{x,y}$ в соответствии с текущими состояниями контакта для корректировки траектории робота (блок расчета значения отклонения). После этого иницируются команды по корректировке ошибок с целью обеспечения соответствия робота требуемой траектории сборки (блок «Привод сборочного робота») [25].

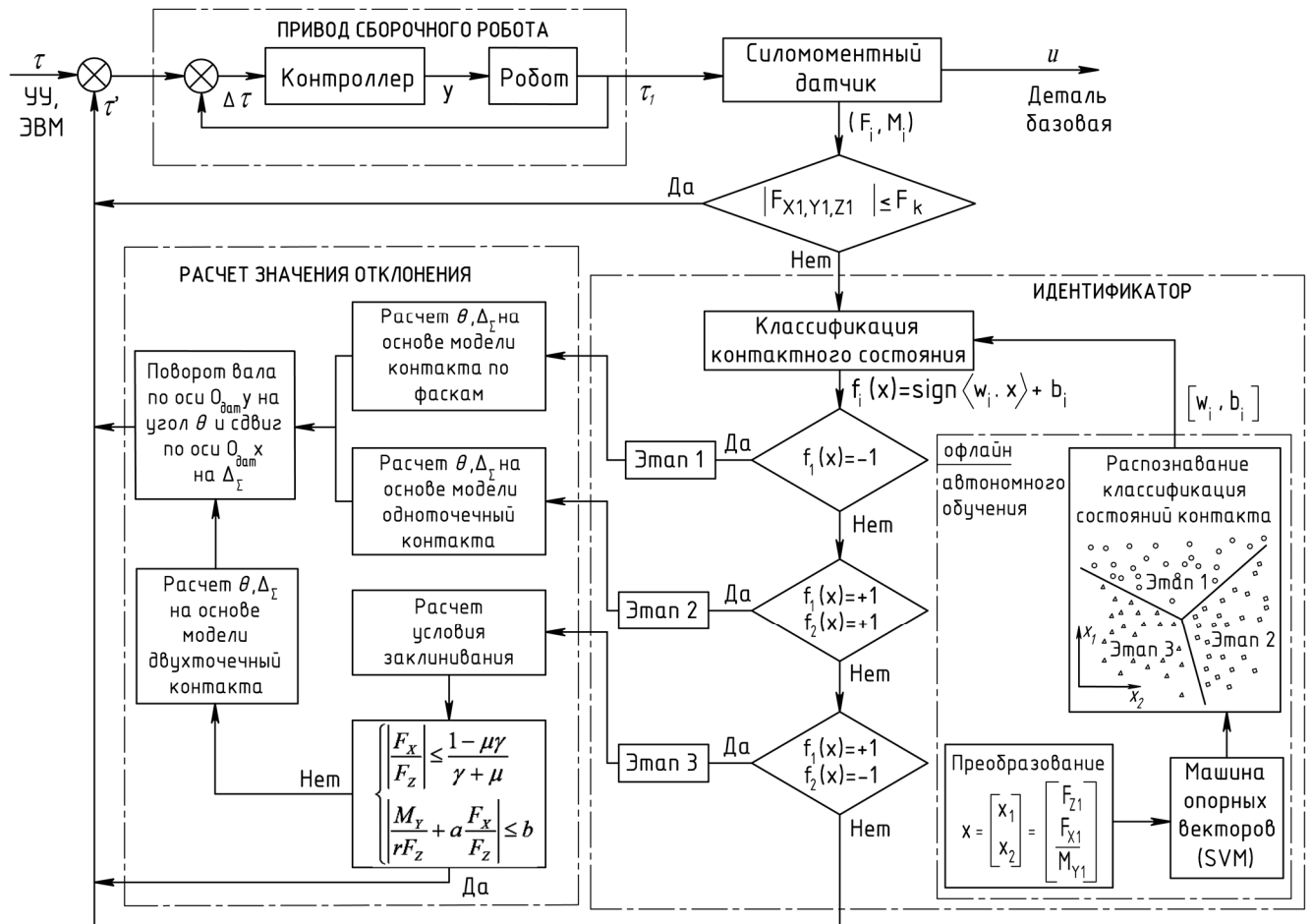


Рисунок 3.6 – Алгоритм управления процессом сопряжения деталей типа «нежесткий вал- жесткая втулка» при роботизированной сборке с силовомоментным очувствлением

где: τ – задающее воздействие (программная траектория);

u – сигнал управления двигателем; τ_1 – выходная координата привода;

u – траектория перемещения устанавливаемой детали;

τ' – корректирующее воздействие, направленное на снижение рассогласования положения собираемых деталей.

Силовой датчик оценивает в режиме онлайн силы и моменты относительно трех осей $O_{дат}x_{дат}$, $O_{дат}y_{дат}$ и $O_{дат}z_{дат}$ на каждом шаге перемещения манипулятора робота. Выполняется сравнение значений по модулю $F_{x1, y1, z1}$ и F_k . Если $|F_{x1, y1, z1}| \leq F_k$ (F_k – сила, возникающая при контакте вала с фаской втулки), то робот продолжает перемещать вал на следующий программный шаг. В противном случае $|F_{x1, y1, z1}| > F_k$ значения сил и моментов подаются на блок «Идентификатор» для определения этапа процесса сопряжения.

Выходным сигналом модели SVM является параметр \mathbf{w} и \mathbf{b} , входным сигналом которого является сигнал эталонных данных $\mathbf{x} = [x_1, x_2] = [F_{z1}, F_{x1}/M_{y1}]$, полученных экспериментальным путем:

- если $|F_{x1,y1,z1}| > F_K$, то выполняется классификация CS, используя модель SVM;
- если $f_1(\mathbf{x}_i) = \langle -1 \rangle$, то выполняется этап «1» (вычисляется значение угла перекоса θ и погрешности положения осей Δ_Σ);
- если $f_1(\mathbf{x}_i) = \langle +1 \rangle$, $f_2(\mathbf{x}_i) = \langle +1 \rangle$, то выполняется этап «2» (вычисляется значение угла перекоса θ и погрешности положения осей Δ_Σ);
- если $f_1(\mathbf{x}_i) = \langle +1 \rangle$, $f_2(\mathbf{x}_i) = \langle -1 \rangle$, то выполняется этап «3», проверяются условия заклинивания (2.170). Если система неравенств выполняется, то робот продолжает опускать вал на следующий программный шаг. Если не выполняется, то рассчитывается значение угла перекоса θ и погрешности положения осей Δ_Σ ;
- программа управления формирует сигнал роботу на поворот вала относительно оси $O_{датu}$ на угол перекоса θ и сдвиг по оси $O_{датx}$ на величину Δ_Σ ;

В остальных случаях, робот продолжает перемещать нежесткий вал на следующий программный шаг. Сигналы с величинами значений сил и моментов, передаются в блок классификации CS (блок «Идентификатор») для обновления текущего CS. Данный цикл обрабатывается, пока вал не достигает заданной глубины сопряжения [25].

3.4 Выводы и результаты по главе 3

1. Использование шестикомпонентного СМД позволяет получать онлайн информацию о процессе сопряжения для применения позиционно-силового управления.

2. Предложен метод машинного обучения для распознавания CS нежесткого цилиндрического вала, сопрягаемого с жесткой втулкой при роботизированной сборке на основе машины опорных векторов.

3. Построена модель определения состояния контакта на основе данных об усилиях с СМД из системы промышленного робота. Выбор и извлечение признаков являются одними из важных процедур в процессе распознавания контактных состояний. Вектор признаков $\mathbf{x} = [F_{z1}, F_{x1}/M_{y1}]$ характеризует процесс сопряжения и обеспечивает классификацию состояний контакта с использованием метода SVM.

4. Разработан алгоритм позиционно-силового управления с использованием СМД для сборки нежестких цилиндрических деталей с небольшими зазорами. Данный алгоритм реализует корректировку траектории на основе координат центра СМД, оценки угла перекоса и смещений осей деталей в процессе сборки.

5. Характер АУ определяется следующими параметрами:

– силами и моментами условий контактного взаимодействия, оцениваемыми СМД;

– значениями признаков $f_1(\mathbf{x}_i), f_2(\mathbf{x}_i)$ в модели SVM;

– коэффициентом трения (μ);

– зазором в сопряжении (Δ);

– предельным значением угла отклонения (θ);

– погрешности положения осей (Δ_Σ);

– условие заклинивания определяется неравенством (2.170).

ГЛАВА 4. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ

4.1 Описание экспериментальной установки

Для проведения экспериментов создана экспериментальная установка, оснащенная силомоментным датчиком FTN-AXIA80 SI500-20 Ethernet. Установка смонтирована на базе промышленного робота IRB-140T с контроллером IRC5. Сопрягаемые цилиндрические детали (нежесткий вал и втулка) жёстко базируются в схвате робота 4 и сборочном приспособлении 7. Информация о возникающих в зоне сборки силах и моментах поступает в систему управления промышленного робота, а также регистрируется персональным компьютером 2. Вал изготовлен из пластика (литейный фторопласт-4, ГОСТ 10007-80), втулка изготавливались из стали 45.

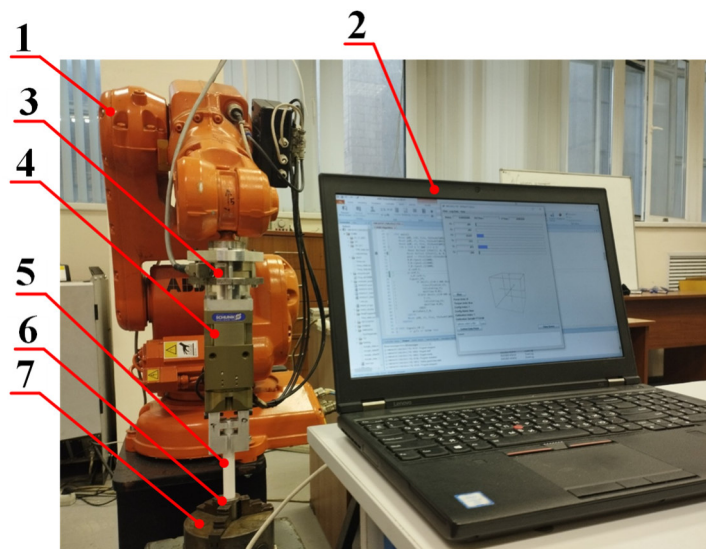


Рисунок 4.1 – Экспериментальная установка: 1 – промышленный робот АBB IRB 140T; 2 – персональный компьютер; 3 – силомоментный датчик FTN-AXIA 80 SI500-20; 4 – схват Schunk GSM-P 64 E-180; 5 – нежесткий вал; 6 – втулка; 7 – базовое приспособление

Промышленный робот компании АBB, включает манипулятор IRB-140T и систему управления IRC5. Технические параметры манипулятора представлены в таблице 4.1. Контроллер промышленного робота АBB принадлежит к пятому поколению и отличается высокой степенью гибкости, обеспечивает безопасность в

эксплуатации, допускает одновременное подключение нескольких манипуляторов к одному контроллеру, а также предоставляет возможность интеграции с персональным компьютером. Технические характеристики контроллера представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.1 – Технические характеристики промышленного робота ABB IRB-140T

Параметра	Значение
Количество осей	6
Тип приводов	Сервопривода
Радиус действия	Сфера радиусом 810 мм, без оснастки
Нагрузка манипулятора	6 кг (с оснасткой)
Точность позиционирования	0,03 мм
Максимальная скорость перемещения фланца (программно задаваемая)	2,5 м/с (7 м/с)
Привод схвата	Пневматический с управлением от двух 2-х позиционных электромагнитных клапанов
Потребляемая мощность	0.4 кВт

Таблица 4.2 – Технические характеристики контроллера IRC5

Параметра	Значение
Размеры (В x Д x Ш)	970 x 725 x 710 мм
Масса	150 кг
Электропитание	3 фазный источник тока 200-600 В, 50-60 Гц
Дополнительные опции безопасности	Электронные позиционные переключатели: 5 выходов слежения за осями 1-7
Безопасное перемещение	8 входных функциональных каналов 8 выходных каналов мониторинга безопасности
Подключение к ПК	Ethernet
Подключение датчиков и доп. оборудования	Ethernet

Для решения задачи применялся схват манипулятора, показанный на рисунке 4.2. Схват, смонтированный на роботе (модель Schunk GSM-P 64-E-180) предназначен для захвата и удержания объектов при манипулировании. Данный схват жестко интегрирован с СМД модели FTN-AXIA80 SI-200-8 / SI-500-20 Ethernet (артикул 1324513), что показано на рисунке 4.3. На схвате установлены оригинальные призматические губки (1). Монтаж СМД выполнен на основе

оригинального приспособления (позиции 3, 4 и 6 на рисунке 4.2). Схват и СМД были установлены на выходном звене манипулятора робота (7).

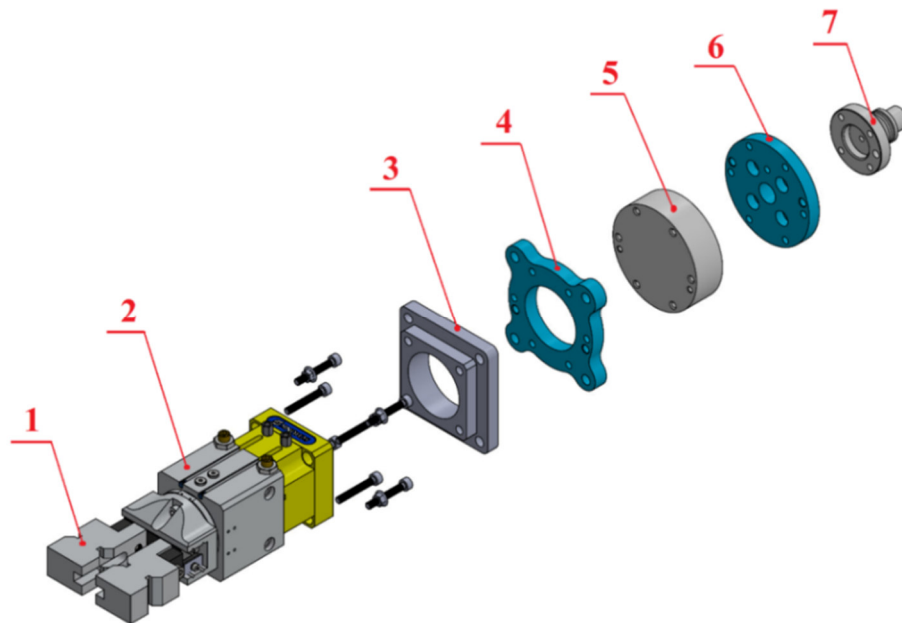


Рисунок 4.2 – Навесное дооснащение робота: 1 – призматические губки; 2 – пневматический схват модели Schunk GSM-P 64 E-180; 3 – переходник; 4 – фланец; 5 – силомоментный датчик модели FTN-AXIA80 SI-200-8 / SI-500-20 EtherNet; 6 – фланец; 7 – выходное звено манипулятора робота

Силомоментный датчик FTN-AXIA80 предназначен для измерения силы и момента в условиях промышленной автоматизации. Высокая точность измерений и совместимость с различными интерфейсами обеспечивают высокую универсальность, позволяя применять эти датчики в различных задачах, включая контроль силовых параметров в режиме реального времени, калибровку, тестирование и другие приложения. Технические характеристики СМД представлены в таблице 4.3.



Рисунок 4.3 – Силомоментный датчик модели FTN-AXIA80 SI-200-8 / SI-500-20 EtherNet

Таблица 4.3 – Технические характеристики силомоментного датчика модели FTN-AXIA80

Главный параметр		
ID	1324513	
Интерфейсы	Ethernet, DeviceNet, Profibus, CAN, RS232	
Масса, кг	0,3	
Калибровка	1 (SI-200-8)	0 (SI-500-20)
Диапазон измерений Fx, Fy [Н]	200	500
Диапазон измерений Fz [Н]	360	900
Диапазон измерений Mx, My [Нм]	8	20
Диапазон измерений Mz [Нм]	8	20
Питание	24 В постоянного тока (DC), 3 А	
Перегрузка Fx, Fy [Н]	±2500	
Перегрузка Fz [Н]	±4500	
Перегрузка Mx, My [Нм]	±100	
Перегрузка Mz [Нм]	±100	
Разрешение Fx, Fy [Н]	1/10	
Разрешение Fz [Н]	1/10	
Разрешение Mx, My [Нм]	1/200	
Разрешение Mz [Нм]	1/200	
Неточность измерения силы [%]	±0,5	
Неточность измерения момента [%]	±0,05	
Резонансные част. Fx, Fy, Mz [Гц]	2200	
Резонансные част. Fz, Mx, My [Гц]	2600	

4.1.1 Программирование промышленного робота

Обычно системные коды в среде RobotStudio разрабатываются для конкретных задач, которые необходимо автоматизировать с помощью промышленного робота (приложение Б).

– *Программирование смещения и/или поворота*

Команда *RelTool* (сокращение от англ. "*Relative Tool*") в промышленных роботах реализует возможность ввода относительных (нестационарных) смещений и/или поворотов TCP (Tool Center Point) относительно заданного положения (рисунок 4.4).

Команда *MoveL* (сокращение от англ. "*Move Linear*") в промышленных роботах позволяет перемещать TCP по прямой линии между заданными начальной и конечной точками.

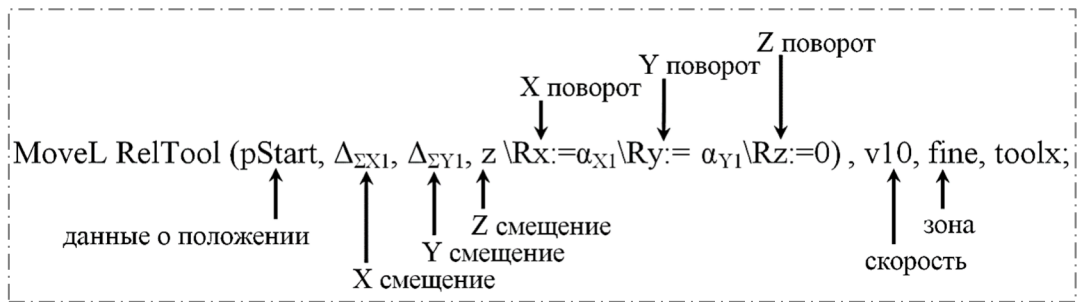


Рисунок 4.4 – Пример программирования смещений и/или поворотов

– Программирование циклов

Команда цикла *FOR* (или цикла "для") используется для повторения определенных команд заданное количество раз. Количество повторений может быть задано как константой, так и переменной величиной. Синтаксис команды *FOR* выглядит следующим образом (рисунок 4.5).

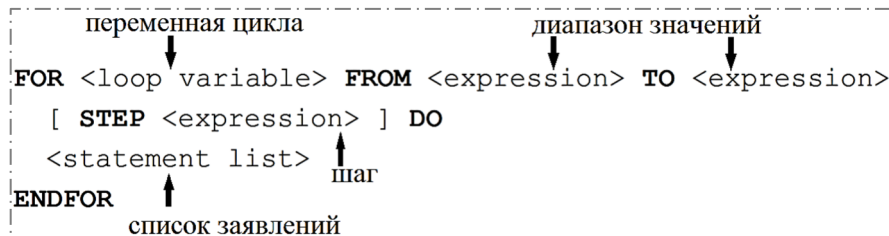


Рисунок 4.5 – Синтаксис команды *FOR* в RobotStudio

– Команды условного перехода

Операции, требующие выполнения условия задаются командой условного перехода *IF*. Командой *IF* выполняются два и более варианта команд в зависимости от результата условия, как показано на рисунке 4.6.

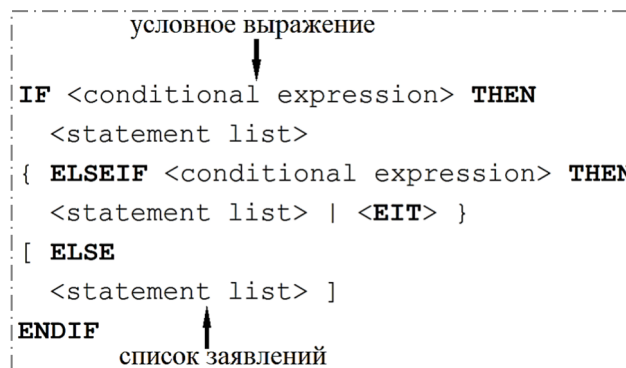


Рисунок 4.6 – Синтаксис команды *IF* в RobotStudio

4.1.2 Калибровка силомоментного датчика

Калибровка СМД представляет собой процесс установления соответствия между измеряемыми значениями момента и силы, регистрируемыми датчиком и

реальными физическими величинами момента и силы в системе. Данная процедура обычно выполняется перед использованием датчика или при его перекалибровке.

Для того чтобы иметь доступ к веб-страницам и настроить датчики АТІ Ethernet Axia F/T для работы в сети, необходимо предварительно настроить сетевые параметры датчика. Задаем IP-адрес датчика по умолчанию: 169.254.5.178. Если введен IP-адрес датчика 169.254.5.178 в браузере, то должна появиться страница приветствия Ethernet Axia F/T. На этой странице показано меню, которое содержит ссылки на различные страницы настройки датчика (рисунок 4.7).

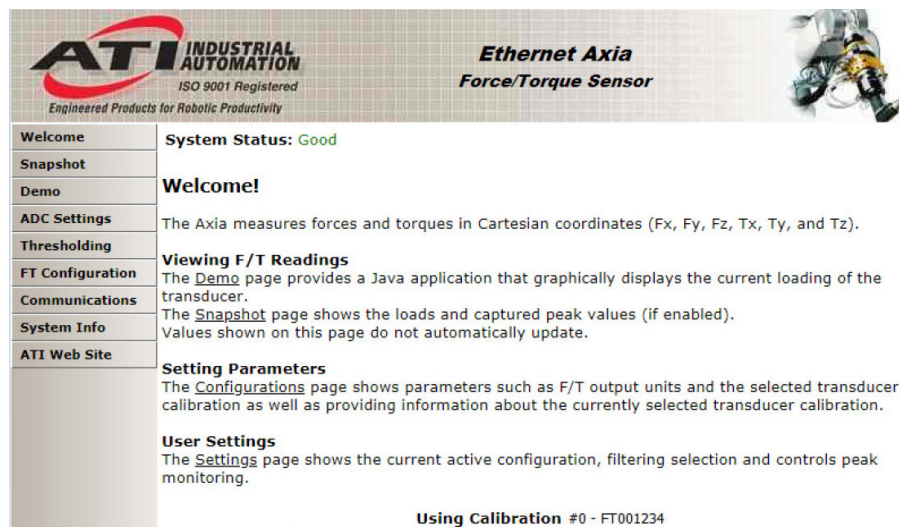


Рисунок 4.7 – Страница датчика Ethernet Axia F/T

На странице приветствия Ethernet Axia F/T могут быть упомянуты различные функции датчика, в том числе и функция ADC (АЦП), которая отвечает за преобразование аналогового сигнала в цифровой. На странице «ADC Settings», доступной для пользователя, можно выбрать различные параметры для этой функции ADC (рисунок 4.8).

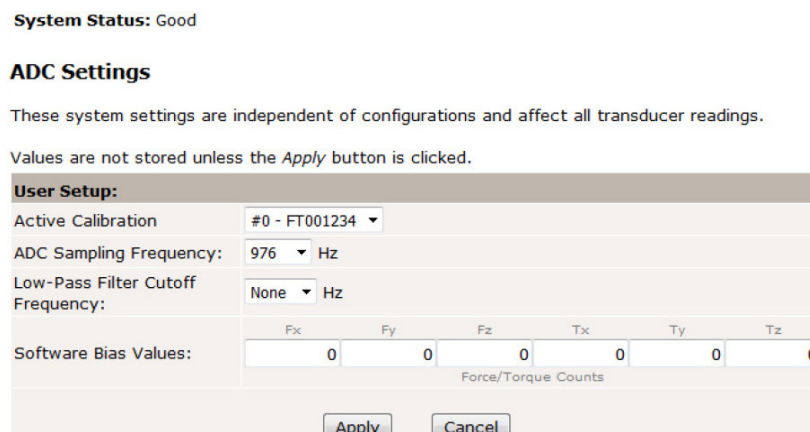


Рисунок 4.8 – Страница ADC Settings

На вкладке "Сеть" операционной системы Windows можно выбрать пункт подключения "Протокол Интернета версии 4 (TCP/IPv4)" для настройки параметров сетевого подключения. Это позволяет конфигурировать IP-адрес, маску подсети, шлюз по умолчанию, а также адрес сервера DNS (рисунок 4.9).

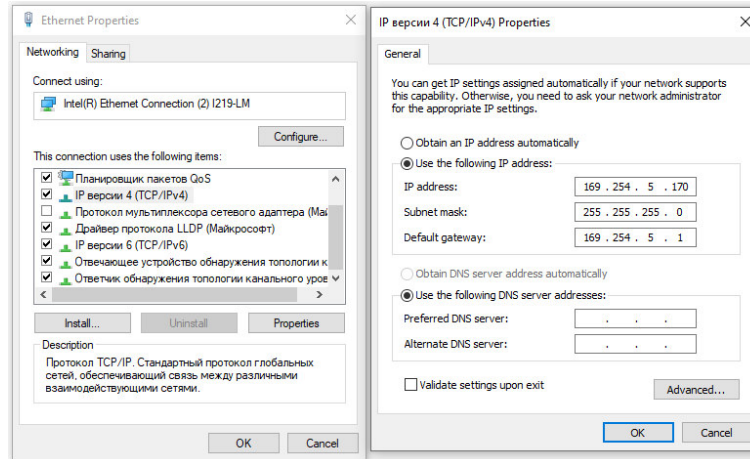


Рисунок 4.9 – Информация о сети Windows 7/8/10

4.2 Определение задачи процесса сборки и методика проведения эксперимента

4.2.1 Постановка задачи

Этапы процесса сопряжения, показаны на рисунке 2.1. Робот осуществляет программное пошаговое перемещение вала относительно глобальной системы координат. Контакт по фаске возникает на первой стадии процесса из-за погрешностей технологической системы (рис. 2.1б). На данном этапе необходимо провести коррекцию положения выходного звена робота (рис. 2.1в, г). Скорректировав положение выходного звена робота, можно успешно выполнить сопряжение нежесткого вала. Для того чтобы сборочная операция не сопровождалась отказом, необходимо решить следующие задачи:

- он-лайн определение сил и моментов, возникающих при сопряжении;
- определение коэффициента трения в соответствии с реальными условиями физического эксперимента;
- определение значений деформации нежесткого вала при контакте в процессе сопряжения с жесткой втулкой. Полученные значения прогибов и углов

поворота используются для корректировки программных траекторий выходного звена робота при сборке;

– идентификация контактных состояний на основе разработки и применения модели SVM для определения, текущего CS по значениям силы и момента выходного звена;

– определение состояния возникающего заклинивания для коррекции выходного звена робота;

– осуществление коррекции положения выходного звена робота, используя математические модели этапов сопряжения и применяя созданный алгоритм управления для регулировки положения выходного звена робота.

4.2.2 Методика проведения эксперимента

Разработка АУ процессом сопряжения нежесткого вала с жесткой втулкой требует выполнения следующих этапов:

1. Определение реального значения коэффициента трения в точках контакта в квазистатической постановке. Процесс включает сопряжение нежесткого вала со втулкой, при котором нежесткий вал изготовлен из пластика, а втулка - из стали 45. Соединение имеет зазор 0,1 мм.

2. Определение значения деформации нежесткого вала в процессе сопряжения с жесткой втулкой. Полученные значения прогибов и углов поворота позволяют корректировать положение выходного звена робота при выполнении операции сборки.

3. Идентификация текущего CS основана на применении модели SVM.

4. Для определения положения точки контакта используется информация о силе и крутящем моменте с СМД. Применяются математические модели контактного состояния, вычисляются смещения положения и угол перекоса.

5. Оценка возможности заклинивания при сопряжении на глубине до 50 мм реализуется на основе физического эксперимента с использованием АУ и условий заклинивания (2.170).

4.3 Результаты экспериментальных исследований

4.3.1 Экспериментальное определение коэффициента трения и оценка условий потери устойчивости упругого нежесткого стержня

Во второй главе приведено определение величины коэффициента трения при установке нежесткого вала во втулку и получены зависимости коэффициента трения от глубины сопряжения деталей и величины сборочного усилия. Полученные значения позволяют определять значения силы трения в процессе сопряжения нежестких деталей с жесткой втулкой.

В таблице 4.4 приведены значения составляющих сил и моментов F_{X1} , F_{Y1} , F_{Z1} , M_{X1} , M_{Y1} , M_{Z1} , полученных с СМД и рассчитанный теоретически коэффициент трения μ с помощью MatLab (приложение В) [9; 102]. По результатам расчетов (таблице 4.4), принято среднее значение коэффициента трения пары «фторопласт-4 – сталь» равное 0,056. Значение коэффициента трения скольжения пары «фторопласт-4 – сталь», приведенное в работе [12], составляет $0,02 \div 0,08$. Полученные результаты полностью согласуются с ранее выполненными исследованиями.

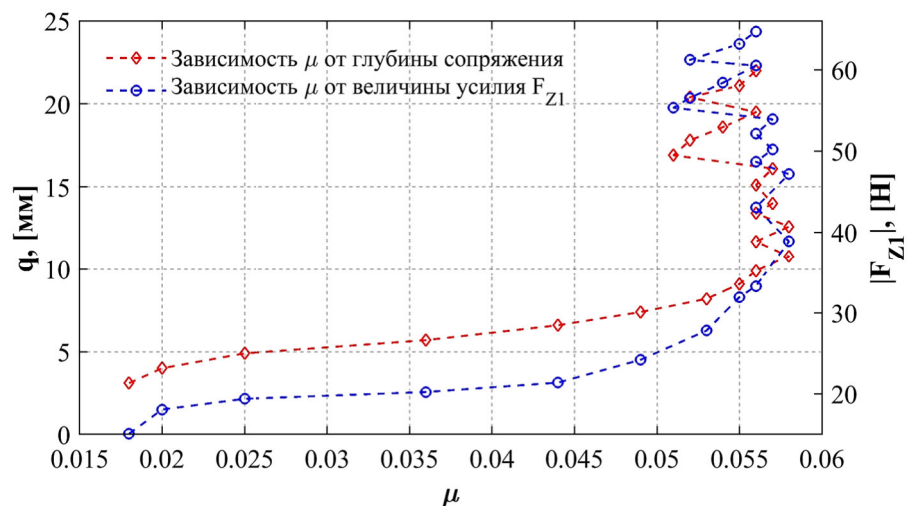


Рисунок 4.10 – Определение коэффициента трения при выполнении цилиндрического соединения с зазором 0,1 мм

Исследования показали, что коэффициент трения при сборке нежестких валов зависит от сборочного усилия. Увеличение F_{Z1} приводит к значительному увеличению коэффициента трения, который при глубине сопряжения более 15 мм остается почти неизменным в диапазоне $0,054 \div 0,058$ (рисунок 4.10).

Таблица 4.4 – Экспериментальные значения коэффициента трения

№	F_{X1} , [Н]	F_{Y1} , [Н]	F_{Z1} , [Н]	M_{X1} , [Н.м]	M_{Y1} , [Н.м]	M_{Z1} , [Н.м]	q , [мм]	α^2 , $\cdot 10^{-5}$	μ
1	-1,159	0,165	-18,06	0,008	-0,593	0,049	3,1	0,367	0,018
2	-1,250	0,441	-18,06	0,012	-0,590	0,045	4,0	0,367	0,02
3	-1,220	0,208	-19,38	0,009	-0,636	0,050	4,9	0,422	0,025
4	-1,050	-0,055	-20,72	0,005	-0,682	0,050	5,7	0,482	0,036
5	-1,196	-0,086	-20,38	0,005	-0,669	0,057	6,6	0,467	0,044
6	-1,354	-0,398	-24,20	0,002	-0,795	0,072	7,4	0,658	0,049
7	-1,524	-0,765	-28,80	-0,001	-0,947	0,090	8,2	0,932	0,053
8	-1,687	-1,438	-34,93	-0,008	-1,150	0,115	9,1	1,371	0,055
9	-1,560	-1,848	-35,30	-0,013	-1,163	0,120	9,9	1,400	0,056
10	-1,724	-2,375	-38,88	-0,018	-1,281	0,141	10,8	1,698	0,058
11	-1,681	-3,262	-44,08	-0,028	-1,454	0,162	11,7	2,183	0,056
12	-1,863	-3,660	-48,14	-0,032	-1,588	0,181	12,6	2,604	0,058
13	-1,863	-4,290	-50,67	-0,039	-1,672	0,197	13,4	2,885	0,056
14	-1,906	-4,804	-52,89	-0,045	-1,745	0,213	14,0	3,143	0,057
15	-1,839	-5,392	-56,13	-0,052	-1,853	0,225	15,1	3,539	0,056
16	-1,845	-5,918	-57,10	-0,058	-1,886	0,239	16,1	3,663	0,057
17	-1,384	-6,542	-55,32	-0,067	-1,830	0,234	16,9	3,438	0,051
18	-1,396	-7,124	-58,54	-0,073	-1,937	0,250	17,8	3,850	0,052
19	-1,463	-7,570	-59,39	-0,078	-1,965	0,265	18,6	3,963	0,054
20	-0,923	-8,091	-55,49	-0,087	-1,839	0,253	19,5	3,460	0,056
21	-0,898	-8,770	-59,20	-0,094	-1,962	0,270	20,4	3,937	0,052
22	-0,989	-9,113	-60,18	-0,098	-1,994	0,283	21,1	4,069	0,055
23	-0,904	-9,810	-62,70	-0,106	-2,079	0,297	22	4,446	0,056

Для проверки устойчивости нежестких деталей при сборке используют выражение (2.64). Результаты расчета показали, показали, что для рассматриваемого в работе вала $\alpha^2 \ll 1$ (таблица 4.4). Поэтому явление потери устойчивости даже для неидеально прямолинейной детали можно не учитывать.

4.3.2 Экспериментальное определение величины прогибов и углов поворота

Значения деформации зависят от стадии сопряжения. Для стадий контакта по фаске и одноточечного контакта используем модель расчета деформации по формулам (2.32), (2.33) в сочетании с системой уравнений в квазистатической

постановке решаем с помощью MatLab (приложение Е). В таблицах 4.5 и 4.6 приведены результаты расчета значений деформации, включая прогиб и углы поворота поперечного сечения в точке контакта по фаске и односточечного контакта в двух случаях (валы без отверстий и валы с отверстиями – толщина стенки $t = 3$ мм).

Таблица 4.5 – Значения прогибов и углов поворота поперечного сечения вала с зазором 0,1 мм при контакте по фаскам

№	Вал без отверстия				Вал с отверстием			
	Δx_c , [мм]	z_c , [мм]	γ , [г]	q , [мм]	Δx_c , [мм]	z_c , [мм]	γ , [г]	q , [мм]
1	-0,0112	331,14	-0,0120	0,1	-0,0094	331,53	-0,0130	0,1
2	-0,0433	331,04	-0,0697	0,3	-0,1222	331,13	-0,2000	0,3
3	-0,0472	330,94	-0,0765	0,5	-0,1969	331,04	-0,3214	0,5
4	-0,0614	330,74	-0,1339	0,7	-0,3522	330,96	-0,5430	0,7
5	-0,1182	330,65	-0,1814	0,9	-0,6848	330,79	-1,0544	0,9
6	-0,3159	330,27	-0,4527	1,1	-0,7365	330,70	-1,1729	1,1
7	-0,4550	330,09	-0,6832	1,3	-0,7955	330,39	-1,2794	1,3
8	-0,5101	329,78	-0,7881	1,5	-0,8211	330,19	-1,3378	1,5
9	-0,5177	329,69	-0,8230	1,7	-0,8318	330,10	-1,3665	1,7
10	-0,5728	329,49	-0,8497	1,9	-0,8477	330,00	-1,3783	1,9

Таблица 4.6 – Значения прогибов и углов поворота поперечного сечения вала с зазором 0,1 мм при односточечном контакте

№	Вал без отверстия				Вал с отверстием			
	Δx_b , [мм]	z_b , [мм]	γ , [г]	q , [мм]	Δx_b , [мм]	z_b , [мм]	γ , [г]	q , [мм]
1	-0,6188	329,30	-0,8675	2,1	-0,8533	329,78	-1,3998	2,1
2	-0,6293	329,10	-0,8884	2,3	-0,8741	329,47	-1,4159	2,3
3	-0,6452	328,88	-0,9045	2,5	-0,8778	329,27	-1,4330	2,5
4	-0,6786	328,67	-0,9310	2,7	-0,8946	328,96	-1,4508	2,7
5	-0,6909	328,46	-0,9575	2,9	-0,9114	328,75	-1,4686	2,9
6	-0,7032	328,24	-0,9839	3,1	-0,9282	328,53	-1,4865	3,1
7	-0,7155	328,03	-1,0104	3,3	-0,9451	328,32	-1,5043	3,3
8	-0,7278	327,81	-1,0368	3,5	-0,9619	328,16	-1,5221	3,5
9	-0,7401	327,60	-1,0633	3,7	-0,9787	327,97	-1,5400	3,7
10	-0,7524	327,39	-1,0898	3,9	-0,9955	327,74	-1,5578	3,9

№	Вал без отверстия				Вал с отверстием			
	Δx_B , [мм]	z_B , [мм]	γ , [г]	q , [мм]	Δx_B , [мм]	z_B , [мм]	γ , [г]	q , [мм]
11	-0,7647	327,17	-1,1162	4,1	-1,0123	327,56	-1,5756	4,1
12	-0,7770	326,96	-1,1427	4,3	-1,0292	327,35	-1,5935	4,3
13	-0,7893	326,74	-1,1691	4,5	-1,0460	327,14	-1,6113	4,5
14	-0,8015	326,53	-1,1956	4,7	-1,0628	326,98	-1,6291	4,7
15	-0,8138	326,32	-1,2221	4,9	-1,0796	326,74	-1,6470	4,9

На рисунке 4.11 показаны величины прогибов и углов поворота поперечного сечения детали в процессе сопряжения при контакте по фаскам и односточном контакте. В точке контакта прогиб и поворот поперечного сечения в момент контакта деталей начинают увеличиваться и продолжают увеличиваться с ростом глубины сопряжения.

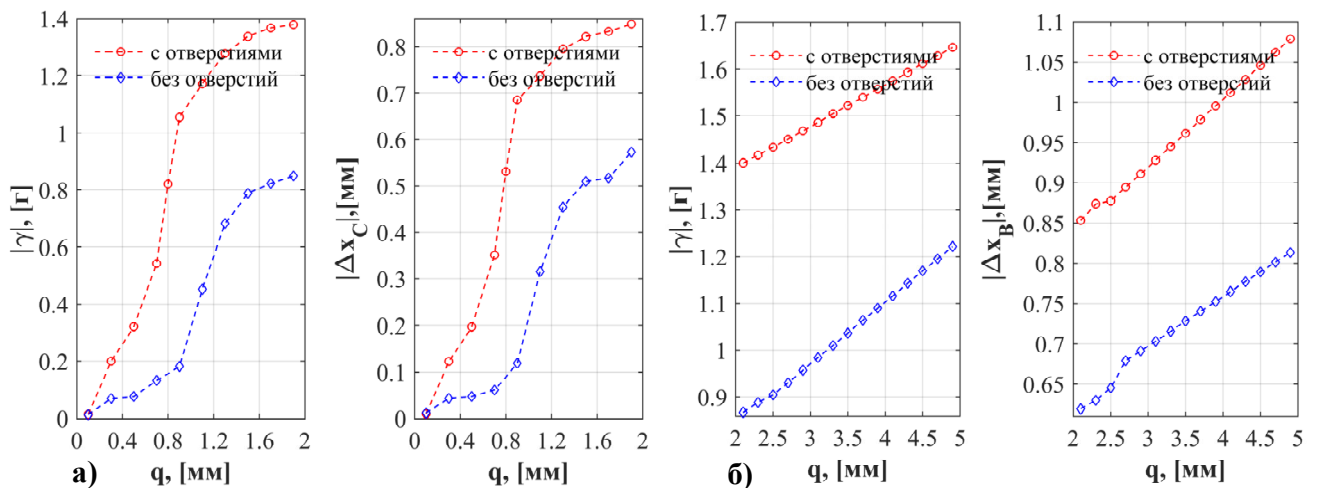


Рисунок 4.11 – Величина деформации в точке контакта при зазоре 0,1 мм: а– при контакте по фаскам; б– при односточном контакте

Для стадий двухточечного контакта используем модель расчета деформации по формулам (2.45), (2.46) совместно с системой уравнений при двухточечном контакте [4; 6; 100].

В таблицах 4.7 и 4.8 представлены результаты расчета с помощью MatLab величин прогиба и углов поворота поперечного сечения вала в точках A и B (для двух случаев: валы без отверстий и валы с отверстиями с помощью уравнений (2.45), (2.46), (2.150), (2.152), (2.155), (2.156).

Таблица 4.7 – Значения прогиба и углов поворота поперечного сечения вала без отверстия при двухточечном контакте с зазором 0,1 мм

№	Δx_B , [мм]	z_B , [м]	Δx_A , [мм]	z_A , [м]	γ , [Г]	θ , [Г]	q , [мм]
1	-0,8355	326,42	-0,1020	331,89	-1,2524	0,3967	5,0
2	-0,8647	325,25	-0,1307	331,75	-1,3351	0,4208	6,5
3	-0,9769	323,12	-0,1677	331,63	-1,6739	0,4520	8,6
4	-1,1572	321,06	-0,2148	331,59	-2,0308	0,5369	10,6
5	-1,3692	318,85	-0,3013	331,45	-2,4559	0,6634	12,8
6	-1,4785	317,84	-0,3588	331,34	-2,6763	0,7152	13,8
7	-1,5854	316,76	-0,4166	331,26	-2,9351	0,7816	14,9
8	-1,7004	315,65	-0,5276	331,16	-3,2330	0,8293	16,0
9	-1,9585	313,47	-0,6824	331,03	-3,8146	1,0108	18,2
10	-2,2523	311,22	-0,8711	330,93	-4,5314	1,2603	20,5
11	-2,3630	310,21	-0,9749	330,72	-4,7509	1,3827	21,5
12	-2,6012	307,97	-1,2355	330,68	-5,5741	1,6496	23,7
13	-2,8926	305,90	-1,5185	330,51	-6,0840	1,8795	25,7
14	-3,0969	303,71	-1,7273	330,42	-6,6009	2,0691	27,9
15	-3,3140	300,40	-1,9673	330,22	-7,3003	2,3317	31,2

Таблица 4.8 – Значения прогиба и углов поворота поперечного сечения вала с отверстием при двухточечном контакте с зазором 0,1 мм ($t = 3$ мм)

№	Δx_B , [мм]	z_B , [м]	Δx_A , [мм]	z_A , [м]	γ , [Г]	θ , [Г]	q , [мм]
1	-1,0926	326,23	-0,1940	332,35	-1,6618	0,5550	5,0
2	-1,2037	325,61	-0,3056	332,24	-1,9646	0,6734	5,7
3	-1,3698	324,36	-0,4559	332,13	-2,3542	0,8204	8,0
4	-1,5598	322,18	-0,6140	332,03	-2,7440	0,9727	10,0
5	-1,8185	320,00	-0,7552	331,92	-3,1504	1,1193	12,2
6	-2,1235	316,94	-1,0119	331,82	-3,7937	1,3393	15,2
7	-2,3298	315,83	-1,1821	331,73	-4,2120	1,5015	16,5
8	-2,6213	312,63	-1,3719	331,57	-4,9603	1,7653	18,5
9	-2,8165	311,57	-1,5632	331,50	-5,4312	1,9445	19,5
10	-3,0177	311,48	-1,8697	331,39	-5,8234	2,1441	20,7
11	-3,3731	309,28	-2,4206	331,24	-6,9674	2,6113	22,9
12	-3,6175	308,18	-2,6836	331,10	-7,7271	2,9434	24,0
13	-3,8522	306,00	-3,0482	330,98	-8,5492	3,2511	26,2
14	-4,0765	303,83	-3,2560	330,76	-9,3866	3,5232	28,4
15	-4,2760	301,05	-3,4726	330,55	-9,9742	3,6143	30,5

На рисунке 4.12 показаны величины прогиба и поворота поперечного сечения в процессе сопряжения в точке B . В точке B прогиб и поворот поперечного

сечения в момент контакта деталей начинают увеличиваться и продолжают расти с увеличением глубины сопряжения. Величина деформации в точке B в обоих случаях соответствует одному и тому же правилу. При одинаковых условиях сборки степень деформации вала с отверстием (толщина стенки $t = 3$ мм) будет больше, чем у вала без отверстия. Для материалов с более низкой величиной значения EI_γ величина деформации с глубиной будет больше.

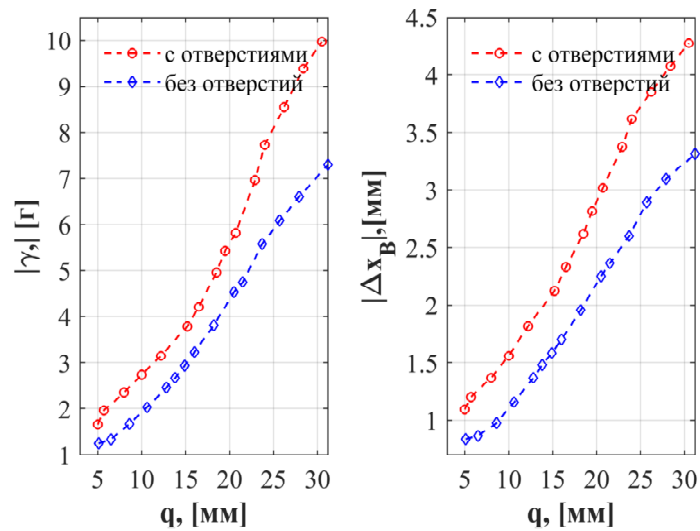


Рисунок 4.12 – Величина деформации пластикового вала в точке B при двухточечном контакте с зазором 0,1 мм

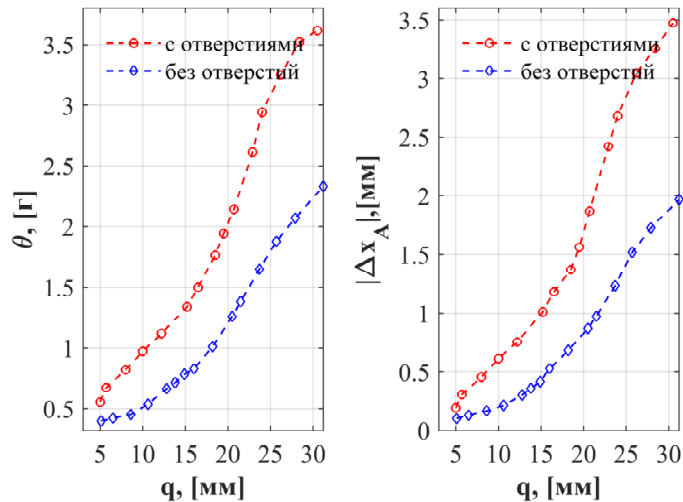


Рисунок 4.13 – Величина деформации пластикового вала в точке A при двухточечном контакте с зазором 0,1 мм

На рисунке 4.13 показаны величины прогиба и угла поворота поперечного сечения во время сопряжения в точке A . В точке A значения прогиба и угол поворота поперечного сечения увеличиваются с увеличением глубины сопряжения

в обоих случаях (валы с отверстиями – толщина стенки $t = 3$ мм и без отверстий). В точке A , вал с отверстием деформируется больше, чем вал без отверстия для идентичных условий сборки.

Проведенные исследования позволяют количественно оценить характерные параметры податливости упругого вала (прогибы и углы поворота поперечных сечений в характерных точках). Результаты эксперимента показывают, что прогибы пропорциональны углу поворота поперечного сечения пластикового вала. Деформируемость стержня увеличивается с ростом глубины сопряжения и с уменьшением изгибной жесткости EI_Y материала стержня. Полученные значения прогибов и углов поворота при двухточечном контакте в процессе сопряжения вала со втулкой позволяют корректировать движение выходного звена робота при выполнении операции сборки и необходимы для разработки алгоритма ПСУ при роботизированной сборке нежестких деталей [100].

4.3.3 Экспериментальное определение условий заклинивания нежестких цилиндрических деталей

При разработке технологии РС необходимо определить условия заклинивания деталей. Разработана математическая модель роботизированной сборки, необходимая для идентификации положения вала по сигналам с СМД [5]. Полученные аналитические решения позволили определить условия возникновения заклинивания упругого вала при двухточечном контакте в процессе сопряжения его с жесткой втулкой.

В работе получено аналитическое описание условий сопряжения, возникающих при установке нежесткого вала в жесткую втулку на этапе двухточечного контакта.

Адекватность предложенной математической модели подтверждена экспериментальным анализом условий заклинивания и количественной оценкой зависимости условий заклинивания от изгибной жесткости вала в среде MatLab (приложение Г).

На рисунке 4.14 показано изменение сил и моментов при сопряжении. На горизонтальной оси – глубина сопряжения q , на вертикальной оси – компоненты

основного вектора силы. Видно, что значения осевого сборочного усилия в двух случаях заметно различаются. В случае более жесткого вала без отверстия значение осевой сборочной силы выше. Это различие возрастает с увеличением глубины сопряжения. При различных глубинах сопряжения пластикового вала со втулкой (рисунок 4.14а) происходит резкий рост компоненты основного вектора силы F_{Z1} после 11,1 мм и после 15,5 мм на рисунке 4.14б, что указывает на заклинивание в зоне сборки.

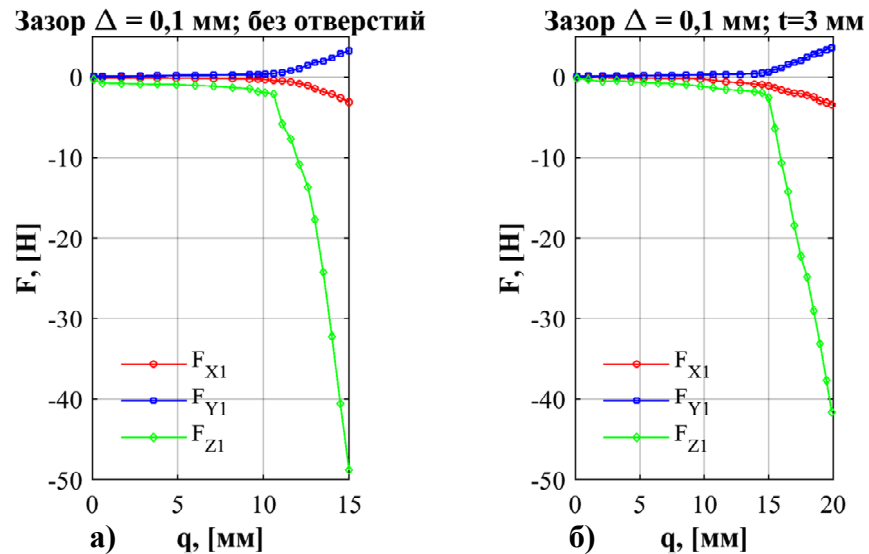


Рисунок 4.14 – Зависимость компонент главного вектора сил от глубины сопряжения: а – для валов без отверстий; б – для валов с отверстиями

В таблице 4.9 и 4.10 приведены значения составляющих сил и моментов F_{X1} , F_{Y1} , F_{Z1} , M_{X1} , M_{Y1} , M_{Z1} полученные с СМД и рассчитанные с помощью MatLab по уравнению (2.170).

Таблица 4.9 соответствует случаю вала без отверстия. При глубинах сопряжения до 10,6 мм заклинивания не возникало. Данная глубина принималась граничной при сборке вала. При глубине более 11,1 мм при значении $b' = |M_Y/rF_Z + aF_X/F_Z| > b$ происходило заклинивание при сопряжении.

Таблица 4.10 содержит результаты для вала с отверстием. При глубинах сопряжения до 15,1 мм заклинивания не возникало. Данная глубина принималась граничной при сборке. При глубине более 15,5 мм при условии $b' = |M_Y/rF_Z + aF_X/F_Z| > b$ возникало заклинивание.

Таблица 4.9 – Экспериментальные результаты при сборке нежесткого вала без отверстия при зазоре 0,1 мм

№	F_{X1} , [Н]	F_{Y1} , [Н]	F_{Z1} , [Н]	M_{X1} , [Н.м]	M_{Y1} , [Н.м]	q , [мм]	$\left \frac{F_X}{F_Z}\right $	$f(\gamma)$	b'	b
1	-0,104	0,144	-0,894	0,0005	-0,0140	3,8	0,199	4,988	0,9303	0,98
2	-0,114	0,177	-0,920	0,0006	-0,0172	4,9	0,229	4,986	1,1830	1,31
3	-0,133	0,188	-1,036	0,0009	-0,0195	6,0	0,222	4,984	1,5617	1,63
4	-0,157	0,212	-1,142	0,0012	-0,0217	7,1	0,231	4,983	1,8243	1,95
5	-0,197	0,244	-1,316	0,0018	-0,0372	8,2	0,238	4,966	2,1049	2,27
6	-0,218	0,266	-1,452	0,0019	-0,0450	9,2	0,237	4,958	2,4128	2,53
7	-0,257	0,293	-1,851	0,0020	-0,0593	9,7	0,210	4,943	2,5273	2,63
8	-0,287	0,321	-1,946	0,0034	-0,0691	10,1	0,221	4,934	2,6470	2,69
9	-0,420	0,377	-2,168	0,0049	-0,0863	10,6	0,260	4,921	2,7718	2,78
10	-0,489	0,542	-5,845	0,0078	-0,1391	11,1	0,124	4,869	3,1024	2,89
11	-0,573	0,737	-7,693	0,0082	-0,2028	11,6	0,121	4,811	3,1757	2,98
12	-0,821	0,982	-10,82	0,0095	-0,3367	12,1	0,118	4,691	3,2776	3,06
13	-1,021	1,453	-13,64	0,0101	-0,4306	12,6	0,130	4,622	3,3232	3,12
14	-1,456	1,796	-17,75	0,0123	-0,6563	13,0	0,130	4,443	3,3533	3,10
15	-1,863	1,973	-24,25	0,0148	-0,8767	13,5	0,111	4,282	3,4109	3,17
16	-2,148	2,342	-32,18	0,0164	-1,0382	14,0	0,098	4,183	3,6427	3,23
17	-2,621	2,899	-40,60	0,0194	-1,3151	14,5	0,096	4,032	3,8722	3,25
18	-3,125	3,244	-48,78	0,0239	-1,5835	15,0	0,092	3,891	4,0442	3,29

Таблица 4.10 – Экспериментальные результаты при сборке нежесткого вала с отверстием при зазоре 0,1 мм (толщина стенки $t = 3$ мм)

№	F_{X1} , [Н]	F_{Y1} , [Н]	F_{Z1} , [Н]	M_{X1} , [Н.м]	M_{Y1} , [Н.м]	q , [мм]	$\left \frac{F_X}{F_Z}\right $	$f(\gamma)$	b'	b
1	-0,102	0,131	-0,560	0,0005	-0,0157	4,3	0,297	4,985	1,07443	1,15
2	-0,114	0,168	-0,687	0,0006	-0,0160	5,3	0,295	4,987	1,26997	1,45
3	-0,127	0,175	-0,754	0,0008	-0,0185	6,4	0,287	4,984	1,57698	1,78
4	-0,141	0,196	-0,824	0,0010	-0,0195	7,5	0,293	4,984	1,91010	2,11
5	-0,152	0,219	-0,918	0,0013	-0,0214	8,6	0,290	4,982	2,19954	2,44
6	-0,219	0,242	-1,161	0,0014	-0,0233	9,7	0,281	4,983	2,40283	2,77
7	-0,379	0,274	-1,347	0,0015	-0,0253	10,7	0,347	4,986	2,86928	3,07
8	-0,586	0,290	-1,575	0,0017	-0,0275	11,7	0,415	4,991	3,07927	3,37
9	-0,697	0,310	-1,687	0,0019	-0,0295	12,8	0,452	4,993	3,38145	3,69
10	-0,869	0,370	-1,843	0,0129	-0,0304	13,9	0,512	4,996	3,74975	4,02
11	-0,941	0,446	-1,994	0,0144	-0,0334	14,5	0,522	4,995	4,09625	4,20

№	F_{X1} , [Н]	F_{Y1} , [Н]	F_{Z1} , [Н]	M_{X1} , [Н.м]	M_{Y1} , [Н.м]	q , [мм]	$\left \frac{F_X}{F_Z}\right $	$f(\gamma)$	b'	b
12	-1,076	0,595	-2,590	0,0154	-0,0537	15,1	0,475	4,977	4,25535	4,34
13	-1,333	0,877	-6,369	0,0160	-0,2061	15,5	0,250	4,813	4,54141	4,44
14	-1,615	1,069	-10,65	0,0172	-0,3471	16	0,181	4,675	4,62208	4,55
15	-1,886	1,534	-14,25	0,0186	-0,4642	16,5	0,170	4,576	4,75452	4,67
16	-2,059	1,791	-18,48	0,0198	-0,6028	17	0,147	4,460	4,81166	4,78
17	-2,102	2,006	-22,25	0,0217	-0,7252	17,5	0,130	4,364	4,91165	4,89
18	-2,330	2,469	-24,83	0,0237	-0,8084	18	0,136	4,316	5,25330	5,01
19	-2,510	2,838	-29,04	0,0248	-0,9434	18,5	0,130	4,228	5,41010	5,12
20	-2,977	3,014	-33,14	0,0259	-1,0762	19,0	0,127	4,149	5,79866	5,23
21	-3,165	3,380	-37,70	0,0269	-1,2253	19,5	0,122	4,062	6,17746	5,34
22	-3,395	3,614	-41,59	0,0285	-1,3558	19,9	0,119	3,996	6,50750	5,42

На рисунке 4.15 показаны диаграммы заклинивания при различной глубине сопряжения пластика вала без отверстия. На глубине до 10,6 мм заклинивания не происходит. Точка, соответствующая строке 9 таблицы 4.9, находится внутри области диаграммы (рисунок 4.15а). Однако при глубине сопряжения $q = 11,1$ мм возникает заклинивание. Точка с координатами, соответствующими строке 10 таблицы 4.9, находится уже вне области диаграммы (рисунок 4.15б).

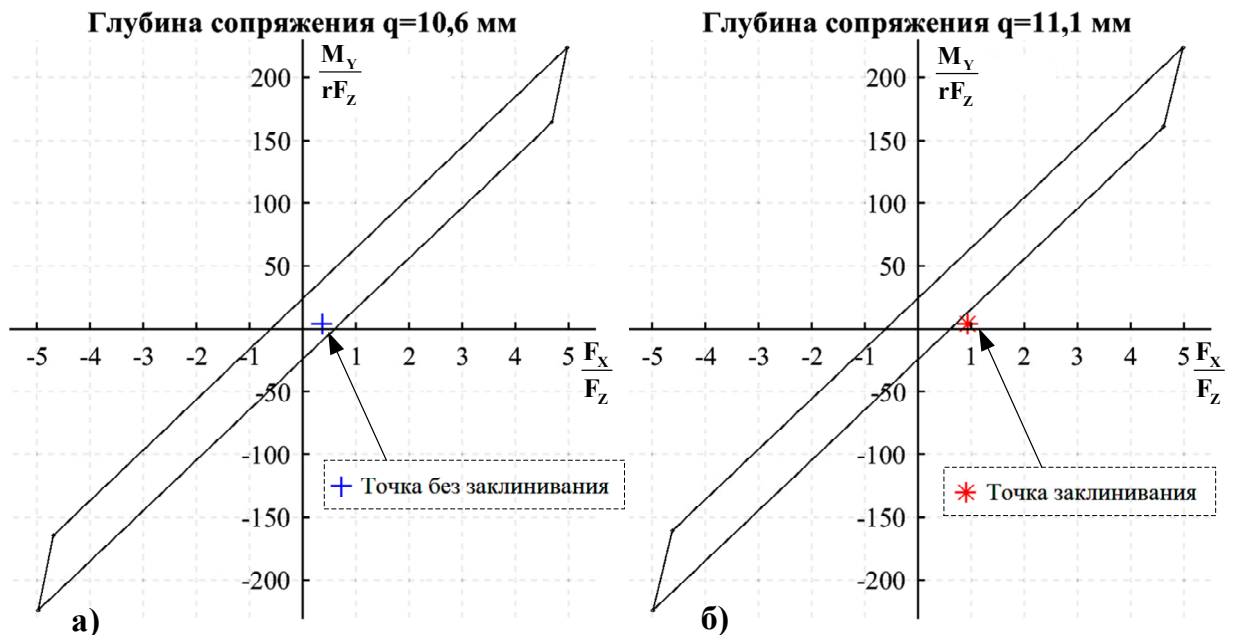


Рисунок 4.15 – Диаграмма заклинивания при различной глубине сопряжения вала без отверстия: а – на глубине 10,6 мм; б – на глубине 11,1 мм

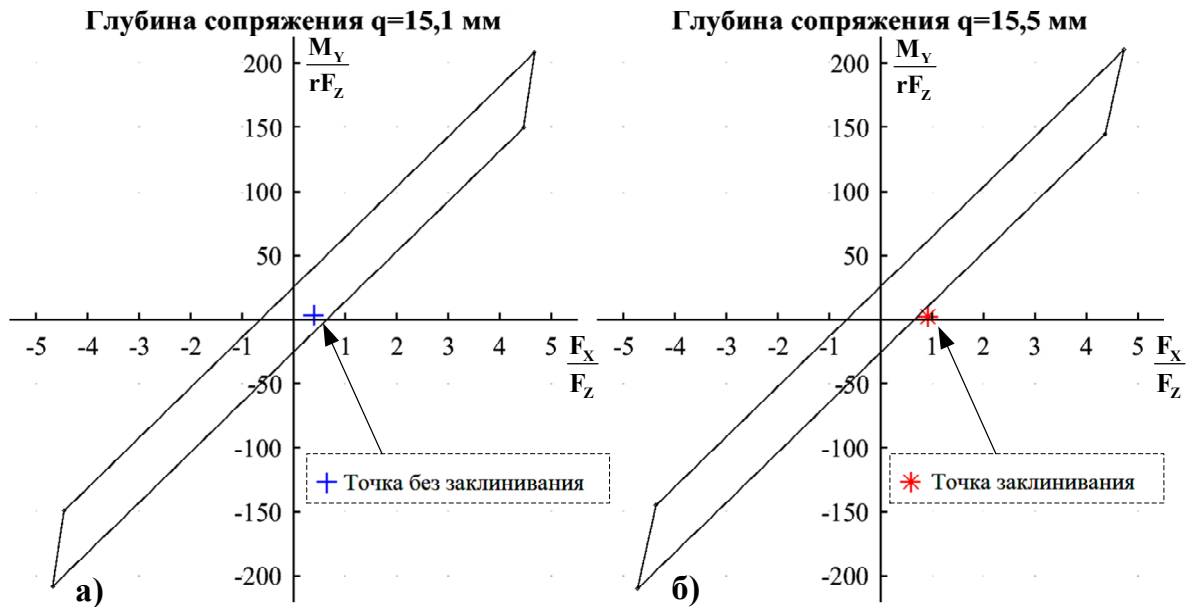


Рисунок 4.16 – Диаграмма заклинивания при различной глубине соединения вала с отверстиями: а – на глубине 15,1 мм; б – на глубине 15,5 мм

Аналогичный эффект наблюдается при сопряжении полого пластикового вала с жесткой втулкой. На рисунке 4.16 показаны диаграммы заклинивания при различной глубине сопряжения пластикового вала с отверстием. На глубине до 15,1 мм заклинивания не происходит, точка, соответствующая строке 12 таблицы 4.10, находится во внутренней области диаграммы (рисунок 4.16а). Однако при глубине сопряжения $q = 15,5$ мм возникает заклинивание. Точка с координатами, соответствующими строке 13 таблицы 4.10, находится уже вне области диаграммы (рисунок 4.16б).

Разработана математическая модель сборки нежесткого вала с жесткой втулкой, позволяющая определить условия возникновения заклинивания при двухточечном контакте. Полученные условия заклинивания нежесткого вала в предельном случае совпадают с условиями Simunovic S. [90; 104; 105] для абсолютно жесткого вала. Адекватность предложенной математической модели подтверждена проведенным экспериментом, результаты которого показывают, что заклинивание существенно зависит от величины изгибной жесткости вала, а именно заклинивание вала с большей жесткостью происходит на меньшей глубине сопряжения. Результаты исследования служат основой для разработки алгоритма ПСУ роботом при сборке нежестких цилиндрических деталей.

4.4 Идентификация положения, анализ сил и моментов при активной роботизированной сборке нежесткого вала

Создана экспериментальная установка, оснащенная СМД и схватом. При создании установки была выбрана жесткая схема крепления СМД и детали в схвате для организации обратной связи в системе управления робота. При проведении эксперимента использованы экспериментальные значения коэффициента трения, полученные автором. Проведена идентификация положения вала и втулки на этапах сопряжения в среде MatLab (приложение Е).

4.4.1 Идентификация положения нежесткого вала с фасками

В таблице 4.11 приведены значения силы F_{Z1} и координаты центра датчика от глубины сопряжения при контакте по фаскам пластикового вала из материала фторопласт-4, рассчитанные в Matlab с использованием уравнений (2.93), (2.94) и (2.98) для соединений при зазоре 0,1 мм.

Таблица 4.11 – Экспериментальные и расчетные значения при контакте по фаскам

№	Экспериментальные значения				Расчетные значения			
	$X_{\text{Одат}}, [\text{мм}]$	$Y_{\text{Одат}}, [\text{мм}]$	$F_{Z1}, [\text{Н}]$	$q, [\text{мм}]$	$\Delta x_C, [\text{мм}]$	$\gamma, [\text{г}]$	$\theta, [\text{г}]$	$\Delta z, [\text{мм}]$
1	1,1321	-0,092	-0,0305	0,1	-1,7180	-2,9872	4,4178	1,2534
2	1,0653	0,759	-0,5420	0,2	-1,6772	-2,8772	4,2040	1,1742
3	0,9449	-0,865	-0,5420	0,3	-1,6224	-2,8224	4,0320	1,0540
4	0,8983	0,814	1,2972	0,4	-1,5817	-2,7817	3,9217	1,0018
5	0,8365	-0,703	1,2972	0,5	-1,5622	-2,7622	3,8018	0,9275
6	-0,8077	0,306	-3,3704	0,6	-1,5518	-2,7518	3,7842	0,9055
7	-0,7442	0,324	-3,3704	0,7	-1,5398	-2,7398	3,6437	0,8334
8	-0,7040	0,559	-9,3622	0,8	-1,5236	-2,7236	3,5157	0,7909
9	-0,6204	0,557	-9,3622	0,9	-1,5116	-2,7116	3,4162	0,7062
10	-0,5448	0,237	-6,5535	1,0	-1,4954	-2,6954	3,3751	0,6371
11	-0,5114	0,073	-6,5535	1,1	-1,4834	-2,6834	3,3401	0,6029
12	-0,4597	0,086	-4,9013	1,2	-1,4683	-2,6683	3,2978	0,5476
13	-0,4018	-0,093	-2,9013	1,3	-1,4443	-2,6443	3,2843	0,4929
14	-0,4027	2,570	-0,3228	1,4	-1,4376	-2,6376	3,2478	0,4879

№	Экспериментальные значения				Расчетные значения			
	$X_{\text{Одат}}, [\text{мм}]$	$Y_{\text{Одат}}, [\text{мм}]$	$F_{Z1}, [\text{Н}]$	$q, [\text{мм}]$	$\Delta x_C, [\text{мм}]$	$\gamma, [\text{г}]$	$\theta, [\text{г}]$	$\Delta_{\Sigma}, [\text{мм}]$
15	-0,3827	-0,168	-0,3228	1,5	-1,4314	-2,6314	3,2279	0,4693
16	-0,3588	-0,208	-0,4446	1,6	-1,4271	-2,6271	3,2079	0,4471
17	-0,3558	-0,055	-0,4446	1,7	-1,4247	-2,6247	3,1879	0,4406
18	-0,3483	-0,091	1,4129	1,8	-1,4133	-2,6233	3,1601	0,4302
19	-0,3421	1,310	1,4129	1,9	-1,4125	-2,6225	3,1401	0,4233
20	-0,3361	0,663	-0,1157	2,0	-1,4120	-2,6220	3,1201	0,4146

На рисунке 4.17 показано изменение параметров сборки на этапе контакта по фаскам. В числовые величины отклонений включаются координаты центра СМД и угол перекоса между осями детали, уменьшающийся с увеличением глубины сопряжения. Это способствует уменьшению величины деформации, включающей прогиб и угол поворота поперечного сечения вала в точке контакта.

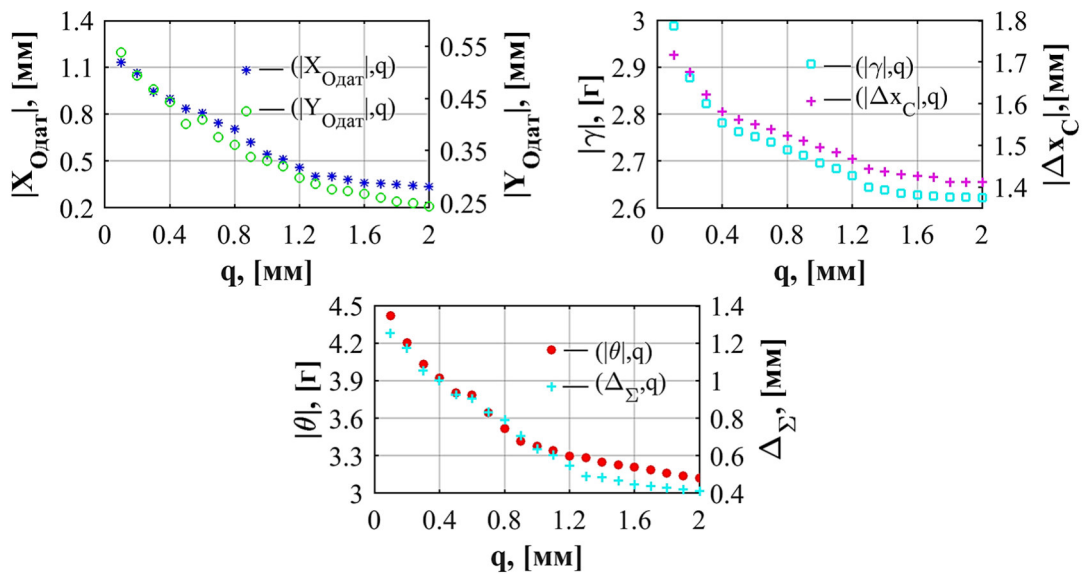


Рисунок 4.17 – Закономерности изменения координат центра СМД, угла перекоса осей деталей и величины деформации при контакте по фаскам

4.4.2 Идентификация положения нежесткого вала при одноточечном контакте

В таблице 4.12 приведены значения силы F_{Z1} и координаты центра датчика от глубины сопряжения при одноточечном контакте, рассчитанные в среде Matlab с использованием уравнений (2.119), (2.120) и (2.121) для соединений с зазором 0,1 мм.

Таблица 4.12 – Экспериментальные и расчетные значения при одноточечном контакте

№	Экспериментальные значения				Расчетные значения			
	$X_{\text{Одат}},$ [мм]	$Y_{\text{Одат}},$ [мм]	$F_{Z1},$ [Н]	$q,$ [мм]	$\Delta x_B,$ [мм]	$\gamma,$ [г]	$\theta,$ [г]	$\Delta_{\Sigma},$ [мм]
1	-0,3212	0,23	-1,1157	2,1	-1,4012	-2,6212	3,0201	0,3951
2	-0,2783	-0,2043	-2,201	2,3	-1,3786	-2,5720	2,8578	0,3453
3	-0,2578	-0,1861	0,134	2,5	-1,3104	-2,4447	2,7163	0,3180
4	-0,2215	-0,1599	-1,5012	2,7	-1,293	-2,4123	2,6803	0,2732
5	-0,1993	-0,1439	0,2888	2,9	-1,2736	-2,376	2,6400	0,2458
6	-0,1893	-0,1366	0,0305	3,1	-1,2518	-2,3354	2,6026	0,2334
7	-0,1782	-0,1287	-0,3715	3,3	-1,2399	-2,3132	2,5702	0,2198
8	-0,1652	-0,1192	0,7064	3,5	-1,2304	-2,2954	2,5505	0,2037
9	-0,1539	-0,1111	1,2558	3,7	-1,2097	-2,2568	2,5202	0,1898
10	-0,1478	-0,1067	2,268	3,9	-1,1975	-2,2341	2,4824	0,1823
11	-0,1386	-0,1001	-1,3045	4,1	-1,1699	-2,1826	2,4621	0,1709
12	-0,1324	-0,0956	-1,2862	4,2	-1,167	-2,1772	2,4559	0,1633
13	-0,1261	-0,091	-2,4862	4,3	-1,1623	-2,1686	2,4462	0,1555
14	-0,1203	-0,0869	-0,2862	4,4	-1,1505	-2,1465	2,4213	0,1484
15	-0,1109	-0,078	0,4750	4,5	-1,152	-2,1492	2,3880	0,1356
16	-0,1054	-0,0761	0,2450	4,6	-1,1423	-2,1312	2,3680	0,1300
17	-0,1014	-0,0732	-2,1218	4,7	-1,1294	-2,1070	2,3412	0,1251
18	-0,0915	-0,0661	-3,1218	4,8	-1,1192	-2,0881	2,3201	0,1129
19	-0,0881	-0,0636	-1,0609	4,9	-1,1114	-2,0735	2,3039	0,1087
20	-0,0822	-0,0593	-3,0609	5	-1,1008	-2,0538	2,2820	0,1013

На рисунке 4.18 показано изменение параметров сборки на этапе одноточечного контакта. В числовые величины отклонений включаются координаты центра СМД и угол перекося между осями детали, уменьшающийся с увеличением глубины сопряжения. Идентификация положения нежесткого вала и жесткой втулки позволит скорректировать движение робота в процессе сборки.

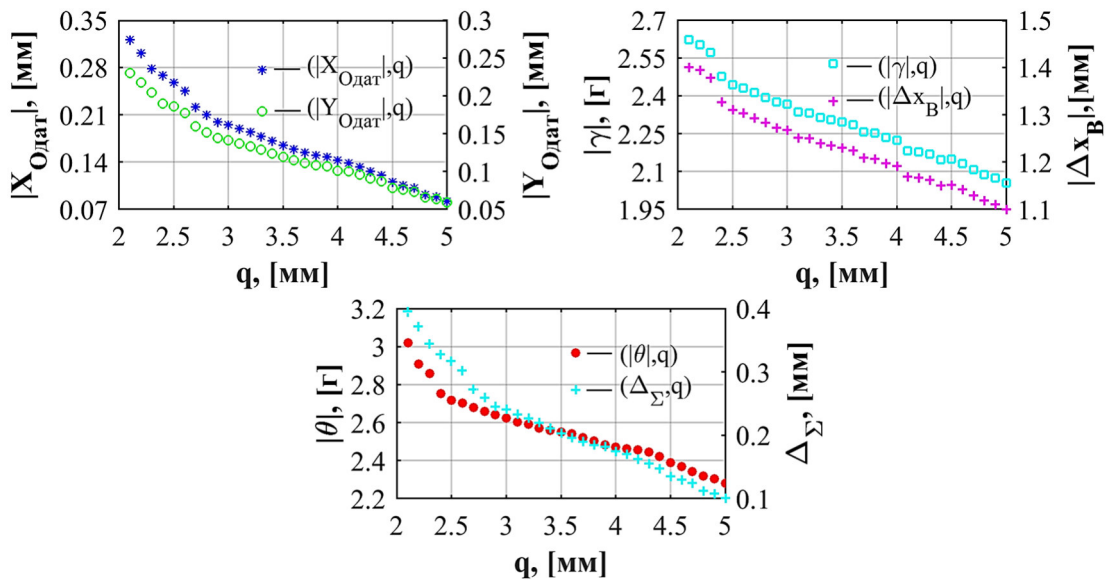


Рисунок 4.18 – Закономерности изменения координат центра СМД, угла перегиба осей деталей и величины деформации при одноточечном контакте

4.4.3 Идентификация положения нежесткого вала при двухточечном контакте

В таблице 4.13 приведены значения силы F_{Z1} и координаты центра датчика от глубины сопряжения при двухточечном контакте, рассчитанные в среде Matlab с использованием уравнений (2.147), (2.150), (2.152), (2.155) и (2.156) для соединений с зазором 0,1 мм.

Таблица 4.13 – Экспериментальные и расчетные значения при двухточечном контакте

№	Экспериментальные значения				Расчетные значения				
	$X_{\text{Одат}}'$ [мм]	$Y_{\text{Одат}}'$ [мм]	F_{Z1}' [Н]	q , [мм]	$\Delta x_B'$ [мм]	$\Delta x_A'$ [мм]	γ [Г]	θ , [Г]	Δ_{Σ}' [мм]
1	-0,0842	-0,0593	-1,35	5,1	-1,0201	-1,0001	-2,0454	2,282	0,103
2	-0,0686	-0,0493	0,87	6,9	-0,7736	-0,7382	1,5585	1,6405	0,0845
3	-0,0625	-0,0467	-1,54	8,9	-0,6980	-0,6661	1,4062	1,4802	0,0781
4	-0,0602	-0,0442	-0,47	9,3	-0,6224	-0,5939	1,2538	1,3198	0,0747
5	-0,0519	-0,0314	-1,26	12,7	-0,3000	-0,3052	0,6444	0,6178	0,0607
6	-0,0446	-0,0298	-2,76	14,8	-0,2244	-0,2331	0,4920	0,5179	0,0536
7	-0,0403	-0,0291	-0,94	16,5	-0,1686	-0,1609	0,3397	0,3576	0,0498
8	-0,0302	-0,0241	-5,04	20,1	-0,0897	-0,0756	0,1806	0,1901	0,0386

№	Экспериментальные значения				Расчетные значения				
	$X_{\text{Одат}},$ [мм]	$Y_{\text{Одат}},$ [мм]	$F_{Z1},$ [Н]	$q,$ [мм]	$\Delta x_B,$ [мм]	$\Delta x_A,$ [мм]	$\gamma,$ [г]	$\theta,$ [г]	$\Delta_{\Sigma},$ [мм]
9	-0,0254	-0,0225	-10,91	22,3	-0,0636	-0,0607	0,1281	0,1348	0,034
10	-0,0201	-0,0201	-13,35	26,1	-0,0803	-0,0766	0,1617	0,1702	0,0284
11	-0,0213	-0,0223	-15,48	28,2	-0,0625	-0,0800	0,1690	0,1779	0,0309
12	-0,0209	-0,0209	-16,42	30,3	-0,0573	-0,0729	0,1539	0,162	0,0295
13	-0,0134	-0,0123	-18,15	32	-0,0729	-0,0696	0,1470	0,1547	0,0182
14	-0,0158	-0,0146	-20,14	34,1	-0,0646	-0,0616	0,1302	0,137	0,0215
15	-0,018	-0,0127	-20,35	36,2	-0,0513	-0,0489	0,1033	0,1087	0,022
16	-0,0115	-0,0115	-21,60	38	-0,0418	-0,0399	0,0842	0,0886	0,0163
17	-0,0138	-0,0124	-22,22	40	-0,0329	-0,0327	0,0663	0,0698	0,0185
18	-0,0118	-0,0118	-21,87	42,1	-0,0205	-0,0204	0,0413	0,0435	0,0167
19	-0,0129	-0,0103	-22,91	46	-0,0102	-0,0101	0,0206	0,0217	0,0165
20	-0,0102	-0,011	-21,59	49,8	-0,0085	-0,0084	0,0171	0,018	0,015

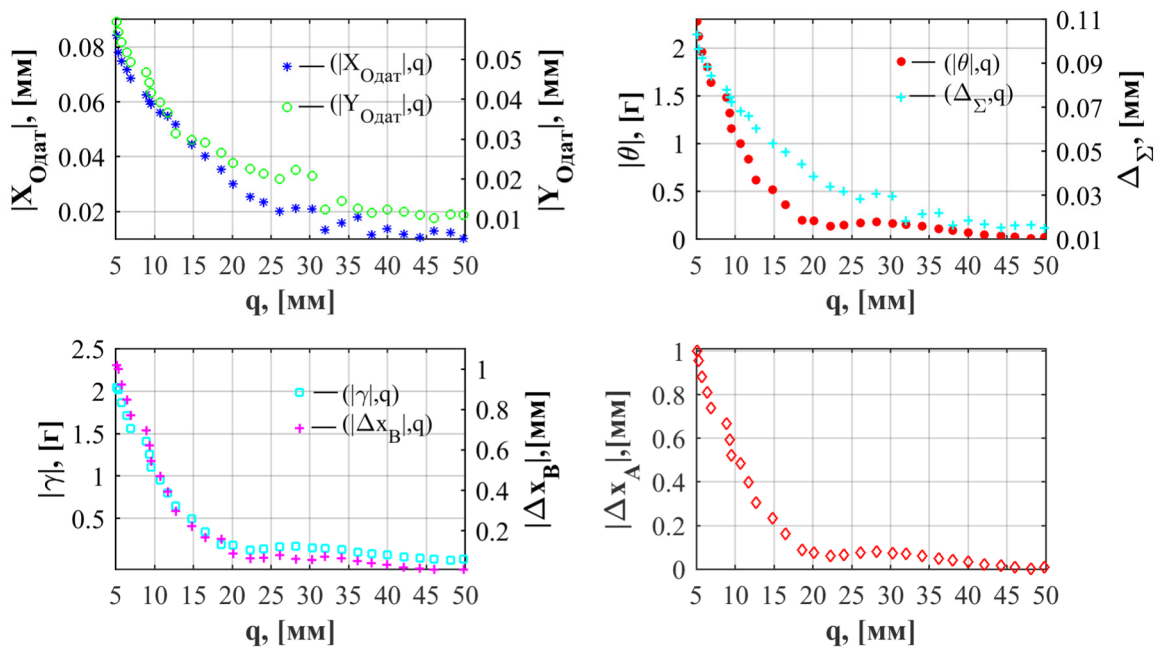


Рисунок 4.19 – Изменение координат центра СМД, угла перекоса осей деталей и величины деформации при двухточечном контакте

На рисунке 4.19 показаны закономерности изменения параметров сборки в процессе сопряжения при двухточечном контакте: координаты центра СМД, углы перекоса θ и деформации в точках контакта A и B . При этом наблюдается, что значения отклонений снижены до допустимого уровня и стабильны по всей

глубине сопряжения. Уровень деформации в точках контакта также уменьшается и поддерживается на протяжении всего процесса сопряжения на глубину до 50 мм.

4.5 Оценка теоретических и экспериментальных результатов, полученных с помощью модели машины опорных векторов

Получив 2500 наборов тестовых сигналов, были построены модели классификации для каждого этапа и выполнена классификация этапов. Эталонные сигналы сил и моментов соответствующих этапов были зафиксированы и показаны на рисунке 4.20.

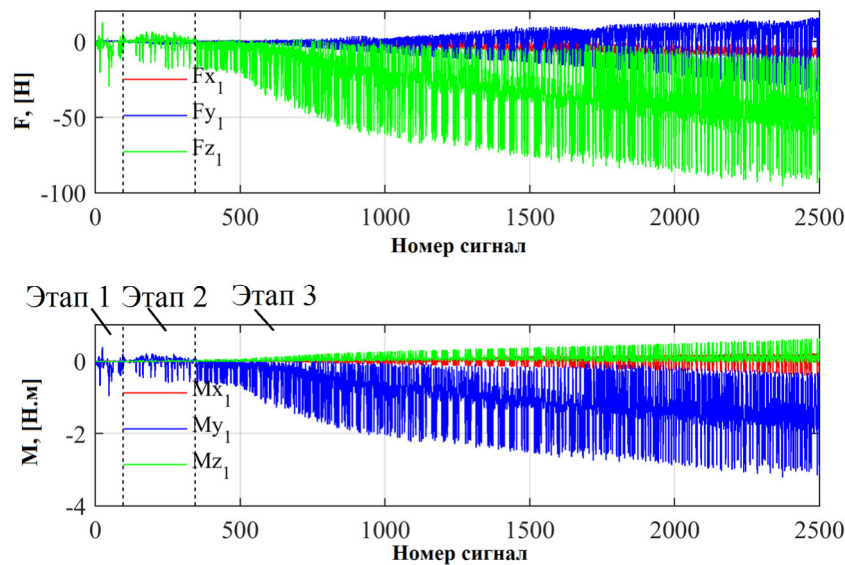


Рисунок 4.20 – Сигналы экспериментальных данных

На основе экспериментальных данных рассчитаны значения w_{1i} , w_{2i} , b_i с помощью MatLab (приложение Д). Получен вектор параметров модели SVM (таблица 4.14).

Таблица 4.14 – Шаг классификации модели SVM

Шаг классификации	Классификация CS	w_{1i}	w_{2i}	b_i
1	Этап 0 - Этап 1	$ F_{X1,Y1,Z1} \leq F_K$		
2	Этап 1 - Этап 2	-0,0154	-3,5650	-3,0312
3	Этап 2 - Этап 3	-0,0222	0,76148	3,7753

На шаге 1, основываясь на интенсивности $|F_{X1,Y1,Z1}|$, выделяют составляющую силы (этап 0) как состояние контакта, в котором значение силы равно $|F_{X1,Y1,Z1}| \leq F_K$. Экспериментально определяют значение константы F_K .

На шаге 2 классификации (этап 1) происходит разделение с использованием признаков x_1 и x_2 . Следует отметить, что, хотя классы хорошо разделимы (благодаря набору признаков), классификация очень неблагоприятна с точки зрения размера классов. Этап 1 содержит всего 24,68% от общего количества сгенерированных шаблонов (рисунок 4.21) [11; 103].

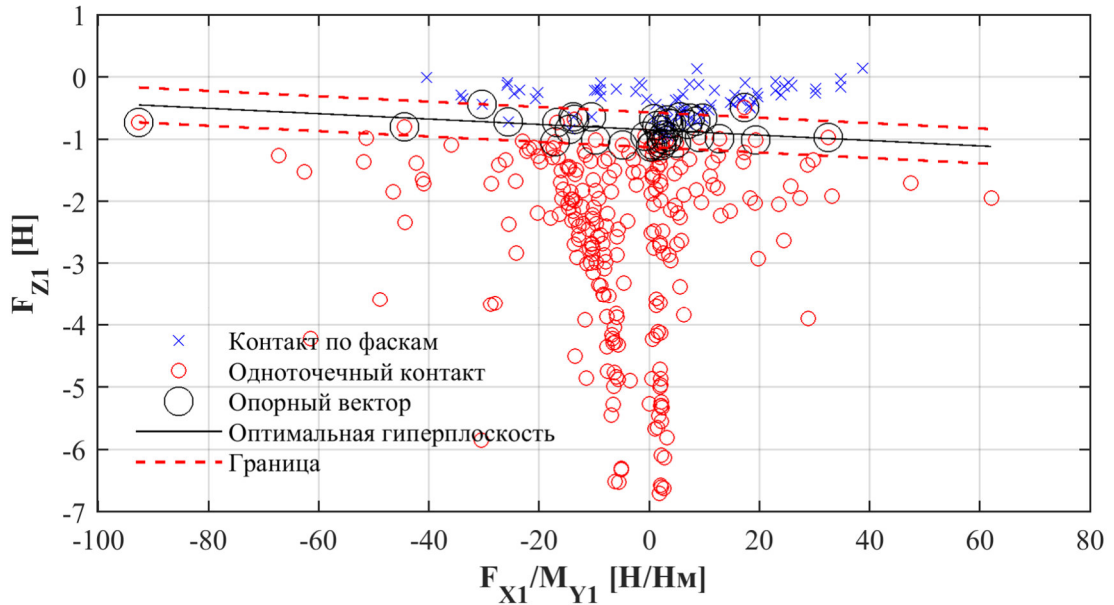


Рисунок 4.21 – Гиперплоскость, устанавливающая границу между двумя слоями (контакт по фаскам и одноточечный контакт- приложение Д)

С другой стороны, SVM демонстрирует хорошие классификационные свойства независимо от размера классов. Когда SVM используются для классификации, шаблоны, расположенные ближе к границам класса, более значимы, чем те, что находятся далеко. Граница класса определяется с помощью отношения:

$$w_{11}x_1 + w_{21}x_2 + b_1 = 0 \quad (4.1)$$

Значения w_{11} , w_{21} и b_1 приведены в таблице 4.14. Используя SVM, был получен запас $\Delta_1=0,28$. Результаты классификации показаны на рисунке 4.21. Доля опорных векторов в общем обучающем наборе составляет 11,87%. Внутри классов доля опорных векторов составляет 24,05% для этапа 1 и 7,88% для остальной группы - этап 2. Процент неправильной классификации в общем наборе обучающих материалов составляет 1,56% для этапа 1 и 1,87% для этапа 2. Внутри классов данный процент составляет 6,33% для этапа 1 и 2,49% для этапа 2 (процент,

рассчитанный на каждом этапе). На шаге 2 доля правильно классифицированных образцов, принадлежащих этапу 1 - составляет 23,13% и этапу 2 - составляет 73,43% от всех обучающих наборов. Процент неправильной классификации от общего набора обучающих выборок составляет 3,44% [103].

На шаге 3 классификации этапы 2 и 3 разделяются на основе признаков x_1 и x_2 . В общем обучающем наборе 9,95% образцов принадлежит этапу 2, а граница пересечения определяется выражением:

$$w_{12}x_1 + w_{22}x_2 + b_2 = 0 \quad (4.2)$$

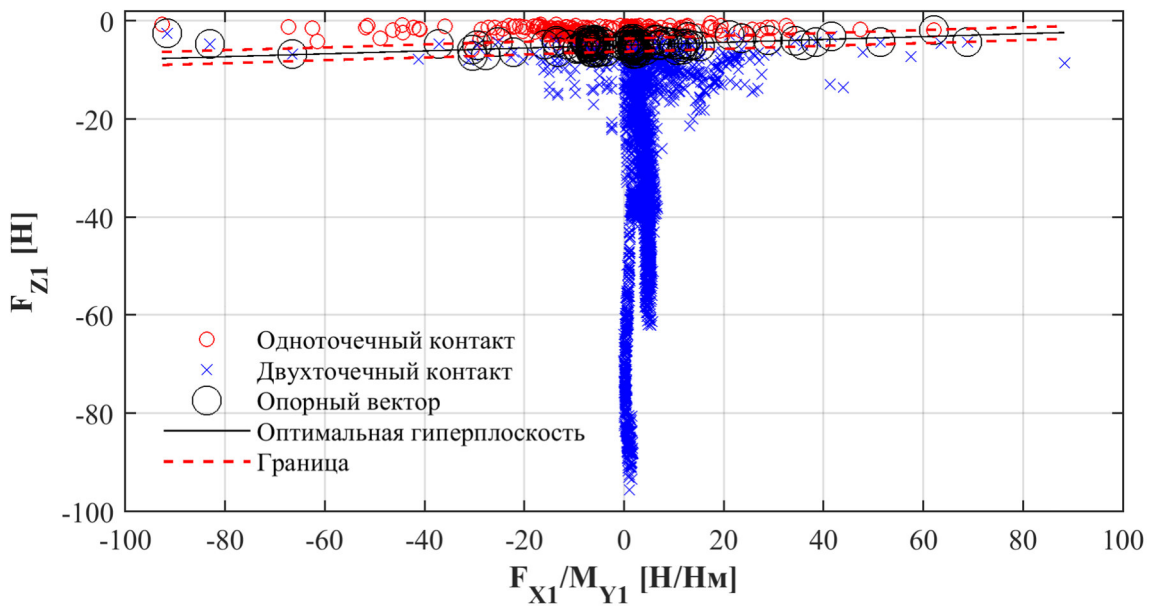


Рисунок 4.22 – Гиперплоскость, устанавливающая границу между двумя слоями (одноточечный контакт и двухточечный контакт - приложение Д)

Значения w_{12} , w_{22} и b_2 приведены в таблице 4.14. В данной классификации запас составляет $\Delta_2 = 1,31$.

Результаты классификации представлены на рисунке 4.22. Форма опорных векторов в общем обучающем наборе составляет 4,58%, в то время как эта доля внутри класса составляет 22,82% для этапа 2 и 2,56% для этапа 3. Процент неправильной классификации по всей обучающей выборке составляет 0,62% для этапа 2 и 1,24% для этапа 3. Таким образом, внутри классов 6,22% для этапа 2 и 1,38% для этапа 3. На шаге 3 доля правильно классифицированных образцов, принадлежащих этапу 2, составляет 9,34% и этапу 3 - 88,80% от всех обучающих

наборов. Процент неправильной классификации от общего набора обучающей выборки составляет 1,86% [103].

Границы классов, определяемые выражениями (4.1) и (4.2), представляют собой оптимальную разделяющую гиперплоскость. Используя эти гиперплоскости, пространство объектов оптимально разделяется. Результаты классификации передаются онлайн-машине распознавания CS.

На основе экспериментальных результатов рассчитаны значения с помощью MatLab (приложение Д), которые проанализированы выше. Вектор параметров модели SVM имеет вид [11; 103]:

$$\mathbf{w} = \begin{pmatrix} w_{11} & w_{12} \\ w_{21} & w_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0,0154 & -0,0222 \\ -3,5650 & 0,76148 \end{pmatrix}; \mathbf{b} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -3,0312 \\ 3,7753 \end{pmatrix}$$

В онлайн-режиме параметры модели SVM передаются в роботизированную систему в виде (3.16). Полученные результаты онлайн-классификации, представлены в таблице 4.15.

Таблица 4.15 – Экспериментальные результаты в онлайн-режиме

№	$F_{X1,Н}$	$F_{Y1,Н}$	$F_{Z1,Н}$	$M_{X1,Н.м}$	$M_{Y1,Н.м}$	$M_{Z1,Н.м}$	$q,мм$	Этап
1	0,09105	0,08568	0,1279	0,00077	0,00352	-0,00658	0,1	1
2	-0,20031	0,67932	-0,4385	0,00872	-0,01316	-0,00796	0,2	1
3	0,10319	0,06732	-0,7552	0,00061	-0,02601	-0,00673	0,3	1
4	0,21245	0,13464	-0,5359	0,00107	-0,01958	-0,01377	0,5	1
5	0,17603	0,17748	-0,6638	0,00168	-0,02356	-0,01316	0,7	1
6	0,22459	0,21420	-0,1766	0,00199	-0,00780	-0,01637	0,9	1
7	-0,06070	0,57528	-0,9440	0,00719	-0,03106	-0,01193	1,2	2
8	-0,07891	0,21420	-2,7527	0,00321	-0,09104	-0,00168	1,6	2
9	0,13961	-0,11628	-1,9914	-0,00107	-0,06824	-0,00352	1,9	2
10	0,33992	-0,71604	-1,0109	-0,00933	-0,03611	0,00306	2,1	2
11	-0,41276	0,39780	-6,7112	0,00689	-0,22032	0,00857	2,4	3
12	-0,43097	0,46512	-6,0900	0,00719	-0,19982	0,00811	2,8	3
13	-0,36420	0,55692	-5,6272	0,00857	-0,18452	0,00214	3,5	3
14	-0,46132	0,70380	-5,1521	0,01040	-0,16845	0,00230	5,6	3
15	-0,48560	0,80172	-5,0852	0,01163	-0,16570	0,00153	8,7	3
16	-0,75875	1,04652	-6,3580	0,01561	-0,20609	0,00765	9,5	3

№	$F_{X1,Н}$	$F_{Y1,Н}$	$F_{Z1,Н}$	$M_{X1,Н.м}$	$M_{Y1,Н.м}$	$M_{Z1,Н.м}$	$q,мм$	Этап
17	-0,97727	0,96084	-9,9754	0,01561	-0,32482	0,01989	10,8	3
18	-0,55237	-0,69156	-12,6550	-0,00474	-0,41693	0,04360	12	3
19	-0,88015	0,06732	-11,5527	0,00490	-0,37791	0,03886	13,9	3
20	-1,69353	1,52388	-16,4491	0,02524	-0,53489	0,03810	15,8	3
21	-1,93026	1,42596	-19,3662	0,02524	-0,63021	0,05156	17,8	3
22	-3,57523	4,28400	-25,5293	0,06503	-0,82329	0,05263	25,2	3
23	-5,42051	7,52148	-32,0212	0,11001	-1,02586	0,05324	35,3	3
24	-5,97288	7,35624	-41,3450	0,11093	-1,33202	0,08262	37,1	3
25	-6,93801	8,34768	-46,8930	0,12622	-1,50965	0,10113	42,2	3

Выполнена оценка эффективности разработанной модели SVM при соединении деталей до глубины $q = 50$ мм с формированием сигналов силы и момента с СМД, которые являются тестовым сигналом (таблица 4.16).

Таблица 4.16 – Результаты оценки модели SVM

Выборка	Глубина [мм]	Этап	Модель SVM		
			Правильная классификация	Неправильная классификация	Процент точности классификации
Классификация CS: Этап 1 - Этап 2 (Общее количество образцов: 320)					
0÷79	0÷2	1	74	5	96,56%
80÷320	2÷5	2	235	6	
Классификация CS: Этап 2 - Этап 3 (Общее количество образцов: 2421)					
80÷320	2÷5	2	226	15	98,14%
321÷2500	5÷50	3	2150	30	

4.6 Анализ сил и моментов в процессе сопряжения с использованием алгоритма

На рисунке 4.23 показаны изменения сил и моментов, возникающих в процессе сборки при применении АУ и без него. На рисунке 4.23б без использования алгоритма на глубине сопряжения $q = 20$ мм, наблюдается увеличение сборочного усилия до $F_{Z1} = 62,2$ Н и момента до $M_{Y1} = 2,01$ Нм.

При увеличении глубины сопряжения сборочное усилие продолжает расти, что может привести к повреждению вала. Однако, с увеличением глубины

сопряжения возникает заклинивание. В случае применения алгоритма (рисунок 4.23а), сборочное усилие постепенно увеличивается при глубине сопряжения в интервале от 18 до 35 мм, а затем постепенно стабилизируется (максимальное значение сборочного усилия составило $F_{Z1} = 22,08$ Н и момента $M_{Y1} = 0,71$ Нм).

При применении алгоритма достигается исключение заклинивания, снижение сборочного усилия до 3 раз и увеличение глубины сопряжения до 50 мм. Эксперимент подтвердил эффективность созданного алгоритма и программного обеспечения, а также его практическую полезность.

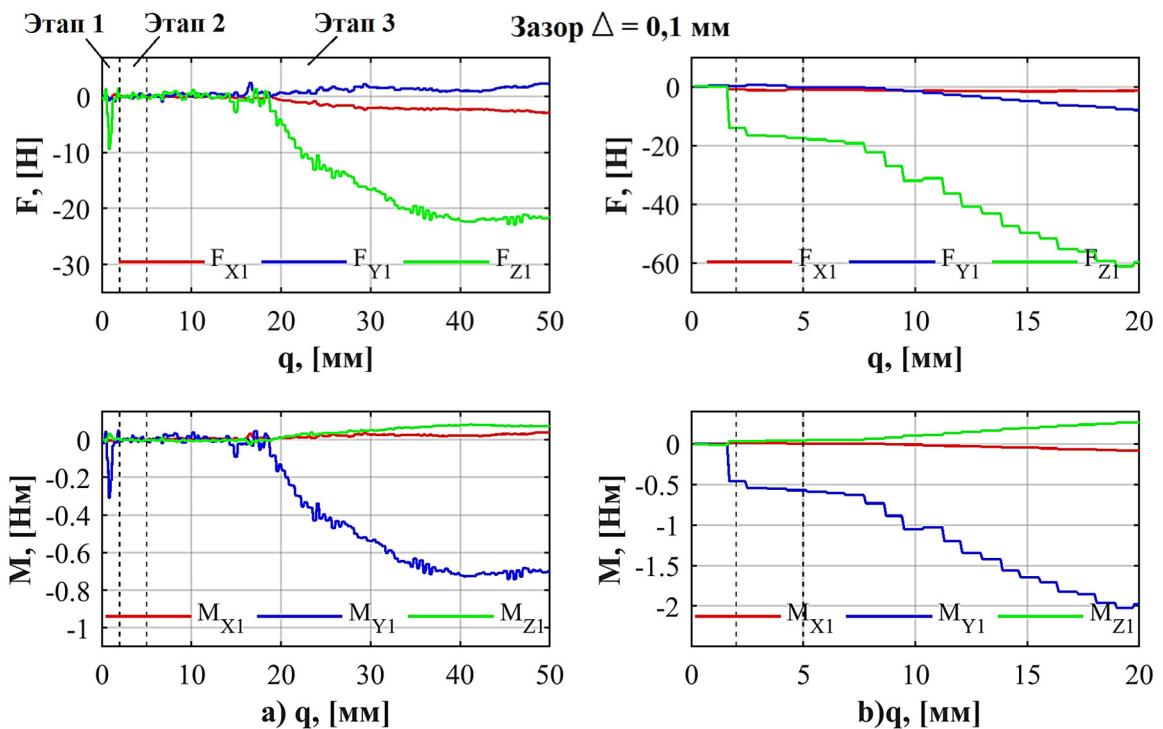


Рисунок 4.23 – Зависимость изменения векторов сил и моментов на трех этапах сопряжения: а – применение алгоритма управления; б – отсутствие алгоритма управления

Чтобы проверить стабильность стратегии управления, предложенной в настоящей работе, один и тот же эксперимент был выполнен 50 раз и вероятность успеха составила 100%, что показано на рисунке 4.24, а максимальное значение контактной силы и момента составило 24 Н и 0,75 Нм соответственно. Это подтверждает, что контактные силы значительно снизились в процессе сборки. Это доказало эффективность разработанного АУ [25].

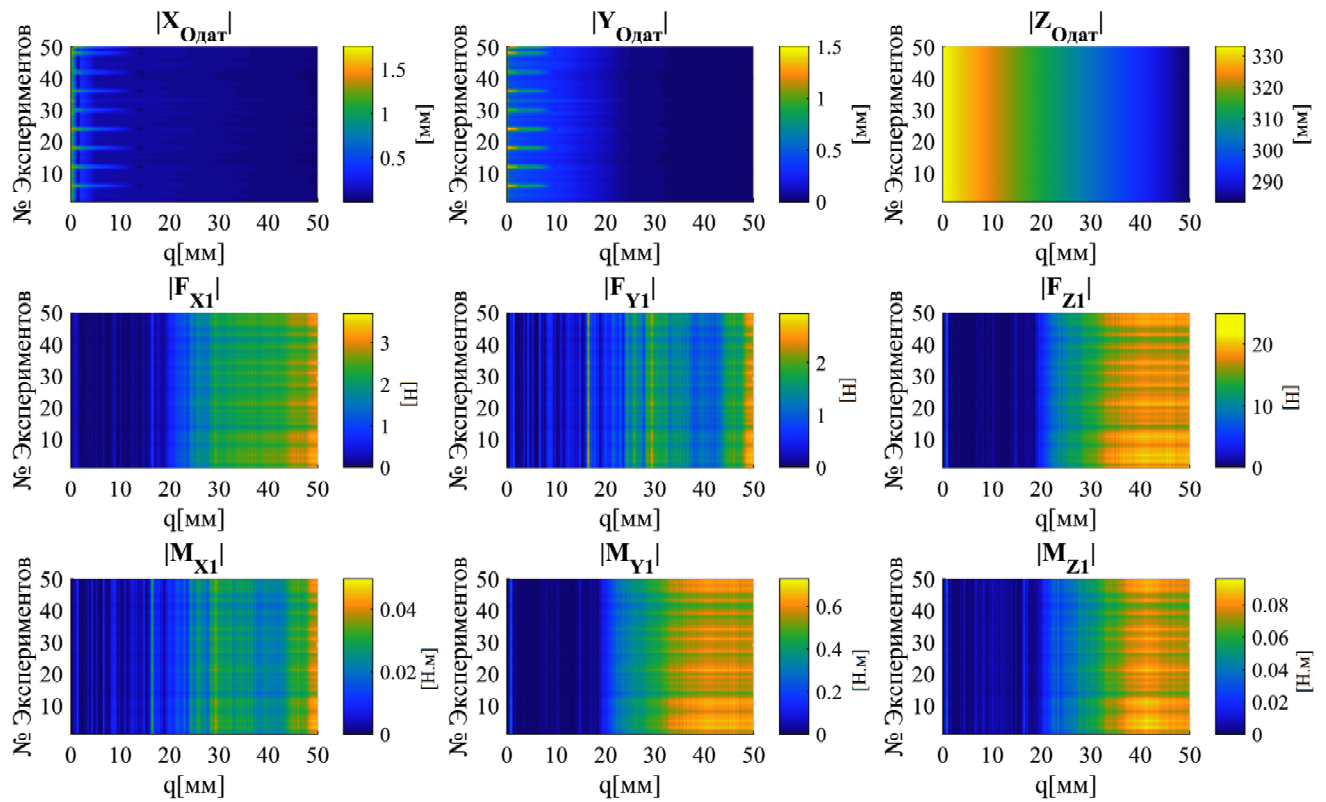


Рисунок 4.24 – Результаты экспериментов: положения нежесткого вала относительно исходного положения в системе координат втулки, значений сборочного усилия и момента

4.7 Выводы и результаты по главе 4

1. Использование шестикомпонентного СМД в сочетании с жестким базированием деталей позволяет получать информацию о процессе сопряжения в режиме онлайн.

2. Экспериментальное определение коэффициента трения, учитывающего материал и состояние поверхности сопряжения, проводилось с целью повышения точности расчетов сборочного усилия.

3. Проведенные исследования позволяют определить величины деформаций, величины прогиба и поворота поперечного сечения характерных точек пластикового вала при использовании робота, оснащенного СМД.

4. Из результатов эксперимента видно, что прогиб пропорционален углу поворота поперечного сечения пластикового вала при сопряжении и зависит от изгибной жесткости EI материала вала.

5. Экспериментальные результаты свидетельствуют о том, что модель SVM может быть эффективно применена для идентификации контактного состояния и управления сборочным роботом. Офлайн-обучение имеет высокий процент правильно классифицированных образцов. Параметры обучения модели в автономном режиме вводятся в роботизированную систему с хорошей классификацией в режиме онлайн.

6. Применение алгоритма ПСУ обеспечивает уменьшение сборочного усилия более чем в три раза. Величина деформации в точках контакта уменьшается, а глубина сопряжения увеличивается, предотвращается возникновение эффекта заклинивания и обеспечивается ТН процесса сопряжения.

7. Результаты физических экспериментов подтвердили достоверность математических моделей и эффективность созданного АУ.

ГЛАВА 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА РОБОТИЗИРОВАННОЙ СБОРКИ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ

5.1 Определение варьируемых параметров, выбор вида модели

В процессе сборки вал закреплялся в схвате робота и перемещался вдоль оси OZ , направленной по оси сборки. Нежесткий вал диаметром $d = 15,8$ мм изготавливался из различных видов пластиков: фторопласта - 4 (Ф4, ГОСТ 10007-80); полиэтилена низкого давления (ПЭНД, ГОСТ 16338-85) и полипропилена (ПП, ГОСТ 26996-86). Диаметр отверстия пластикового вала (d_0) имел различные значения с целью варьирования жесткости. Три втулки, изготавливались из стали 45 и имели различный диаметр отверстия. Описание экспериментальных образцов приведено в приложении А.

Момент начала отсчета соответствовал касанию торцов собираемых деталей. Окончанием сборки считалось сопряжение деталей на глубину 50 мм. Глубина сопряжения в 50 мм была выбрана из условия превышения диаметра в 3 раза. При изучении процесса сборки сборочные силы рассматривались как выходной параметр, характеризующий отклик системы.

В ходе исследования анализировались следующие входные факторы: скорость перемещения робота (мм/с); зазор в соединении (мм); толщина стенки вала (мм); модуль упругости вала (МПа) (таблица 5.1).

Таблица 5.1 – Входные факторы

Параметры	Обозначение
Скорость перемещения робота (мм/с)	X_1
Зазор соединения (мм)	X_2
Толщина стенки вала (мм)	X_3
Модуль упругости вала (МПа)	X_4

Применялись статистические методы ПЭ для описания сборочной силы [20; 33]. Для измерения силы в зоне сборки применялся СМД, фиксирующий онлайн силы и моменты, зависящие от входных параметров. Математической моделью

объекта исследования была функция отклика, устанавливающая взаимосвязь между входными и выходными параметрами процесса. Функцию отклика можно представить в виде:

$$F = f(X_1, X_2, X_3, X_4) \quad (5.1)$$

где X_1, X_2, X_3, X_4 – варьируемые параметры.

Для оптимизации рекомендуется использовать отрезки степенных рядов:

$$F = \kappa X_1^\eta X_2^\lambda X_3^\nu X_4^\vartheta \quad (5.2)$$

где $\kappa, \eta, \lambda, \nu, \vartheta$ – постоянные величины.

Уравнение (5.2) после логарифмирования можно записать как линейное выражение:

$$\ln F = \ln \kappa + \eta \ln X_1 + \lambda \ln X_2 + \nu \ln X_3 + \vartheta \ln X_4 \quad (5.3)$$

Уравнение регрессии без квадратичных эффектов представлено следующим образом:

$$y = b_0 + \sum_{1 \leq i \leq 4} b_i x_i + \sum_{1 \leq i < j \leq 4} b_{ij} x_i x_j \quad (5.4)$$

где x_i – кодированные значения X_i ; y – значения силы и момента.

Кодированное значение фактора x_i :

$$x_i = 2 \frac{\ln X_i - \ln X_{i\max}}{(\ln X_{i\max} - \ln X_{i\min})} + 1; i=1, \dots, 4 \quad (5.5)$$

где $X_{i\max}$ и $X_{i\min}$ – значения верхнего и нижнего уровней;

X_i – натуральное значение.

По результатам экспериментов предполагалось, что функцию отклика можно описать линейным полиномом на исследуемом интервале с использованием двух уровней варьирования факторов (таблица 5.2).

Таблица 5.2 – Варьирование уровней и интервалов параметров

Факторы	Уровни			Интервал варьирования	Размерность
	-1	0	+1		
X_1	10	15	20	5	мм/с
X_2	0,06	0,1	0,14	0,04	мм
X_3	2,1	5	7,9	2,9	мм
X_4	500	800	1100	300	МПа

Для полнофакторного эксперимента на двух уровнях понадобилось бы

провести $2^4 = 16$ опытов, но было решено использовать дробно-факторный план с $2^{4-1} = 8$ опытами. Эксперимент проводился с учетом рандомизации, опыты проводились в случайном порядке. По каждому условию проведено 3 реплики (таблица 5.3).

Таблица 5.3 – План эксперимента в виде матрицы

№ по плану	№	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_1x_2	x_1x_3	x_1x_4	x_2x_3	x_2x_4	x_3x_4
1	16	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1
	14											
	8											
2	2	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1
	3											
	15											
3	4	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1
	18											
	6											
4	7	+1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	-1	-1	+1
	12											
	21											
5	9	+1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1
	23											
	1											
6	24	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	-1
	17											
	5											
7	11	+1	-1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	-1
	22											
	19											
8	10	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1
	20											
	13											

5.2 Обработка результатов эксперимента и определение функции

5.2.1 Отсевание грубых наблюдений в параллельных опытах

Матрица планирования создается из результатов индивидуальных экспериментов, затем вычисляется среднее значение целевой функции для каждой структуры [20]:

$$\bar{y}_j = \frac{1}{n} \sum_{u=1}^n y_{ju} \quad (5.6)$$

где y_{ju} – значение целевой функции для эксперимента;

n – число экспериментов.

Дисперсия для каждого эксперимента для оценки отклонения параметра от среднего значения.

$$s_j^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{u=1}^n (y_{ju} - \bar{y}_j)^2 \quad (5.7)$$

Оценка ошибки выражается формулой:

$$s_j = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{u=1}^n (y_{ju} - \bar{y}_j)^2} \quad (5.8)$$

Экспериментальные ошибки вызваны неучтенными факторами, влияющими на результаты опытов. Используется критерий – отношение U (согласно ГОСТ 11.002–73) для проверки экстремумов на нормальность и принятия решений о включении или исключении их из выборки [33]:

$$U_{\max} = \frac{y_{j\max} - \bar{y}_j}{s_j}, U_{\min} = \frac{\bar{y}_j - y_{j\min}}{s_j} \quad (5.9)$$

Где $y_{j\max}$, $y_{j\min}$ – экстремальные значения целевой функции в параллельных опытах.

Граничный коэффициент $\beta = 1,15$ по ГОСТ 11.002–73 для $n = 3$ и уровня значимости 5%. Оценка результатов: если $U \geq \beta$, результат исключается, в противном случае, считается верным (таблица 5.4).

Таблица 5.4 – Результирующие значения U

№ опыта	$U < \beta = 1,15$							
	F_{X1}		F_{Y1}		F_{Z1}		M_{Y1}	
	U_1	U_2	U_1	U_2	U_1	U_2	U_1	U_2
1	0,99	1,01	1,11	0,83	0,99	1,01	0,99	1,01
2	0,92	1,06	0,99	1,01	1,01	0,99	0,93	1,06
3	0,76	1,13	0,72	1,14	1,08	0,89	0,88	1,09
4	1,10	0,86	1,05	0,93	0,90	1,08	0,86	1,10
5	0,84	1,11	0,99	1,01	0,96	1,04	0,80	1,12
6	0,72	1,14	1,12	0,81	1,00	1,00	0,83	1,11
7	0,82	1,12	0,96	1,04	0,95	1,04	0,94	1,05
8	0,78	1,13	0,99	1,01	0,98	1,02	1,00	1,00

Для уравновешивания количества параллельных опытов в каждой строке

матрицы, некорректные опыты следует повторить. Подробные результаты представлены в приложении Ж. В дополнение, проанализированы итоги экспериментов, включая дисперсии сил и моментов (таблица 5.5).

Таблица 5.5 – Результаты дисперсии сил и моментов F_{X1} , F_{Y1} , F_{Z1} , M_{Y1} .

№ по плану	F_{X1}		F_{Y1}		F_{Z1}		M_{Y1}	
	\bar{y}	s_j^2	\bar{y}	s_j^2	\bar{y}	s_j^2	\bar{y}	s_j^2
1	0,796	0,0027	0,685	0,0123	3,154	0,0167	-0,563	0,0086
2	1,197	0,0030	1,089	0,0015	3,515	0,0067	-0,136	0,0210
3	0,409	0,0095	0,343	0,0122	2,802	0,0091	-1,198	0,0640
4	0,381	0,0123	0,226	0,0030	2,577	0,0069	-1,324	0,0367
5	1,283	0,0022	1,152	0,0014	3,647	0,0055	-0,050	0,0061
6	1,396	0,0010	1,263	0,0007	3,678	0,0081	0,167	0,0200
7	0,668	0,0058	0,536	0,0045	3,004	0,0109	-0,851	0,0334
8	1,070	0,0027	0,889	0,0099	3,412	0,0085	-0,205	0,0066

5.2.2 Проверка однородности дисперсий

Для проверки однородности дисперсий применялся F-критерий Фишера [20].

$$F = \frac{s_1^2}{s_2^2} \quad (5.10)$$

где s_1^2 и s_2^2 – максимальная и минимальная величины дисперсии.

Однородность дисперсий может быть проверена с использованием F-критерия Фишера, при условии, что значение $F < F_m$ (таблица 5.6). Для данной проверки принимается число степеней свободы $f_1 = n_{\max} - 1 = 2$, $f_2 = n_{\min} - 1 = 2$, соответствующее уровню значимости 5%. Принимая во внимание эти параметры, $F_m = 19,2$ [33].

Таблица 5.6 – Проверка однородности дисперсий с помощью F-критерия

$F < F_m = 19,2$							
F_{X1}		F_{Y1}		F_{Z1}		M_{Y1}	
11,845	Да	17,657	Да	3,010	Да	10,536	Да

Для оценки однородности дисперсий, можно использовать критерий Кохрена или Бартлетта. В случае равномерного повторения опытов, подходит критерий Кохрена, который применяется для вычисления однородности ряда [13]:

$$G = \frac{s_{\max}^2}{\sum_{j=1}^N s_j^2} \quad (5.11)$$

Таблица 5.7 – Оценка однородности дисперсий с помощью *G*-критерия Кохрена

$G < G_m = 0,5157$							
F_{X1}		F_{Y1}		F_{Z1}		M_{Y1}	
0,3132	Да	0,2698	Да	0,2303	Да	0,3259	Да

Условие однородности дисперсий соблюдается, если вычисленное значение не превышает заданного порога G_m . В данном случае $G_m = 0,5157$ [33], при $N = 8$ и $n = 3$. Если $G > G_m$, дисперсии считаются неоднородными, и распределение исследуемого показателя не является нормальным [13; 33] (таблица 5.7).

5.2.3 Определение коэффициентов регрессии

Коэффициенты уравнения регрессии были определены методом наименьших квадратов с использованием матричной формы для вычисления вектора коэффициентов [33]:

$$\mathbf{B} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \bar{\mathbf{Y}} \quad (5.12)$$

где \mathbf{B} – вектор коэффициентов;

\mathbf{X} – матрица факторов;

$\bar{\mathbf{Y}}$ – вектор средних значений.

Коэффициенты уравнения (5.4) получены умножением на вектор коэффициентов \mathbf{B} [33]:

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \bar{y}_j, \quad (5.13)$$

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{ij} \bar{y}_j, \quad (5.14)$$

$$b_{ik} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{ij} x_{kj} \bar{y}_j, \quad (5.15)$$

где i, k – номера факторов;

x_{ij}, x_{kj} – кодированные значения факторов i и k в j -м эксперименте.

В таблице 5.8 представлены значения коэффициентов уравнений регрессии.

Таблица 5.8 – Значимость коэффициентов уравнений регрессии F_{X1} , F_{Y1} , F_{Z1} , M_{Y1}

b_i, b_{il}	F_{X1}	F_{Y1}	F_{Z1}	M_{Y1}
b_0	0,9000	0,7730	3,2236	-0,5200
b_1	0,1110	0,0940	0,0718	0,1458
b_2	-0,2680	-0,2744	-0,2750	-0,3746
b_3	0,2043	0,1873	0,2118	0,2853
b_4	0,0896	0,0955	0,1203	0,1228
b_{12}	-0,0177	-0,0350	-0,0261	-0,0155
b_{13}	0,0178	0,0219	0,0380	0,0702
b_{14}	0,0329	0,0269	0,0476	0,0812
b_{23}	0,0329	0,0269	0,0476	0,0812
b_{24}	0,0178	0,0219	0,0380	0,0702
b_{34}	-0,0177	-0,0350	-0,0261	-0,0155

5.2.4 Проверка значимости коэффициентов уравнений регрессии

Коэффициенты регрессионного уравнения проверялись с помощью t-критерия Стьюдента [20]:

$$t_j = \frac{|b_j|}{s_{\{b\}}} \quad (5.16)$$

Была определена дисперсия коэффициентов регрессии [20]:

$$s_{\{b\}}^2 = \frac{s_y^2}{Nn} \quad (5.17)$$

При однородных дисперсиях опытов s_j^2 дисперсию s_y^2 воспроизводимости опыта определялись соотношением [20]:

$$s_y^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N s_j^2 \quad (5.18)$$

Коэффициент значим, если $t_j > t_j^{kp}$. При количестве степеней свободы $f = (n-1)N=16$ и принятом уровне значимости (5%), $t_j^{kp} = 2,12$ (приложение Ж) [33].

Для оценки статистической значимости коэффициентов регрессии применялся критерий Стьюдента. Незначимые коэффициенты были исключены. (приложение Ж). Значимость коэффициентов приведена в таблице 5.9.

Таблица 5.9 – Значимость коэффициентов в регрессионном уравнении

b_j	F_{X1}	F_{Y1}	F_{Z1}	M_{Y1}
b_0	0,9	0,773	3,2236	-0,52
b_1	0,111	0,094	0,0718	0,1458
b_2	-0,268	-0,2744	-0,275	-0,3746
b_3	0,2043	0,1873	0,2118	0,2853
b_4	0,0896	0,0955	0,1203	0,1228
b_{12}	0	-0,035	0	0
b_{13}	0	0	0	0,0702
b_{14}	0,0329	0	0,0476	0,0812
b_{23}	0,0329	0	0,0476	0,0812
b_{24}	0	0	0	0,0702
b_{34}	0	-0,0350	0	0

Уравнения регрессии имеют вид:

$$y_{F_{X1}} = 0,9 + 0,111x_1 - 0,268x_2 + 0,204x_3 + 0,089x_4 + 0,033x_1x_4 + 0,033x_2x_3 \quad (5.19)$$

$$y_{F_{Y1}} = 0,773 + 0,094x_1 - 0,274x_2 + 0,187x_3 + 0,095x_4 - 0,035x_1x_2 - 0,035x_3x_4 \quad (5.20)$$

$$y_{F_{Z1}} = 3,224 + 0,072x_1 - 0,275x_2 + 0,212x_3 + 0,12x_4 + 0,048x_1x_4 + 0,048x_2x_3 \quad (5.21)$$

$$y_{M_{Y1}} = -0,52 + 0,146x_1 - 0,374x_2 + 0,285x_3 + 0,123x_4 + 0,07x_1x_3 + 0,081x_1x_4 + 0,081x_2x_3 + 0,07x_2x_4 \quad (5.22)$$

5.2.5 Оценка адекватности модели

Выполнена оценка дисперсии адекватности, определяемая соотношением [20]:

$$s_{ад}^2 = \frac{n \sum_{j=1}^N (\bar{y}_j - \hat{y}_j)^2}{N - (k + 1)}, \quad (5.23)$$

где \hat{y}_j – прогнозное значение целевой функции по регрессионному уравнению для j -го эксперимента;

k – количество факторов.

Проверка адекватности модели проводилась с помощью *F-критерия Фишера* [13].

$$F = \frac{s_{ад}^2}{s_y^2} \quad (5.24)$$

Модель считается адекватной, если $F < F_m$. В противном случае, гипотеза об адекватности отвергается [33].

При заданном числе степеней свободы $f_1 = N - (k + 1) = 8 - (3 + 1) = 4$, $f_2 = N(n-1) = 8(3-1) = 16$, и уровне значимости (5%), принимаем $F_m = 3,0$ [33].

Для облегчения вычислений, необходимые расчетные данные были сведены в таблицы (5.10)÷(5.13).

Таблица 5.10 – Расчетные данные для проверки адекватности уравнения:

$$y_{F_{X1}} = 0,9 + 0,111x_1 - 0,268x_2 + 0,204x_3 + 0,089x_4 + 0,033x_1x_4 + 0,033x_2x_3,$$

№ опыта	\bar{y}	\hat{y}_j	$(\bar{y}_i - \hat{y}_i)^2$	$s_{ад}^2$	F	Условие проверки
1	0,7959	0,8288	0,0011	0,01024	2,094	$F < F_m$ Да
2	1,1971	1,2298	0,0011			
3	0,4088	0,4114	0,0000			
4	0,3808	0,3125	0,0047			
5	1,2826	1,2143	0,0047			
6	1,3963	1,3988	0,0000			
7	0,6684	0,7012	0,0011			
8	1,0699	1,1028	0,0011			

Таблица 5.11 – Расчетные данные для проверки адекватности уравнения:

$$y_{F_{Y1}} = 0,773 + 0,094x_1 - 0,274x_2 + 0,187x_3 + 0,095x_4 - 0,035x_1x_2 - 0,035x_3x_4,$$

№ опыта	\bar{y}	\hat{y}_j	$(\bar{y}_i - \hat{y}_i)^2$	$s_{ад}^2$	F	Условие проверки
1	0,6845	0,6983	0,0002	0,01457	2,560	$F < F_m$ Да
2	1,0895	1,1294	0,0016			
3	0,3430	0,3731	0,0009			
4	0,2261	0,1423	0,0070			
5	1,1524	1,0686	0,0070			
6	1,2632	1,2933	0,0009			
7	0,5364	0,5763	0,0016			
8	0,8892	0,9030	0,0002			

Таблица 5.12 – Расчетные данные для проверки адекватности уравнения:

$$y_{F_{Z1}} = 3,224 + 0,072x_1 - 0,275x_2 + 0,212x_3 + 0,12x_4 + 0,048x_1x_4 + 0,048x_2x_3,$$

№ опыта	\bar{y}	\hat{y}_j	$(\bar{y}_i - \hat{y}_i)^2$	$s_{ад}^2$	F	Условие проверки
1	3,1540	3,2135	0,00353	0,02634	2,906	$F < F_m$ Да
2	3,5146	3,5503	0,00128			
3	2,8018	2,8183	0,00027			
4	2,5766	2,4649	0,01248			
5	3,6472	3,5355	0,01248			
6	3,6784	3,6949	0,00027			
7	3,0041	3,0398	0,00128			
8	3,4120	3,4714	0,00353			

Таблица 5.13 – Расчетные данные для проверки адекватности уравнения:

$$y_{M_{Y1}} = -0,52 + 0,146x_1 - 0,374x_2 + 0,285x_3 + 0,123x_4 + 0,07x_1x_3 + 0,081x_1x_4 + 0,081x_2x_3 + 0,07x_2x_4$$

№ опыта	\bar{y}	\hat{y}_j	$(\bar{y}_i - \hat{y}_i)^2$	$s_{ад}^2$	F	Условие проверки
1	-0,5634	-0,4274	0,01849	0,07060	2,876	$F < F_m$ Да
2	-0,1356	-0,1091	0,00070			
3	-1,1983	-1,1939	0,00002			
4	-1,3238	-1,4907	0,02786			
5	-0,0500	-0,2169	0,02786			
6	0,1673	0,1718	0,00002			
7	-0,8513	-0,8249	0,00070			
8	-0,2046	-0,0687	0,01849			

Исходя из полученных результатов (таблицы 5.10÷5.13) можно сделать вывод о адекватности полученной модели. Гипотеза адекватности уравнения регрессии (5.2) подтверждается. При наличии информации о скорости перемещения робота, зазоре соединения, толщине стенки вала и модуле упругости возникает возможность представления зависимости сборочной силы и крутящего момента от исследуемых параметров процесса сборки уравнением (5.2).

5.3 Исследование влияния входных параметров на сборочную силу и момент

Значения x_1 , x_2 , x_3 и x_4 использованы для перехода к натуральным значениям в уравнении регрессии (5.5). В результате проведенных преобразований были

получены следующие выражения:

$$\ln F_{X1} = 0,421 - 1,269 \ln X_1 - 0,41 \ln X_4 + 0,24 \ln X_1 \ln X_4 - 0,797 \ln X_2 + 0,588 \ln X_3 + 0,117 \ln X_2 \ln X_3, \quad (5.25)$$

$$\ln F_{Y1} = -7,557 + 1,964 \ln X_1 - 0,472 \ln X_2 - 0,238 \ln X_1 \ln X_2 - 0,015 \ln X_3 + 0,921 \ln X_4 - 0,134 \ln X_2 \ln X_4, \quad (5.26)$$

$$\ln F_{Z1} = 4,187 - 2,095 \ln X_1 - 0,618 \ln X_4 + 0,348 \ln X_1 \ln X_4 - 0,887 \ln X_2 + 0,725 \ln X_3 + 0,17 \ln X_2 \ln X_3, \quad (5.27)$$

$$\ln M_{Y1} = -2,475 - 3,938 \ln X_1 - 4,069 \ln X_2 + 0,312 \ln X_3 - 0,259 \ln X_4 + 0,306 \ln X_1 \ln X_3 + 0,595 \ln X_1 \ln X_4 + 0,289 \ln X_2 \ln X_3 + 0,42 \ln X_2 \ln X_4, \quad (5.28)$$

После возведения в степень выражений (5.25)÷(5.28) определяются зависимости сил и моментов от факторов процесса роботизированной сборки:

$$F_{X1} = \frac{1,523 X_1^{(0,24 \ln X_4 - 1,269)} X_2^{(0,117 \ln X_3 - 0,797)} X_3^{0,588}}{X_4^{0,41}}, \quad (5.29)$$

$$F_{Y1} = \frac{0,0005 X_1^{(1,964 - 0,238 \ln X_2)} X_4^{0,921}}{X_2^{(0,472 + 0,134 \ln X_4)} X_3^{0,015}}, \quad (5.30)$$

$$F_{Z1} = \frac{65,82 X_2^{(-0,887 + 0,17 \ln X_3)} X_3^{0,725}}{X_1^{(2,095 - 0,348 \ln X_4)} X_4^{0,618}}, \quad (5.31)$$

$$M_{Y1} = \frac{0,084 X_1^{(-3,938 + 0,306 \ln X_3 + 0,595 \ln X_4)} X_3^{0,312}}{X_2^{(4,069 - 0,289 \ln X_3 - 0,42 \ln X_4)} X_4^{0,259}} \quad (5.32)$$

Данные выражения используются для определения силы и момента, воздействующих на деталь при ее установке в процессе сборки. Уравнения (5.29)÷(5.32) использованы для создания номограмм, которые позволяют определить силы, действующие на вал в процессе сборки.

С использованием выражений (5.29)÷(5.32) в среде MatLab были найдены локальные минимумы силы и момента после проведения расчетов. Полученные значения приведены в таблице 5.14.

Таблица 5.14 – Значение локальных минимумов сил и моментов

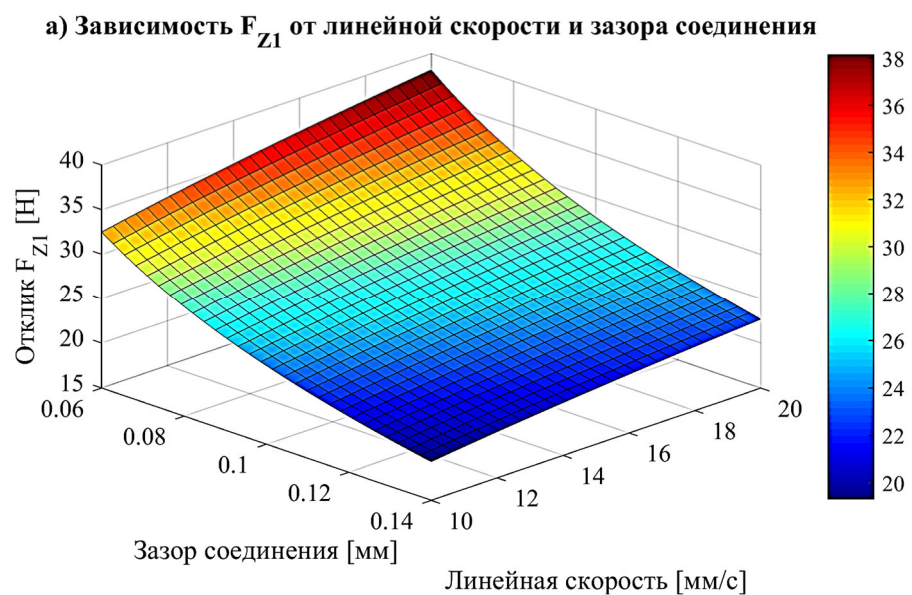
Минимумы	X_1 , [мм/с]	X_2 , [мм]	X_3 , [мм]	X_4 , [МПа]
$F_{X1min} = 1,33$ Н	10	0,14	2,1	500
$F_{Y1min} = 1,19$ Н	10	0,14	2,1	500
$F_{Z1min} = 12,02$ Н	10	0,14	2,1	500
$M_{Y1min} = 0,21$ Нм	10	0,14	2,1	500

Регрессионная модель (5.1) была исследована и использована для нахождения соответствующих реакций. На номограммах (рисунок 5.1) отображена связь между парами факторов при других фиксированных факторах на нулевом уровне для удобства анализа.

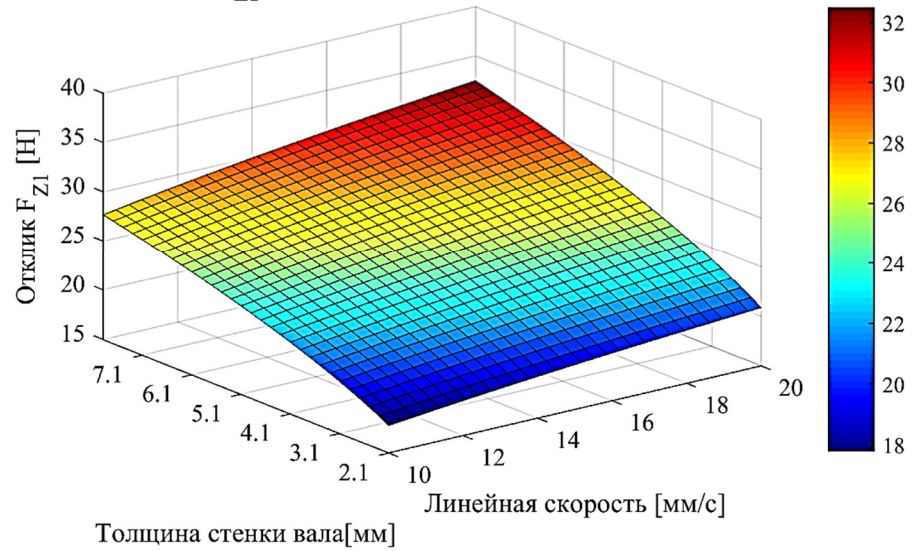
На рисунке 5.1 показана зависимость сборочной силы F_{Z1} от варьируемых параметров процесса. Сила F_{Z1} пропорциональна линейной скорости, толщине стенки вала и модулю упругости вала. Максимальное значение силы F_{Z1} составило 40,05 Н (рисунок 5.1г), а минимальное – 15,17 Н (рисунок 5.1г).

Зазор в соединении оказывает существенное влияние на сборочную силу F_{Z1} : при увеличении зазора сила значительно уменьшается. Например, при зазоре 0,06 мм максимальное значение сборочной силы достигает 40,05 Н (рисунок 5.1г), а при зазоре 0,14 мм минимальное значение – 15,17 Н (рисунок 5.1г).

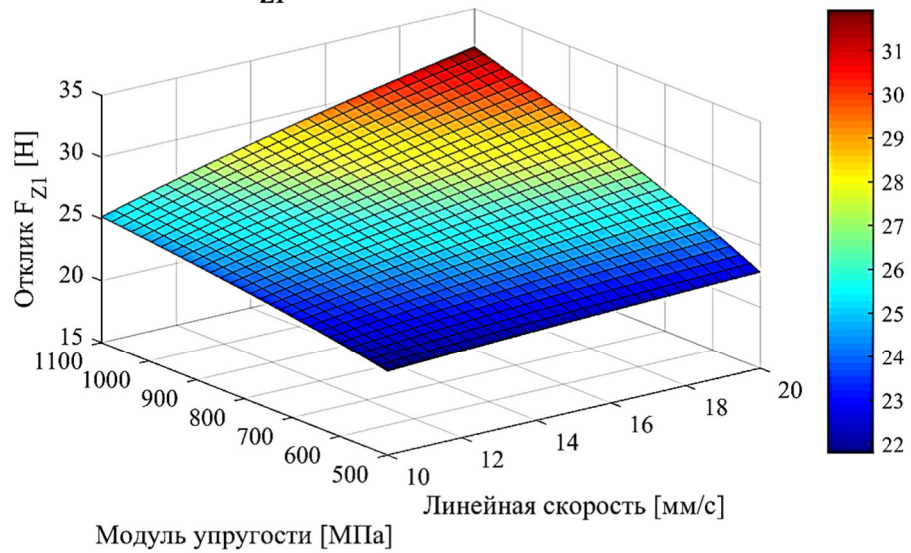
Толщина стенки вала и модуль упругости также влияют на сборочную силу F_{Z1} . Уменьшение этих параметров приводит к уменьшению силы (рисунок 5.1б-е). Коэффициент жесткости при изгибе EI непосредственно влияющий на сборочную силу, зависит от толщины стенки вала и модуля упругости. Чем больше значение EI , тем больше сборочная сила. Снижение линейной скорости уменьшает сборочную силу F_{Z1} (рисунок 5.1а, б, в). Уменьшение линейной скорости, однако, приводит к увеличению времени сборки.



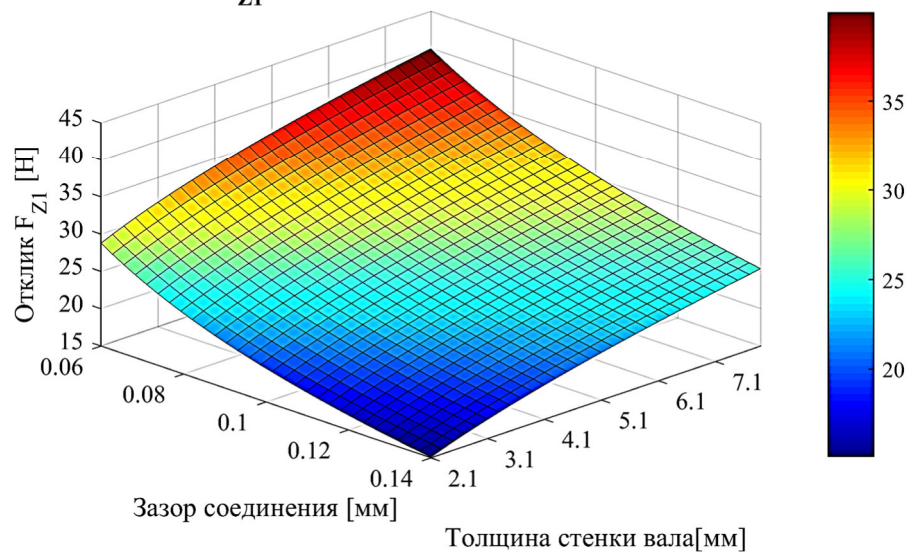
б) Зависимость F_{Z1} от линейной скорости и толщины стенки вала



в) Зависимость F_{Z1} от линейной скорости и модуля упругости



г) Зависимость F_{Z1} от зазора соединения и толщины стенки вала



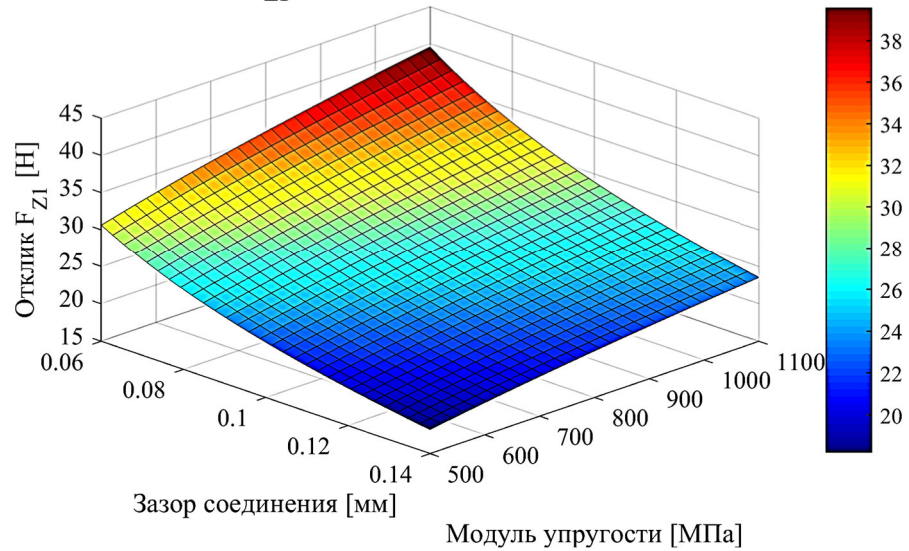
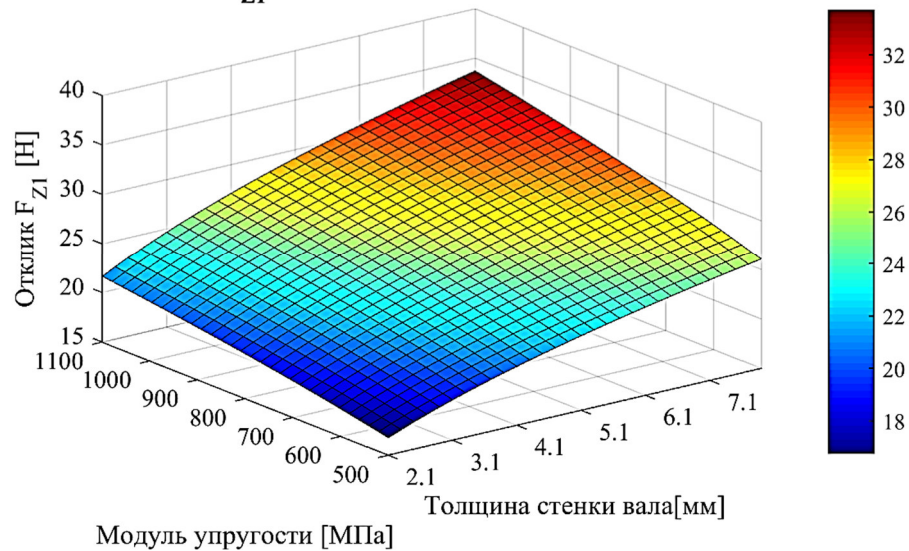
д) Зависимость F_{Z1} от зазора соединения и модуля упругостие) Зависимость F_{Z1} от толщины стенки вала и модуля упругости

Рисунок 5.1 – Зависимость величины сборочной силы F_{Z1} от парных параметров при поддержании остальных параметров на основном уровне

Эксперименты показали, как варьируемые параметры влияют на силу и момент сборки вала с использованием АУ. В результате исследования были выявлены экспериментальные взаимосвязи между силой, моментом и варьируемыми параметрами. Экспериментальная модель показала высокую адекватность, что свидетельствует о достоверности и надежности полученных результатов.

В рамках проведенных экспериментов в лаборатории «Средства автоматизации и промышленные роботы» Московского Политеха был изучен процесс сборки нежесткого вала и жесткой втулки с использованием АУ и без его

применения (таблицы 5.15 и 5.16). Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что применение АУ способно существенно снизить сборочную силу и предотвратить заклинивание нежесткого вала при РС.

Таблица 5.15 – Экспериментальные результаты при использовании алгоритма управления

Зазор соединения, [мм]	Скорость работа, [мм/с]	Толщина вала, [мм]	Модуль упругости, [МПа]	Глубина, [мм]	Процент заклинивания, [%]	Сила F_{Z1max} , [Н]
0,06	10	7,9	500	50	0	28 ÷ 42
0,1	10	7,9	500	50	0	18 ÷ 32
0,14	10	7,9	500	50	0	14 ÷ 26

Таблица 5.16 – Экспериментальные результаты при без алгоритма управления

Зазор соединения, [мм]	Скорость работа, [мм/с]	Толщина вала, [мм]	Модуль упругости, [МПа]	Глубина, [мм]	Процент заклинивания, [%]	Сила F_{Z1max} , [Н]
0,06	10	7,9	500	5...15	8	50 ÷ 90
				15...25	84	70 ÷ 120
				25...30	100	100 ÷ 150
0,1	10	7,9	500	5...15	6	40 ÷ 80
				15...25	76	60 ÷ 100
				25...30	100	90 ÷ 130
0,14	10	7,9	500	5...15	4	30 ÷ 60
				15...25	68	50 ÷ 80
				25...30	100	70 ÷ 110

5.4 Апробация алгоритма на промышленном изделии

Адекватность алгоритма была оценена на примере операции установки датчика уровня масла T0173-4007 (рисунок 5.2, таблица 5.17) с помощью работа АBB IRB140.

Таблица 5.17 – Параметры соединения «датчик-направляющая втулка» (датчик уровня масла T0173-4007 TOPCOVER Mercedes Benz)

	Диаметр	Радиальный зазор в соединении
Направляющая втулка	$D_{факт}=10,09$ мм	0,12 мм
Пластиковый вал датчика уровня масла (материал полиамид ПА 66)	$d_{факт}=9,85$ мм	
	$d_{офакт}=7,65$ мм	

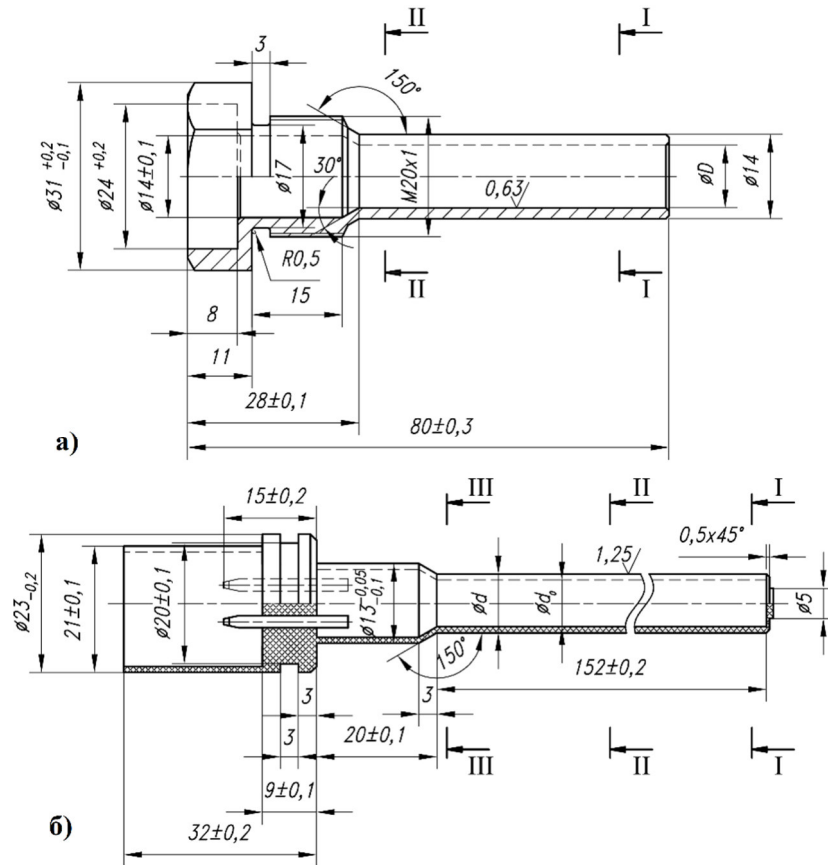


Рисунок 5.2 – Датчик уровня масла TOPCOVER T0173-4007: а – направляющая втулка; б – пластиковый вал датчика уровня масла

На рисунке 5.3 показаны зависимости силы и момента при установке датчика уровня масла с применением АУ при линейной скорости работа $v = 10$ мм/с.

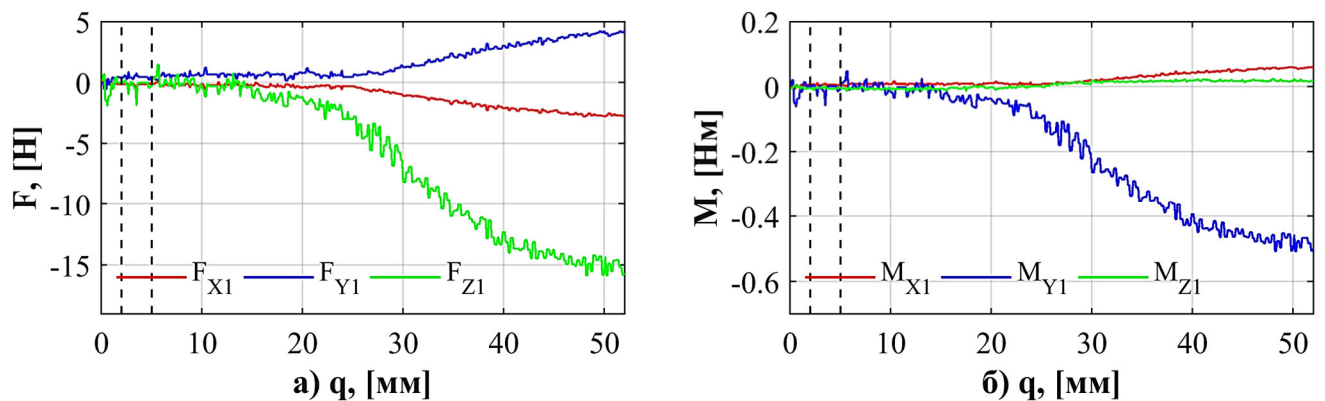


Рисунок 5.3 – Изменения сил и моментов при установке датчика уровня масла T0173-4007 TOPCOVER Mercedes Benz

Из рисунка 5.3а видно, что сила F_{Z1} медленно увеличивается с ростом глубины q (достигнув максимального значения $F_{Z1} -15,85$ Н при глубине сопряжения 50 мм). Полученные результаты позволяют исключить возникновение

заклинивания при сборке датчика уровня масла, подтверждая эффективность предложенного алгоритма и программного обеспечения для практического использования.

5.5 Выводы и результаты по главе 5

1. Эксперименты подтвердили влияние варьируемых параметров на силу и момент при сборке пластикового вала с использованием АУ. Определены зависимости изменения варьируемых параметров.

2. На основе экспериментальных исследований доказано, что применение АУ способно существенно снизить сборочные силы и предотвратить возникновение заклинивания нежесткого вала при РС.

3. Эксперименты показали, что сборочная сила зависит от линейной скорости, толщины стенки вала, модуля упругости и зазора в соединении. Сила F_{Z1} достигает максимального значения на образцах из пластика полипропилена, а минимальные значения получены на экспериментальных образцах из фторопласта-4.

4. Проведенные эксперименты доказали, что применение разработанного АУ позволяет повысить ТН сборочного процесса. Полученные результаты доказали, что применение АУ позволяет исключить возникновение заклинивания при РС. Проведенная апробация разработанного алгоритмического и программного обеспечения на промышленном изделии подтверждает их эффективность для практического применения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполнена научно-квалификационная работа, обладающая существенной значимостью для предприятий машино- и приборостроения. Решены научные и технические вопросы, связанные с обеспечением технологической надежности автоматической сборки нежестких деталей, а именно исключением заклиниваний на основе позиционно-силового управления промышленным роботом.

2. Разработана математическая модель определения величины деформации нежесткого вала на этапах сопряжения на основе идентификации выходных сигналов силомоментного датчика. Математическая модель использована для разработки алгоритма позиционно-силового управления при роботизированной сборке нежестких деталей.

3. Создана диаграмма условий заклинивания при сопряжении нежесткого вала и жесткой втулки. Диаграмма заклинивания при соединении нежесткого вала с жесткой втулкой позволяет назначать рациональные технологические режимы роботизированной сборки и оценивать вероятность заклиниваний при сопряжении.

4. Разработаны математические модели, описывающие контактные состояния при роботизированной сборке нежестких цилиндрических деталей. Созданный идентификатор положения деталей в процессе роботизированной сборки позволяет определять положение нежестких цилиндрических деталей на основе анализа контактных реакций в зоне сопряжения.

5. Доказана адекватность и эффективность применения модели машины опорных векторов для идентификации контактного состояния деталей при роботизированной сборке. Алгоритм управления сборочным роботом на основе модели машины опорных векторов доказал эффективность в обеспечении технологической надежности операции сборки нежестких деталей.

6. Экспериментальные исследования подтвердили, что применение алгоритма позиционно-силового управления позволило уменьшить сборочную силу с 65 Н до 20 Н для соединений нежестких деталей с зазором 0,1 мм, при этом увеличив глубину сопряжения с 20 до 50 мм.

7. Проведенные эксперименты на промышленном изделии (датчик уровня масла Mercedes Benz T0173-4007) доказали эффективность алгоритма при наибольшей сборочной силе 15,85 Н, глубине сопряжения до 52 мм и зазоре в соединении 0,12 мм.

8. Исследовано влияние жесткости пластмассового вала, зазора в соединении, скорости сопряжения и материала вала на сборочную силу. Уравнения регрессии позволяют анализировать влияние параметров на целевую функцию. При применении алгоритма управления достигнуто снижение сборочной силы до 3 и более раз.

9. Алгоритм управления сборочным роботом, основанный на использовании метода машины опорных векторов, доказал возможность обеспечения технологической надежности автоматической сборки нежестких деталей.

10. Разработана программа для ЭВМ «Программа управления роботизированной сборкой для обеспечения технологической надежности сборки цилиндрических нежестких деталей на основе сигналов силомоментного датчика» (свидетельство о государственной регистрации ЭВМ № 2023687744 от 18.12.2023). Программное обеспечение может быть использовано при разработке технологии автоматической сборки нежестких деталей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бать, М.И. Теоретическая механика в примерах и задачах, Том 1. Статика и Кинематика / М.И. Бать, Г.Ю. Джанелидзе, А.С. Кельзон; под ред. Г.Ю. Джанелидзе, Д.Р. Меркина. – М.: Издательство «Наука». Главная редакция физико-математической литературы, 1967. – 512 с.
2. Биргер, И.А. Прочность, устойчивость, колебания, Справочник в трех томах, Том 1 / И.А. Биргер, Я.Г. Пановко. – М.: Издательство Машиностроение, 1968. – 831 с.
3. Вартанов, М.В. Анализ условий заклинивания нежестких цилиндрических деталей при роботизированной сборке на основе применения силомоментного датчика / М.В. Вартанов, Е.А. Коган, Нгуен Ван Линь // Вестник МГТУ «СТАНКИН». – 2023. – № 4(67). – С. 80–92. doi: 10.47617/2072-3172_2023_4_80.
4. Вартанов, М.В. Анализ степени деформации нежестких цилиндрических деталей при роботизированной сборке с использованием силомоментного датчика / М.В. Вартанов, Е.А. Коган, Нгуен Ван Линь // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – №3 – С. 3–9. doi: 10.24412/2071-6168-2023-3-3-10.
5. Вартанов, М.В. Диаграмма заклинивания нежестких цилиндрических деталей при роботизированной сборке на основе применения позиционно силового управления / М.В. Вартанов, Е.А. Коган, Нгуен Ван Линь, Дао Ван Луу // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – №11 – С. 656–664. doi: 10.24412/2071-6168-2023-11-656-657.
6. Вартанов, М.В. Математическая модель значений деформации нежесткого вала при роботизированной сборке на основе активной адаптации / М.В. Вартанов, Нгуен Ван Линь // Материалы VIII международного научно-технического семинара «Современные технологии сборки». – 2023. – С. 65–78.
7. Вартанов, М.В. Математическая модель процесса сопряжения соединения «вал-втулка» с помощью активного средства адаптации при трехточечном контакте / М.В. Вартанов, Нгуен Ван Зунг, Нгуен Ван Линь // Машиностроение: сетевой

электронный научный журнал. – 2022. – № 3. – С. 28–32. doi: 10.24892/RIJE/20220305.

8. Вартанов, М.В. Модель поведения нежесткой детали при роботизированной сборке / М.В. Вартанов, Е.А. Коган, Нгуен Ван Линь // Материалы международного научный «Фундаментальные основы физики, химии и механики наукоёмких технологических систем формообразования и сборки изделий». – 2023. – С. 91–96.

9. Вартанов, М.В. Определение величины коэффициента трения с помощью силомоментного датчика при роботизированной сборке нежесткого вала во втулке / М.В. Вартанов, Нгуен Ван Линь // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2023. – Т10, №10. – С. 9–13.

10. Вартанов, М.В. Оценка эффективности стратегий поиска при роботизированной сборке / М.В. Вартанов, Нгуен Ван Линь, Нгуен Ван Зунг // Журнал «Станкоинструмент». – 2022. – №.3(28) – С.46–57. doi: 10.22184/2499-9407.2022.28.3.46.56.

11. Вартанов, М.В. Распознавание состояний контакта нежестких цилиндрических деталей при роботизированной сборке на основе машины опорных векторов / М.В. Вартанов, Нгуен Ван Линь // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2024. – №1. – С.3–10. doi: 10.36652/0202-3350-2024-25-1-3-10.

12. Ганз С.Н., Пархоменко В.Д. Антифрикционные химически стойкие материалы в машиностроении. М.: Машиностроение, 1965. –148 с.

13. Гусев, В.Г. Теория планирования многофакторных экспериментов: Метод. Указания к лаб. работам / В.Г. Гусев. – Владим. Гос. ун-т. Владимир, 2010. – 110 с.

14. Детали машин. Учеб. для машиностр. спец. вузов.— 4-е изд., перераб. – М.: Высш. шк., 1984. – 336 с.

15. Зубчанинов, В.Г. Сопротивление материалов: Учебное пособие, - 2-е издание. Тверь: ТГТУ, 2005. – 352 с.

16. Кован, В.М. Основы технологии машиностроения / В.М. Кован, В.С. Корсакова, А.Г. Косилова. – М.: Машиностроение, 1977. – 416 с.

17. Коган, Е.А. Математические модели деформирования нежестких деталей при роботизированной сборке / Е.А. Коган, М.В. Вартанов, Нгуен Ван Линь. // «СТИН». – 2022. – №12(2). – С. 40–44.
18. Крагельский, И.В. Виноградова И.Э. Коэффициенты трения. Справочное пособие. Издание второе, переработанное и дополненное / И.В. Крагельский, И.Э. Виноградова. – М: Машгиз, 1962. – 222 с.
19. Крагельский, И.В. Трение и износ. Изд. 2-е перераб. и доп. – М: Машиностроение, 1968. – 480 с.
20. Кристаль, М.Г. Обработка результатов планирования экстремального эксперимента: учебное пособие / М.Г. Кристаль, А.Ю. Горелова, ВолГТУ – Волгоград, 2019. – 70 с.
21. Куклев, Л.С. Оснастка для обработки нежестких деталей высокой точности / Л.С. Куклев, М.М. Тазетдинов. – М.: Машиностроение, 1978. – 104 с.
22. Машиностроение. Энциклопедия. Ред. совет: К.В. Фролов и др. Технология изготовления деталей машин. Т. III – 3 / А.М. Дальский, А.Г. Суслов, Ю.Ф. Назаров и др.; Под общ. ред. А.Г. Суслова. – Машиностроение, 2000. – 840 с.
23. Машиностроение. Энциклопедия. Ред. совет: К.В. Фролов и др. Технология сборки в машиностроении. Т. III – 5/ А.А. Гусев, В.В. Павлов, А.Г. Андреев и др.; под общей редакцией Ю.М. Соломенцева. – М.: Машиностроение, 2001 – 640 с.
24. Морозов, И.М. Основы технологии сборки в машиностроении. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 232 с.
25. Нгуен Ван Линь. Повышение технологической надежности роботизированной сборки цилиндрических нежестких деталей на основе разработки алгоритма управления роботом / Нгуен Ван Линь // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – №2. – С. 451–459. doi: 10.24412/2071-6168-2024-2-451-452
26. Нгуен, В.З. Повышение технологической надежности роботизированной сборки на основе разработки алгоритма интеллектуального управления промышленным роботом: дис. ... канд. тех. наук: 2.5.6 / Нгуен Ван Зунг. – Москва, 2023. – 165 с.

27. Новиков, М.П. Основы технологии сборки машин и механизмов – 5-е изд. – М.: Машиностроение, 1980. – 592 с.
28. Ноф, Ш. Справочник по промышленной робототехнике, том 2. – М., Мир, 1990. – 480 с.
29. Подпоркин, В.Г. Обработка нежестких деталей. – М.: МАШГИЗ, 1959. – 203 с.
30. Решетов, Д.Н. Работоспособность и надёжность машин. Учебное пособие для машиностроительных специальностей вузов. – М.: Высш. школа, 1974. – 206 с.
31. Рудицын, М.Н. Справочное пособие по сопротивлению материалов / М.Н. Рудицын, П.Я. Артемов, М.И. Любошиц. Под общей редакцией М.Н. Рудицына. Минск, Изд-во Высшэйшая школа, 1970. – 630 с.
32. Сайтов, А.В. Интенсификация токарной обработки нежестких валов / А.В. Сайтов, С.Л. Васильевых, В.Е. Сайтов // Современные наукоемкие технологии. – 2015. – № 7. – С. 71–73.
33. Спиридонов, А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А.А. Спиридонов. – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.
34. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Т.1 / Под ред. А.С. Васильева, А.А. Кутина. 6-е издание, перераб. и доп. – М.: Инновационное машиностроение, 2018. – 756 с.
35. Тимошенко, С.П. Курс теории упругости / С.П. Тимошенко; под ред. Э.И. Григолюка. Киев.: Издательство «Наукова думка», 1972. – 508 с.
36. Уманский, А.А. Строительная механика самолета / М.: Гос. научно-техническое изд-во Оборонгиз. 1961. – 530 с.
37. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов // Учеб. Для вузов. – 10-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. – 592 с.
38. Чан, Ч.Т. Повышение технологической надежности автоматической сборки цилиндрических соединений на основе вращательного движения и низкочастотных колебаний: дис. ... канд. тех. наук: 05.02.08 / Чан Чунг Та. – Москва, 2021. – 155 с.

39. Черняховская, Л.Б. Кинематический и динамический анализы автоматической сборки цилиндрических деталей. Монография // Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2011. – 76 с.
40. Шаньгина, В.Ф. Промышленные роботы для миниатюрных изделий. – М.: Машиностроение, 1985. – 104 с.
41. Abegg, F. Manipulating deformable linear objects: Vision-based recognition of contact state transitions / F. Abegg, D. Henrich, H. Woern // Proceedings of the 9th International Conference on Advanced Robotics. – 1999. – P. 135–140.
42. Affiliation, R.M. A systematic review on pneumatic gripping devices for industrial robots / R.M. Affiliation, V.S. Affiliation, P.M. Affiliation, J.X. Affiliation // International Journal of Advanced Robotic Systems. – 2022. – 37(3). – P. 1–16. doi: 10.3846/transport.2022.17110.
43. Baykal, I.C. Inspection of screw holes on machine parts using robot vision / Ibrahim Cem Baykal // 2018 International Conference on Artificial Intelligence and Data Processing (IDAP). – Malatya. – Turkey. – 2018. – P. 1–5. doi: 10.1109/IDAP.2018.8620904.
44. Bdiwi, M. Improved peg-in-hole (5-pin plug) task: intended for charging electric vehicles by robot system automatically / M. Bdiwi, J. Suchý, M. Jockesch, A. Winkler // Proceedings of the IEEE 12th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD15). – 2015. – P. 1–5. doi: 10.1109/SSD.2015.7348200.
45. Bishop, C.M. Pattern Recognition and Machine Learning / Christopher M. Bishop. New York.: Springer. 2006. – 738 p.
46. Chang, W. Automatic robot assembly with eye-in-hand stereo vision / W. Chang, Y. Weng, Y. Tsai, C. Chang // Proceedings of the 8th World Congress on Intelligent Control and Automation. – 2011. – 21(1). – P. 914–919. doi: 10.1109/WCICA.2011.5970649.
47. Chen, C. Deformation identification and estimation of one-dimensional objects by using vision sensors / C. Chen, Y.F. Zheng // Proceedings 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation. – 1991. – P. 2306–2311. doi: 10.1109/ROBOT.1991.131538.

48. Cho, H.S. Vision Based Part shape and Misalignment measurement in Cylindrical Peg in hole Tasks / H.S. Cho, J.Y. Kim // Journal of Intelligent and Robotic Systems. – 2005. – 11(7). – P. 615–620. doi: 10.5302/J.ICROS.2005.11.7.615.

49. De Schutter, J. Estimating first-order geometric parameters and monitoring contact transitions during forcecontrolled compliant motion / J.D. Schutter, H. Bruyninckx, S. Dutré, J.D. Geeter, J. Katupitiya, S. Demeery, T. Lefebvre // The International Journal of Robotics Research. – 1999. – 18(2). –P. 1161–1184 . doi: 10.1177/02783649922067780.

50. Desai, R.S., Volz R.A. Identification and verification of termination conditions in fine motion in presence of sensor errors and geometric uncertainties / R.S. Desai, R.A. Volz // Proceedings, 1989 International Conference on Robotics and Automation. – 1989. – P.800–807. doi: 10.1109/ROBOT.1989.100082.

51. Di, P. Hybrid Vision-Force Guided Fault Tolerant Robotic Assembly for Electric Connectors / P. Di, J. Huang, F. Chen, H. Sasaki, T. Fukuda // International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science. – 2009. – P.86–91. doi: 10.1109/MHS.2009.5352078.

52. Dietrich, F. On contact models for assembly tasks: experimental investigation beyond the peg-in-hole problem on the example of force-torque maps / F. Dietrich, D. Buchholz, F. Wobbe, F. Sowinski, A. Raatz, W. Schumacher, F.M. Wahl // 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. – 2010. – P. 2313–2318. doi: 10.1109/IROS.2010.5652704.

53. Du, Y. Decentralized adaptive force position control of reconfigurable manipulator based on soft sensors / Y. Du, Q. Zhu // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part I Journal of Systems and Control Engineering. – 2018. – 232(4). – P. 1–12. doi: 10.1177/0959651818779848.

54. Everett, L.J. Generalized recognition of single-ended contact formations / L.J. Everett, R. Ravuri, R.A. Volz, M. Skubic // IEEE Transactions on Robotics and Automation. – 1999. – 15(5). – P. 829–836. doi:10.1109/70.795788.

55. Fukukawa, T. Assembly algorithm for plastic ring with characteristic finger shape / T. Fukukawa, J. Takahashi, T. Fukuda // IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII). – 2012. – P. 470–475. doi: 10.1109/SII.2012.6426956.

56. Gadeyne, K. Bayesian hybrid model-state estimation applied to simultaneous contact formation recognition and geometrical parameter estimation / K. Gadeyne, T. Lefebvre, H. Bruyninckx // *The International Journal of Robotics Research*. – 2005. – 24(8). – P. 615–630. doi: 10.1177/0278364905056196.

57. Gamez, J.G. Generalized contact force estimator for a robot manipulator / J.G. Garcia, A. Robertsson, J. Gomez Ortega, R. Johansson // *Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006*. – 2006. – P. 4019–4024. doi: 10.1109/ROBOT.2006.1642319.

58. Henrich, D. Robot Manipulation of Deformable Objects / *Advanced Manufacturing*. London.: Springer. – 2000. – 288 p. doi: 10.1007/978-1-4471-0749-1.

59. Hirana, K. Realization of Skill Controllers for Manipulation of Deformable Objects Based on Hybrid Automata / K. Hirana, T. Suzuki, S. Okuma, K. Itabashi, F. Fujiwara // *Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on Robotics and Automation*. – 2001. – P. 2674–2679. doi: 10.1109/ROBOT.2001.933026.

60. Jain, S. Positioning of unknown flexible payloads for robotic arms using a wrist-mounted force/torque sensor / S. Jain, F. Khorrami // *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. – 1995. – 3(2). – P. 189–201. doi: 10.1109/87.388127.

61. Jakovljevic, Z. Contact states recognition in robotic part mating based on support vector machines / Z. Jakovljevic, P.B. Petrovic, J. Hodolic // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2011. – 59. – P. 377–395. doi: 10.1007/s00170-011-3501-5.

62. Jakovljevic, Z. Fuzzy inference mechanism for recognition of contact states in intelligent robotic assembly / Z. Jakovljevic, P.B. Petrovic, J. Hodolic, V.D. Mikovic, M. Pajic // *Journal of Intelligent Manufacturing*. – 2014. – 25. – P. 571–587. doi: 10.1007/s10845-012-0706-x.

63. Jakovljevic, Z. Recognition of contact states in robotized assembly using qualitative wavelet-based features and support vector machines / Z. Jakovljevic, P.B. Petrovic // *Proceedings of the 36th international MATADOR conference*. London: Springer. – 2010. – P. 305–308. doi: 10.1007/978-1-84996-432-6_69.

64. Jasim, I.F. Contact-state modelling in force-controlled robotic peg-in-hole assembly processes of flexible objects using optimised Gaussian mixtures / I.F. Jasim,

P.W. Plapper, H. Voos // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. – 2015. – 231(8). – P. 1448–1463. doi: 10.1177/0954405415598945.

65. Jasim, I.F., Plapper P.W. Contact-state modeling of robotic assembly tasks using Gaussian Mixture Models / I.F. Jasim, P.W. Plapper // Procedia CIRP. – 2014. – 23. – P. 229–234. doi: 10.1016/j.procir.2014.10.061.

66. Jiang, J. State-of-the-Art control strategies for robotic PiH assembly / J. Jiang, H. Zhiyuan, B. Zhuming, M. Xuefeng, Y. Guang // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. – 2020. – 65. – P. 201–219. doi: 10.1016/j.rcim.2019.101894.

67. Jiang, J. The state of the art of search strategies in robotic assembly / J. Jiang, L. Yao, Z. Huang, G. Yu, L. Wang, Z. Bi // Journal of Industrial Information Integration. – 2019. – 26. – P. 1–28. doi: 10.1016/j.jii.2021.100259.

68. Kim, J.Y. A Neural Net-based Assembly Algorithm for Flexible Parts Assembly / J.Y. Kim, H. S. Cho // Journal of Intelligent and Robotic Systems. – 2000. – 29. – P. 133–160. doi: 10.1023/A:1008115522778.

69. Kogan, E.A. Deformation of Flexible Parts in Robotic Assembly / E.A. Kogan, M.V. Vartanov, Nguyen Van Linh // Assembly. Russ. Engin. Res. – 2023. –43. – P. 386–389. doi: 10.3103/S1068798X23040160.

70. Kraus , W. Case studies in the manipulation of flexible parts using a hybrid position/force approach / W. Kraus, B.J. McCarragher // Proceedings of International Conference on Robotics and Automation. – 1997. – P. 367–372. doi: 10.1109/ROBOT.1997.620065.

71. Lee, D.-H. A Laparoscopic Grasping Tool With Force Sensing Capability / D.-H. Lee, U. Kim, T. Gulrez, W.J. Yoon, B. Hannaford // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. – 2015. –20(2). – P. 130–141. doi: 10.1109/TMECH.2015.2442591.

72. Lefebvre, T. Online statistical model recognition and state estimation for autonomous compliant motion / T. Lefebvre, H. Bruyninckx, J.D Schutter // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews). – 2005. – 35(1). –P. 16–29. doi:10.1109/TSMCC.2004.840053.

73. Li, B. Industrial robotic assembly process modeling using support vector regression / B. Li, H. Chen, T. Jin // 2014 IEEE/RSJ International Conference on

Intelligent Robots and Systems. Chicago, USA. – 2014. – P. 4334–4339. doi: 10.1109/IROS.2014.6943175.

74. Li, R. A Survey for Methods and Strategies for High-precision Robotic Grasping and Assembly Tasks – Some New Trends / R. Li, H. Qiao // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. – 2019. – 24(6). – P. 2718–2732. doi: 10.1109/TMECH.2019.2945135.

75. Matsuno, F. Task Understanding And Optimal Strategies for Handling Flexible Beams by Using N-link Manipulators / F. Matsuno, N. Sakabe, M. Ikeda // IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS. – 1994. – P. 941–948.

76. Miura, J, Ikeuchi, K. Task Planning of Assembly of Flexible Objects and Vision-Based Verification // Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation. – 1998. – P. 2086–2091.

77. Monguzzi, A. Flexible robotic strategy for the assembly of ring-shaped elastic objects / A. Monguzzi, M. Maiocchi, A.M. Zanchettin, P. Rocco // Procedia Computer Science. – 2022. – 200. – P. 376–385. doi: 10.1016/j.procs.2022.01.236.

78. Mosemann, H. Identification of assembly process states using polyhedral convex cones / H. Mosemann, A. Raue, F. Wahl // Proceedings 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation. – 1999. – P. 2313–2318. doi: 10.1109/ROBOT.1999.774014.

79. Nakagaki, H. Study of Deformation and Insertion Tasks of a Flexible Wire / H. Nakagaki, , K. Kitagi, T. Ogasawara, H. Tsukune // Proceedings of International Conference on Robotics and Automation. – 1997. – P. 2397–2402. doi: 10.1109/ROBOT.1997.619320.

80. Nakagaki, H. Study of Insertion Task of a Flexible Beam into a Hole / H. Nakagaki, K. Kitagaki, H. Tsukune // Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation. – 1995. – P. 330–335. doi: 10.1109/ROBOT.1995.525306.

81. Naltagaki, H. Study of insertion task of a flexible wire into a hole by using visual tracking observed by stereo vision / H. Naltagaki, K. Kitagi, T. Ogasawara, H. Tsukune // Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation. – 1996. – P. 3209–3214. doi: 10.1109/ROBOT.1996.509201.

82. Nuttin, M. Learning approaches to contact estimation in assembly tasks with robots / M. Nuttin, J. Rosell, R. Suarez, H. Van Brussel, L. Basanez, J. Hao // In: Proceedings of the 3rd European workshop on learning robots, Heraklion. – 1995. – P. 1–11.
83. Park, Y.K. A self-learning rule-based control algorithm for chamferless part mating / Y.K. Park, H.S. Cho // Control Engineering Practice. – 1994. – 2(5). – P.773–783. doi:10.1016/0967-0661(94)90342-5.
84. Petrovic, P.B. Outline of a new feature space deformation approach in fuzzy pattern recognition / P.B. Petrovic // FME Transactions. – 2003. – 31(2). – P. 75–86.
85. Ramirez-Alpizar, I.G., Harada, K., Yoshida, E. Human-based framework for the assembly of elastic objects by a dual-arm robot / I.G. Ramirez-Alpizar, K. Harada, E. Yoshida // ROBOMECH Journal. – 2017. – 20. – P. 1–10. doi: 10.1186/s40648-017-0088-0.
86. Saadat, M. Industrial applications of automatic manipulation of flexible materials / M. Saadat, P. Nan // Industrial Robot. – 2002. – 29 (5). – P. 434–442. doi: 10.1108/01439910210440255.
87. Sasaki, K. Cylinder Insertion into Hole of Flexible Rubber Plate - Path Search for Local Minimum Insertion Force by Shifting Fitted Zone Regression / K. Sasaki, A. Brata, S. Shimachi // J. Robot. Mechatron. – 1998. – 10(3). – P. 197–202. doi: 10.20965/jrm.1998.p0197.
88. Shimachi, S. Assembly Skill for Cylinder Insertion into Elastic Hose / S. Shimachi, H. Hattori, A.S. Brata // Advanced Robotics. – 1999. – P. 183–189.
89. Shirinzadeh, B. A hybrid contact state analysis methodology for robotic-based adjustment of cylindrical pair / B. Shirinzadeh, Y. Zhong, P.D. Tilakaratna, Y. Tian, M.M. Dalvand // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2011. – 52. – P. 329–342. doi:10.1007/s00170-010-2705-4.
90. Simunovic, S. Force Information in Assembly Processes / S. Simunovic // Presented at the 5th International Symposium on Industrial Robots. – 1975. – P. 414–431.
91. Skubic, M. Identifying single-ended contact formations from force sensor patterns / M. Skubic, R.A. Volz // IEEE Transactions on Robotics and Automation. – 2000. – 16(5). – P. 597–603. doi:10.1109/70.880810.

92. Son, C. A neural/fuzzy optimal process model for robotic part assembly / C. Son // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2001. – 41(12). – P. 1783–1794. doi:10.1016/S0890-6955(01)00032-3.
93. Son, C. Optimal control planning strategies with fuzzy entropy for robotic part assembly tasks / C. Son // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2002. – 42(12). – P. 1335–1344. doi:10.1016/S0890-6955(02)00063-9.
94. Song, HC. USB assembly strategy based on visual servoing and impedance control / H.C. Song, M.C. Kim, J.B. Song // *12th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI)*. – 2015. – 1(1). – P. 182–187. doi:10.1109/URAI.2015.7358873.
95. Su, J. A new insertion strategy for a peg in an unfixed hole of the piston rod assembly / J. Su, H. Qiao, C. Liu, Z. Ou // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2012. – 59(1). – P. 1211–1225. doi:10.1007/s00170-011-3569-y.
96. Suárez, R. Assembly contact force domains in the presence of uncertainty / R. Suárez, L. Basañez, J. Rosell // *IFAC Proceedings Volumes*. – 1999. – 27(14). – P. 653–659. doi:10.1016/S1474-6670(17)47380-0.
97. Sun, B. Robotic Wiring Harness Assembly System for Fault-tolerant Electric Connectors Mating / B. Sun, F. Chen, H. Sasaki, T. Fukuda // *International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science*. – 2010. – P. 202–205. doi:10.1109/MHS.2010.5669533.
98. Takahashi, J. Passive alignment principle for robotic assembly between a ring and a shaft with extremely narrow clearance / J. Takahashi, T. Fukukawa, T. Fukuda // *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. – 2016. – 21(1). – P. 196–204. doi:10.1109/TMECH.2015.2448639.
99. Vapnik, V.N. *The nature of statistical learning theory*. New York.: Springer. – 2000. – 314p. doi: 10.1007/978-1-4757-3264-1.
100. Vartanov, M.V. Analysis of Deformability of Non-Rigid Cylindrical Parts during Robotic Assembly Using a Force Torque Sensor / M.V. Vartanov, E.A. Kogan, Van Linh Nguyen // *IEEE 2024 International Russian Smart Industry Conference*. – 2024. – P. 7–12. doi: 10.1109/SmartIndustryCon61328.2024.10515980.

101. Vartanov, M.V. Determination of Changing Friction Coefficient Using Force Torque Sensor During Robotic Assembly of Cylindrical Connection with Clearance / M.V. Vartanov, Nguyen Van Dung, Tran Dinh Van // 2020 International Russian Automation Conference. – 2020. – P. 977–981. doi: 10.1109/RusAutoCon49822.2020.9208047.

102. Vartanov, M.V. Determination of the friction coefficient using a force torque sensor during the robotic assembly of a non-rigid shaft with a rigid sleeve / M.V. Vartanov, Nguyen Van Linh // In: Radionov A.A., Gasiyarov V.R. (eds) Proceedings of the 9th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2023). Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. – 2023. – P. 521–529. doi: 10.1007/978-3-031-38126-3_52.

103. Vartanov, M.V. Evaluating the Use of Support Vector Machine Models for Contact State Identification of Non-Rigid Cylindrical Parts During Robotic Assembly/ M.V. Vartanov, Van Linh Nguyen, E.A. Kogan // IEEE 2024 International Russian Smart Industry Conference. – 2024. – P. 1–6. doi: 10.1109/SmartIndustryCon61328.2024.10515354.

104. Whitney, D.E. Mechanical Assemblies: Their Design, Manufacture, and Role in Product Development. Oxford University Press, 2004. – 273 p.

105. Whitney, DE. Quasi-static assembly of compliantly supported rigid parts / D.E. Whitney // Dynamic Systems Measurement Control. – 1982. – 104(1). – P. 65–77. doi:10.1115/1.3149634.

106. Xiao, J. Contact states: representation and recognizability in the presence of uncertainties / J. Xiao, L. Liu // Proceedings. 1998 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Innovations in Theory, Practice and Applications. – 1999. – P. 1151–1156. doi:10.1109/IROS.1998.727454.

107. Yang, Z. A coaxial vision assembly algorithm for uncentripetal holes on large-scale stereo workpiece using multiple-DOF robot / Z. Yang, W. Liu, H. Li, Z. Li // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. – 2018. – 51. – P. 168–179. doi: 10.1109/IST.2018.8577136.

108. Yue, S. Manipulating Deformable Linear Objects: Fuzzy-Based Active Vibration Damping Skill / S. Yue, D. Henrich // Journal of Intelligent and Robotic Systems. – 2006. – 46. – P. 201–219. doi: 10.1007/s10846-006-9049-1.

109. Zhang, K. Jamming Analysis and Force Control for Flexible Dual Peg-in-hole Assembly / K. Zhang, J. Xu, H. Chen, J. Zhao, K. Chen // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2019. – 66(3). – P. 1930 – 1939. doi: 10.1109/TIE.2018.2838069.

110. Zheng, Y.F. Strategies for automatic assembly of deformable objects / Y.F. Zheng, R. Pei, C. Chen // Proceedings of 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation. – 1991. – P. 2598–2603. doi: 10.1109/ROBOT.1991.132019.

ПРИЛОЖЕНИЕ А: Описание экспериментальных образцов

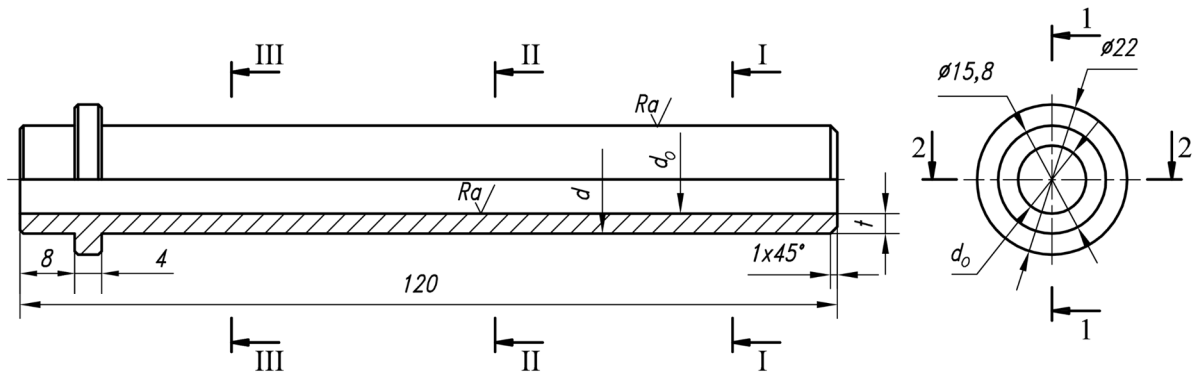


Рисунок 1 – Схема измеренных сечений фактических размеров нежесткого вала

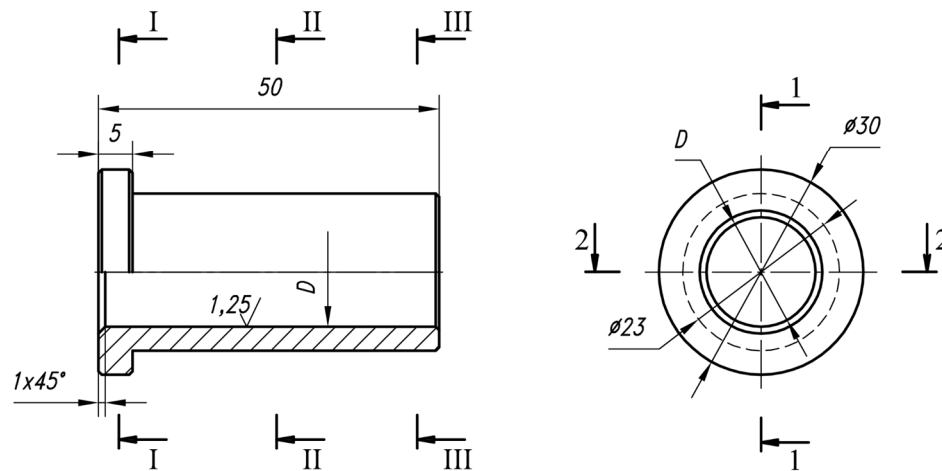


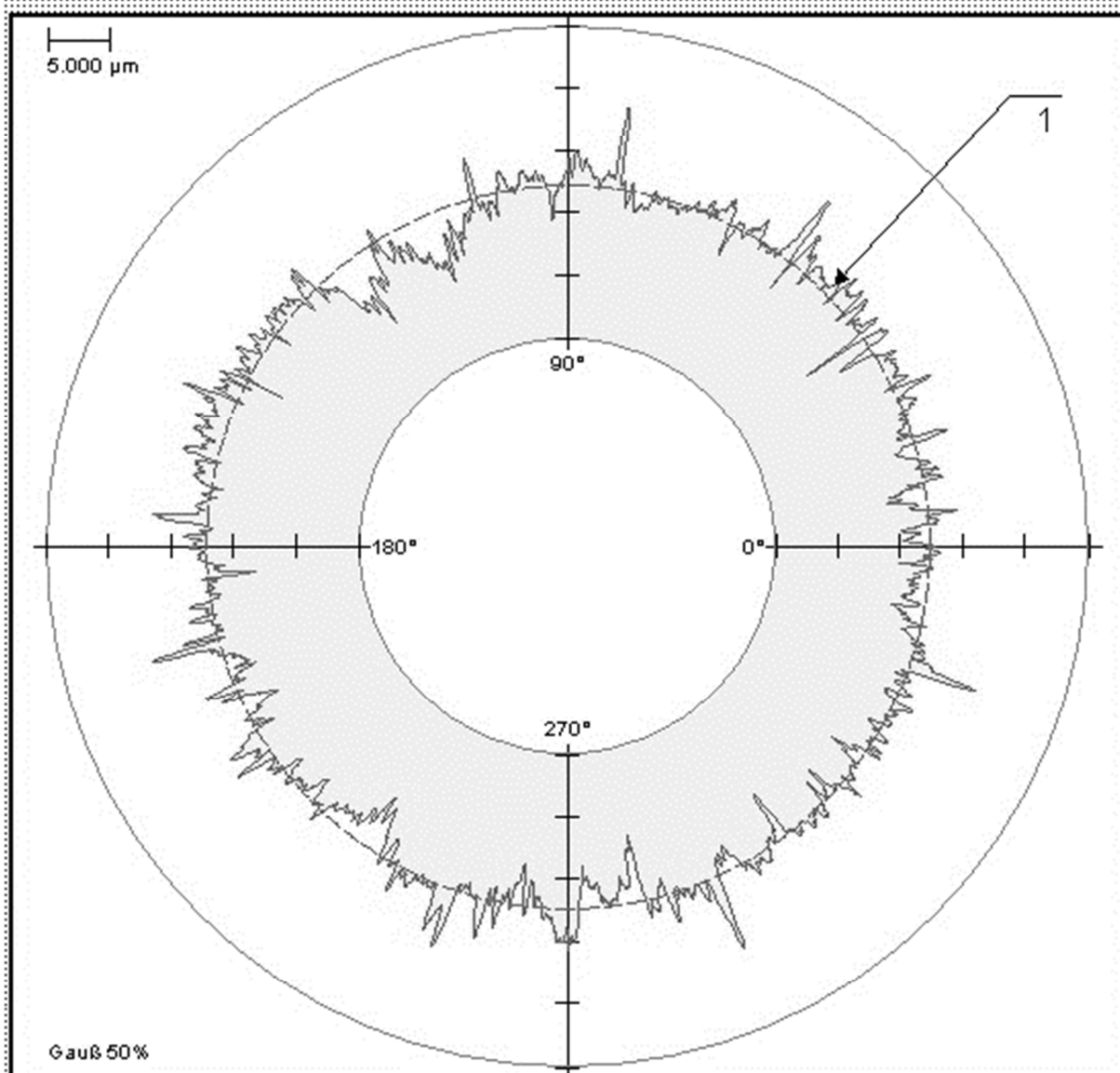
Рисунок 2 – Схема измеренных сечений фактических размеров втулки

Данные экспериментальных образцов

Образцов	Карта материала	Модуль упругости E, МПа	d, мм	d ₀ , мм	Толщина стенки вала t, мм
Вал	Фторопласта - 4 (ГОСТ 10007-80)	500	15,80	0	7,9
				5,8	5,0
				11,6	2,1
	Полиэтилена (ПЭНД) (ГОСТ 16338-85)	800		0	7,9
				5,8	5,0
				11,6	2,1
	Полипропилена (ПП) (ГОСТ 26996-86)	1100		0	7,9
				5,8	5,0
				11,6	2,1
Втулка	Карта материала		D, мм		Зазор, мм
	Стали 45		15,92	0,06	
			16,00	0,10	
			16,08	0,14	

Средства измерения: микрометр МК25-1 ГОСТ 6507-90, Hommel tester form 4004.

Supplier / customer MOSPOLITECH	Test plan 11048-3	JENOPTIK GERMANY
Order TIOM	Designation of standard 11048-3	
Device Hommel tester FORM 4004	Number of standard 11048-3	HOMMEL-ETAMIC
Serial number 11048-3	Inspector MISHIN V.N.	SW-Version V8.11
Comments 11048-3		Datum 22.11.2023
		Uhrzeit 04:20:35



<input checked="" type="checkbox"/> Округлость 1	E: 3.08 µm	Путь измерений: 360.0 °
Значение: 10.02 µm	E(Phi): 244.8 °	Точки измерений: 4096
Допуск: 1.00 µm	R0: 29.55782 mm	Время: 22.11.2023 4:19:24
Способ: LSCI	<input checked="" type="checkbox"/> Округлость 1 Радиальное 1	
Фильтр: 0 - 0 W/U	Скорость: 5.0 об/мин	

Supplier / customer MOSPOLITECH	Test plan 11048-3	JENOPTIK GERMANY
Order TIOM	Designation of standard 11048-3	
Device Hommel tester FORM 4004	Number of standard 11048-3	HOMMEL-ETAMIC
Serial number 11048-3	Inspector MISHIN V.H.	SW-Version V8.11
Comments 11048-3		Datum 22.11.2023
		Uhrzeit 04:28:06

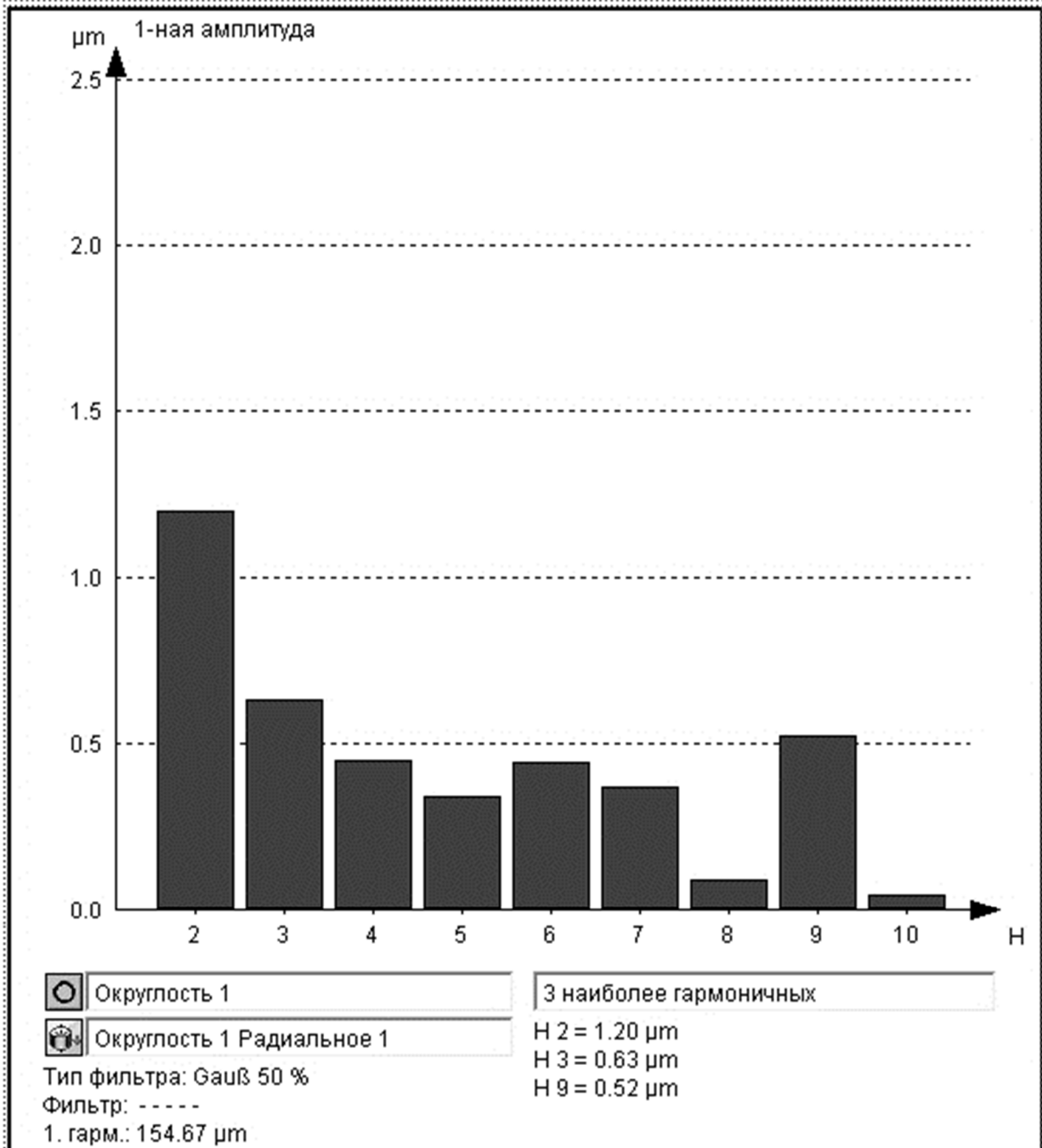
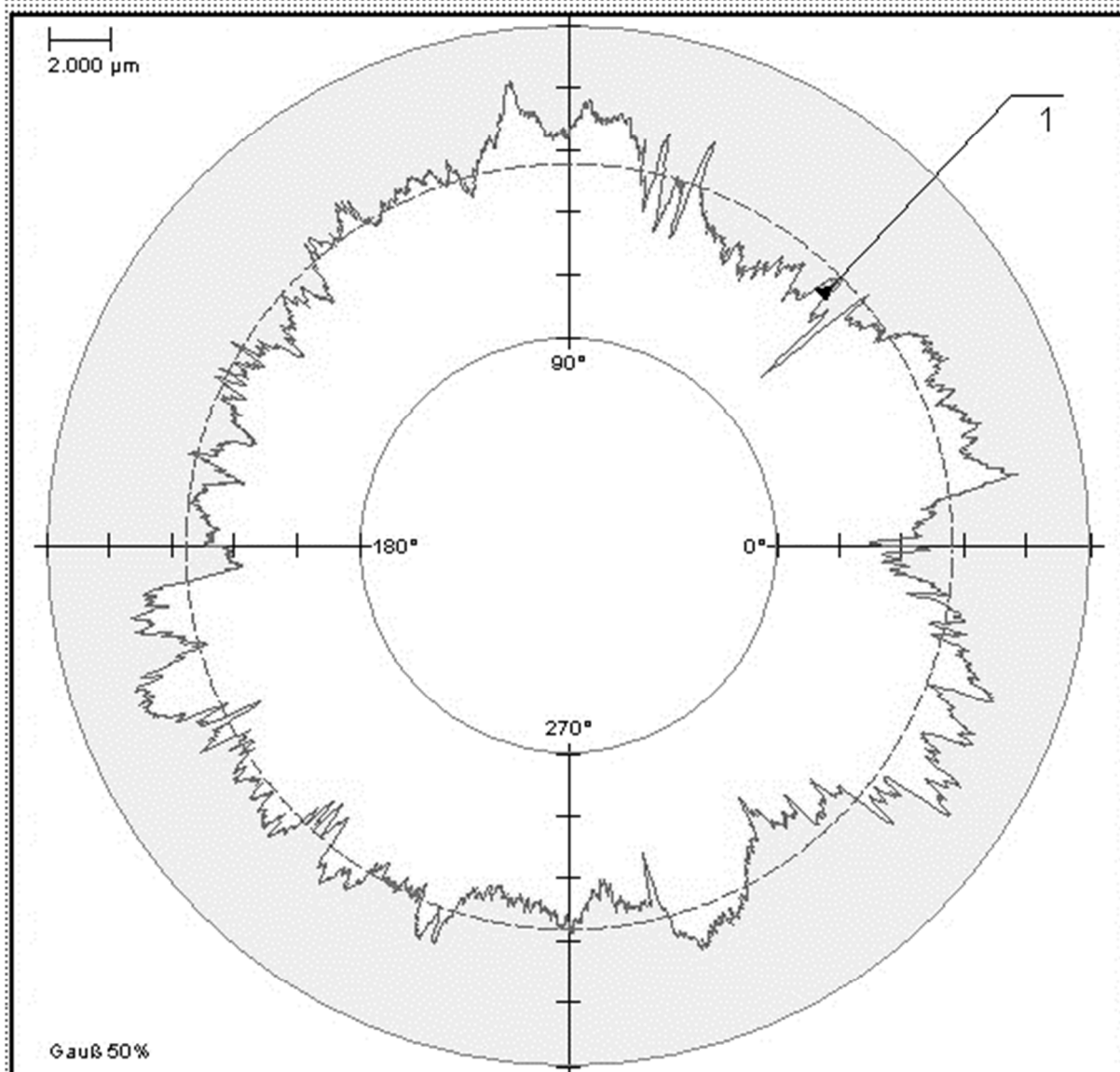


Рисунок 3 – Результат измерения погрешности вала

Supplier / customer MOSPOLITECH	Test plan 11048-3	JENOPTIK GERMANY
Order TIOM	Designation of standard 11048-3	
Device Hommel tester FORM 4004	Number of standard 11048-3	HOMMEL ETAMIC
Serial number 11048-3	Inspector MISHIN V.N.	SW-Version V8.11
Comments 11048-3		Datum 24.11.2023
		Uhrzeit 03:38:48



<input checked="" type="checkbox"/> Округлость 1	E: 1.89 µm	Путь измерений: 360.0 °
Значение: 6.81 µm	E(Phi):353.0 °	Точки измерений: 4096
Допуск: 1.00 µm	R0: 0.04342 mm	Время: 24.11.2023 3:38:36
Способ:LSCI	<input checked="" type="checkbox"/> Округлость 1 Радиальное 1	
Фильтр: 0 - 0 W/U	Скорость: 5.0 об/мин	

Supplier / customer MOSPOLITECH	Test plan 11048-3	JENOPTIK GERMANY
Order TIOM	Designation of standard 11048-3	
Device Hommel tester FORM 4004	Number of standard 11048-3	HOMMEL ETAMIC
Serial number 11048-3	Inspector MISHIN V.N.	SW-Version V8.11
Comments 11048-3		Datum 24.11.2023
		Uhrzeit 03:40:44

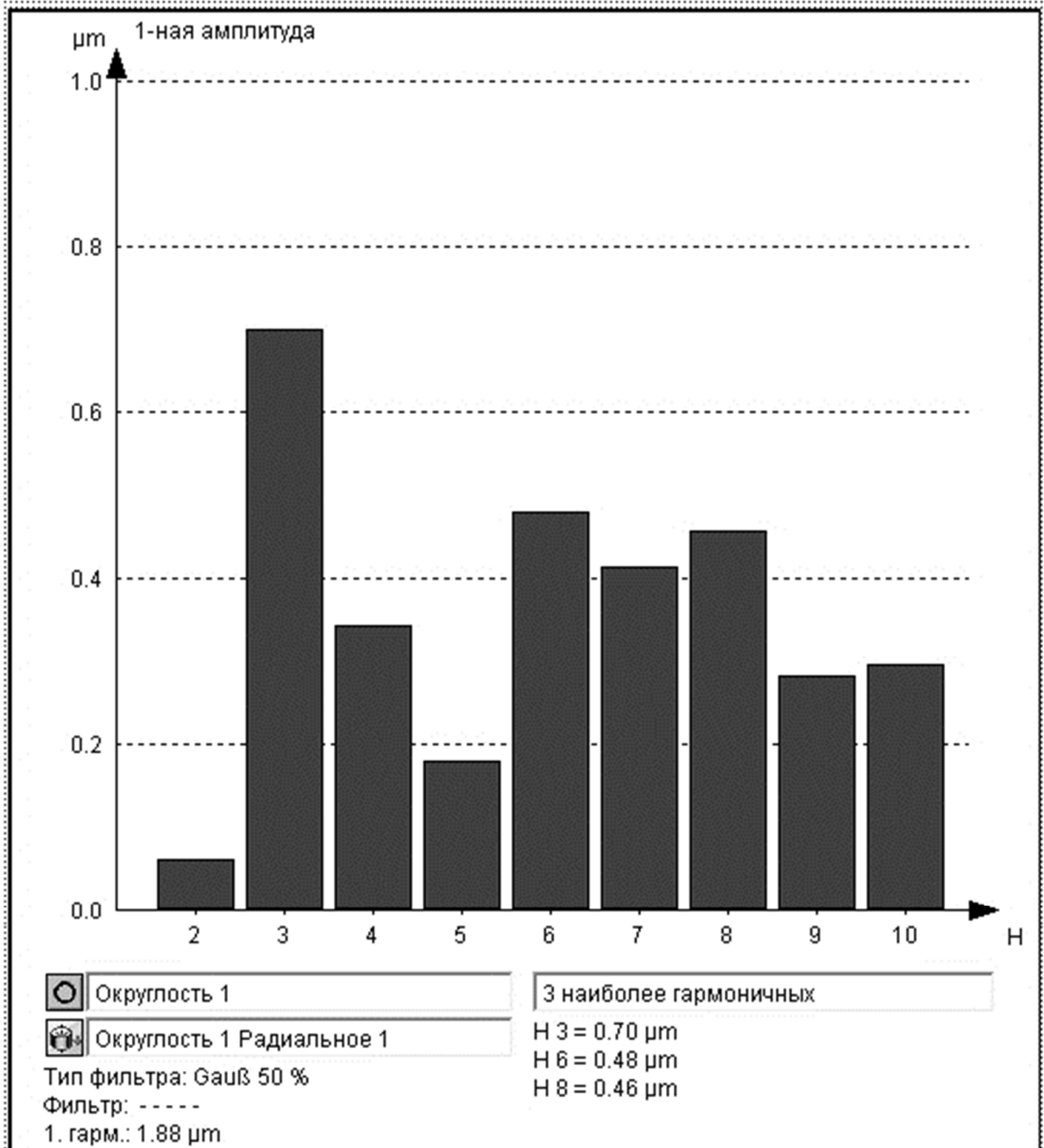


Рисунок 4 – Результат изменения погрешности втулки

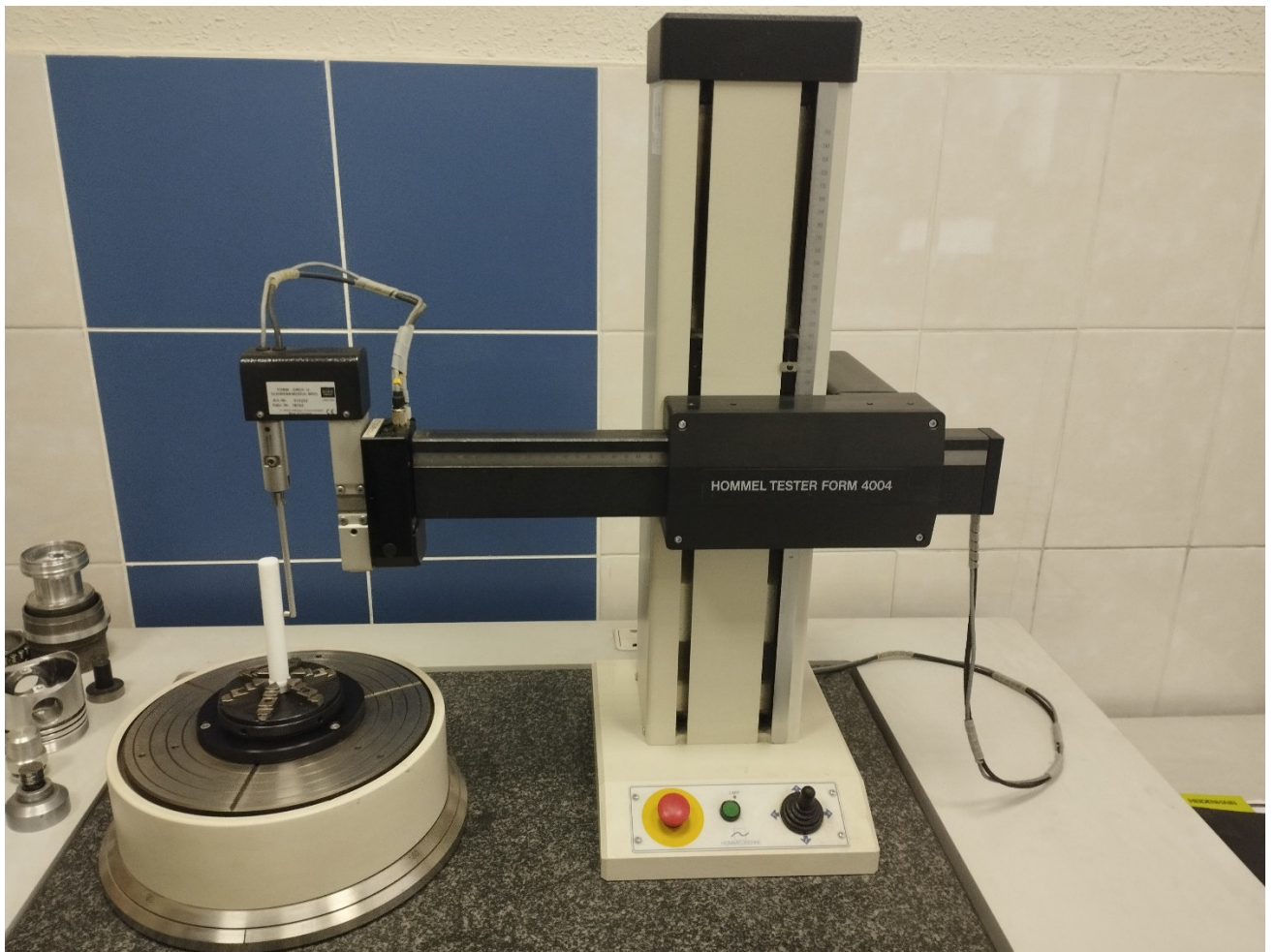


Рисунок 5 – Измерительная станция HOMMEL TESTER FORM 4004

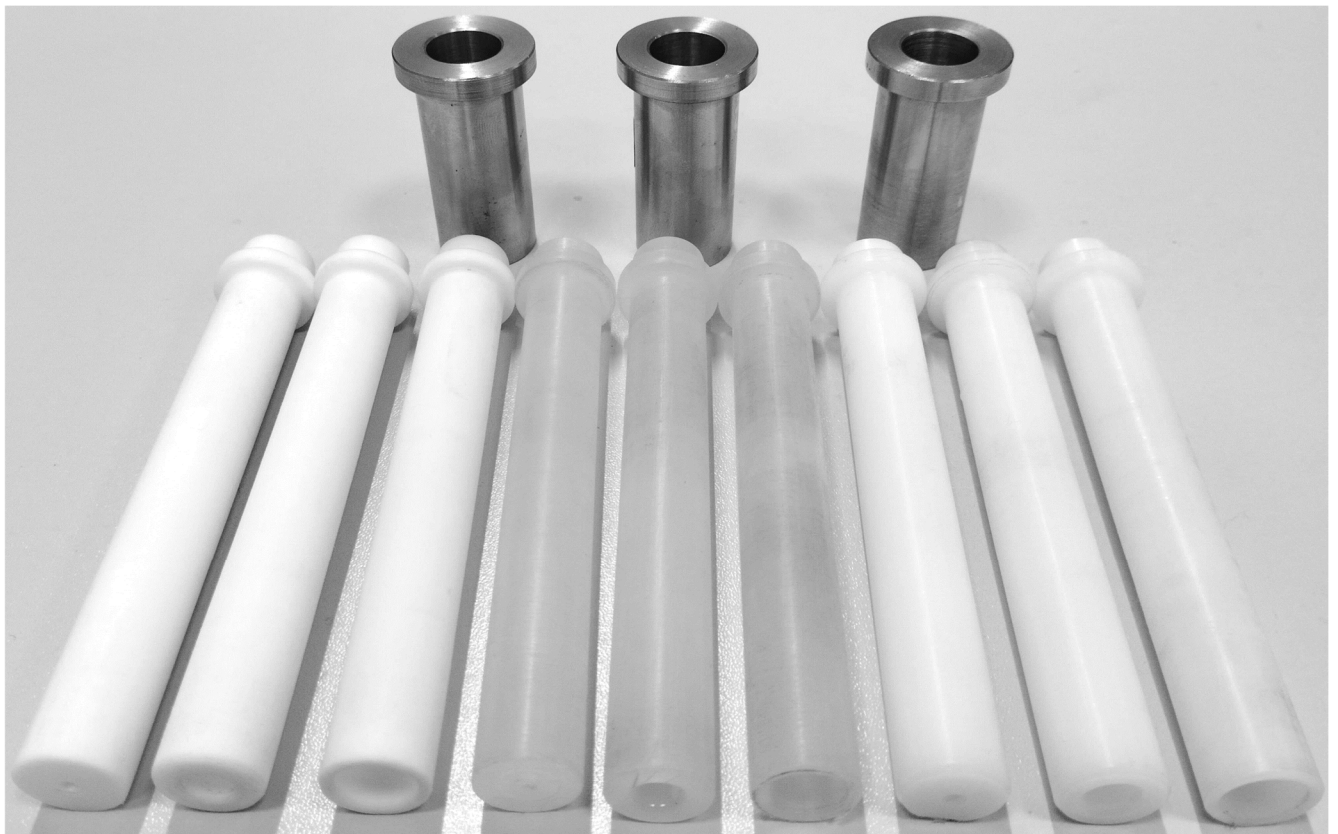


Рисунок 6 – Экспериментальные образцы

**ПРИЛОЖЕНИЕ Б: Программа алгоритма силово-позиционного управления
в среде RobotStudio при сборке нежестких цилиндрических деталей**

```

MODULE Algorithm
VAR num D:=0.0160;
VAR num D_n:=0.0158;
VAR num D_t:=0.0118;
VAR num C_B:=0.001;
VAR num r:=0.0079;
VAR num phi:=45;
VAR num mi:=0.056;
VAR num E:=500000000;
VAR num I:=0;
VAR num cosalpha:=0;
VAR num theta:=0;
VAR num gamma:=0;
VAR num k:=0;
VAR num Ang:=0;
VAR num h:=0.280;
VAR num zb_1:=0;
VAR num xb_1:=0;
VAR num zb:=0;
VAR num xb:=0;
VAR num delta_xb:=0;
VAR num xa:=0;
VAR num za_1:=0;
VAR num xa_1:=0;
VAR num za:=0;
VAR num Angle_gamma:=0;
VAR num Angle_theta:=0;
VAR num Rad_gamma:=0;
VAR num Rad_theta:=0;
VAR num delta_xa:=0;
VAR num Angle_theta_1:=0;
VAR num X_01:=0;
VAR num My_0:=0;
VAR num X_0:=0;
VAR num Z_0:=0;
VAR num Y_0:=0;
VAR num X_b:=0;
VAR num Z_b:=0;
VAR num Fx_mul:=0.00607;
VAR num My_mul:=0.000153;
VAR num d_x:=0;
VAR num q:=0;
VAR num q_0:=0;
VAR num d_y:=0;
VAR num R_y:=0;
VAR num R_x:=0;
VAR num ket:=0;
VAR num MF_d:=0;
VAR num MF_p:=0;
VAR num Delta:=0;
VAR num a:=0;
VAR num a_0:=0;
VAR num Delta_err_Y:=0;
VAR num Y:=0;
VAR num Y_1:=0;
VAR num Delta_err_X:=0;
VAR num M_F:=0;
VAR num km_1:=0;
VAR num L:=0.105;
VAR num kz_1:=0;
VAR num kz_2:=0;
VAR num kx_1:=0;
VAR num kx_2:=0;
VAR num t:=0;
VAR num Fx:=0;
VAR num Fz:=0;
VAR num My:=0;
VAR num zb_0:=0;
VAR num c:=0.7;
VAR num Fx_1:=0;
VAR num Fy_1:=0;
VAR num Fz_1:=0;
VAR num x2:=0;
VAR num x3:=0;
VAR num Mx_1:=0;
VAR num My_1:=0;
VAR num Mz_1:=0;
VAR num Fy_mul:=0.00612;
VAR num Fz_mul:=0.00609;
VAR num Mz_mul:=0.000153;

```



```

VAR string                                     ! Signal to identify contact status
FileLocation:="HOME:Linh.csv";                VAR num Sigma_1_2:=0;
VAR iodev File;                               VAR num Sigma_2_3:=0;
VAR string time;
VAR pos pos1;
!Main program
PROC main()
  MoveL p00, v10, fine, tSchunk2\WObj:=wobj2;
  MoveL p10, v10, fine, tSchunk2\WObj:=wobj2;
  MoveL p20, v10, fine, tSchunk2\WObj:=wobj2;
  FOR i FROM 1 TO 500 STEP 1 DO
    MoveL RelTool (CRobT(), 0, 0, 0.1), v10, fine, tSchunk2\WObj:=wobj2;
    pos1 := CPos(\Tool:=tSchunk2\WObj:=wobj2);
    X_01:=(pos1.x)/1000;
    Y_0:=(pos1.y)/1000;
    Z_0:=(pos1.z)/1000;
    q:=q+0.1;
    Signal_Calculation_Input;
    Classification_CS_SVM;
    Calculating_CS_DEV;
    WaitTime 0.05;
    WriteData_F_M_S_V_M;
    TPErase;
  ENDFOR
  MoveL RelTool (CRobT(), 0, 0, -0.02), v10, fine, tSchunk2\WObj:=wobj2;
ENDPROC
PROC Signal_Calculation_Input()
  IF gi_Fx_1 >= 32768 THEN
    Fx_1:=(gi_Fx-65535)*Fx_mul;
  ELSE
    Fx_1:=(gi_Fx)*Fx_mul;
  ENDIF
  IF gi_Fy >= 32768 THEN
    Fy_1:=(gi_Fy-65535)*Fy_mul;
  ELSE
    Fy_1:=(gi_Fy)*Fy_mul;
  ENDIF
  IF gi_Fz >= 32768 THEN
    Fz_1:=(gi_Fz-65535)*Fz_mul;
  ELSE
    Fz_1:=(gi_Fz)*Fz_mul;
  ENDIF
  IF gi_Tx >= 32768 THEN
    Mx_1:=(gi_Tx-65535)*Mx_mul;
  ELSE

```

```

    Mx_1:=(gi_Tx)*Mx_mul;
ENDIF
IF gi_Ty >= 32768 THEN
    My_1:=(gi_Ty-65535)*My_mul;
ELSE
    My_1:=(gi_Ty)*My_mul;
ENDIF
IF gi_Tz >= 32768 THEN
    Mz_1:=(gi_Tz-65535)*Mz_mul;
ELSE
    Mz_1:=(gi_Tz)*Mz_mul;
ENDIF
ENDPROC
PROC Calculating_CS_DEV()
!Calculate values from force-torque sensors
IF Fx_1>0 THEN
    Fx:= sqrt(POW(Fx_1,2) + POW(Fy_1,2));
ELSE
    Fx:= -sqrt(POW(Fx_1,2) + POW(Fy_1,2));
ENDIF
Fz:=Fz_1;
IF My_1>0 THEN
    My:= sqrt(POW(Mx_1,2) + POW(My_1,2));
ELSE
    My:= -sqrt(POW(Mx_1,2) + POW(My_1,2));
ENDIF
My_0:=My+Fx*h;
!Calculating input data
IF X0_1>=0 THEN
X_0:= sqrt(POW(X_01,2) + POW(Y_0,2));
ELSE
X_0:= -sqrt(POW(X_01,2) + POW(Y_0,2));
ENDIF
X_b:=D/2;
cosalpha:=(X_01/sqrt(POW(X_01,2) + POW(Y_0,2)));
I:=pi*(Pow(D_n,4))/64;
Z_b:=C_B;
a:=(Z_0-Z_b);
k:= sqrt(abs(Fz/(E*I)));
    !Chamfer contact!
IF t=1 THEN
    ! Coordinates of point C
    FOR Rad_gamma_1 FROM -0.18 TO 0.18 STEP 0.0001 DO
        FOR xc_1 FROM -0.008 TO 0.008 STEP 0.00005 DO

```

```

        zc_1:= (((My*(1+ Pow (Rad_gamma_1,2)))/(Fx+Fz*Rad_gamma_1))+
xc_1*(mi+Rad_gamma_1))/(1-mi*Rad_gamma_1);
        Y:= -xc_1+r-((My_0)/Fz)*(1-cos(k*(zc_1-
h)*180/pi))+(Fx/Fz)*((zc_1-h)-(sin(k*(zc_1-h)*180/pi))/k);
        IF Abs(Y)<0.001 AND X_0<0 THEN
            xc:= -xc_1;
            zc:= zc_1;
        ELSEIF Abs(Y)<0.001 AND X_0>=0 THEN
            xc:= xc_1;
            zc:= zc_1;
        ENDIF
    ENDFOR
ENDFOR
!Calculation of deflection angle gama and angle theta
Rad_gamma:= -(My_0/Fz)*k*sin(k*(zc-h)*180/pi)+(Fx/Fz)*(1-cos(k*(zc-h)*180/pi));
Angle_gamma:=(Rad_gamma*180/pi);
Rad_theta:=(Abs(X_0)-Abs(X_b)+Abs(xb))/zb;
Angle_theta:=Abs(Rad_theta*180/pi);
! Calculation of adjustment values
Delta_err_X:=-X_01*1000;
Delta_err_Y:=-Y_0*1000;
d_x:=(Delta_err_X*Abs(Fx_1)/(Abs(Fx)));
d_y:=(Delta_err_Y*Abs(Fy_1)/(Abs(Fx)));
R_x:=-(0.01*Angle_theta*(Mx_1))/Abs(My))/2;
R_y:=((0.01*Angle_theta*(My_1))/Abs(My))/2;
!% Adjust the offset angle and coordinates
MoveL RelTool (CRobT(),d_x,d_y,0,\Rx:=R_x),v10,fine,tSchunk2\WObj:=wobj2;
MoveL RelTool (CRobT(),d_x,d_y,0,\Rx:=R_x),v10,fine,tSchunk2\WObj:=wobj2;
MoveL RelTool (CRobT(),0,0,0,\Ry:=R_y),v10,fine,tSchunk2\WObj:=wobj2;
MoveL RelTool (CRobT(),0,0,0,\Ry:=R_y),v10,fine,tSchunk2\WObj:=wobj2;
!Single-point contact!
ELSEIF t=2 THEN
    ! Coordinates of point B
    FOR xb_1 FROM -0.008 TO 0.008 STEP 0.00005 DO
        Delta:= Pow(a,2)-4*((abs(X_0)-abs(X_b))*xb_1+ Pow(xb_1,2));
        zb_1:=(Z_b-Z_0+sqrt(Delta))/2;
        Y:= -xb_1+r-(My_0/Fz)*(1-cos(k*(zb_1-h)*180/pi))+(Fx/Fz)*((zb_1-h)-
(sin(k*(zb_1-h)*180/pi))/k);
        IF Abs(Y)<0.001 AND X_0<0 THEN
            xb:= -xb_1;
            zb:= zb_1;
        ELSEIF Abs(Y)<0.001 AND X_0>=0 THEN
            xb:= xb_1;
            zb:= zb_1;
        ENDIF
    ENDIF

```

```

ENDFOR
!Calculation of deflection angle gama and angle theta
Rad_gamma:=- (My_0/Fz)*k*sin(k*(zb-h)*180/pi)+(Fx/Fz)*(1-cos(k*(zb-h)*180/pi));
Angle_gamma:=(Rad_gamma*180/pi);
Rad_theta:=(Abs(X_0)-Abs(X_b)+Abs(xb))/zb;
Angle_theta:=Abs(Rad_theta*180/pi);
! Calculation of adjustment values
Delta_err_X:=-X_01*1000;
Delta_err_Y:=-Y_0*1000;
d_x:=(Delta_err_X*Abs(Fx_1)/(Abs(Fx)));
d_y:=(Delta_err_Y*Abs(Fy_1)/(Abs(Fx)));
R_x:=-((0.01*Angle_theta*(Mx_1))/Abs(My))/2;
R_y:=((0.01*Angle_theta*(My_1))/Abs(My))/2;
!% Adjust the offset angle and coordinates
MoveL RelTool (CRobT(),d_x,d_y,0,\Rx:=R_x),v10,fine,tSchunk2\WObj:=wobj2;
MoveL RelTool (CRobT(),d_x,d_y,0,\Rx:=R_x),v10,fine,tSchunk2\WObj:=wobj2;
MoveL RelTool (CRobT(),0,0,0,\Ry:=R_y),v10,fine,tSchunk2\WObj:=wobj2;
MoveL RelTool (CRobT(),0,0,0,\Ry:=R_y),v10,fine,tSchunk2\WObj:=wobj2;
! Two-point contact !
ELSEIF t=3 THEN
! Coordinates of point B
FOR xb_1 FROM -0.008 TO 0.008 STEP 0.00005 DO
Delta:= Pow(a,2)-4*((abs(X_0)-abs(X_b))*xb_1+ Pow(xb_1,2));
zb_1:=(Z_b-Z_0+sqrt(Delta))/2;
M_F:= -(My+xb_1*Fz-zb_1*Fx)/(Fz*k);
x2:=
M_F*((1-cos(k*q*180/pi))*(1-cos(k*L*180/pi))-k*sin(k*q)*(k*L-
sin(k*L*180/pi)))/(2*(1-cos(k*L*180/pi))-(k*L*sin(k*L*180/pi)));
x3:=
M_F*((1-cos(k*L*180/pi))*sin(k*L*180/pi)-sin(k*L*180/pi)*(1-cos(k*(L-
zb_1)*180/pi)))/(2*(1-cos(k*L*180/pi))-(k*L*sin(k*L*180/pi)));
Y:= -xb_1+r-(x2*(1-cos(k*(zb_1-h)))+x3*(k*(zb_1-h)-sin(k*(zb_1-h))));
IF Abs(Y)<0.001 AND X_0<0 THEN
xb:= -xb_1;
zb:= zb_1;
ELSEIF Abs(Y)<0.001 AND X_0>=0 THEN
xb:= xb_1;
zb:= zb_1;
ENDIF
ENDFOR
ENDFOR
!Calculation of deflection angle gama and angle theta
Rad_gamma:=x2*k*sin(k*(zb-h)*180/pi)+k*x3*(1-cos(k*(zb-h)*180/pi));
Angle_gamma:=(Rad_gamma*180/pi);
Rad_theta:=(Abs(X_0)-Abs(X_b)+Abs(xb))/zb;
Angle_theta:=Abs(Rad_theta*180/pi);
gamma:= Abs(Rad_gamma);
theta:=Abs(Rad_theta);

```

```

! Coordinates of point A
q:=q;
q_0 :=q/1000;
za :=(q_0-C_B)/(cos(Angle_theta))+zb;
xa:=          -(xb/abs(xb))*(D-abs(X_b)+abs(X_0))          za*Abs(sin(Angle_theta))/
cos(Angle_theta);
! Calculation of adjustment values
Delta_err_X:=-X_01*1000;
Delta_err_Y:=-Y_0*1000;
d_x:=(Delta_err_X*Abs(Fx_1)/(2*Abs(Fx)));
d_y:=(Delta_err_Y*Abs(Fy_1)/(2*Abs(Fx)));
R_x:=-(0.001*Angle_theta*(Mx_1))/Abs(My));
R_y:=((0.001*Angle_theta*(My_1))/Abs(My));
!Calculation of jamming conditions during assembly
kz_1:=mi+theta;
kz_2:=mi+gamma;
kx_1:=mi*theta-1;
kx_2:=1-mi*gamma;
km_1:=mi*(za*theta+abs(xa))-(za-abs(xa)*theta);
km_2:= (zb-abs(xb)*gamma)-mi*(zb*gamma+abs(xb));
a_0:=((kz_2/kz_1-km_2/km_1)*(km_1*kx_1)/(kx_2/kx_1-kz_2/kz_1));
MF_p:=abs((kx_2/kx_1-km_2/km_1)*(km_1/kz_1)/(kx_2/kx_1-kz_2/kz_1));
MF_d:=abs(My/(Fz)+a_0*(Fx/Fz));
ket:=(MF_p-MF_d); ! Evaluation value of jamming <0 =>jamming
IF MF_d > MF_p THEN
  MoveL RelTool (CRobT(),0, 0, 0, \Rx:=R_x \Ry:=R_y), v10, fine,
tSchunk2\WObj:=wobj2;
  MoveL RelTool (CRobT(),0, 0, 0, \Rx:=R_x \Ry:=R_y), v10, fine,
tSchunk2\WObj:=wobj2;
  MoveL RelTool (CRobT(),d_x, d_y, 0), v10, fine, tSchunk2\WObj:=wobj2;
ELSEIF MF_d < MF_p THEN
  q:=q;
ENDIF
ENDIF
ENDPROC
PROC Classification_CS_SVM()
! Learning data
VAR num X{2,1}:=[[0],[0]];
VAR num W{2,2}:=[[-0.0154, -3.5650],[-0.0222, 0.76148]];
VAR num bias_1_2:=-3.0312;
VAR num bias_2_3:=3.7753;
! SVM contact state identification
X{1,1}:=Fx_1/My_1;
X{2,1}:= Fz_1;
Sigma_1_2:= X{1,1}*W{1,1}+X{2,1}*W{1,2}+bias_1_2;

```

```
Sigma_2_3:= X{1,1}*W{2,1}+X{2,1}*W{2,2}+bias_2_3;
IF Sigma_1_2<0 THEN
  t:=1;
ELSEIF Sigma_1_2>0 AND Sigma_2_3>0 THEN
  t:=2;
ELSEIF Sigma_1_2>0 AND Sigma_2_3<0 THEN
  t:=3;
ENDIF
ENDPROC
PROC WriteData_F_M_S_V_M()
  Open FileLocation, File \Append;
  Write File, NumToStr(Fx_1,5)+", "\NoNewLine;
  Write File, NumToStr(Fy_1,5)+", "\NoNewLine;
  Write File, NumToStr(Fz_1,5)+", "\NoNewLine;
  Write File, NumToStr(Mx_1,5)+", "\NoNewLine;
  Write File, NumToStr(My_1,5)+", "\NoNewLine;
  Write File, NumToStr(Mz_1,5)+", "\NoNewLine;
  Write File, NumToStr(q,3)+"";
  Close File;
ENDPROC
ENDMODULE
```

**ПРИЛОЖЕНИЕ В: Фрагменты кода в среде MatLab для расчета
коэффициента трения**

```

clear; clc;
A = xlsread('du_lieu_tinh_he_so_ma_sat_chuan.xlsx');
Fx1 = A(:,1); Fy1 = A(:,2); Fz1 = A(:,3);
Mx1 = A(:,4); My1 = A(:,5); Mz1 = A(:,6);
X0 = A(:,7); Y0 = A(:,8); Z0 = A(:,9);
q=A(:,10)/1000; D= 0.0160; d_1= 0.0158; h=0.28;
R = D/2; r = d_1/2; L=0.105; E =5000000000; %
q_1=q.*1000;
% I = (pi*(d_1^4-d_2^4))/64;
I = (pi*d_1^4)/64; C_B= 0.001;
for i=1:length(Fx1)
    if (Fx1(i) > 0)
        P(i) = sqrt(Fx1(i).^2 + Fy1(i).^2);
    else
        P(i) = -sqrt(Fx1(i).^2 + Fy1(i).^2);
    end
end
Fx = P';
Fz = Fz1;
for i=1:length(Fx1)
    if (My1(i) > 0)
        N(i) = sqrt(Mx1(i).^2 + My1(i).^2);
    else
        N(i) = -sqrt(Mx1(i).^2 + My1(i).^2);
    end
end
My = N';
Mx=Mx1;
Mz=Mz1;
Fy=Fy1;
cosalpha= X0./sqrt(X0.^2 + Y0.^2);
k1 = 1:length(Fx1);
for i=1:length(Fx1)
    if abs(X0(i))>0
        Xb_0(i)= cosalpha(i).*D/2;
    else
        Xb_0(i)= D/2;
    end
end
Xb=Xb_0';

```

```

Zb(k1,1)=C_B;
% Xac dinh toan do diem B theo OXY
k = sqrt(abs(Fz./(E*I)));
for i = 1:length(k)
    for xb1 = -0.008:2E-7:0.008 %
        Delta= (Z0(i)-Zb(i))^2-4*((abs(X0(i))-abs(Xb(i))).*abs(xb1)+xb1^2);
        zb1=(Zb(i)-Z0(i)+sqrt(Delta))/2;
        My_0= -(My(i)+xb1.*Fz(i)-(zb1-h).*Fx(i))./(Fz(i).*k(i));
        x2= My_0*((1-cos(k(i).*q(i)))*(1-cos(k(i).*L))-k(i).*sin(k(i).*q(i))*(k(i).*L-
sin(k(i).*L)))/(2*(1-cos(k(i).*L))-(k(i).*L*sin(k(i).*L)));
        x3= My_0*((1-cos(k(i).*L))*sin(k(i).*L)-sin(k(i).*L)*(1-cos(k(i).(L-
zb1))))/(2*(1-cos(k(i).*L))-(k(i).*L*sin(k(i).*L)));
        Y_0= -xb1+r-(x2*(1-cos(k(i).(zb1-h)))+x3*(k(i).(zb1-h)-sin(k(i).(zb1-h))));
        Y= -xb1+(r+Y_0);
        if (abs(Y)<0.00001) && (X0(i)<0)
            xb_1(i)= -xb1;
            zb_1(i)= zb1;
        elseif (abs(Y)<0.00001) && (X0(i)>=0)
            xb_1(i)= xb1;
            zb_1(i)= zb1;
        end
    end
end
end
xb=xb_1';
zb=zb_1';
My_0= -(My+xb.*Fz-(zb-h).*Fx)./(Fz.*k);
x2= My_0*((1-cos(k.*q))*(1-cos(k.*L))-k.*sin(k.*q)*(k.*L-sin(k.*L)))/(2*(1-
cos(k.*L))-(k.*L*sin(k.*L)));
x3= My_0*((1-cos(k.*L))*sin(k.*L)-sin(k.*L)*(1-cos(k.*(L-zb)))/(2*(1-cos(k.*L))-
(k.*L*sin(k.*L)));
deltaxb= x2.*(1-cos(k.*(zb-h)))+x3.*(k.*(zb-h)-(sin(k.*(zb-h))./k)).*1000;
% Рассчитайте углы отклонения rad_gamma и rad_theta
rad_gamma= x2.*k.*sin(k.*(zb-h))+k.*x3.*(1-cos(k.*(zb-h)));
gamma = rad_gamma*180/pi;
for i = 1:length(k)
    for rad_theta_1 = -0.2:2E-6:0.2
        Ang=abs(X0(i))-abs(Xb(i))+abs(xb(i)).*cos(rad_theta_1)-
abs(zb(i)).*sin(rad_theta_1);
        % Ang=abs(zb(i)).*cos(rad_theta_1)-abs(Z0(i))-abs(Zb(i));
        if abs(Ang)<0.0001
            rad_theta_0(i)= rad_theta_1;
        end
    end
end
end
rad_theta=abs(rad_theta_0)';

```



```

theta = abs(rad_theta*180/pi);
za =(q-C_B)./cos(rad_theta)+zb;
xa=- (xb./abs(xb)).*(D-abs(Xb)+abs(X0)-za.*sin(rad_theta))./cos(rad_theta);
for i = 1:length(k)
    for mi= 0.02:0.001:0.3
        Det_1= (rad_theta(i)+mi).*(1-rad_gamma(i).*mi)+(mi+rad_gamma(i)).*(1-
rad_theta(i).*mi);
        A_1=
(rad_gamma(i)+mi).*(abs(xa(i)).*(rad_theta(i)+mi)+(za(i)+h).*(rad_theta(i).*mi-1));
        A_2=(rad_theta(i)+mi).*((zb(i)+h).*(rad_gamma(i).*mi-
1)+abs(xb(i)).*(rad_gamma(i)+mi));
        A_3= (1-
rad_gamma(i).*mi).*(abs(xa(i)).*(rad_theta(i)+mi)+(za(i)+h).*(rad_theta(i).*mi-1));
        A_4= (rad_theta(i).*mi-
1).*(abs(xb(i)).*(rad_gamma(i)+mi)+(zb(i)+h).*(rad_gamma(i).*mi-1));
        Y_1 = My(i)-(Fx(i)./Det_1).*(A_1+A_2)+(Fz(i)./Det_1).*(A_3+A_4);
        if abs(Y_1)<0.0025
            mi_0(i)=mi;
        end
    end
end
mi_0;
xlswrite('tinh_toan_he_so_ma_sat_1.xlsx',[Fx(:),Fz(:),My(:),xb(:),zb(:),xa(:),za(:),gam
ma(:),theta(:),mi_0(:),q_1(:)]);

```

**ПРИЛОЖЕНИЕ Г: Фрагменты кода в среде MatLab для анализа условий
заклинивания**

```

clear; clc; % Image size in pixels
dpi = 330;      % Resolution
sz = [0 0 3048 1200]; % Image size in pixels
%12
figure(...
    'PaperUnits','inches',...
    'PaperPosition', sz/dpi,...
    'PaperPositionMode','manual',...
    'Visible', 'off')
% данные полученные от датчиков
A = xlsread('1_du_lieu_tiep_huc_khong_lo.xlsx');
Fx1 = A(:,1);
Fy1 = A(:,2);
Fz1 = A(:,3);
Mx1 = A(:,4);
My1 = A(:,5);
Mz1 = A(:,6);
X0 = A(:,7);
Y0 = A(:,8);
Z0 = A(:,9);
q=A(:,10)/1000;
D= 0.0160;
d_1= 0.0158;
h=0.28;
R = D/2;
r = d_1/2;
L=0.105;
E =5000000000;
mi=0.056;
q_1=q.*1000; C_B= 0.001;
% I = (pi*(d_1^4-d_2^4))/64;
% d_2 = 0.0100;
I = (pi*d_1^4)/64;
for i=1:length(Fx1)
    if (Fx1(i) > 0)
        P(i) = sqrt(Fx1(i).^2 + Fy1(i).^2);
    else
        P(i) = -sqrt(Fx1(i).^2 + Fy1(i).^2);
    end
end
end

```

```

Fx = P';
Fz = Fz1;
for i=1:length(Fx1)
    if (My1(i) > 0)
        N(i) = sqrt(Mx1(i).^2 + My1(i).^2);
    else
        N(i) = -sqrt(Mx1(i).^2 + My1(i).^2);
    end
end
My = N';
Mx=Mx1;
Mz=Mz1;
Fy=Fy1;
cosalpha= X0./sqrt(X0.^2 + Y0.^2);
k1 = 1:length(Fx1);
for i=1:length(Fx1)
    if abs(X0(i))>0
        Xb_0(i)= cosalpha(i).*D/2;
    else
        Xb_0(i)= D/2;
    end
end
Xb=Xb_0';
Zb(k1,1)=C_B;
% Рассчитать координаты точки В по системе координат OXYZ.
k = sqrt(abs(Fz./(E*I)));
for i = 1:length(k)
    for xb1 = -0.008:2E-7:0.008 %
        Delta= (Z0(i)-Zb(i))^2-4*((abs(X0(i))-abs(Xb(i))).*abs(xb1)+xb1^2);
        zb1=(Zb(i)-Z0(i)+sqrt(Delta))/2;
        My_0= -(My(i)+xb1.*Fz(i)-(zb1-h).*Fx(i))./(Fz(i).*k(i));
        x2= My_0*((1-cos(k(i).*q(i)))*(1-cos(k(i).*L))-k(i).*sin(k(i).*q(i))*(k(i).*L-
sin(k(i).*L*))/2*(1-cos(k(i).*L))-(k(i).*L*sin(k(i).*L)));
        x3= My_0*((1-cos(k(i).*L))*sin(k(i).*L)-sin(k(i).*L)*(1-cos(k(i).(L-
zb1))))/(2*(1-cos(k(i).*L))-(k(i).*L*sin(k(i).*L)));
        Y_0= -xb1+r-(x2*(1-cos(k(i).(zb1-h)))+x3*(k(i).(zb1-h)-sin(k(i).(zb1-h)));
        Y= -xb1+(r+Y_0);
        if (abs(Y)<0.00001) && (X0(i)<0)
            xb_1(i)= -xb1;
            zb_1(i)= zb1;
        elseif (abs(Y)<0.00001) && (X0(i)>=0)
            xb_1(i)= xb1;
            zb_1(i)= zb1;
        end
    end
end
end

```

```

end
xb=xb_1';
zb=zb_1';
My_0= -(My+xb.*Fz-(zb-h).*Fx)/(Fz.*k);
x2= My_0.*((1-cos(k.*q))*(1-cos(k.*L))-k.*sin(k.*q)*(k.*L-sin(k.*L*))/2*(1-
cos(k.*L))-(k.*L*sin(k.*L)));
x3= My_0.*((1-cos(k.*L))*sin(k.*L)-sin(k.*L)*(1-cos(k.*(L-zb))))/2*(1-cos(k.*L))-
(k.*L*sin(k.*L));
deltaxb= x2.*(1-cos(k.*(zb-h)))+x3.*(k.*(zb-h)-(sin(k.*(zb-h)))/k)).*1000;
% Рассчитайте углы отклонения rad_gamma и rad_theta
rad_gamma= x2.*k.*sin(k.*(zb-h))+k.*x3.*(1-cos(k.*(zb-h)));
gamma = rad_gamma*180/pi;
for i = 1:length(k)
    for rad_theta_1 = -0.2:2E-6:0.2
        Ang=abs(X0(i))-abs(Xb(i))+abs(xb(i)).*cos(rad_theta_1)-
abs(zb(i)).*sin(rad_theta_1);
% Ang=abs(zb(i)).*cos(rad_theta_1)-abs(Z0(i))-abs(Zb(i));
        if abs(Ang)<0.0001
            rad_theta_0(i)= rad_theta_1;
        end
    end
end
end
rad_theta=abs(rad_theta_0)';
theta = abs(rad_theta*180/pi);
% Tinh toan toa do diem A
za =(q-C_B)/cos(rad_theta)+zb;
xa=- (xb./abs(xb)).*(D-abs(Xb)+abs(X0)-za.*sin(rad_theta))/cos(rad_theta);
deltaxa=- (xa*1000-d_1*1000/2);
% Анализ условий заклинивания в соответствии с соотношением сил и моментов
C_d=abs(Fx./Fz);
F_p=(1-mi*rad_theta)/(mi+rad_theta);
F_p2=(1-mi*rad_gamma)/(mi+rad_gamma);
ket_luc=F_p2-C_d;% >0=> lap rap//
kz1=mi+rad_theta;
kz2=rad_gamma+mi;
kx1=mi*rad_theta-1;
kx2=1-mi*rad_gamma;
km1=(mi*((za+h).*rad_theta+abs(xa))-((za+h)-abs(xa)).*rad_theta);
km2=(((zb+h)-abs(xb)).*rad_gamma)-mi*((zb+h).*rad_gamma+abs(xb));
% km1=(mi*((za).*rad_theta+abs(xa))-((za)-abs(xa)).*rad_theta);
% km2=(((zb)-abs(xb)).*rad_gamma)-mi*((zb).*rad_gamma+abs(xb));
h1= kx2./kx1;
h2= kz2./kz1;
h3= km2./km1;
a_0=((kz2./kz1-km2./km1).*(km1./kx1)/(kx2./kx1-kz2./kz1))./(r);

```

```

b=abs(((kx2./kx1-km2./km1).*(km1./kz1)./((kx2./kx1-kz2./kz1)))./(r));
s1=My./Fz;
s2=Fx./Fz;
MF_d=abs(((My)./(Fz.*(r)))+a_0.*(Fx./Fz));
So=b-MF_d; % So>0=> lap rap// So<0=> ket
xlswrite('ket_qua_khong_lo_ket_25_09.xlsx',[Fx1(:),Fy1(:),Fz1(:),Mx1(:),My1(:),Mz1(:),q_1(:),C_d(:),F_p2(:),MF_d(:),b(:),rad_gamma(:),rad_theta(:),xb(:),zb(:),xa(:),za(:)]);

```

**ПРИЛОЖЕНИЕ Д: Фрагменты кода в среде MatLab для идентификации
контактного состояния в сборочных операциях типа «нежесткий вал-жесткая
штулка»**

%% Гиперплоскость разграничения границы между двумя слоями «контакт по
фаскам и однотоочечный контакт»

```

clc
clear all
close all
warning off
dpi = 330;          % Resolution
sz = [0 0 2048 1050]; % Image size in pixels
%12
figure(...
    'PaperUnits','inches',...
    'PaperPosition', sz/dpi,...
    'PaperPositionMode','manual',...
    'Visible', 'off')
% figure
set(0,'DefaultAxesFontName', 'Times New Roman')
set(0,'DefaultAxesFontSize', 10)
load fisheriris34
inds = ~strcmp(labe,'двухточечный контакт');%loai bo nhan "двухточечный контакт"
ra khoi du lieu
X = data1(inds,1:2);
s = labe(inds);
SVMModel = fitcsvm(X,s);
sv = SVMModel.SupportVectors; % Support vectors
beta = SVMModel.Beta; % Linear predictor coefficients
b = SVMModel.Bias; % Bias term
% xac dinh tong loi phan loai sai
CVMdl2 = crossval(SVMModel); % xac dinh tong loi phan loai sai
misclass2 = kfoldLoss(CVMdl2);
misclass2;
% % % Выявить неправильную классификацию внутри класса
newData1 = xlsread('du_lieu_tiep_xuc_hai_diem_copy.xlsx');
grpData = ones(317,1);
grpData(1:79)=-1;
v = predict(SVMModel,newData1);% du doan loi sai o lop mep vat
% % L_Test = loss(SVMModel,newData,grpData)
hold on
grid on

```

```

gscatter(X(:,1),X(:,2),s,'br','xo',5)
plot(sv(:,1),sv(:,2),'ko','MarkerSize',10)
X1 = linspace(min(X(:,1)),max(X(:,1)),10);
X2 = -(beta(1)/beta(2)*X1)-b/beta(2);
plot(X1,X2,'-')
m = 1/sqrt(beta(1)^2 + beta(2)^2); % Margin half-width
X1margin_low = X1+beta(1)*m^2;
X2margin_low = X2+beta(2)*m^2;
X1margin_high = X1-beta(1)*m^2;
X2margin_high = X2-beta(2)*m^2;
plot(X1margin_high,X2margin_high,'r--','LineWidth',0.9)
plot(X1margin_low,X2margin_low,'r--','LineWidth',0.9)
xlabel('F_{X1}/M_{Y1} [H/HM]')
ylabel('F_{Z1} [H]')
pbaspect([2 1 1])
legend('Контакт по фаскам','Одноточечный контакт','Опорный вектор', ...
    'Оптимальная гиперплоскость','Граница','Location','northwest')
legend('boxoff')
hold on
grid on
print('-r330','-dtiff','рис.1_2_chuan.tiff');

%% Гиперплоскость разграничения границы между двумя слоями «одноточечный
контакт и двухточечный контакт»

clc
clear all
close all
warning off
dpi = 330; % Resolution
sz = [0 0 2048 1050]; % Image size in pixels
%12
figure(...
    'PaperUnits','inches',...
    'PaperPosition', sz/dpi,...
    'PaperPositionMode','manual',...
    'Visible', 'off')
% figure
set(0,'DefaultAxesFontName', 'Times New Roman')
set(0,'DefaultAxesFontSize', 10)
load fisheriris34
inds = ~strcmp(labe,'контакт по фаскам');%loai bo nhan "контакт по фаскам" khoi du
lieu
X = data1(inds,1:2);
s = labe(inds);

```

```

SVMModel = fitcsvm(X,s);
sv = SVMModel.SupportVectors; % Support vectors- Координаты опорного вектора
beta = SVMModel.Beta; % Linear predictor coefficients
b = SVMModel.Bias; % Bias term
% хач dinh tong loi phan loai sai
CVMdl2 = crossval(SVMModel); % Выявление неправильно классифицированных
%образцов
misclass2 = kfoldLoss(CVMdl2);
misclass2;
% % % Выявить неправильную классификацию внутри класса
newData2 = xlsread('du_lieu_tiep_xuc_hai_diem_cory.xlsx');
grpData = ones(2171,1);
grpData(1:238)=-1;
v = predict(SVMModel,newData2);% du doan loi sai o lop 1 diem
hold on
gscatter(X(:,1),X(:,2),s,'rb','ox',5)
plot(sv(:,1),sv(:,2),'ko','MarkerSize',10)
X1 = linspace(min(X(:,1)),max(X(:,1)),10);
X2 = -(beta(1)/beta(2)*X1)-b/beta(2);
plot(X1,X2,'-')
m = 1/sqrt(beta(1)^2 + beta(2)^2); % Margin half-width
X1margin_low = X1+beta(1)*m^2;
X2margin_low = X2+beta(2)*m^2;
X1margin_high = X1-beta(1)*m^2;
X2margin_high = X2-beta(2)*m^2;
plot(X1margin_high,X2margin_high,'r--','LineWidth',0.9)
plot(X1margin_low,X2margin_low,'r--','LineWidth',0.9)
xlabel('F_{X1}/M_{Y1} [H/HM]')
ylabel('F_{Z1} [H]')
pbaspect([2 1 1])
legend('Одноточечный контакт','Двухточечный контакт','Опорный вектор', ...
'Оптимальная гиперплоскость','Граница','Location','northwest')
legend('boxoff')
hold on
grid on
print('-r330','-dtiff','рис.2_3_chuan.tiff');

```


ПРИЛОЖЕНИЕ Е: Фрагменты кода в среде MatLab для расчета значений деформаций и идентификации положения нежесткого вала и жесткой втулки

1. Идентификация положения и значения деформации нежестких вала при контакте по фаскам

```

clear; clc; % Image size in pixels
% данные полученные от датчиков
A = xlsread('du_lieu_tiep_xuc_khong_lo.xlsx');
Fx1 = A(:,1); Fy1 = A(:,2); Fz1 = A(:,3);
Mx1 = A(:,4); My1 = A(:,5); Mz1 = A(:,6);
X01 = A(:,7); Y0 = A(:,8); Z0 = A(:,9);
q=A(:,10)/1000; D = 0.0160; d_1 = 0.0158; r = d_1/2; E = 500000000; mi=0.056;
L=0.105; phi=45*pi/180;q_1=q.*1000; h=0.280;
I = (pi*d_1^4)/64; C_B= 0.001;
for i=1:length(Fx1)
    if (Fx1(i) > 0)
        P(i) = sqrt(Fx1(i).^2 + Fy1(i).^2);
    else
        P(i) = -sqrt(Fx1(i).^2 + Fy1(i).^2);
    end
end
Fx = P';
Fz = Fz1;
for i=1:length(Fx1)
    if (My1(i) > 0)
        N(i) = sqrt(Mx1(i).^2 + My1(i).^2);
    else
        N(i) = -sqrt(Mx1(i).^2 + My1(i).^2);
    end
end
My = N'; Mx=Mx1; Mz=Mz1; Fy=Fy1;
My_0 = My+Fx.*h;
cosalpha= X01./sqrt(X01.^2 + Y0.^2);
X0=(X01./abs(X01)).*sqrt(X01.^2 + Y0.^2);
k1 = 1:length(Fx1);
for i=1:length(Fx1)
    if abs(X0(i))>0
        Xb_0(i)= D/2;
    else
        Xb_0(i)= D/2;
    end
end
end

```

```

Xb=Xb_0';
Zb(k1,1)=C_B;
k = sqrt(abs(Fz./(E*I)));
% Рассчитать координаты точки C
for i = 1:length(k)
    for rad_gamma_1 = -0.18:2E-6:0.18
        for xc_1 = -0.008:2E-7:0.008
            zc_1=(((My(i).*(1+rad_gamma_1^2))./(Fx(i)+Fz(i).*rad_gamma_1))+
xc_1*(mi+rad_gamma_1))./(1-mi*rad_gamma_1);
            Y_0= -((My_0(i)./Fz(i)).*(1-cos(k(i).*(zc_1-h)))+(Fx(i)./Fz(i)).*((zc_1-h)-
(sin(k(i).*(zc_1-h)))./k(i));
            Y= -xc_1+(r+Y_0);
            if (abs(Y)<0.00001) && (X0(i)<0)
                xc_0(i)= -xc_1;
                zc_0(i)= zc_1;
            elseif (abs(Y)<0.00001) && (X0(i)>=0)
                xc_0(i)= xc_1;
                zc_0(i)= zc_1;
            end
        end
    end
end
xc=xc_0';
zc=zc_0';
deltaxc= -(My_0./Fz).*(1-cos(k.*(zc-h)))+(Fx./Fz).*((zc-h)-(sin(k.*(zc-h)))./k)).*1000;
% Рассчитайте углы отклонения rad_gamma и rad_theta
rad_gamma= ((-My_0./Fz).*k.*sin(k.*(zc-h))+(Fx./Fz).*(1-cos(k.*(zc-h))));
gamma = rad_gamma*180/pi;
rad_theta = (X0-Xb+xc+tan(phi)*(Z0+zc-C_B))./(zc-xc.*tan(phi));
theta = abs(rad_theta*180/pi);
xlswrite('ket_qua_tinh_toan_tiep_xuc_mep_vat_khong_lo_chuan.xlsx',[deltaxc(:),zc(:),
gamma(:), theta(:), q_1(:)]);

```

2. Идентификация положения и значения деформации нежестких вала при одноточечном контакте

```

clear; clc; % Image size in pixels
% данные полученные от датчиков
A = xlsread('du_lieu_tiep_xuc_khong_lo.xlsx');
Fx1 = A(:,1); Fy1 = A(:,2); Fz1 = A(:,3);
Mx1 = A(:,4); My1 = A(:,5); Mz1 = A(:,6);
X01 = A(:,7); Y0 = A(:,8); Z0 = A(:,9);
q=A(:,10)/1000;D = 0.0160; d_1 = 0.0158; R = D/2; r = d_1/2;
E = 500000000; mi=0.056; q_1=q.*1000; h=0.280;
% I = (pi*(d_1^4-d_2^4))/64;
I = (pi*d_1^4)/64; C_B= 0.001;

```

```

for i=1:length(Fx1)
    if (Fx1(i) > 0)
        P(i) = sqrt(Fx1(i).^2 + Fy1(i).^2);
    else
        P(i) = -sqrt(Fx1(i).^2 + Fy1(i).^2);
    end
end
Fx = P';
Fz = Fz1;
for i=1:length(Fx1)
    if (My1(i) > 0)
        N(i) = sqrt(Mx1(i).^2 + My1(i).^2);
    else
        N(i) = -sqrt(Mx1(i).^2 + My1(i).^2);
    end
end
My = N';
My_0 = My+Fx.*h;
Mx=Mx1;
Mz=Mz1;
Fy=Fy1;
cosalpha= X01./sqrt(X01.^2 + Y0.^2);
X0=(X01./abs(X01)).*sqrt(X01.^2 + Y0.^2);
k1 = 1:length(Fx1);
for i=1:length(Fx1)
    if abs(X0(i))>0
        % Xb_0(i)= cosalpha(i).*D/2;
        Xb_0(i)= D/2;
    else
        Xb_0(i)= D/2;
    end
end
Xb=Xb_0';
Zb(k1,1)=C_B;
k = sqrt(abs(Fz./(E*I)));
% Рассчитать координаты точки В
for i = 1:length(k)
    for xb1 = -0.008:2E-7:0.008 %
        Delta= (Z0(i)-Zb(i))^2-4*((abs(X0(i))-abs(Xb(i))).*abs(xb1)+xb1^2);
        zb1=(Zb(i)-Z0(i)+sqrt(Delta))/2;
        Y_0= -(My_0(i)/Fz(i)).*(1-cos(k(i).*(zb1-h)))+(Fx(i)/Fz(i)).*((zb1-h)-
(sin(k(i).*(zb1-h)))./k(i));
        Y= -xb1+(r+Y_0);
        if (abs(Y)<0.00001) && (X0(i)<0)
            xb_1(i)= -xb1;
        end
    end
end

```

```

        zb_1(i)= zb1;
        elseif (abs(Y)<0.00001) && (X0(i)>=0)
            xb_1(i)= xb1;
            zb_1(i)= zb1;
        end
    end
end
zb=zb_1';
xb=xb_1';
deltaxb=          (- (My_0./Fz).*(1-cos(k.*(zb-h)))+(Fx./Fz).*((zb-h)-(sin(k.*(zb-
h)))./k)).*1000;
% Рассчитайте углы отклонения rad_gamma и rad_theta
rad_gamma= ((-My_0./Fz).*k.*sin(k.*(zb-h))+(Fx./Fz).*(1-cos(k.*(zb-h))));
gamma = rad_gamma*180/pi;
for i = 1:length(k)
    for rad_theta_1 = -0.18:2E-6:0.18
        Ang=abs(X0(i))-abs(Xb(i))+abs(xb(i)).*cos(rad_theta_1)-
abs(zb(i)).*sin(rad_theta_1);
        if abs(Ang)<0.001
            rad_theta_0(i)= rad_theta_1;
        end
    end
end
end
rad_theta=rad_theta_0';
% rad_theta = (abs(X0)-abs(Xb)+abs(xb))./zb;
theta = abs(rad_theta*180/pi);
xlswrite('ket_qua_tinh_toan_tiep_xuc_mot_diem_khong_lo_chuan.xlsx',[deltaxb(:),zb(:
),gamma(:), theta(:), q_1(:)]);

```

3. Идентификация положения и значения деформации нежестких вала при двухточечном контакте

```

clear; clc; % Image size in pixels
% данные полученные от датчиков
A = xlsread('du_lieu_tiep_xuc_khong_lo_1.xlsx');
Fx1 = A(:,1); Fy1 = A(:,2); Fz1 = A(:,3);
Mx1 = A(:,4); My1 = A(:,5); Mz1 = A(:,6);
X01 = A(:,7); X00=1000*A(:,7); Y0= A(:,8); Z0 = A(:,9);
q=A(:,10)/1000; D = 0.0160; d_1 = 0.0158; L=0.105; R = D/2; r = d_1/2;
E = 500000000; mi=0.056; h=0.280; q_1=q.*1000;
I = (pi*d_1^4)/64; C_B= 0.001;
for i=1:length(Fx1)
    if (Fx1(i) > 0)
        P(i) = sqrt(Fx1(i).^2 + Fy1(i).^2);
    else

```

```

    P(i) = -sqrt(Fx1(i).^2 + Fy1(i).^2);
end
end
Fx = P';
Fz = Fz1;
for i=1:length(Fx1)
    if (My1(i) > 0)
        N(i) = sqrt(Mx1(i).^2 + My1(i).^2);
    else
        N(i) = -sqrt(Mx1(i).^2 + My1(i).^2);
    end
end
My = N'; Mx=Mx1; Mz=Mz1; Fy=Fy1;
cosalpha= X01./sqrt(X01.^2 + Y0.^2);
X0=(X01./abs(X01)).*sqrt(X01.^2 + Y0.^2);
k1 = 1:length(Fx1);
for i=1:length(Fx1)
    if abs(X0(i))>0
        Xb_0(i)= D/2;
    else
        Xb_0(i)= D/2;
    end
end
Xb=Xb_0';
Zb(k1,1)=-C_B;
% % Рассчитать координаты точки B
k = sqrt(abs(Fz./(E*I)));
for i = 1:length(k)
    for xb1 = -0.008:2E-7:0.008 %
        Delta= (Z0(i)-Zb(i))^2-4*((abs(X0(i))-abs(Xb(i))).*abs(xb1)+xb1^2);
        zb1=(Zb(i)-Z0(i)+sqrt(Delta))/2;
        My_0= -(My(i)+xb1.*Fz(i)-(zb1-h).*Fx(i))./(Fz(i).*k(i));
        x2= My_0*((1-cos(k(i).*q(i)))*(1-cos(k(i).*L))-k(i).*sin(k(i).*q(i))*(k(i).*L-
sin(k(i).*L*))/2*(1-cos(k(i).*L))-(k(i).*L*sin(k(i).*L)));
        x3= My_0*((1-cos(k(i).*L))*sin(k(i).*L)-sin(k(i).*L)*(1-cos(k(i).(L-
zb1))))/(2*(1-cos(k(i).*L))-(k(i).*L*sin(k(i).*L)));
        Y_0= -xb1+r-(x2*(1-cos(k(i).(zb1-h)))+x3*(k(i).(zb1-h)-sin(k(i).(zb1-h))));
        Y= -xb1+(r+Y_0);
        if (abs(Y)<0.00001) && (X0(i)<0)
            xb_1(i)= -xb1;
            zb_1(i)= zb1;
        elseif (abs(Y)<0.00001) && (X0(i)>=0)
            xb_1(i)= xb1;
            zb_1(i)= zb1;
        end
    end
end

```

```

end
end
xb=xb_1';
zb=zb_1';
My_0= -(My+xb1.*Fz-(zb1-h).*Fx)/(Fz.*k);
x2= My_0.*((1-cos(k.*q))*(1-cos(k.*L))-k.*sin(k.*q)*(k.*L-sin(k.*L)))/(2*(1-
cos(k.*L))-(k.*L*sin(k.*L)));
x3= My_0*((1-cos(k.*L))*sin(k.*L)-sin(k.*L)*(1-cos(k.*(L-zb1))))/(2*(1-cos(k.*L))-
(k.*L*sin(k.*L)));
deltaxb= x2.*(1-cos(k.*(zb-h)))+x3.*(k.*(zb-h)-(sin(k.*(zb-h)))/k).*1000;
% Рассчитайте углы отклонения rad_gamma и rad_theta
rad_gamma= x2.*k.*sin(k.*(zb-h))+k.*x3.*(1-cos(k.*(zb-h)));
gamma = rad_gamma*180/pi;
for i = 1:length(k)
    for rad_theta_1 = 0:2E-7:0.18
        Ang=abs(X0(i))-abs(Xb(i))+abs(xb(i)).*cos(rad_theta_1)-
abs(zb(i)).*abs(sin(rad_theta_1));
        if abs(Ang)<0.01
            rad_theta_0(i)= rad_theta_1;
        end
    end
end
end
rad_theta=(rad_theta_0)';
% rad_theta = (abs(X0)-abs(Xb)+abs(xb))./zb;
theta = abs(rad_theta*180/pi);
% Рассчитать координаты точки A
za =(q-C_B)./cos(rad_theta)+zb;
% xa=-(xb./abs(xb)).*(-D+abs(Xb)-abs(X0)+za.*abs(sin(rad_theta)));
xa=-(xb./abs(xb)).*(D-abs(Xb)+abs(X0)-za.*abs(rad_theta));
deltaxa=1000*(d_1/2-abs(xa));
xlswrite('ket_qua_tinh_toan_tiep_xuc_hai_diem_khong_lo_chuan.xlsx',[Fx(:),Fy(:),Fz(:)
),Mx(:),My(:),Mz(:),xb(:),deltaxb(:),zb(:),xa(:),deltaxa(:),za(:),gamma(:),theta(:),q_1(:),
X0(:)]);

```

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж: Протоколы экспериментов

1. Экспериментальные результаты

Таблица 1 – Результаты опытов сил и моментов

№	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	Значение опытах					
	[мм/с]	[мм]	[мм]	[МПа]	LnF _{X1} , [Н]	lnF _{Y1} , [Н]	lnF _{Z1} , [Н]	lnM _{X1} , [Н.м]	lnM _{Y1} , [Н.м]	lnM _{Z1} , [Н.м]
1	10	0,06	2,1	500	0,744	0,592	3,023	-3,196	-0,657	-2,598
					0,796	0,654	3,157	-3,201	-0,562	-2,575
					0,847	0,807	3,282	-3,178	-0,471	-2,563
2	20	0,06	2,1	1100	1,139	1,050	3,433	-2,730	-0,289	-1,998
					1,205	1,090	3,513	-2,717	-0,117	-1,980
					1,248	1,128	3,597	-2,713	-0,001	-1,976
3	10	0,14	2,1	1100	0,298	0,217	2,716	-3,308	-1,144	-2,771
					0,445	0,390	2,784	-3,299	-1,474	-2,709
					0,483	0,422	2,905	-3,267	-0,977	-2,654
4	20	0,14	2,1	500	0,286	0,175	2,487	-3,440	-1,534	-3,107
					0,354	0,219	2,592	-3,376	-1,279	-3,077
					0,502	0,284	2,651	-3,315	-1,159	-3,027
5	10	0,06	7,9	1100	1,231	1,115	3,570	-2,723	-0,137	-1,985
					1,295	1,153	3,653	-2,717	-0,025	-1,955
					1,321	1,189	3,718	-2,710	0,012	-1,925
6	20	0,06	7,9	500	1,360	1,242	3,588	-2,689	0,010	-1,877
					1,410	1,255	3,679	-2,664	0,208	-1,854
					1,420	1,293	3,768	-2,659	0,284	-1,798
7	10	0,14	7,9	500	0,583	0,467	2,896	-3,232	-1,043	-2,645
					0,691	0,542	3,013	-3,227	-0,832	-2,631
					0,731	0,601	3,103	-3,225	-0,679	-2,631
8	20	0,14	7,9	1100	1,011	0,789	3,318	-2,788	-0,286	-2,062
					1,088	0,890	3,415	-2,786	-0,204	-2,023
					1,110	0,988	3,502	-2,747	-0,123	-1,966

2. Проверка значимости коэффициентов уравнения регрессии

Таблица 2 – Значимость коэффициентов уравнения регрессии силы F_{X1}

b_j		$s_{\{b\}}$	t_j	Сравнение	Значимость
b_0	0,9000	0,014276	63,041	$t_j > t_j^{KP}$	0,9000
b_1	0,1110		7,778	$t_j > t_j^{KP}$	0,1110
b_2	-0,2680		18,772	$t_j > t_j^{KP}$	-0,2680
b_3	0,2043		14,313	$t_j > t_j^{KP}$	0,2043
b_4	0,0896		6,278	$t_j > t_j^{KP}$	0,0896
b_{12}	-0,0177		1,238	$t_j < t_j^{KP}$	0
b_{13}	0,0178		1,244	$t_j < t_j^{KP}$	0
b_{14}	0,0329		2,301	$t_j > t_j^{KP}$	0,0329
b_{23}	0,0329		2,301	$t_j > t_j^{KP}$	0,0329
b_{24}	0,0178		1,244	$t_j < t_j^{KP}$	0
b_{34}	-0,0177		1,238	$t_j < t_j^{KP}$	0

Таблица 3 – Значимость коэффициентов уравнения регрессии силы F_{Y1}

b_j		$s_{\{b\}}$	t_j	Сравнение	Значимость
b_0	0,7730	0,015401	50,194	$t_j > t_j^{KP}$	0,7730
b_1	0,0940		6,101	$t_j > t_j^{KP}$	0,0940
b_2	-0,2744		17,815	$t_j > t_j^{KP}$	-0,2744
b_3	0,1873		12,160	$t_j > t_j^{KP}$	0,1873
b_4	0,0955		6,200	$t_j > t_j^{KP}$	0,0955
b_{12}	-0,0350		2,273	$t_j > t_j^{KP}$	-0,0350
b_{13}	0,0219		1,425	$t_j < t_j^{KP}$	0
b_{14}	0,0269		1,744	$t_j < t_j^{KP}$	0
b_{23}	0,0269		1,744	$t_j < t_j^{KP}$	0
b_{24}	0,0219		1,425	$t_j < t_j^{KP}$	0
b_{34}	-0,0350		2,273	$t_j > t_j^{KP}$	-0,0350

Таблица 4 – Значимость коэффициентов уравнения регрессии силы F_{Z1}

b_j		$s_{\{b\}}$	t_j	Сравнение	Значимость
b_0	3,2236	0,019432	165,888	$t_j > t_j^{KP}$	3,2236
b_1	0,0718		3,695	$t_j > t_j^{KP}$	0,0718
b_2	-0,2750		14,150	$t_j > t_j^{KP}$	-0,2750
b_3	0,2118		10,901	$t_j > t_j^{KP}$	0,2118
b_4	0,1203		6,191	$t_j > t_j^{KP}$	0,1203
b_{12}	-0,0261		1,345	$t_j < t_j^{KP}$	0
b_{13}	0,0380		1,954	$t_j < t_j^{KP}$	0
b_{14}	0,0476		2,449	$t_j > t_j^{KP}$	0,0476
b_{23}	0,0476		2,449	$t_j > t_j^{KP}$	0,0476
b_{24}	0,0380		1,954	$t_j < t_j^{KP}$	0
b_{34}	-0,0261		1,345	$t_j < t_j^{KP}$	0

Таблица 5 – Значимость коэффициентов уравнения регрессии силы M_{Y1}

b_j		$s_{\{b\}}$	t_j	Сравнение	Значимость
b_0	-0,5200	0,031981	16,258	$t_j > t_j^{KP}$	-0,5200
b_1	0,1458		4,559	$t_j > t_j^{KP}$	0,1458
b_2	-0,3746		11,712	$t_j > t_j^{KP}$	-0,3746
b_3	0,2853		8,921	$t_j > t_j^{KP}$	0,2853
b_4	0,1228		3,841	$t_j > t_j^{KP}$	0,1228
b_{12}	-0,0155		0,484	$t_j < t_j^{KP}$	0
b_{13}	0,0702		2,195	$t_j > t_j^{KP}$	0,0702
b_{14}	0,0812		2,540	$t_j > t_j^{KP}$	0,0812
b_{23}	0,0812		2,540	$t_j > t_j^{KP}$	0,0812
b_{24}	0,0702		2,195	$t_j > t_j^{KP}$	0,0702
b_{34}	-0,0155		0,484	$t_j < t_j^{KP}$	0

**ПРИЛОЖЕНИЕ 3: Свидетельство о государственной регистрации
программы**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023687744

**Программа управления роботизированной сборкой для
обеспечения технологической надежности сборки
цилиндрических нежестких деталей на основе сигналов
силомоментного датчика**

Правообладатель: **Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
"Московский политехнический университет" (RU)**

Авторы: **Вартанов Михаил Владимирович (RU), Нгуен Ван
Линь (VN)**

Заявка № **2023685856**

Дата поступления **29 ноября 2023 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **18 декабря 2023 г.**



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 429b6a0fe3853164ba96f83b73b4aa7
Владелец: **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 10.05.2023 по 02.08.2024

Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ И: Акт внедрения

«УТВЕРЖДАЮ»



Заместитель директора по учебной работе

университета «Чан Дай Нгхиа»

к.т.н., доцент. Лыонг Хонг Сам

«_____» _____ 2024 г.

АКТ

об использовании результатов кандидаткой диссертации Нгуен Ван Линь на тему: «Обеспечение технологической надежности автоматической сборки нежестких деталей на основе позиционно-силового управления» в учебном процессе университета «Чан Дай Нгхиа», г. Хошиминь, Вьетнам

Комиссия в составе председателя – Начальник отдел обучения университета «Чан Дай Нгхиа», к.т.н., Нгуиен Мань Хунг и членов: Начальника отдела планирования к.т.н., Фам Вьет Хоанг и декана факультета «Машиностроение» составила настоящий акт, которым подтверждается что результаты диссертации Нгуен Ван Линя использованы в учебном процессе при проведении лабораторных и практический занятий со студентами по направлению 7510201 «Машиностроение», специальность «Технология машиностроения».

Начальник отдел обучения,
к.т.н.,

Нгуиен Мань Хунг

Начальник отдел планирования,
к.т.н.,

Фам Вьет Хоанг

Заместитель декана факультета
«Машиностроение», к.т.н., доцент

Чан Тхэ Ван

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**«МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХ)**

УТВЕРЖДАЮ

АКТ

Проректор по учебной работе
Московского Политеха

№ _____

Г.Х. Шарипзянова

2024г.

(место составления)

О внедрении в учебный процесс университета результатов диссертационной работы «Обеспечение технологической надежности автоматической сборки нежестких деталей на основе позиционно-силового управления», выполненной аспирантом кафедры «Технологии и оборудование машиностроения» Нгуеном Ван Линь.

Мы, нижеподписавшиеся начальник учебно-методического управления, декан факультета Машиностроение, заведующий кафедрой «Технологии и оборудование машиностроения» составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы по теме «Обеспечение технологической надежности автоматической сборки нежестких деталей на основе позиционно-силового управления», имеют теоретическое и практическое значение для учебного процесса и внедрены в учебный процесс Московского политехнического университета при обучении студентов направления 15.04.01 «Машиностроение» (профиль «Комплексные высокоэффективные технологии машиностроения») в форме лекции по дисциплине «Теоретические и технологические основы автоматической сборки».

Кафедра, внедрившая результаты: «Технологии и оборудование машиностроения».

Дата и номер протокола заседания кафедры, на котором рассмотрены результаты внедрения: протокол № 9-23/24 от 05.04.2024.

Начало использования объекта внедрения: сентябрь 2024 года.

Начальник учебно-методического
управления

А.Б. Максимов

Декан факультета,
внедривший разработку
И.о. заведующего кафедрой

Е.В. Сафонов

А.В. Александров