

На правах рукописи



НГУЕН ВАН ЛИНЬ

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

Специальность 2.5.6 – Технология машиностроения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2024

Работа выполнена на кафедре «Технологии и оборудование машиностроения» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский политехнический университет», г. Москва.

- Научный руководитель:** **Вартанов Михаил Владимирович**
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технологии и оборудование машиностроения», федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский политехнический университет», г. Москва
- Официальные оппоненты:** **Симаков Александр Леонидович**
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Приборостроение» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ковровская государственная технологическая академия имени В.А. Дегтярева», г. Ковров
- Пантюхина Елена Викторовна**
доктор технических наук, доцент, доцент кафедры «Промышленная автоматика и робототехника» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тульский государственный университет», г. Тула
- Ведущая организация:** Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь

Защита диссертации состоится «17» декабря 2024 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета 24.2.332.01, созданного на базе ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»» по адресу: 127994, ГСП-4, г. Москва, Вадковский переулок, д. 1. С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН» и на сайте https://stankin.ru/pages/id_115/page_1493.

Отзывы на автореферат в 2-х экземплярах, заверенные гербовой печатью учреждения (организации), просим направить по указанному адресу в диссертационный совет 24.2.332.01 на имя ученого секретаря совета.

Автореферат разослан «__» _____ 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.2.332.01, к.т.н.

Е.С. Сотова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы Сборка является заключительным этапом производства и, следовательно, определяет качество изделий. Исследования собираемости при автоматической сборке обычно выполнялись на деталях, которые считались абсолютно жесткими. Однако в последние годы в различных машинах и механизмах используется все больше нежестких деталей. Необходимость учета деформаций детали, вследствие ее малой жесткости, существенно усложняет решение задачи автоматической сборки.

В процессе роботизированной сборки возникают осевые и угловые погрешности положения деталей. Причиной этих погрешностей являются неточности движений робота-манипулятора, геометрические погрешности деталей и погрешности технологической системы. Совмещение, необходимое для корректирования этих погрешностей, известное как относительная ориентация, может быть достигнуто за счет активной или пассивной адаптации, либо за счет их комбинации. Активная адаптация основана на управлении с обратной связью с применением силомоментных датчиков или технического зрения. Однако теоретические основы роботизированной сборки с активной адаптацией пока остаются недостаточно разработанными.

Возникновение заклинивания может быть обусловлено значительными силами трения скольжения, возникающими в местах контакта деталей при небольших зазорах, причем деформация нежестких деталей при роботизированной сборке усложняет проблему. Применение алгоритма управления промышленным роботом на основе силомоментного очувствления является неотъемлемым элементом для расширения технологических возможностей роботизированной сборки. Применение позиционно-силового управления позволяет исключить возможность заклинивания при наличии погрешностей в положении деталей, что в свою очередь позволяет корректировать положение устанавливаемой детали и предотвращать заклинивание. Разработанный алгоритм существенно повышает технологическую надежность процесса роботизированной сборки.

Степень разработанности темы. На данный момент автоматическая сборка исследована с различных точек зрения. Российские и зарубежные ученые внесли значительный вклад в развитие науки о автоматической и роботизированной сборке: Андреев А.Г., Безъязычный В.Ф., Балакшин Б.С., 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., Chang W., Cho H.S., Dietrich F., Fukukawa T., Jasim I.F., Jakovljevic Z., Jiang J., Kim J.Y., Kraus W., Li B., Monguzzi A., Nakagaki H., Park J., Sasaki K., Simunovic S., Skubic M., Son C., Whitney D.E., Xia Y., Yang Z. и др.

К настоящему времени позиционно-силовое управление продемонстрировало значительный потенциал в управлении промышленными роботами. Явным преимуществом этого подхода является одновременный учет

силы и положения. Возможность применения позиционно-силового управления была подтверждена при сборке деталей, считающихся абсолютно жесткими. Однако разработка и применение позиционно-силового управления для сборки нежестких деталей представляет собой нерешенную задачу.

Целью работы является обеспечение технологической надежности операции роботизированной сборки нежестких цилиндрических деталей на основе обратной связи и алгоритма корректировки программных траекторий.

В диссертационной работе решались 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.
3. Построение математической модели идентификации контактного состояния (CS) при автоматической сборке нежестких цилиндрических деталей на основе машины опорных векторов (SVM).
4. Создание алгоритма управления промышленным роботом при автоматической сборке на основе силомоментного оучувствления.
5. Разработка методики и проведение физического эксперимента.
6. Планирование эксперимента, 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 силомоментного датчика.
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 определяется построением математической модели процесса сборки нежестких цилиндрических деталей, определением их деформации и идентификации CS для разработки алгоритма позиционно-силового управления с целью обеспечения технологической надежности сборочного процесса.

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.

Методы и средства исследований. Диссертационные исследования выполнены на основе методов теоретической механики, теории сопротивления материалов, основ технологии машиностроения, линейной алгебры, аналитической геометрии, вычислительной математики, теории планирования эксперимента, а также использования программных средств MATLAB и RobotStudio.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Математические модели деформации нежестких цилиндрических валов на основе идентификации выходных сигналов с использованием силомоментного датчика.
2. Математические модели этапов процесса сборки для идентификации положения нежестких цилиндрических валов.
3. Идентификатор контактных состояний нежестких цилиндрических валов на различных этапах процесса сопряжения с использованием SVM.
4. Алгоритм позиционно-силового управления сборочным роботом.
5. Экспериментальные взаимосвязи сборочных сил и моментов, положения деталей и параметров соединений.

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

Основные положения диссертационной работы обсуждались на международных научно-технических конференциях и семинаре: Международный научный симпозиуме «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.; 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 входят в перечень 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, показана степень ее разработанности, сформулированы основные цели и задачи, сформулированы научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы и положения, выносимые на защиту, описана методология и методы исследования, перечислены полученные автором результаты работы, представлена структура диссертации.

В первой главе проанализированы существующие научные подходы по вопросам автоматической и роботизированной сборки нежестких деталей и задачи повышения технологической надежности процесса автоматической сборки, сформулированы цель и научные задачи работы.

Проведен анализ существующих методов автоматической сборки. Исследования обычно выполнялись на деталях, которые считались абсолютно жесткими. Однако в последние годы в различных механизмах машин используется все больше гибких и нежестких деталей. Необходимость учета деформации упругого вала, вследствие его малой жесткости, существенно усложняет решение задачи автоматической сборки. Существует небольшое число работ, которые связаны со сборкой нежесткого вала, однако они не учитывают деформации при сопряжении. Параметры деформации оказывают большое влияние на процесс сборки. Для решения данной задачи можно использовать адаптивные сборочные устройства. Подобные устройства делятся на две основные группы: пассивные и активные. Принципы пассивной адаптации основаны на взаимосвязи деформации упругих звеньев и относительного положения соединяемых деталей. Данной группе устройств характерна конструктивная простота и невысокая стоимость. Однако для деталей с различной геометрией необходимо проектировать и изготавливать оригинальные устройства, что затрудняет технологическую подготовку производства. Активные адаптивные устройства основаны на автоматическом управлении с обратной связью на основе применения технического зрения и силомоментных датчиков.

На основе проведенного анализа установлено, что технологическая надежность автоматических сборочных операций может быть существенно повышена на основе применения средств активной адаптации, расширяя технологические возможности автоматической сборки. Таким образом, показана целесообразность разработки, исследования и внедрения методов сборки нежестких деталей на основе обратной связи и алгоритмов управления автоматом. Сформулированы цель и задачи исследования.

Вторая глава посвящена разработке математических моделей, определяющих значения деформации упругого вала в процессе сопряжения на основе идентификации выходных сигналов с силомоментного датчика. Разработка математических моделей, определяющих условия контактного взаимодействия деталей на разных этапах процесса автоматической сборки с зазором на основе модели определения величин деформаций нежестких валов при сопряжении. Задача решалась в квазистатической постановке (рисунок 1).

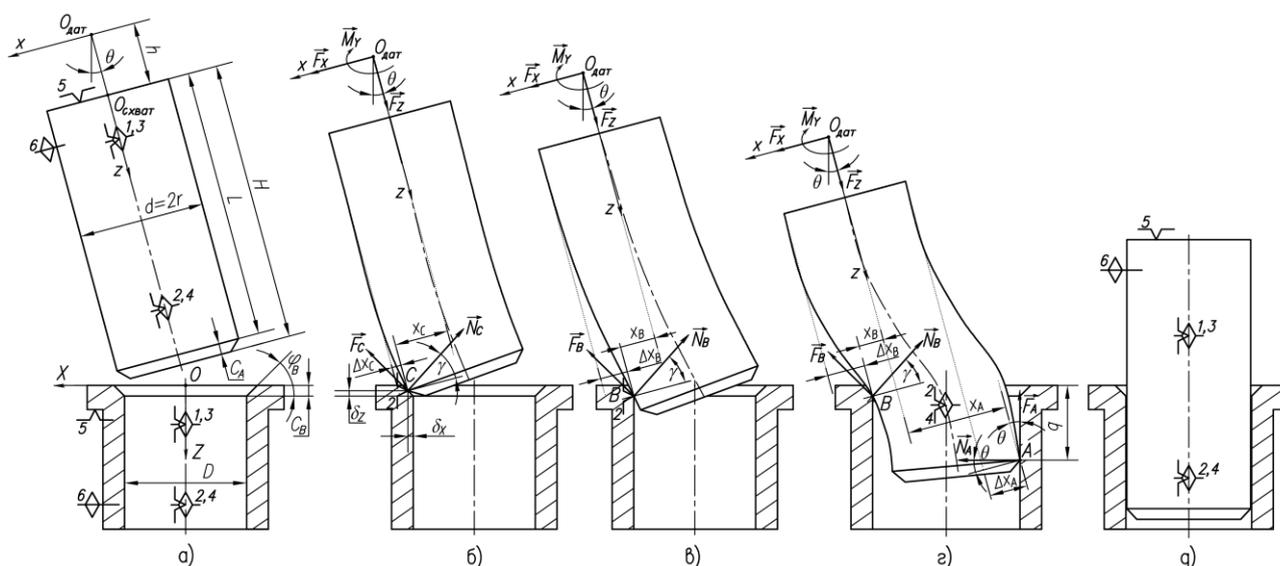


Рисунок 1 – Схема действия сил на этапах сопряжения:

а – начало процесса сопряжения; б – контакт по фаскам; в – одноточечный контакт; г – двухточечный контакт; д – окончание процесса сопряжения

где D – диаметр втулки; d – диаметр нежесткого вала;

H – расстояние от торца вала до края схвата; q – глубина сопряжения;

h – расстояние от края схвата до центра силомоментного датчика;

φ_B – угол фаски в отверстии втулки; θ – угол перекоса оси вала и втулки;

γ – угол поворота поперечного сечения; μ – коэффициент трения;

C_A, C_B – высота фаски на сопрягаемых поверхностях;

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

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

$\bar{R}_1:(O_{дат},x,y,z)$ – локальная система координат,

$O_{дат}xz$ – плоскость изгиба вала связанная с силомоментным датчиком;

$\bar{R}_0:(O,X',Y',Z')$ – система координат, которая постоянно связанная со втулкой и первоначально задаемая при настройке инструмента.

В процессе сборки вал, опирающийся на кромку отверстия втулки,

является подвижной деталью. Реализована возможность распознавания положения точки контакта при взаимодействии деталей в процессе роботизированной сборки с применением силомоментного датчика. Система координат датчика $O_{\text{дат}}xZ$ связана с его центральной точкой $O_{\text{дат}}$, ось $O_{\text{дат}}z$, совпадает с осью схвата, а $O_{\text{дат}}x$ выбирается так, чтобы вал и втулка были симметричны относительно плоскости $O_{\text{дат}}xZ$. Реакции в точках контакта формируют силы F_X , F_Z и крутящий момент M_Y в центральной точке $O_{\text{дат}}$. С силомоментного датчика фактически снимаются проекции вектора силы на оси координат F_{X1} , F_{Y1} , F_{Z1} , и проекции вектора момента M_{X1} , M_{Y1} , M_{Z1} . Модуль \vec{F}_X , \vec{M}_Y можно определить как:

$$F_X = \sqrt{F_{X1}^2 + F_{Y1}^2}; M_Y = \sqrt{M_{X1}^2 + M_{Y1}^2} \quad (1)$$

Погрешность смещения определяется по координатам центра силомоментного датчика во взаимосвязи двух координат $OX'Y'Z'$ и $OXYZ$:

$$\Delta_\Sigma = |X_{O_{\text{дат}}}| = \sqrt{X_{O_{\text{дат}}}^2 + Y_{O_{\text{дат}}}^2} \quad (2)$$

На начальном этапе сборки при одноточечном контакте вала со втулкой, вал можно рассматривать как консольно заземленный упругий стержень. Решение применимо для двух случаев: контакта по фаскам и одноточечного контакта (рисунок 1б, в). Уравнение упругой линии изогнутого стержня имеет вид:

$$\Delta x(z) = x(z) = -\frac{M_Y + hF_X}{F_Z} [1 - \cos k(z-h)] + \frac{F_X}{F_Z} \left[(z-h) - \frac{\sin k(z-h)}{k} \right] \quad (3)$$

Угол поворота поперечного сечения равен:

$$\gamma(z) = -\frac{M_Y + hF_X}{F_Z} k \sin k(z-h) + \frac{F_X}{F_Z} [1 - \cos k(z-h)] \quad (4)$$

где: $k^2 = F_Z/EI_Y$; $I_Y = \pi d^4/64$.

При контакте по фаске втулки (рисунок 1б) в точке контакта C возникает нормальная сила \vec{N}_C и сила трения \vec{F}_C . Уравнения равновесия имеют вид:

$$\begin{aligned} \sum F_{kz} &= -N_C \sin \gamma - F_C \cos \gamma + F_Z = 0 \\ \sum F_{kx} &= -N_C \cos \gamma + F_C \sin \gamma + F_X = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\sum M_{O_{\text{дат}}}(F_k) = N_C (z_C \cos \gamma - x_C \sin \gamma) - F_C (z_C \sin \gamma + x_C \cos \gamma) - M_Y = 0$$

Абсцисса же точки C в локальной системе координат определяется из уравнения (3):

$$x_C = r + \left\{ \frac{M_Y + hF_X}{F_Z} [1 - \cos k(z_C - h)] - \frac{F_X}{F_Z} \left[(z_C - h) - \frac{\sin k(z_C - h)}{k} \right] \right\} \quad (6)$$

Значение угла перекоса осей θ (рисунок 1б) определяется выражением:

$$\theta = \frac{X_{O_{\text{дат}}} - X_B + x_C + (Z_{O_{\text{дат}}} + z_C - C_B) \tan \varphi_B}{z_C - x_C \tan \varphi_B} \quad (7)$$

На рисунке 1в показано состояние одноточечного контакта по боковой поверхности вала. В точке контакта B возникает нормальная сила \vec{N}_B и сила

трения \vec{F}_B . Уравнения равновесия имеют вид:

$$\begin{aligned}\sum F_{kz} &= -N_B \sin \gamma - F_B \cos \gamma + F_Z = 0 \\ \sum F_{kx} &= -N_B \cos \gamma + F_B \sin \gamma + F_X = 0 \\ \sum M_{O_{\text{дат}}} (F_k) &= N_B (z_B \cos \gamma - x_B \sin \gamma) - F_B (z_B \sin \gamma + x_B \cos \gamma) - M_Y = 0\end{aligned}\quad (8)$$

Абсцисса точки B в локальной системе координат определяется из уравнения (3):

$$x_B = r + \left\{ \frac{M_Y + hF_X}{F_Z} [1 - \cos k(z_B - h)] - \frac{F_X}{F_Z} \left[(z_B - h) - \frac{\sin k(z_B - h)}{k} \right] \right\} \quad (9)$$

Значение угла перекоса θ (рисунок 1в) определяются из выражения:

$$\theta = (X_{O_{\text{дат}}} - X_B + x_B) / z_B \quad (10)$$

При двухточечном контакте решение методом начальных параметров задачи о продольно – поперечном изгибе упругого вала выражение для прогиба упругого вала в точке B принимает вид:

$$\Delta x_B = x(z_B) = x_0'' [1 - \cos k(z_B - h)] + x_0''' [k(z_B - h) - \sin k(z_B - h)] \quad (11)$$

При этом угол поворота поперечного сечения равен:

$$\gamma = x'(z_B) = x_0'' k \sin k(z_B - h) + kx_0''' [1 - \cos k(z_B - h)] \quad (12)$$

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

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

На рисунке 1г при двухточечном контакте в точках контакта B и A возникают нормальные силы \vec{N}_B , \vec{N}_A и силы трения \vec{F}_B , \vec{F}_A . Уравнения равновесия имеют вид:

$$\begin{aligned}\sum F_{kz} &= -F_A \cos \theta - N_A \sin \theta - N_B \sin \gamma - F_B \cos \gamma + F_Z = 0 \\ \sum F_{kx} &= -F_A \sin \theta + N_A \cos \theta - N_B \cos \gamma + F_B \sin \gamma + F_X = 0 \\ \sum M_{O_{\text{дат}}} (F_k) &= F_A (z_A \sin \theta + x_A \cos \theta) - N_A (z_A \cos \theta - x_A \sin \theta) + \\ &+ N_B (z_B \cos \gamma - x_B \sin \gamma) - F_B (z_B \sin \gamma + x_B \cos \gamma) - M_Y = 0\end{aligned}\quad (13)$$

Координата точки B в локальной системе координат определяется:

$$x_B = r - \Delta x_B; (z_B)_{1,2} = (Z_{O_{\text{дат}}} - Z_B \pm \sqrt{\zeta}) / 2 \quad (14)$$

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

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

Значение угла перекоса осей θ (рисунок 1г) определяются из выражения:

$$\theta = \frac{X_{O_{\text{дат}}} - X_B + r - \left\{ x_0'' [1 - \cos k(z_B - h)] + x_0''' [k(z_B - h) - \sin k(z_B - h)] \right\}}{z_B} \quad (15)$$

Координата точки A в локальной системе координат:

$$x_A = z_A \theta + X_B - D - X_{O_{\text{дат}}}; z_A \approx (q - C_B) / \theta + (Z_B - Z_{O_{\text{дат}}} \pm \sqrt{\zeta}) / 2 \quad (16)$$

Условия заклинивания при роботизированной сборке с использованием силомоментного датчика определяются условиями:

$$\begin{cases} \left| \frac{F_X}{F_Z} \right| \leq \frac{1 - \mu\gamma}{\gamma + \mu} \\ \left| \frac{M_Y}{rF_Z} + a \frac{F_X}{F_Z} \right| \leq b \end{cases} \quad (17)$$

где: $k_{x1} = \mu\theta - 1$; $k_{x2} = 1 - \mu\gamma$; $k_{z1} = \mu + \theta$; $k_{z2} = \gamma + \mu$; $\Delta_0 = k_{x2}/k_{x1} - k_{z2}/k_{z1}$;
 $k_{M1} = \mu(z_A\theta + x_A) - (z_A - x_A\theta)$; $k_{M2} = (z_B - x_B\gamma) - \mu(z_B\gamma + x_B)$;
 $a = (k_{z2}/k_{z1} - k_{M2}/k_{M1})k_{M1}/r\Delta_0k_{x1}$; $b = (k_{x2}/k_{x1} - k_{M2}/k_{M1})k_{M1}/r\Delta_0k_{z1}$.

На рисунке 2 представлена диаграмма заклинивания при сопряжении нежесткого вала с жесткой втулкой. Точки, характеризующиеся соотношениями сил и моментов, удовлетворяющие условию (17), не вызывают заклинивания и расположены внутри параллелограмма. Напротив, точки, не удовлетворяющие условию (17), определяют возникновение заклинивания и лежат вне параллелограмма.

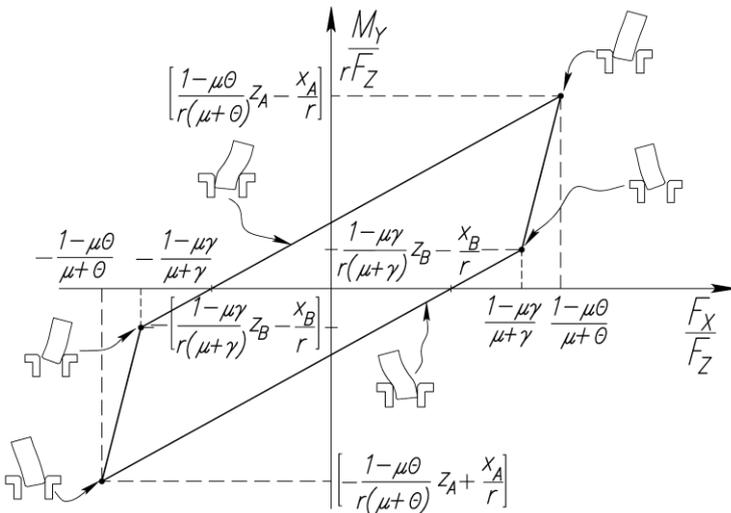


Рисунок 2 – Диаграмма заклинивания при соединении нежесткого вала

В третьей главе предложена структурная схема системы управления автомата для сборки нежестких цилиндрических деталей интегрированная с системой распознавания контактного состояния на основе машины опорных векторов. Схема алгоритма включает в себя три основных блока: блок идентификатора; блок расчета положения деталей и блок привода сборочного автомата (рисунок 3).

Автомат запрограммирован на пошаговое перемещение вала с требуемой скоростью и траекторией. Сигнал рассогласования между программной траекторией и корректирующим воздействием, подаваемый контроллером, приводит вал к требуемому положению.

Силомоментный 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. 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 автомат

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.

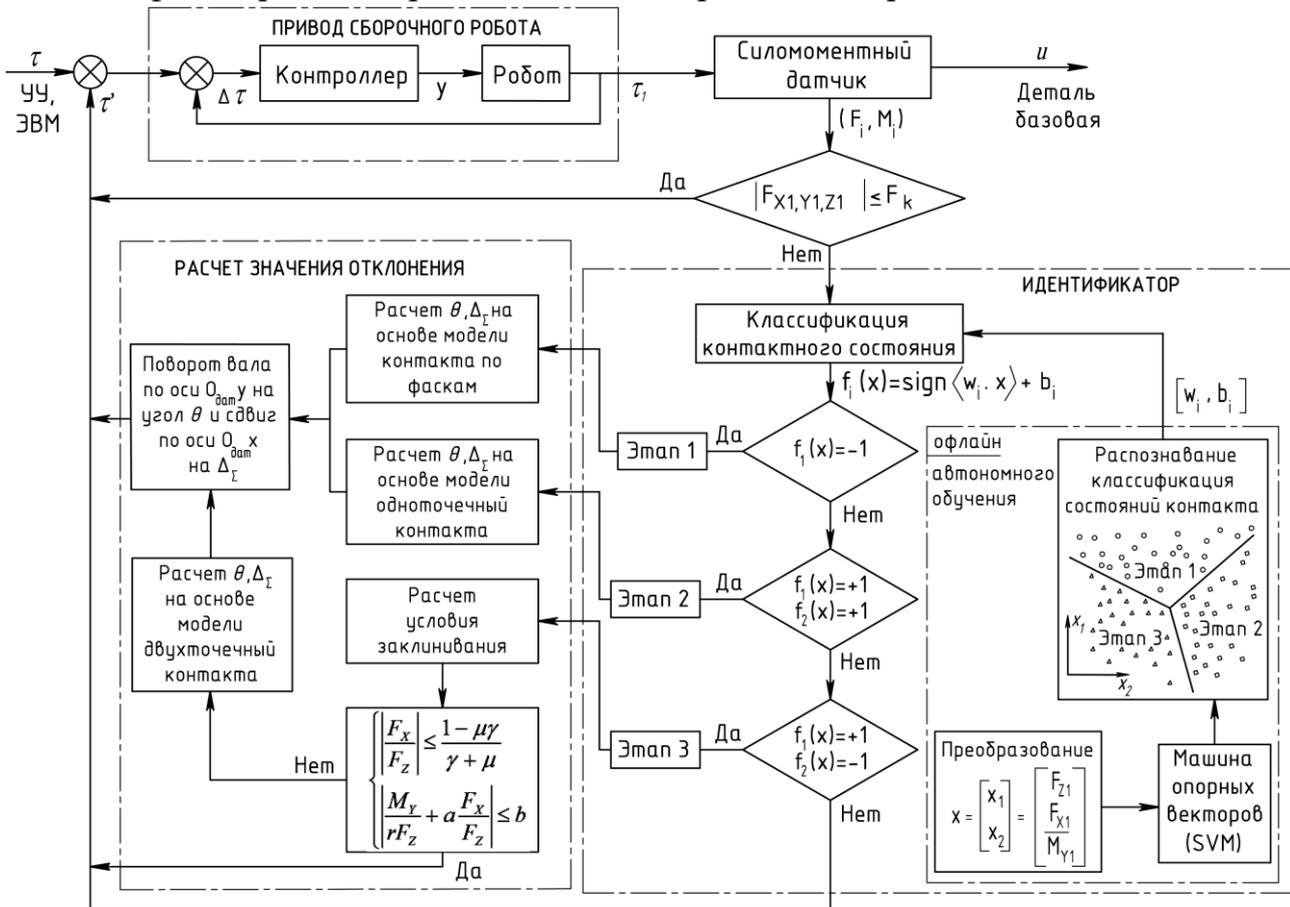


Рисунок 3 – Алгоритм управления процессом сопряжения деталей типа «нежесткий вал- жесткая втулка» при автоматической сборке с силомоментным очувствлением: τ – задающее воздействие (программная траектория); y – сигнал управления двигателем; τ_1 – выходная координата привода; u – траектория перемещения присоединяемой детали; τ^* – корректирующее воздействие, направленное на снижение значений сигнала рассогласования положения собираемых деталей.

Целью блока идентификации является использование сигналов силомоментного датчика для определения текущего состояния контакта. Для достижения данной цели в работе применена модель SVM. Модель SVM состоит из двух модулей: модуля для офлайн-обучения и модуля для онлайн распознавания- классификации контактного состояния.

В процессе роботизированной сборки информация о усилиях с силомоментного датчика и преобразуется в шаблоны-векторы признаков, являясь входными данными для модели SVM. Векторы признаков x , представляющие состояние контакта, извлекаются и выбираются следующим образом: $x = [x_1, x_2] = [F_{z1}, F_{x1}/M_{y1}]$.

Для начала обучения модели автономного обучения SVM было выбрано 2D-пространство с линейным функционалом ядра, состоящими из векторo признаков x . Граница принятия решения определяется выражением при решении

модели SVM:

$$f_i(\mathbf{x}) = \text{sign}(\langle \mathbf{w}_i, \mathbf{x} \rangle + b_i); i = 1, 2 \quad (18)$$

В онлайн распознавании классификация контактного состояния выполняется во время сопряжения.

Для классификации этап 1 выбирается функция $f_1(\mathbf{x})$. Определяется гиперплоскость H_{01} , разделяющая класс «-1» (этап 1) и класс «+1» (этапов 2-3):

$$\langle \mathbf{w}_1, \mathbf{x} \rangle + b_1 = 0 \quad (19)$$

В процессе сборки вектор \mathbf{x} , представляющий каждый сигнал, полученный от робототехнической системы, классифицируется в класс «-1» гиперплоскости H_{01} , когда условие удовлетворено:

$$\langle \mathbf{w}_1, \mathbf{x} \rangle + b_1 < 0 \Rightarrow f_1(\mathbf{x}) = \text{sign}(\langle \mathbf{w}_1, \mathbf{x} \rangle + b_1) = -1 \quad (20)$$

Для классификации этап 2-этап 3 выбирается функция $f_2(\mathbf{x})$. Определяется гиперплоскость H_{02} , разделяющая класс «+1» (этап 2) и класс «-1» (этап 3):

$$\langle \mathbf{w}_2, \mathbf{x} \rangle + b_2 = 0 \quad (21)$$

Сигнал $\mathbf{x} = [x_1, x_2]$ определяется как принадлежащий классу «+1» гиперплоскости H_{02} , когда:

$$f_1(\mathbf{x}) = \text{sign}(\langle \mathbf{w}_1, \mathbf{x} \rangle + b_1) = +1; f_2(\mathbf{x}) = \text{sign}(\langle \mathbf{w}_2, \mathbf{x} \rangle + b_2) = +1 \quad (22)$$

Аналогично, сигнал $\mathbf{x} = [x_1, x_2]$ определяется как принадлежащий классу «-1» гиперплоскости H_{02} (этап 3), когда:

$$f_1(\mathbf{x}) = \text{sign}(\langle \mathbf{w}_1, \mathbf{x} \rangle + b_1) = +1; f_2(\mathbf{x}) = \text{sign}(\langle \mathbf{w}_2, \mathbf{x} \rangle + b_2) = -1 \quad (23)$$

Выходным сигналом блока «классификация контактного состояния» являются значения $f_i(\mathbf{x})$ (см. 20, 22, 23), которые определяются параметрами \mathbf{w} , b и сигналом $[x_1, x_2]$. При этом классификация контактного состояния на этапе процесса сопряжения и последующего управляющего сигнала определяется исходя из условий:

- если $f_1(\mathbf{x}) = -1$, то выполняется этап №1 (вычисляется значение угла перекоса θ и погрешности положения осей Δ_Σ).

- если $f_1(\mathbf{x}) = +1, f_2(\mathbf{x}) = +1$, то выполняется этап №2 (вычисляется значение угла перекоса θ и погрешности положения осей Δ_Σ).

- если $f_1(\mathbf{x}) = +1, f_2(\mathbf{x}) = -1$, то выполняется этап №3, проверяются условия заклинивания (17). Если выполняется система неравенств, то робот продолжает опускать вал на следующий программный шаг. Если система неравенств не выполняется, то рассчитывается значение угла перекоса θ и погрешности положения осей Δ_Σ .

- программа управления формирует сигнал роботу на поворот вала относительно оси $O_{дат}$ на угол перекоса θ и сдвиг по оси $O_{дат}x$ 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.

В работе применяется модель машины опорных векторов для определения состояния контакта при движении робота.

Рассмотрим задачу двух классовой классификации с обучающим набором данных: (\mathbf{x}_i, y_i) $i=1, \dots, r$. где: $\mathbf{x}_i \in \mathbf{R}^n$, $y_i = \{-1, +1\}$. Пусть функция принятия решения будет:

$$f(\mathbf{x}_i) = \text{sign}(\langle \mathbf{w}, \mathbf{x}_i \rangle + b) \quad (24)$$

где: \mathbf{w} - весовой вектор; b - вещественное число.

Хорошее обобщение достигается за счет максимального увеличения расстояния между разделяющей гиперплоскостью H_0 и ближайшие точки данных во входном пространстве:

$$\langle \mathbf{w}, \mathbf{x}_i \rangle + b = 0 \quad (25)$$

Эта оптимальная гиперплоскость может быть определена следующим образом:

$$\begin{cases} \langle \mathbf{w}, \mathbf{w} \rangle / 2 - \text{Минимизировать;} \\ y_i (\langle \mathbf{w}, \mathbf{x}_i \rangle + b) \geq 1, \forall i = 1..r \end{cases} \quad (26)$$

Это задача оптимизации с ограничениями. Рассмотрим задачу минимизации $f(\mathbf{x})$ при условии, что $g_i(\mathbf{x}) \leq 0$. Необходимое условие решения \mathbf{x}_i будет удовлетворять системе:

$$\begin{cases} \left. \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} \left(f(\mathbf{x}) + \sum_{i=1}^r \alpha_i g_i(\mathbf{x}) \right) \right|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}_0} = 0; \\ g_i(\mathbf{x}) \leq 0, \forall i = 1..r \end{cases} \quad (27)$$

где: $\alpha_i \geq 0$ является множителем Лагранжа.

Решение (26) эквивалентно решению следующей двойственной задачи:

$$\begin{cases} \text{Max} L_\alpha(\alpha) = \sum_{i=1}^r \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^r \alpha_i \alpha_j y_i y_j \langle \mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j \rangle; \\ \sum_{i=1}^r \alpha_i y_i = 0, \alpha_i \geq 0 \end{cases} \quad (28)$$

Граница принятия решения определяется выражением:

$$f(\mathbf{x}) = \text{sign}(\langle \mathbf{w}, \mathbf{x} \rangle + b) = \text{sign} \left(\sum_{i=1}^r \alpha_i y_i K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) + b \right) \quad (29)$$

В четвертой главе приведены результаты физического эксперимента. Для проведения экспериментов создана экспериментальная установка, оснащенная силомоментным датчиком FTN-AXIA80 SI500-20 Ethernet (рисунок 4). Установка смонтирована на базе промышленного робота IRB-140T с контроллером IRC5. Сопрягаемые цилиндрические детали (нежесткий вал и жесткая 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.

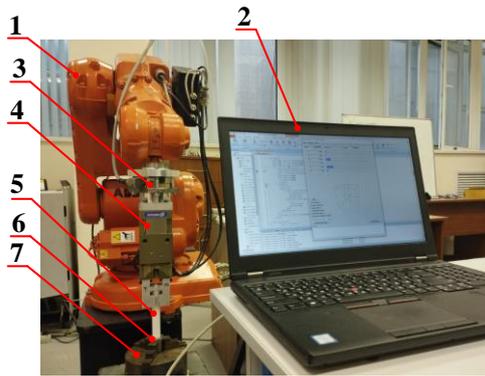


Рисунок 4 – Экспериментальная установка для исследования роботизированной сборки: 1 – промышленный робот ABB IRB 140T; 2 – персональный компьютер; 3 – силомоментный датчик FTN-AXIA 80 SI500-20; 4 – схват Schunk GSM-P 64 E-180; 5 – нежесткий вал; 6 – жесткая втулка; 7 – базовое приспособление

Проведенные исследования показали, что сборочная сила при выполнении соединения с зазором зависит от глубины сопряжения деталей и коэффициента трения (рисунок 5). Полученный результат является промежуточным и необходим для разработки алгоритма роботизированной сборки с позиционно-силовым управлением.

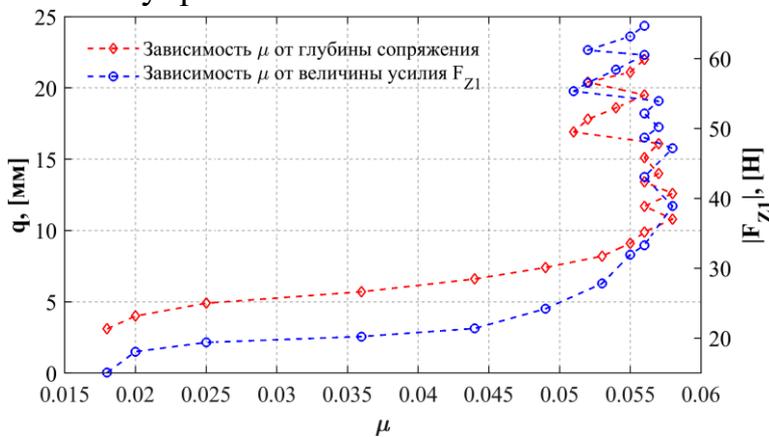


Рисунок 5 – Определение коэффициента трения с помощью силомоментного датчика с зазором 0,1 мм

На рисунке 6 показаны величины прогиба и угол поворота поперечного сечения в процессе сопряжения в точке контакта по фаскам и одноточечном контакте в двух случаях (валы без отверстий и валы с отверстиями – толщина стенки $t = (d-d_0)/2 = 3$ мм, d_0 – диаметр отверстия вала). В точке контакта прогиб и угол поворота поперечного сечения в момент контакта деталей начинают увеличиваться и продолжают увеличиваться с глубиной сопряжения.

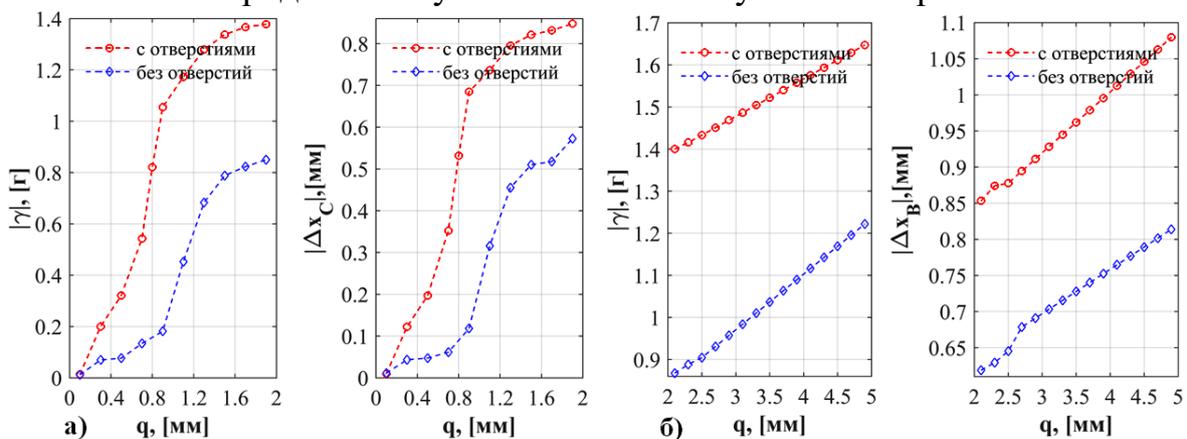


Рисунок 6 – Величина деформации в точке контакта с зазором 0,1 мм: а – при контакте по фаскам; б – при одноточечном контакте

В случае двухточечного контакта, на рисунке 7а показаны величины прогиба и угол поворота поперечного сечения в процессе сопряжения в точке В.

В точке B прогиб и угол поворота поперечного сечения в момент контакта деталей начинают увеличиваться и продолжают увеличиваться с глубиной сопряжения. Величина деформации в точке B в обоих случаях соответствует одному и тому же правилу. При одинаковых условиях сборки степень деформации вала с отверстиями ($t = 3$ мм) будет больше, чем у вала без отверстий. Для материалов с более низким значением коэффициента жесткости при изгибе EI диапазон увеличения деформации с глубиной будет значительнее. В точке A значения прогиба и угол поворота поперечного сечения увеличиваются с ростом глубины сопряжения (рисунок 7б).

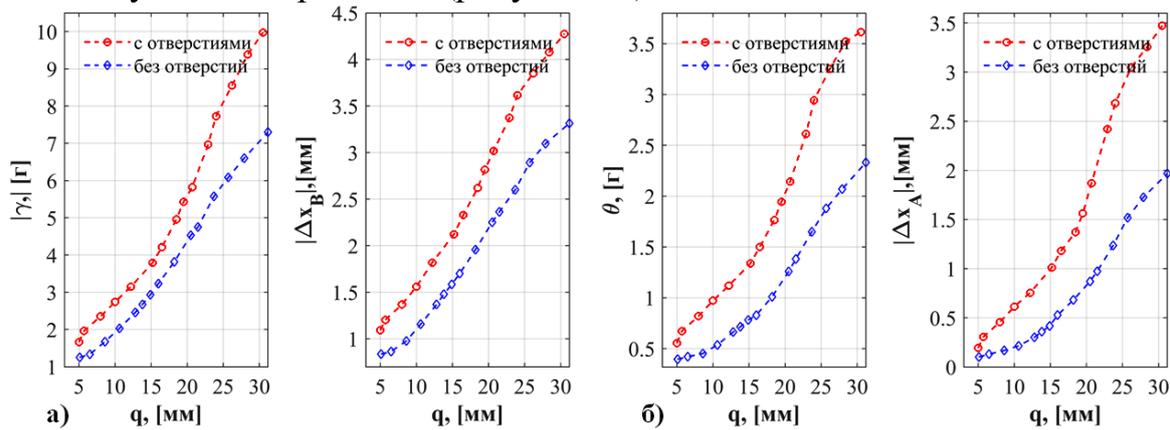


Рисунок 7 – Величина деформации пластикового вала при двухточечном контакте с зазором 0,1 мм: а– в точке B ; б – в точке A

На рисунке 8а показано изменение возникающих сил и моментов с глубиной сопряжения деталей. Главный вектор силы F_{Z1} резко увеличивается, указывая на возникновение заклинивания в зоне сборки. На рисунке 8б, в показаны диаграммы заклинивания. На глубине до 10,6 мм заклинивания не происходит: соответствующие точки находятся внутри области диаграммы (рисунок 8б). При глубине более 11,1 мм при невыполнении условия (17) происходило заклинивание в сопряжении: соответствующие точки находятся вне области диаграммы (рисунок 8в).

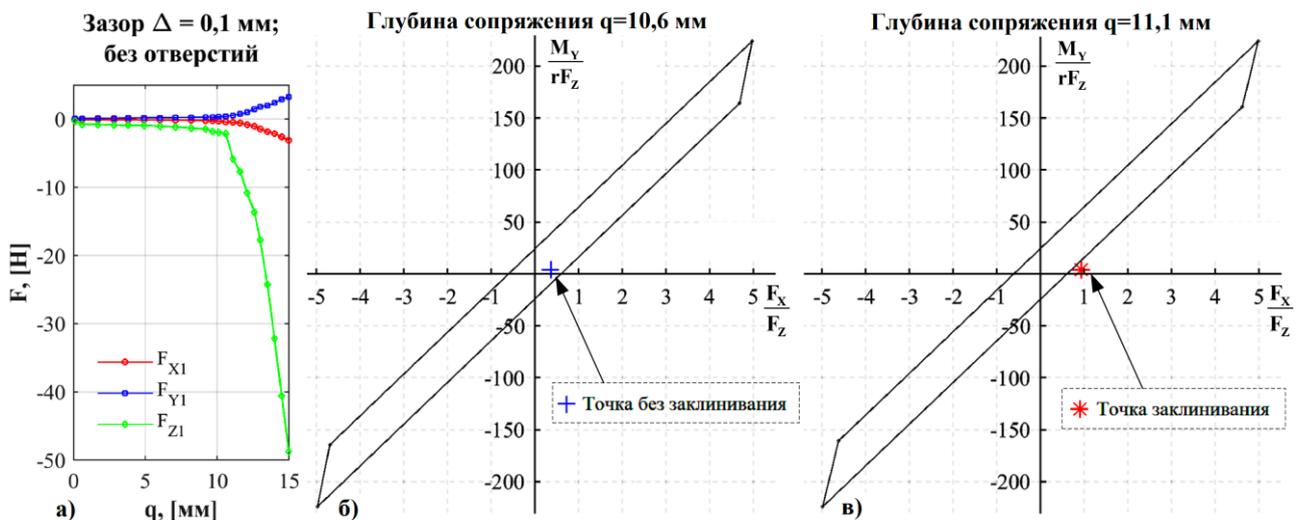


Рисунок 8 – Экспериментальной исследований заклинивания при сопряжении пластикового вала: а – зависимость компонент главного вектора сил и моментов от глубины сопряжения; б, в – диаграмма условий заклинивания

Сформировав 2500 выборок тестовых сигналов, были построены модели классификации для каждого этапа и выполнена классификация для каждого этапа. На основе экспериментальных данных рассчитаны значения w_{1i} , w_{2i} , b_i с помощью MatLab. На шаге классификации «этап 1–этап 2» процент неправильной классификации по общему набору обучающих материалов составляет 3,44% (рисунок 9).

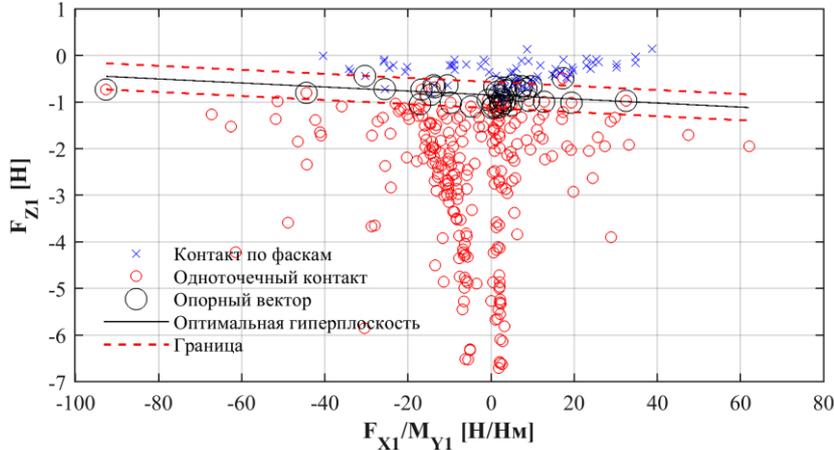


Рисунок 9 –
Гиперплоскость
разграничения границы
между двумя слоями
«контакта по фаскам и
одноточечном контакте»

На шаге классификации «этап 2–этап 3» процент неправильной классификации по общему набору обучающих материалов составляет 1,86% (рисунок 10).

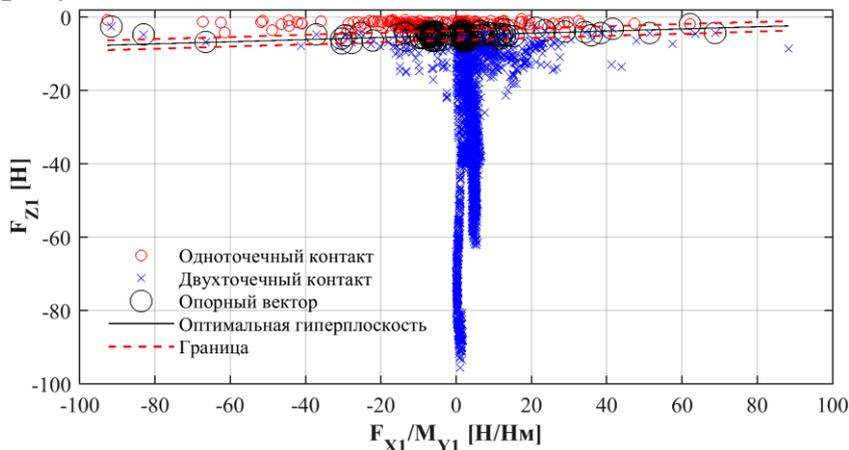


Рисунок 10 –
Гиперплоскость
разграничения границы
между двумя слоями
«одноточечный контакт и
двухточечный контакт»

Выполнена оценка эффективности разработанной модели SVM при соединении деталей до глубины $q = 50$ мм с формированием сигналов силы и момента с силомоментного датчика, которые являются тестовым сигналом (таблица 1).

Таблица 1 – 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	

На рисунке 11 показано изменение параметров сборки на этапах контакта по фаскам и при одноточечном контакте с зазором 0,1 мм. В числовые показатели отклонений включаются координаты центра силомоментного датчика и угол отклонения между осями детали, уменьшающийся с увеличением глубины сопряжения. Это способствует уменьшению величины деформации (прогиб и угол поворота поперечного сечения в точке контакта).

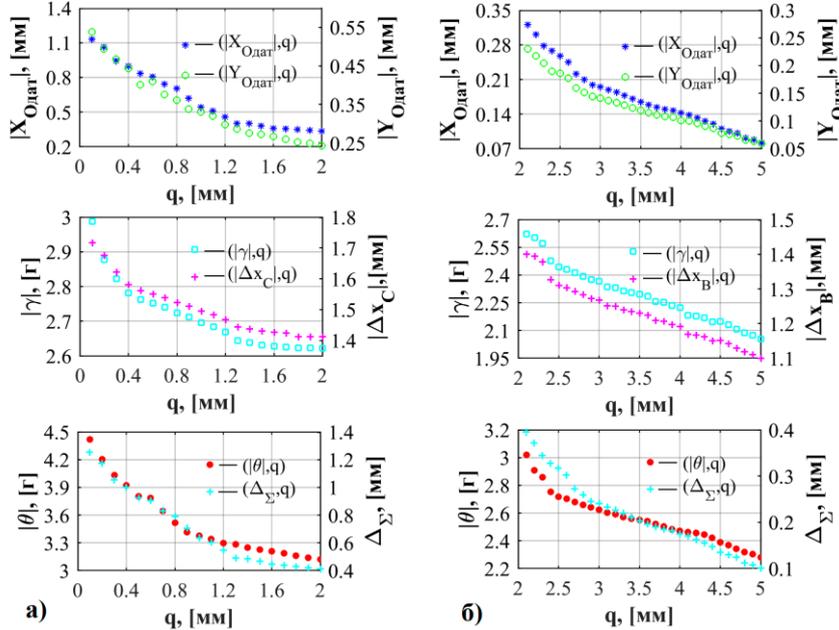


Рисунок 11 – Закономерности изменения координат центра силомоментного датчика, угла отклонения осей деталей θ и величин деформации: а – при контакте по фаскам; б – при одноточечном контакте

На рисунке 12 показаны закономерности изменения параметров процесса сопряжения при двухточечном контакте с зазором 0,1 мм, включая координаты центра силомоментного датчика, углы отклонения θ и деформации в точках контакта A и B . Значения отклонений снижены до оптимального уровня и стабильны на всей глубине сопряжения. Уровень деформации в точках контакта также уменьшается до минимального значения и поддерживается на протяжении всего процесса сопряжения на глубину до 50 мм.

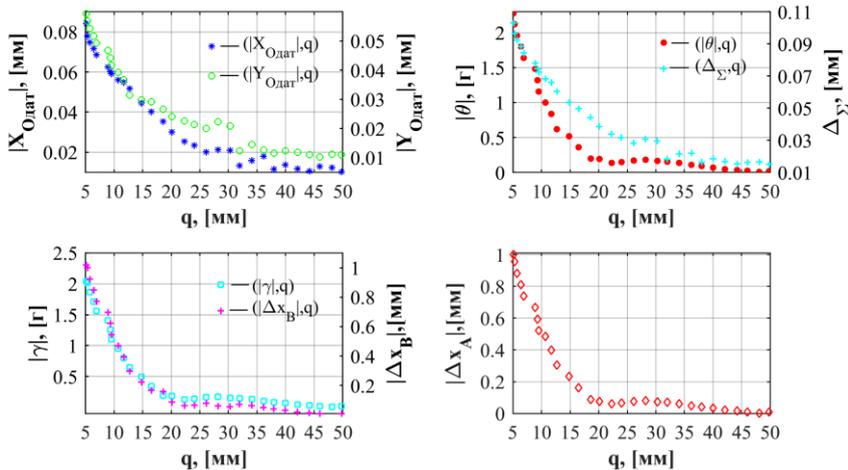


Рисунок 12 – Изменение координат центра силомоментного датчика, угла перекоса осей деталей и величины деформации при двухточечном контакте

На рисунке 13 показано изменение сил и моментов, возникающих в процессе сборки с применением алгоритма управления и без него. При применении алгоритма заклинивание исключается, усилие сборки снижается в 3 раза и увеличивается глубина сопряжения с 20 мм до 50 мм. Результаты эксперимента подтвердили эффективность предложенного алгоритма и программного обеспечения, а также показали его практическую эффективность.

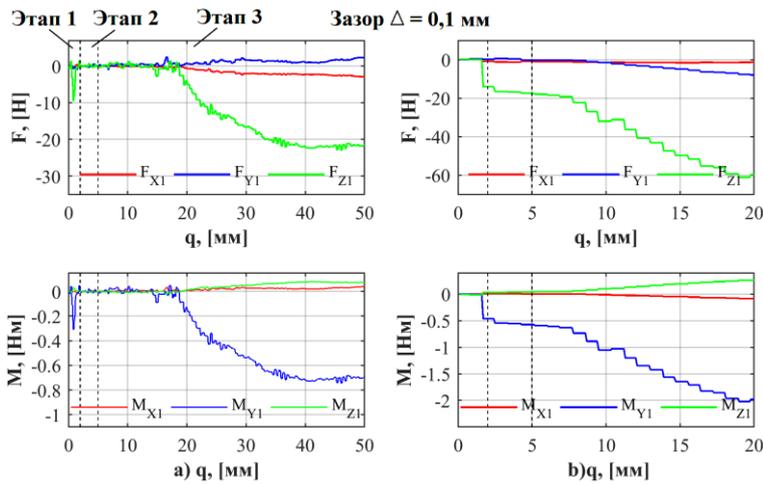


Рисунок 13 – Зависимость изменения вектора сил и моментов на трех этапах сопряжения:
 а – с применением алгоритма управления;
 б – при отсутствии алгоритма управления

В пятой главе спланирован и проведен многофакторный эксперимент. Нежесткий вал выполнялся из различных видов пластика: фторопласта - 4 (Ф4, ГОСТ 10007-80); полиэтилена (ПЭНД, ГОСТ 16338-85) и полипропилена (ПП, ГОСТ 26996-86). Втулки изготавливались из стали 45. При проведении исследования рассматривались следующие факторы, являющиеся входными параметрами: скорость перемещения робота (мм/с); зазор в соединении (мм); толщина стенки вала (мм); модуль упругости вала (МПа). В качестве целевой функции были выбраны компоненты сборочной силы и момента, измеряемые силомоментным датчиком. В качестве функции отклика, связывающей рациональный параметр с факторами процесса, были приняты уравнения степенного типа с достаточной точностью связывающие входные параметры с целевой функцией. В результате обработки результатов эксперимента были найдены зависимости сил и моментов от исследуемых факторов процесса роботизированной сборки:

$$F_{X1} = \frac{1,523 X_1^{(0,24 \ln X_4 - 1,269)} X_2^{(0,117 \ln X_3 - 0,797)} X_3^{0,588}}{X_4^{0,41}} \quad (30)$$

$$F_{Y1} = \frac{0,0005 X_1^{(1,964 - 0,238 \ln X_2)} X_4^{0,921}}{X_2^{(0,472 + 0,134 \ln X_4)} X_3^{0,015}} \quad (31)$$

$$F_{Z1} = \frac{65,82 X_2^{(-0,887 + 0,17 \ln X_3)} X_3^{0,725}}{X_1^{(2,095 - 0,348 \ln X_4)} X_4^{0,618}} \quad (32)$$

$$M_{Y1} = \frac{0,084 X_1^{(-3,938 + 0,306 \ln X_3 + 0,595 \ln X_4)} X_3^{0,312}}{X_2^{(4,069 - 0,289 \ln X_3 - 0,42 \ln X_4)} X_4^{0,259}} \quad (33)$$

где: X_1 – скорость перемещения робота; X_2 – зазор соединения; X_3 – толщина стенки вала; X_4 – модуль упругости вала.

В среде MATLAB были определены локальный минимум силы и момента по формулам (30)÷(33) и показаны в таблице 2.

Таблица 2 – 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
$M_{Y1min} = 0,21$ Н.м	10	0,14	2,1	500

Выражения (30÷33) позволили определить компоненты силы и момента, действующие на устанавливаемую деталь в процессе сборки. На основе этих взаимосвязей были построены номограммы (рисунок 14), которые позволяют в практических целях определять компоненты силы, действующие на устанавливаемый нежесткий вал при роботизированной сборке. Проведенные экспериментальные исследования позволили выявить влияние варьируемых параметров на составляющие сборочной силы и момента.

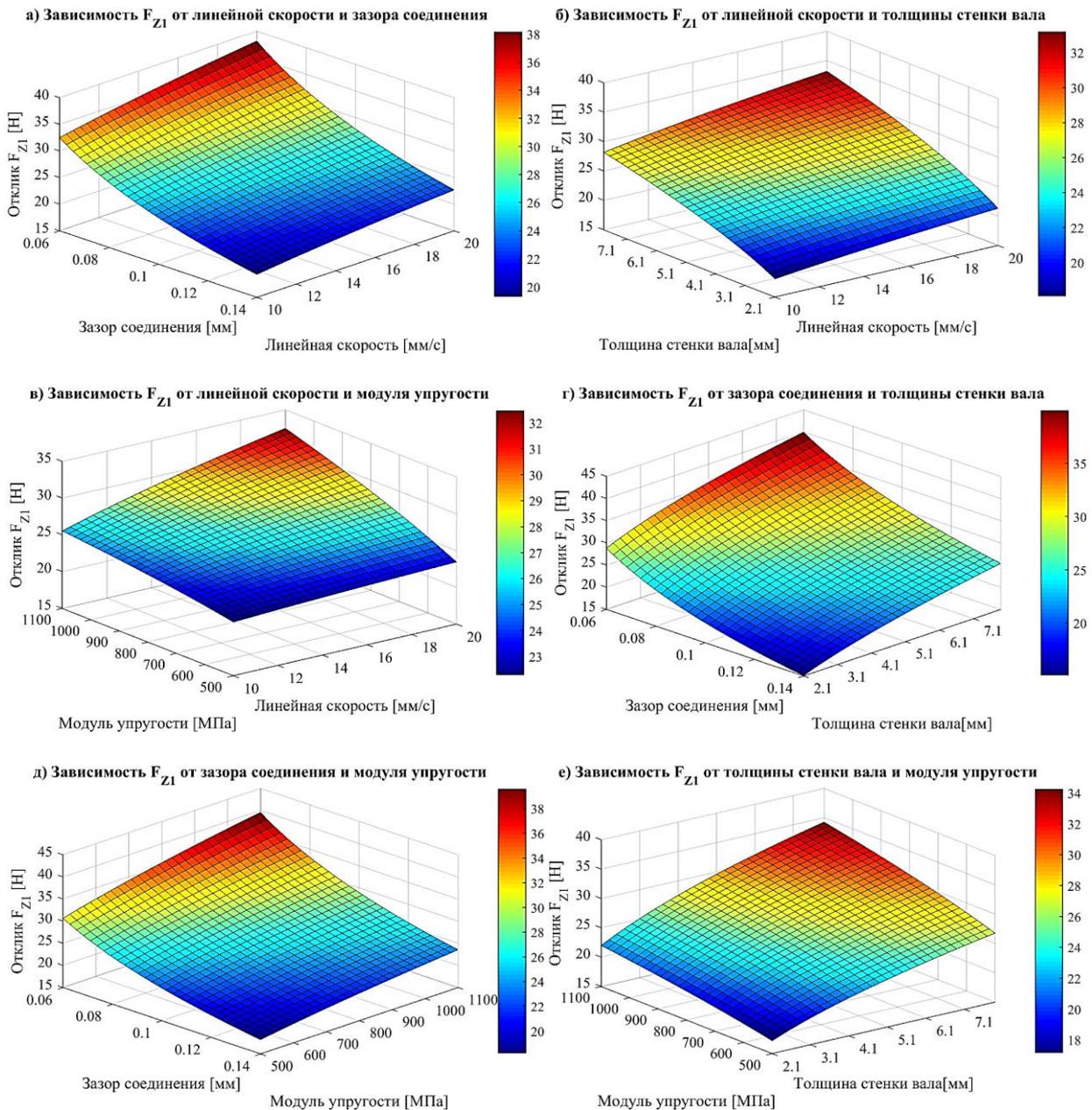


Рисунок 14 – Зависимость значения силы F_{Z1} от парных факторов при поддержании остальных факторов на основном уровне

В лаборатории «Средства автоматизации и промышленные роботы» Московского Политеха были проведены экспериментальные исследования процесса сборки нежесткого вала при использовании и отсутствии алгоритма управления (таблица 3, 4). Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что применение алгоритма управления способно существенно снизить сборочные силы и предотвратить заклинивание нежесткого вала при роботизированной сборке.

Таблице 3 – Результаты физического эксперимента сборки нежестких валов при применении алгоритма управления

Зазор [мм]	Скорость работы [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

Таблице 4 – Результат физического эксперимента сборки нежестких валов при отсутствии алгоритма управления

Зазор [мм]	Скорость работы [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

Были проведены также экспериментальные исследования процесса установки датчика уровня масла T0173-4007 автобуса Mercedes Benz при применении алгоритма управления (рисунок 15).

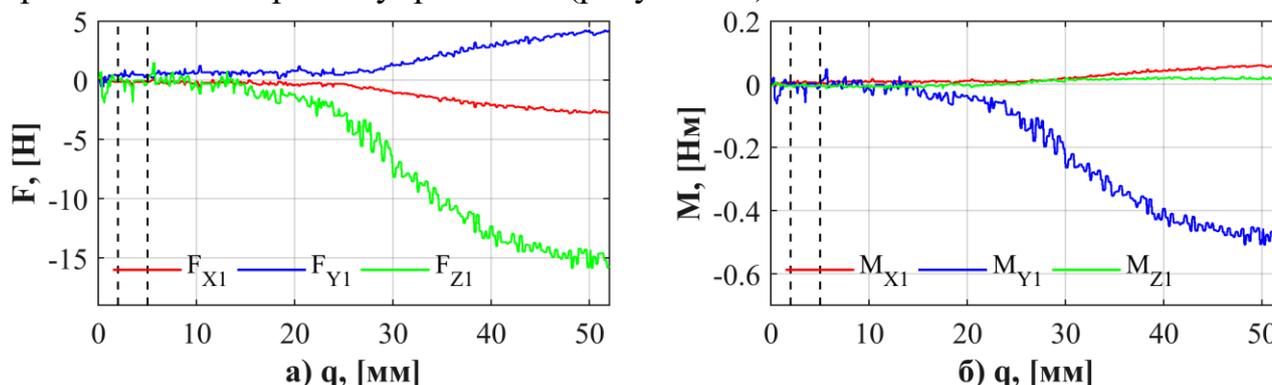


Рисунок 15 – Зависимости изменений сил и моментов в процессе установки датчика уровня масла T0173-4007 Mercedes Benz (линейная скорость работы $v = 10$ мм/с): а – зависимости изменения сил; б – зависимости изменения моментов

Из рисунка 15а видно, что сила F_{Z1} медленно увеличивается с ростом глубины q (максимальное значение силы F_{Z1} составило -15,85 Н). Полученные результаты позволяют исключить возникновение заклинивания при сборке датчика уровня масла. Проведенный эксперимент подтвердил эффективность предложенного алгоритма и программного обеспечения, а также показал возможность его практического использования.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

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.

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 автоматической 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 автоматической сборки и оценивать вероятность заклиниваний при сопряжении.

4. Разработаны математические модели, описывающие контактные состояния при сборке нежестких цилиндрических деталей. Созданный идентификатор положения деталей в процессе автоматической 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 автоматической 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 РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В научно-технических журналах, рекомендуемых ВАК Минобрнауки РФ:

1. 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. (Личное участие 60 %).

2. 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. (Личное участие 60 %).

3. 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. (Личное участие 60 %).

4. 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. (Личное участие 60 %).

5. Коган, Е.А. Математические модели деформирования нежестких деталей при роботизированной сборке / Е.А. Коган, М.В. Вартанов, **Нгуен Ван Линь** // Журнал «СТИН». – 2022. – №.12(2) – С.40–44. (Личное участие 60 %).

6. Вартанов, М.В. Научноёмкие технологии в сборочном производстве / М.В. Вартанов, **Нгуен Ван Линь** // Научноёмкие технологии в машиностроении. – 2023. – №10(148). – С.39–48. (Личное участие 50 %).

7. 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. (Личное участие 60 %).

8. **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.

9. Вартанов, М.В. Адаптивное оборудование и технологическая оснастка для автоматической сборки / М.В. Вартанов, **Нгуен Ван Линь** // Научноёмкие технологии в машиностроении. – 2024. – №6(156). – С.36–48. (Личное участие 50 %).

В рецензируемых изданиях в международных базах цитирования Scopus:

10. 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, **Van Linh Nguyen** // Proceedings of the 9th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2023). Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. – 2023. – pp. 521-529. (Личное участие 60 %).

11. Nguyen Van Dung. Identify the Position of the Shaft and Hole Using a Force-Torque Sensor in Three-Point Contact Assembly Operations / Van Dung Nguyen, M.V. Vartanov, **Van Linh Nguyen** // 2022 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). – 2022. – pp. 295-300. (Личное участие 40 %).

12. Vartanov, M.V. Mathematical Model of the Coupling Process of the “Shaft-Sleeve” Connection Using an Active Adaptation Tool for Three-Point Contact / M.V. Vartanov, Van Dung Nguyen, **Van Linh Nguyen** // Proceedings of the 8th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2022). Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. – 2022. – pp. 674-683. (Личное участие 40 %).

13. Kogan, E.A. Deformation of Flexible Parts in Robotic Assembly / E.A. Kogan, M.V. Vartanov, **Van Linh Nguyen** // Russ. Engin. Res. vol 43, – 2023. – pp. 386-389. (Личное участие 60 %).

14. 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 // 2024 International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon). – 2024. – pp. 1-6. (Личное участие 60 %).

15. 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** // 2024 International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon). – 2024. – pp. 7-12. (Личное участие 60 %).

16. Vartanov, M.V. Intelligent control algorithm for industrial robots when performing the assembly operation of cylindrical non-rigid parts / M.V. Vartanov, **Van Linh Nguyen**, E.A. Kogan, Van Luu Dao // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. vol 46 (524). – 2024. (Личное участие 60 %).

В других научных журналах и изданиях:

17. 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». – 2022. – С. 91–97.

18. Вартанов, М.В. Анализ методов идентификации положения нежесткого вала во втулке при роботизированной сборке / М.В. Вартанов, Е.А. Коган, **Нгуен Ван Линь** // Материалы национальной научно-технической конференции «Автоматизация: проблемы, идеи, решения» (АПИР-27). – 2022. – С. 173–177.

19. 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.

Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ

20. Вартанов, М.В. Программа управления роботизированной сборкой для обеспечения технологической надежности сборки цилиндрических нежестких деталей на основе сигналов силомоментного датчика / М.В. Вартанов, **Нгуен Ван Линь** // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023687744 от 18.12.2023 (Личное участие 50 %).

Научное издание

Нгуен Ван Линь

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

*Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук*

Подписано в печать