

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева»



Институт «Энергетики и машиностроения»

Кафедра «Машиностроения»

Пулатбек Арман Берикұлы

«Повышение качества обработки деталей машин в роботизированном производстве»

МАГИСТРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

7M07112 – Цифровизация машиностроительного производства

Алматы 2024

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева»



SATBAYEV
UNIVERSITY

Институт «Энергетики и машиностроения»

УДК 621.28 (31)

На правах рукописи

Пулатбек Арман Бериккулы

МАГИСТРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ
На соискание академической степени магистра

Название диссертации: «Повышение качества обработки деталей машин в
роботизированном производстве»

Направление подготовки: 7М07112 – Цифровизация машиностроительного производства

Научный руководитель

PhD доктор, ассоц. профессор

 Рахматулина А.Б.

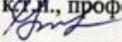
«11» 01 2024 г.

Рецензент

КазаАДИ им. Л. Б. Гончарова

кафедры «Транспортная техника и организация
перевозок»

к.т.н., профессор

 Мурзахметова У.А.

«11» 01 2024 г.

Норма контроль

Ст. преподаватель

 Карпеков Р.К.

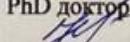
«11» 01 2024 г.

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой

«Машиностроение»

PhD доктор

 Е.З. Нугман

«12» 01 2024 г.

Алматы 2024

ДИПЛОМ ҚОРҒАУҒА ЖІБЕРІЛДІ
ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ ДИПЛОМА

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева»



SATBAYEV
UNIVERSITY

Институт «Энергетики и машиностроения»

Кафедра «Машиностроения»

7M07112 – Цифровизация машиностроительного производства

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой
«Машиностроение»

PhD доктор

Е.З. Нугман

«12» 01 2024 г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение магистерской диссертации

Магистрант: Пулатбек Арман Бериккулы

Тема: «Повышение качества обработки деталей машин в роботизированном производстве»

Проректор по учебной работе 1022 «03» 04 №48/41/У утверждено приказом

Срок выполнения работ: «___» Январь 2024 г.

Исходные данные магистерской диссертации: Повышение качества обработки деталей машин в роботизированном производстве.

Перечень вопросов, которые необходимо рассмотреть в магистерской диссертации:

- а) Анализ технологических возможностей процессов направленных на применение роботов в процессах механической обработки*
- б) Визуализация обработанных поверхностей*
- в) Анализ качества поверхностей для исследования условий резания*
- г) Экспериментальное модальное испытание*

Список графических материалов (с точным указанием требуемой графики):

Презентация работы показана на слайде

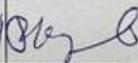
Список рекомендуемой основной литературы: 23

Подготовка магистерской диссертации

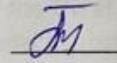
ГРАФИК

Наименование разделов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Анализ технологических возможностей процессов направленных на применение роботов в процессах механической обработки	15.06.2023	Выполнено
Визуализация обработанных поверхностей	5.08.2023	Выполнено
Анализ качества поверхностей для исследования условий резания	1.09.2023	Выполнено
Экспериментальное модальное испытание	7.10.2023	Выполнено
Заключительный раздел	17.11.2023	Выполнено

Подписи консультантов и норм контролёра на законченный проект

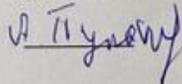
Наименование разделов	Ф.И.О (Научная степень, должность)	Дата подписания	Подпись
Основной наблюдатель	Карпеков Р.К., старший преподаватель	10.01.2024	
Основной раздел	Рахматулина А.Б., PhD доктор, ассоц. профессор	11.01.2024	
Расчетный раздел	Рахматулина А.Б., PhD доктор, ассоц. профессор	11.01.2024	

Научный руководитель



Рахматулина А.Б.

Задание принял к исполнению обучающийся



Пулатбек А.Б.

Дата

«__» _____ 2024 г.

АННОТАЦИЯ

В данной магистерской работе представлена исследование качества поверхности срезов, обработанных роботизированной фрезерной. Для этого на алюминиевом блоке типа 6061 T6 обрабатываются различные пазы, применяя различную скорость подачи и глубину резания. Затем будет исследована топология неровностей, образующихся на обрабатываемых поверхностях, и их порождающие факторы. Затем, исследуемый промышленный робот калибруется с использованием нового подхода, основанного на использовании оптической КИМ Creaform C-Track. Потом анализ качеству поверхности и механизмам ее генерации. Наконец, обсуждаются результаты этого исследования.

АҢДАТПА

Бұл магистрлік диссертацияда, Роботталған фрезерлеу машинасымен өңделген кесінділердің беткі сапасын зерттеу ұсынылады. Осы мақсатта 6061 T6 типті алюминий блогында паздарды әр түрлі жылдамдығын және кесу тереңдігін қолданатын түрлі слоттар жасалады. Содан кейін өңделген беттерде пайда болған бұзушылықтар топологиясы және олардың генерациялайтын факторлары зерттеледі. Содан кейін зерттелетін өнеркәсіптік робот жаңа тәсілді пайдалана отырып калибрленеді. Creaform C-Track оптикалық СММ көмегімен. Содан кейін беттің сапасын және оның пайда болу механизмдерін талдау. Сайып келгенде, бұл зерттеудің нәтижелері талқыланады.

ANNOTATION

In this master's thesis, a study of the surface quality of cuts processed by a robotic milling machine is presented. For this purpose, different slots are machined on the type 6061 T6 aluminium block, applying different feed speeds and cutting depths. Then, the topology of the irregularities formed on the treated surfaces and their generating factors will be investigated. Then, the industrial robot under study is calibrated using a new approach based on using the Creaform C-Track optical CMM. Then the analysis of the surface quality and the mechanisms of its generation. Finally, the results of this study are discussed.

СОДЕРЖАНИЕ

	Введение	7
1	Анализ технологических возможностей процессов направленных на применение роботов в процессах механической обработки	9
1.1	Исследование особенностей применения роботов на операции	9
1.2	Основные выводы, цели и задачи исследования	11
1.3.1	Точность калибровки и позиционирования	13
1.3.2	Геометрическая модель и калибровка	16
2	Неровности поверхности	24
2.1	Экспериментальная установка	25
2.2	Визуализация обработанных поверхностей	27
2.3	Характеристика неровностей обрабатываемой поверхности	31
2.3.1	Анализ спектральной плотности поверхности профилей	40
2.3.2	Среднеквадратичное значение нарушений	46
3	Анализ качества поверхностей для исследования условий резания	48
3.1	Силы резания	48
3.1.1	Основные силы резания фрезерования	48
3.1.2	Результаты и их обсуждение	
3.2	Контроль прямолинейности траектории робота	
3.3	Динамическое поведение	
3.3.1	Вибрация с одной степенью свободы	
3.3.2	Экспериментальное модальное испытание	
3.3.3	Тестовая установка	
3.4	Заключение	
	Заключение	
	Перечень принятых сокращений, терминов	
	Список использованной литературы	

ВВЕДЕНИЕ

Без гибкости в производстве производителям практически невозможно совершенствоваться и даже удерживать свои позиции на современном конкурентном рынке. Поскольку требования рынка меняются очень быстро, производители должны быть в состоянии адаптировать свои производственные системы к этим изменениям как можно скорее. По этой причине очень желательны программируемые машины, которые можно быстро настроить в соответствии с новыми производственными настройками. Станки с ЧПУ используются на протяжении десятилетий для повышения гибкости в механических цехах. Несмотря на то, что ЧПУ могут выполнять практически любую операцию обработки, есть некоторые случаи, в которых использование ЧПУ не рекомендуется. Удаление заусенцев, например, является операцией, которая в основном выполняется квалифицированными рабочими; В этой операции мастер берет инструмент для снятия заусенцев и перетаскивает его по краям обработанной детали, чтобы удалить заусенцы. Однако из-за проблем, возникающих при работе с ручным инструментом, несогласованности в продуктах, например, производители, как правило, максимально разрабатывают автоматизированные системы. Промышленные роботы — это программируемые машины, которые могут быть легко интегрированы в производственную систему для решения этой проблемы.

В настоящее время промышленные роботы широко используются в механических операциях, не требующих высокой точности. Действительно, чистовая обработка и предварительная обработка являются областями, в которых промышленные роботы очень популярны. При типичной чистовой операции, например, при шлифовании, робот перемещает инструмент, установленный в гибком держателе инструмента, над нужной поверхностью или кромкой для улучшения качества продукта; В типичной операции предварительной обработки, например, при снятии направляющих и затворов с литейных деталей, к роботу присоединяется пильный инструмент с низким усилием для удаления отливки отходов.

Высокая гибкость в сочетании с разумной ценой промышленных роботов обуславливает большую тенденцию использования этих станков в обрабатывающей промышленности. Кроме того, роботы могут использоваться для обработки деталей в обрабатывающей ячейке, что дает больше преимуществ, поскольку ЧПУ нуждаются в рабочих для их загрузки и разгрузки. Однако использование роботов вместо станков с ЧПУ сопряжено с некоторыми трудностями. Низкое качество поверхности и недостаточная точность, возникающие из-за низкой жесткости роботизированных

обрабатывающих систем, являются основными трудностями, ограничивающими применение роботов в обрабатывающей промышленности.

До сих пор были проведены некоторые исследования по преодолению барьеров роботизированной обработки. Однако большая часть этих исследований была посвящена повышению точности роботизированных систем обработки, а не качеству обрабатываемых поверхностей. Действительно, исследование качества поверхности ограничивается такими процессами отделки, как роботизированное удаление заусенцев или роботизированное шлифование, но качество поверхностей, создаваемых роботизированными фрезерными системами, почти не было предметом каких-либо исследований. Исследование неровностей поверхности, образуемых типичной роботизированной фрезерной системой, является основным направлением данной работы. Однако точность робота проверяется заранее.

Данная диссертация организована следующим образом. В 1 главе раскрываются цель и методология данного исследования. Глава 2 посвящена качеству поверхности и механизмам ее генерации. Наконец, в главе 3 обсуждаются анализ качества поверхностей для исследования условий резания.

1 Анализ технологических возможностей процессов направленных на применение роботов в процессах механической обработки

1.1 Исследование особенностей применения роботов на операции

Примечательно количество исследовательских работ, направленных на применение роботов в процессах механической обработки. Исследования робототехнической обработки можно разделить на следующие области: быстрое прототипирование, анализ вибрации, планирование пути и автоматическое программирование роботов [1]. Следующие потенциальные области исследований определяются в рамках перекрывающихся рабочих сред оператора и робота, жесткости робота и вибрации при обработке, методов мониторинга и компенсации для повышения качества и точности, оптимизации конфигурации системы роботизированной обработки и улучшения стратегий обработки в соответствии с возможностями робота [2].

Для фрезерных операций с роботами авторы концентрируются на результатах по отклонениям траектории и шероховатости. Исследования шероховатости проводились для титановых сплавов и заготовок из углепластика с использованием геометрической модели и сравнения ее с экспериментальными результатами [3]. Многотельные системы с формулой Денавита-Хартенберга и гибкие соединения применялись для прогнозирования отклонений траектории при фрезеровании, где гибкие фиктивные соединения добавляются к модели жесткого соединения [4]. Модель дает хорошие результаты по сравнению с экспериментальными значениями, когда на нее воздействуют измеренными силами. Однако не был выполнен строгий анализ точности, а только отклонение между номинальным значением (запрограммированным) от кинематики и значениями, рассчитанными с новыми углами после расчета обратной динамики без вычислений с обратной связью.

При помощи многотельных методов обратная динамика использовалась для моделирования параллельных кинематических роботов, вводя податливости в соединениях и звеньях, сравнивая с экспериментальными результатами отклонения при введении выходных измеренных сил и моментов от фрезерования [5]. Другие исследования применяют методы многих тел для проверки надежности других методологий, таких как методы виртуальной работы, для создания обратных динамических моделей [8].

Конфигурация робота широко оценивается даже с точки зрения минимального энергопотребления [9]. Использование индексов, основанных на жесткости, является частым подходом, используемым при фрезеровании [10], [11], [12]. Та же методология используется для оптимизации положения

бурения, чтобы избежать использования дополнительных устройств в роботизированной системе [13], [14]. Невозможно предсказать, какие результаты могут быть достигнуты для данной точки сверления с точки зрения геометрических или размерных допусков. Также не уделяется внимания установлению взаимосвязи между параметрами обработки, силами и крутящими моментами для включения в модель робота.

Буровыми операциями являются те, которые чаще всего можно выполнять с помощью робота согласно рисунку 2. Следовательно, здесь открыта возможность повышения производительности ячеек. В этой области исследований наиболее важными факторами являются угол отклонения оси инструмента, перпендикулярность и отклонение положения сверла. Качество просверливаемого отверстия с точки зрения угла отклонения может быть достигнуто с помощью методов оптимизации, таких как коэффициент жесткости [15], основанный на построении модели матрицы податливости [11]. Что касается перпендикулярности, то использование систем мониторинга с мультисенсорами и лазерным слежением за буровой установкой позволяет оценить отклонение положения [16]. Некоторые из этих методов сочетают в себе также геометрические модели [17]. В направлении минимизации использования дорогостоящих устройств некоторые исследования сочетают улучшенный подход к управлению положением, улучшенные функции контроля соответствия и новые специальные конструкции режущего инструмента для сверления и фрезерования в стандартных промышленных роботах [18]. Другие направления исследований оценивают с помощью гибридных методов управления силой/движением реакцию роботоманипуляторов, когда силы окружающей среды применяются для обнаружения столкновений [19].

Однако весь этот интерес упирается в отсутствие методологии определения производительности роботизированной обработки, которая могла бы служить основой для оптимизации роботизированных операций. Некоторые авторы попытались восполнить этот пробел, предложив структурированную методологию [20]. На сегодняшний день он не применяется, и невозможно определить, подходит ли промышленный робот для задач обработки и их пределы, какой уровень геометрического или размерного допуска (и в каких условиях) может быть достигнут.

Необходимо знать, способен ли робот выполнять новые задачи, когда потребуется перераспределить их в любой ячейке, в любом куске и в любое время. Единственный способ избежать дорогостоящих тестов (иногда даже невозможных) — использовать модель. По этой причине они разрабатывают модель процесса бурения, модель робота, в которую интегрирована эта модель процесса бурения, и анализ точности работы, который включает результаты как робота, так и процесса.

Для предлагаемой модели процесса бурения ими считаются статические значения моментов и сил, вызывающие постоянные отклонения. Нет необходимости оценивать изменение глубины стружки [21], [22]. Использование абсолютных значений сил для оценки рабочего отклонения делает ненужным оценивать отклонение силы, вызывающее вибрацию [23].

Сочетание моделей робота и процесса использует максимальные значения в каждый момент времени t для сил и крутящих моментов бурения, поскольку именно они вызывают наибольшие отклонения робота [23]. В результате этого приложения отклонение моделируется и рассчитывается, а его осуществимость может быть проверена с помощью чертежных спецификаций (в общих чертах, допуска положения).

1.2 Основные выводы, цели и задачи исследования

Исследование качества поверхности срезов, обработанных роботизированной фрезерной системой, представленное на рисунке 1, является основной темой данного исследования. Для этого на алюминиевом блоке типа 6061 T6 обрабатываются различные пазы, применяя различную скорость подачи и глубину резания. Затем будет исследована топология неровностей, образующихся на обрабатываемых поверхностях, и их порождающие факторы.

В этом проекте качество поверхности срезов предварительно проверяется с помощью электрооптического микроскопа, чтобы визуальным образом изучить топологию неровностей поверхности. После этого элементарного контроля применяется механический профилировщик поверхности, щуп, для создания профиля обрабатываемых поверхностей. Профили отображают высоту поверхности вдоль траектории, по которой перетаскивается щуп. Как визуальный осмотр, так и профили поверхности отображают низкочастотные неровности на поверхности. Чтобы определить частоту этих неоднородностей, измеренные профили анализируются с помощью метода дискретного преобразования Фурье. Этот метод выявляет преобладающие периодические неровности, заложенные в профилях поверхности.

Силы резания являются еще одним параметром, измеряемым для исследования условий резания. Измеренные силы предоставляют ценную информацию о движении инструмента по траекториям резания. Действительно, любое отклонение от траектории резания влияет на усилия обработки. Таким образом, неровности, образующиеся на поверхности, сопровождаются аналогичными на профилях сил, поэтому для определения частоты доминирующих периодических сил, вложенных в силу, к измеряемым силам будет применен дискретный анализ преобразования Фурье профили.

После обнаружения неровностей поверхности можно было идентифицировать их порождающие факторы. По сути, выявление нарушений

является первым шагом к изучению этих факторов. Эти неравномерности могут возникать либо из-за вибрации инструмента, вибраций, либо из-за движения робота независимо от процесса обработки. По этой причине движение робота в 20

Будут проанализированы одни и те же траектории резания. Для этого к роботу прикрепляется специальный артефакт, оснащенный лазерной целью-трекером, и его положение спорно измеряется во время движения. Измеренные положения генерируют профили движения, которые сравниваются со связанными профилями поверхности. Это сравнение выявляет неровности, которые образовались на поверхности из-за движения робота.

Далее, чтобы найти неровности, образовавшиеся из-за вибрации инструмента, проводится испытание на удар. Применяя испытание на удар, можно определить собственные частоты обрабатывающей системы. Эти собственные частоты определяют частоты, на которых система может проявлять резонансную вибрацию. Если возбуждается одна или несколько собственных частот системы, обрабатывающая система начинает вибрировать. Эта вибрация может передаваться на наконечник инструмента и влиять на качество поверхности обрабатываемой детали.

Перед проведением испытания на механическую обработку оценивается точность позиционирования робота. Точность позиционирования робота представляет собой среднюю ошибку между целью, заданной с помощью программного обеспечения для программирования, и той, которой робот достигает в рабочем пространстве. Если величина этой погрешности незначительна, то процесс обработки может быть полностью запрограммирован с помощью программного обеспечения, и необходимые моменты могут быть обучены с помощью программного обеспечения. Однако, если погрешность позиционирования, даже после применения метода калибровки, настолько велика, что влияет на параметры резания, например, на глубину резания, то каждая необходимая точка должна быть обучена подвесным пультом обучения.

В этом случае ошибки позиционирования не влияют на параметры резания.

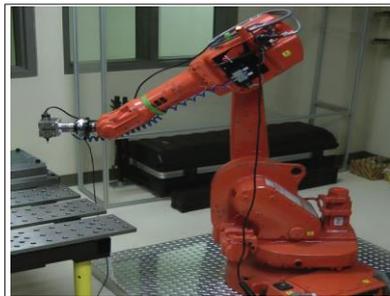


Рисунок 1-Роботизированная фрезерная система, ABB IRB 1600

1.3.1 Точность калибровки и позиционирования

Несмотря на то, что роботы успешно используются в различных отраслях промышленности, их использование в механической обработке ограничено. Действительно, в некоторых областях обработки требуется качество отделки, которого невозможно достичь с помощью промышленных роботов. Среди этих качеств точность позиционирования играет ключевую роль в квалификации робота для конкретных задач обработки. Собственно, точность позиционирования роботов является основным недостатком, ограничивающим их использование в обрабатывающей промышленности. Если быть более точным, то из-за недостаточной точности типичная роботизированная система обработки удаляет больше или меньше материала из деталей и генерирует ограниченные размеры на обрабатываемых деталях.

Точность позиционирования робота определяется как расстояние между точкой, установленной его программным обеспечением, и средним значением точек, посещенных роботом несколько раз, чтобы достичь заданной точки. Это расстояние может возникать из-за разных источников погрешностей, но геометрические погрешности и упругость робота являются основными. Действительно, когда точка определена программным обеспечением, контроллер вычисляет координаты соединений, которые должны быть установлены для достижения этой точки. Собственно, координаты стыка вычисляются с помощью обратного кинематического метода, разработанного на основе номинальной геометрической модели робота. В идеале, когда заданы расчетные координаты соединения, центральная точка инструмента (ЦТИ) робота должна точно совпадать с точкой, определенной программным обеспечением. Однако на практике, поскольку номинальная геометрическая модель робота отличается от фактической из-за ошибок, возникающих в процессе изготовления деталей робота и на этапах сборки, точки, которые выполняются роботом, отличаются от заданных программным обеспечением.

Следует отметить, что, поскольку в роботизированной обработке важна способность робота перемещать свой режущий инструмент по желаемой траектории, следует оценивать точность траектории робота, а не точность его позиционирования. Точность траектории робота зависит от его динамических, геометрических и статических характеристик. Однако в случае, если робот движется с относительно низкой скоростью, как в данном исследовании, динамическими ошибками можно пренебречь. В этом случае оценки точности позиционирования робота будет достаточно, чтобы определить его способность перемещать инструмент по желаемой траектории.

Как упоминалось ранее, общая эластичность робота также влияет на точность его позиционирования; действительно, когда к роботу прикладывается нагрузка, он проявляет значительное отклонение, которое смещает положение ЦТИ. Большинство исследователей признали податливость суставов, ответственных за общую эластичность. На самом деле, когда на робота оказывается нагрузка, его суставы прогибаются из-за их низкой жесткости. Как и в типичном серийном роботе, датчики позиционирования шарниров, энкодеры или резольверы, устанавливаются на валах двигателей шарниров, отклонения шарниров не могут быть распознаны контроллером и, следовательно, не компенсируются. Влияние прогибов соединения на положение центральной точки инструмента можно рассчитать, применив матрицу Якоби. Поскольку матрица Якоби зависит от конфигурации робота, влияние этих отклонений на точность позиционирования робота может быть значительно увеличено. Однако следует учитывать, что податливость шарниров не является единственным источником ошибок позиционирования шарниров, и другие дефекты, такие как люфт, эксцентриситеты и частичные геометрические несовершенства зубчатых передач, также могут приводить к ошибкам координат соединений и, следовательно, снижать точность позиционирования робота.

Оценка точности позиционирования робота и разработка метода калибровки, включая идентификацию кинематических особенностей соединений и ошибок позиционирования соединений, являются основной темой этой главы. Точность позиционирования оценивается путем измерения расстояния между положением, заданным программным обеспечением, и положением, фактически выполненным роботом в относительно большом количестве случайных точек в рабочем пространстве. Точность позиционирования робота может составлять всего несколько миллиметров. Тем не менее, его можно улучшить, применив подходящие методы калибровки. Для этого в данной главе сначала определена геометрическая модель робота и экспериментально определены его параметры. Затем согласия соединений и другие источники ошибок координат соединений моделируются и включаются в геометрическую модель с целью повышения ее точности. Наконец, сравнивается точность позиционирования робота до и после калибровки. Необходимо добавить, что САД-модель робота показана на рисунке 1.1.

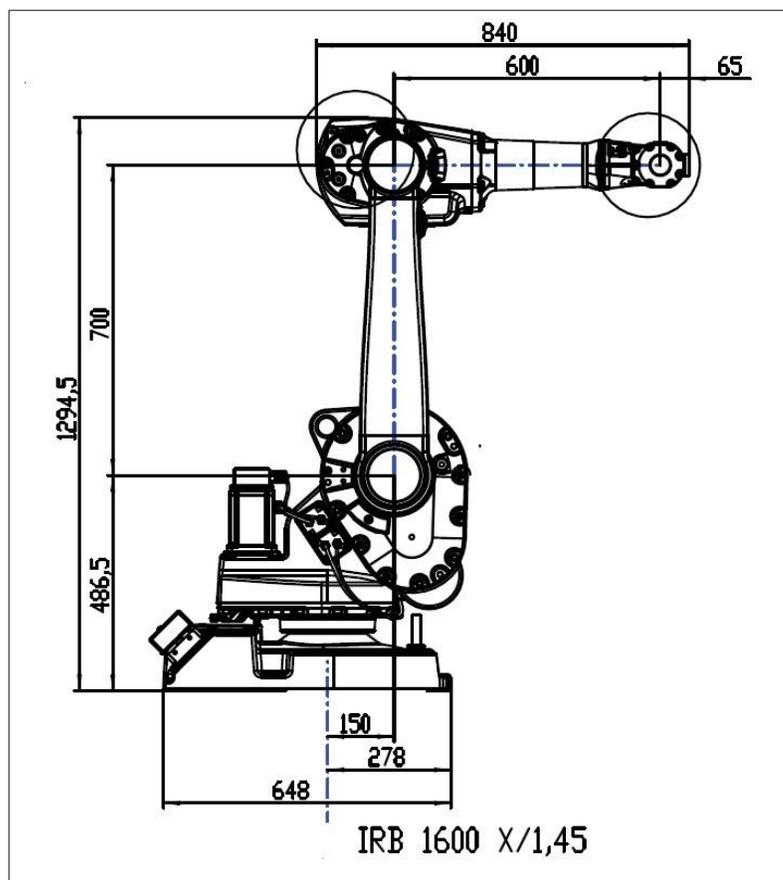


Рисунок 1.1-CAD-модель робота АВВ (2004)

Для определения податливости соединений было разработано специальное приспособление, способное удерживать нагрузочные диски. На рисунке 1.2 показан робот и прикрепленное к нему нагруженное приспособление. Таким образом, добавляя нагрузки к приспособлению и измеряя прогиб робота, можно исследовать его жесткость. Для измерения положения робота используется портативная камера Creaform. Эта камера измеряет положение твердого тела, если видны по крайней мере три прикрепленные к нему мишени C-Track. С-образная траектория показана на рисунке 1.3.

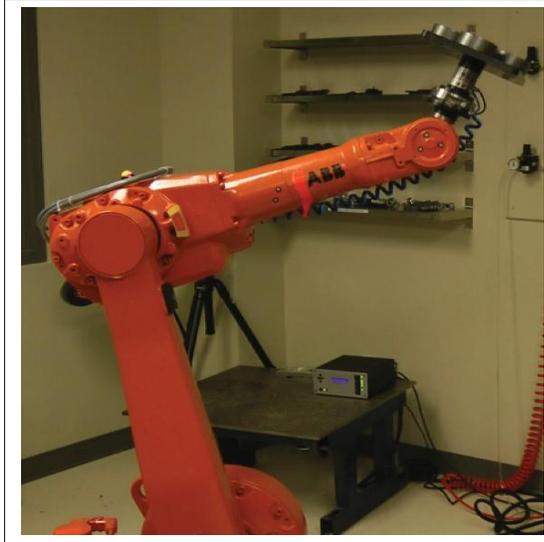


Рисунок 1.2-Робот и нагруженное приспособление



Рисунок 1.3-С-трек

1.3.2 Геометрическая модель и калибровка

Разработка геометрической модели робота – это первый шаг, который необходимо сделать для определения позы его конечного эффектора в рабочем пространстве. На самом деле, геометрическая модель состоит из тригонометрических функций, связывающих координаты сустава в качестве входных данных с положением конечного эффектора в качестве выхода. Для разработки геометрической модели робота необходимо изучить его кинематику; В целом, кинематическую структуру серийных роботов можно объяснить понятием кинематической цепи. Кинематическая цепь состоит из нескольких твердых тел, которые соединены между собой шарнирами. Серийный робот имеет открытую кинематическую цепную структуру, в которой каждый сустав соединяет только два звена, тела. Один конец кинематической цепи робота, его основание, закреплен на земле, в то время как другой конец, конечный эффектор, перемещается в рабочем пространстве. Геометрическая модель робота, действительно, определяет положение конечного эффектора по отношению к неподвижной раме, которая обычно прикреплена к основанию в зависимости от координат сустава.

Для разработки геометрической модели робота были внедрены различные методы. Однако методы, описанные в учебниках по робототехнике, в основном основаны на применении матриц переноса. В этом методе каждому звену робота присваивается один кадр. Затем положение конечного эффектора, которое является постоянным по отношению к рамке, прикрепленной к

конечному эффектору, переносится обратно на предыдущую с помощью матрицы переноса, связанной между этими двумя кадрами. Таким же образом поза конечного эффектора переносится обратно через кадры до тех пор, пока поза конечного эффектора не будет перенесена на базовую раму. Поскольку базовая рама закреплена в своем положении, она обычно выбирается в качестве системы отсчета. Поэтому, когда позы конечного эффектора определены по отношению к базовому каркасу, его положение в рабочем пространстве будет понятно. Знаменитая модель Денавита-Хартенберга, описанная почти во всех учебниках по робототехнике, и S-модель Стоуна (1986) являются примерами геометрических моделей, применяющих матрицы переноса для определения положения конечного эффектора в рабочем пространстве.

Тем не менее, в этом эксперименте было предпочтительно рассчитать все измерения относительно неподвижной рамы C-Track. В этом случае нет необходимости назначать рамку каждому звену робота. Действительно, все векторы и матрицы вращения вычисляются только относительно одного кадра. Тем не менее, прежде чем представить геометрическую модель робота, необходимо определить кинематические особенности его суставов. По этой причине сначала выявляются кинематические особенности соединений, а затем на их основе определяется геометрическая модель.

Кинематические характеристики вращательного шарнира определяются двумя параметрами: осью вращения и центром вращения шарнира. Как центр, так и ось вращения сустава идентифицируются с помощью окружности вращения этого сустава. Круг вращения i -го соединения, соединяющего $(i - 1)$ -е звено с i -м звеном, может быть определен путем измерения положения мишени C-Track, прикрепленной к i -му звену, в то время как соединение вращается в заданном диапазоне. В этом случае мишень движется по круговой траектории, определяющей круг вращения этого сустава. Центр этой окружности определяет центр сустава, а вектор нормали плоскости окружности определяет ось сустава. На рисунке 1.4 показаны кинематические особенности вращательного шарнира. В литературе этот метод идентификации называется методом одиночного сустава, так как каждый сустав рассматривается отдельно; Стоун (1986) применяет этот метод для калибровки робота PUMA 560.

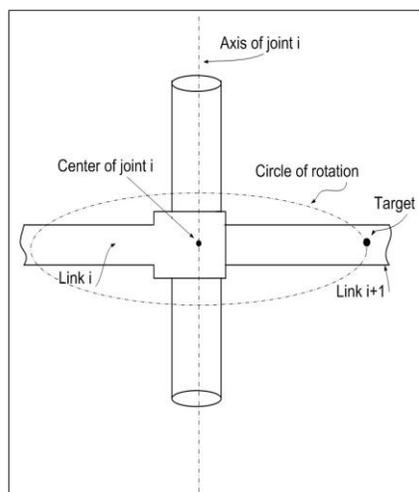


Рисунок 1.4-Кинематические особенности сустава

Для того, чтобы построить геометрическую модель робота, необходимо определить некоторые обозначения. \vec{a}_i' определяется как вектор, соединяющий центр вращения i -го сустава, O_i , с центром вращения $(i+1)$ -го сустава, O_{i+1} , где i изменяется от 1 до $n-1$. Кроме того \vec{a}_0 , определяется как вектор, соединяющий начало координат рамы С-образной направляющей, O_c , с центром вращения первого соединения, O_1 , и $-a_n$ как вектор, соединяющий центр последнего соединения, O_n , с положением наконечника инструмента, P . Таким образом, очевидно, что положение наконечника инструмента по отношению к раме C-Track равно сумме соединительных векторов, то есть

$$\vec{p} = \vec{a}_0 + \vec{a}_1 + \vec{a}_2 + \dots + \vec{a}_6. \quad (1.1)$$

На рисунке 1.5 показаны векторы a_i , где первый сустав поворачивается на 90° , а остальные суставы находятся в нулевом положении, однако a_0 на рисунке не изображен.

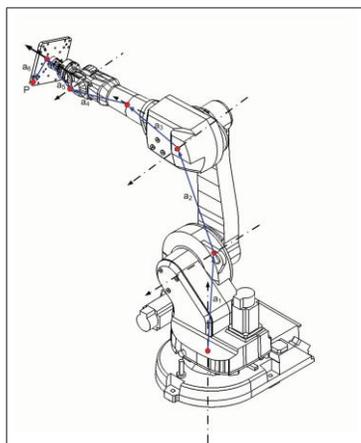


Рисунок 1.5-Геометрическая модель робота

Следует отметить, что позиция центра вращения каждого сустава может находиться в любом месте на оси вращения. Если \vec{a}_i' обозначает вектор $-\vec{a}_i'$ при нулевой конфигурации, конфигурацию, при которой были выявлены кинематические особенности соединений, то связь между этими двумя векторами может быть продемонстрирована матрицами вращения, как показано ниже;

$$\vec{a}_i = R_1 \cdot R_2 \dots R_i \vec{a}_i' \quad (1.2)$$

Идентификация вектора \vec{a}_i' незамысловата, однако идентификация матриц вращения R_i требует дополнительной проработки; если вектор \vec{e}_i обозначает ось вращения i -го сустава, а θ_i обозначает его угол поворота, то соответствующая матрица вращения R_i вычисляется по уравнению 1.3, заданному Анхелес (2007):

$$R_i = \vec{e}_i \cdot \vec{e}_i^T + \cos(\theta_i) \cdot (1 - \vec{e}_i \cdot \vec{e}_i^T) + \sin(\theta_i) \cdot E_i \quad (1.3)$$

где 1 —матрица тождества 3×3 , а E_i -матрица перекрестного произведения вектора $-\vec{e}_i = [e_1 \cdot e_2 \cdot e_3] \cdot T$ который вычисляется как

$$E_i = \begin{bmatrix} 0 & -e_3 & e_2 \\ e_3 & 0 & -e_1 \\ -e_2 & e_1 & 0 \end{bmatrix}$$

Наконец, объединив уравнение 1.1 и уравнение 1.2, будет достигнуто уравнение 1.4:

$$\vec{p} = \vec{a}_0 + R_1 \cdot \vec{a}_1' + R_1 \cdot R_2 \cdot \vec{a}_2' + \dots + R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot R_4 \cdot R_5 \cdot R_6 \cdot \vec{a}_6' \quad (1.4)$$

Приведенное выше уравнение демонстрирует геометрическую модель робота, в которой положение центральной точки инструмента, P , вычисляется на основе матриц вращения соединений и векторов, соединяющих центр соединений при нулевой конфигурации. Необходимо отметить, что в приведенном выше уравнении значения матриц вращения изменяются в зависимости от координат соединения, но значения векторов \vec{a}_i' постоянны.

1.4 Ошибки в суставах

Упругость, люфт, эксцентриситеты и частичные геометрические несовершенства соединения являются основными источниками ошибок позиционирования соединения. Несмотря на то, что погрешности соединений бесконечно малы, они могут изменять положение конечного исполнительного механизма до нескольких миллиметров из-за конфигурации робота. По этой причине моделирование ошибок позиционирования соединений может значительно повысить точность конечного исполнительного механизма. В этом разделе погрешности позиционирования каждого соединения измеряются экспериментально, а затем моделируются и включаются в геометрическую модель робота.

Для измерения погрешностей позиционирования соединения его фактическое положение измеряется через равные промежутки времени в пределах заранее заданного стыкового пространства, затем измеренные значения вычитаются из соответствующих номинальных; результаты демонстрируют ошибки позиционирования соединения. Для измерения фактических положений i -го соединения, соединяющего $(i - 1)$ -е звено c_{i-1} звеном с заданными интервалами, применяется следующее уравнение:

$$\theta_m = \arccos \frac{\overrightarrow{O_i P_0}^T \overrightarrow{O_i P_m}}{|\overrightarrow{O_i P_0}|^2}, \quad (1.5)$$

где $\overrightarrow{O_i P_0}$ — вектор, соединяющий начало координат i -го сустава с положением цели, прикрепленной к i -у звену, когда соединение расположено в точке O_0 , и $\overrightarrow{O_i P_m}$ — вектор, соединяющий начало координат с положением цели после прохождения m интервалов. Знак θ_m определяется направлением вращения. Поскольку в этом эксперименте C-track используется для измерения положения тела, по крайней мере, три мишени C-track, прикрепленные к телу, должны быть видны камере C-track. C-Track вычисляет положение тела на основе положений прикрепленных целей. На рисунке 1.1 показано размещение мишеней C-Track на работе. Более того, поскольку положение мишени в точке P_m является средним значением положений, которые должны быть достигнуты мишенью, чтобы достичь P_m с обоих направлений соединения, влияние люфта зубчатых колес на измерение фактического положения соединения сводится к минимуму.

После выявления ошибок позиционирования узла разрабатывается численная регрессионная модель для моделирования этих ошибок. Эта модель не имеет никакого физического смысла, но может очень точно предсказывать погрешности соединения. Кроме того, эластичность суставов определяется отдельно и включается в регрессионную модель. Наконец, геометрическая

модель робота улучшена путем добавления модели ошибок позиционирования суставов.

Несмотря на то, что упругость основания робота была проигнорирована в этом исследовании, для полного изучения жесткости робота базовая жесткость изучается в следующем исследовании Раздел первый.

1.4.1 Базовая жесткость

Несмотря на то, что в учебниках по робототехнике основание робота рассматривается как твердое тело, неподвижное в своем положении, основание демонстрирует узнаваемый прогиб вращения при приложении к нему значительного крутящего момента. Действительно, поскольку манипулятор серийного робота относительно тяжелый, его вращение может создать большой крутящий момент на основании. Джадд и Кнасински определили прогиб основания как функцию конфигурации плеча, которая определяется координатами второго и третьего суставов. Они экспериментально изучили базовую жесткость робота AID-900 и заявили, что основным источником прогиба основания является радиальная жесткость подшипника первого шарнира, которая генерирует прогиб основания до 2 градусов при полном выдвижении руки перед роботом. Тем не менее, радиальная жесткость подшипника не является единственным источником прогиба основания, и жесткость других частей, например, балок, используемых для привинчивания робота к земле, также может быть эффективной. На рисунке 1.6 представлены возможные источники прогиба основания.

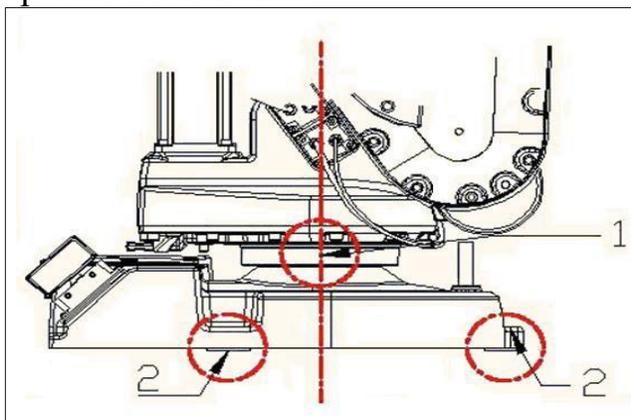


Рисунок 1.6 - Источники прогиба основания: опора первого стыка и балки прикручивают основание к земле

Прогиб основания при вращении можно измерить, наблюдая за положением двух различных точек, расположенных на нем, P_1 и P_2 . Если новое положение этих точек в результате крутящего момента, приложенного от веса

робота, показано по P_1' and P_2' формуле, то соответствующий прогиб основания при вращении вычисляется по уравнению 1.6.

$$\delta\theta_{Base} = \arccos \frac{\overrightarrow{P_2P_1}^T \overrightarrow{P_2'P_1'}}{|\overrightarrow{P_2P_1}|^2}, \quad (1.6)$$

где $\overrightarrow{P_2P_1}$ and $\overrightarrow{P_2'P_1'}$ – векторы, связывающие положения второй группы с первой группой до и после изменения конфигурации плеча. На рисунке 1.7 показаны положения P_1 и P_2 на основании робота. На рисунке 1.8 показан прогиб основания в результате вращения второго сустава при полном выпрямлении руки. На рисунке видно, что прогиб основания будет изменяться линейно по отношению к приложенному крутящему моменту.

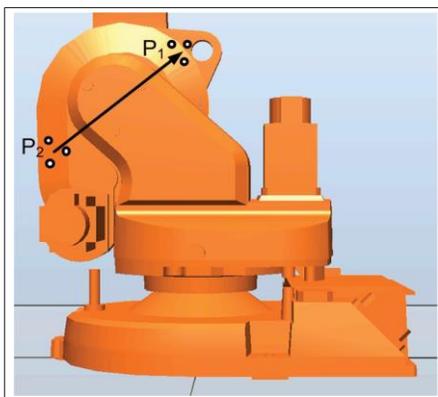


Рисунок 1.7- Положение двух целей на базе

Хотя вращательное отклонение базы влияет на точность позиционирования робота, основание робота можно смело принять за твердое тело. Действительно, поскольку вес рычага оказывает одинаковое крутящее время на основание и второй шарнир, вращательное отклонение основания будет постоянной долей вращательного прогиба второго шарнира. Более того, поскольку конфигурация основания по отношению ко второму шарниру в плоскости вращения рычага фиксирована, влияние прогиба основания на положение центральной точки инструмента не может быть отделено от влияния прогиба второго шарнира при вращении. В этом случае было бы разумно рассматривать основание как твердое тело, и совместить его вращательный прогиб с вращательным прогибом второго шарнира.

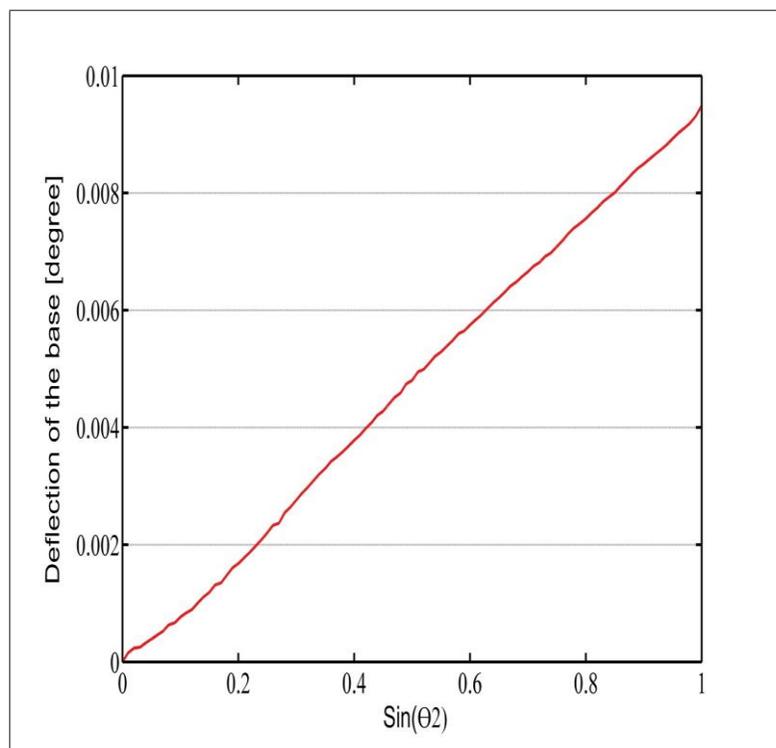


Рисунок 1.8-Вращательный прогиб основания по отношению к вращению второго шарнира

2 Неровности поверхности

Качество поверхности обрабатываемых деталей играет важную роль в их эксплуатационных характеристиках. Действительно, шероховатые поверхности механической системы увеличивают трение, шум и тепло. По этой причине было проведено множество научно-исследовательских работ по изучению влияния различных факторов обработки на качество обрабатываемых поверхностей; однако большая часть этих работ посвящена исследованию поверхностей, генерируемых станками или ЧПУ, и лишь немногие из них были посвящены изучению качества поверхности, создаваемой роботизированными системами обработки. В этой главе будет исследовано влияние динамических и кинематических свойств роботизированной фрезерной системы (рисунок 1) на качество поверхности.

Смещения соединений и звеньев серийного робота являются основными кинематическими ошибками, влияющими на точность позиционирования инструмента. При роботизированной обработке эти ошибки снижают точность размеров обрабатываемых деталей и приводят к ошибкам формы, которые не влияют на качество поверхности деталей; В то время как эксцентриситеты зубчатых колес, другой тип геометрических ошибок, влияют на качество поверхности. Этот тип ошибок приводит к тому, что инструмент роботизированной обрабатывающей системы движется по волнообразной траектории, а не по прямой линии, поэтому система генерирует шероховатые обработанные поверхности. Сламани и Бонев (2013) определили влияние эксцентриситетов зубчатых колес на движение серии ABB IRB1600 роботов. В их работе положение инструмента измерялось с точностью до миллиметра с помощью лазерного интерферометра, в то время как инструмент двигался по метровой прямой. На основе этих измерений был подготовлен профиль движения инструмента, а затем с применением алгоритма БПФ были обнаружены частоты доминирующих периодических волн, заложенных в профиль движения. Авторы пришли к выводу, что, поскольку частоты доминирующих периодических волн соответствуют скоростям вращения шестерен робота, эксцентриситеты зубчатых колес ответственны за волнообразность движения инструмента.

Динамические характеристики роботизированной обрабатывающей системы являются еще одним фактором, влияющим на качество обрабатываемых поверхностей. Динамические характеристики системы могут быть представлены ее собственными частотами. Фактически, собственные частоты системы демонстрируют частоты, на которых система может проявлять резонанс. Точно так же собственные частоты роботизированной фрезерной системы демонстрируют частоты, на которых система обработки резонирует и

генерирует высокоамплитудную вибрацию инструмента. Из-за такой большой вибрации теряется качество поверхности. Поэтому определение условий обработки, при которых процесс стабилен, было бы очень важным. Несмотря на то, что при применении консервативных параметров обработки можно сохранить стабильность обработки, выбор консервативных параметров нежелателен, так как это снижает производительность системы. Поэтому определение параметров обработки, гарантирующих как стабильность, так и производительность системы, является очень востребованным.

В этой главе будет рассмотрено влияние кинематического и динамического поведения серийного робота на качество обрабатываемых поверхностей. В первую очередь, чтобы достичь первоначального замысла, обработанные поверхности проверяются с помощью микроскопа. Далее поверхность срезов осматривается механическим профилировщиком, щупом, для подготовки поверхностных профилей. Плотность спектра мощности, ПСМ - то метод, который применяется к профилям для анализа встроенных неоднородностей. Усилия обработки являются еще одним критерием, который измеряется динамометрическим столом для исследования условий обработки. После выявления неровностей поверхности будут исследованы механизмы их образования. С этой целью кинематические и динамические свойства робота исследуются с помощью экспериментальных испытаний.

2.1 Экспериментальная установка

На рисунке 2.1 показана настройка экспериментального теста. В данном эксперименте использовался серийный робот ABB IRB 1600 – 6/1.45 выполняет операцию фрезерования пазов на алюминиевом блоке типа 6061-T6, установленном на динамометрическом столе Kistler типа 9255B. Динамометрический стол способен измерять составляющую сил резания по трем основным ортогональным осям: X, Y и Z. Кроме того, на запястье робота прикреплен датчик силы ATI, измеряющий как приложенные силы, так и крутящие моменты. Несмотря на то, что силы резания можно измерить с помощью обоих датчиков, динамометр более надежен, чем другой, из-за высокой частоты дискретизации. Фрезерный инструмент из твердого сплава с двумя канавками установлен на высокоскоростном шпинделе SLF FS33-60/0,15, который удерживается кронштейном из глинозема. Держатель оснащен устройством смены инструмента для облегчения установки и снятия держателя шпинделя.

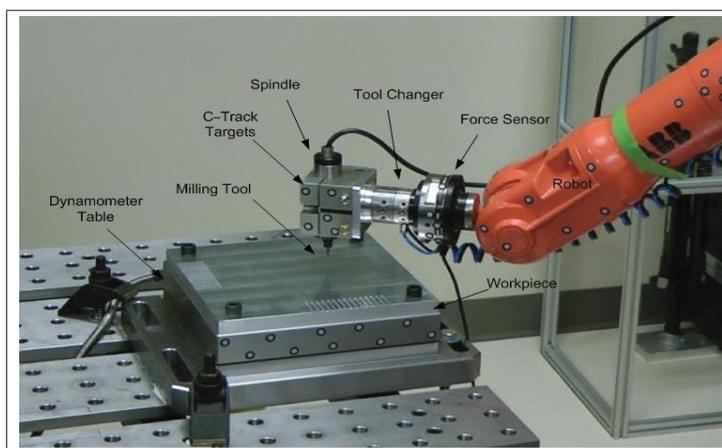


Рисунок 2.1-Экспериментальная установка

Эксперимент по механической обработке включает в себя три набора резаний, каждый из которых состоит из пяти U-образных сегментов, включающих три линейных резания в направлении $+Y$, $+X$ и $-Y$ (рисунок 2.2). Каждый набор пропилов имеет одинаковую глубину резания, в то время как скорость подачи варьируется в каждом сегменте. Таким образом, глубина первого набора разреза для всех его сегментов постоянна и равна $0,25 \text{ мм}$, в то время как скорость подачи вдоль пяти сегментов изменяется от 1 мм/сек до 5 мм/сек с шагом 1 мм/сек .

Скорость подачи второго комплекта резания изменяется так же, как и скорость подачи первого комплекта, в то время как глубина резания в два раза больше, $0,5 \text{ мм}$. Наконец, скорость подачи третьего комплекта резания в два раза превышает скорость подачи первого набора. На самом деле, они варьируются от 2 мм/сек до 10 мм/сек шага, 2 мм/сек , в то время как, глубина резания этого множества одинакова до глубины резания первого набора, которая равна $0,25 \text{ мм}$. Скорость вращения шпинделя для всех резов постоянна и равна 28000 об/мин .

Перед выполнением испытания на механическую обработку инструмент был откалиброван по отношению к алюминиевому блоку, который был привинчен к динамометру, установленному на столе. Для этого в углу блока была определена система отсчета R_0 , и по отношению к ней были откалиброваны направление и положение инструментальной рамы.

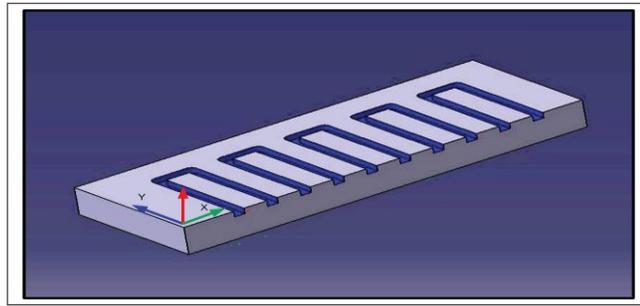


Рисунок 2.2-Экспериментальная обработанная деталь

2.2 Визуализация обработанных поверхностей

Оптико-цифровой микроскоп Olympus DSX 100 был использован для визуализации и увеличения неровностей, образующихся на обработанных поверхностях; микроскоп представлен на рисунке 2.3.

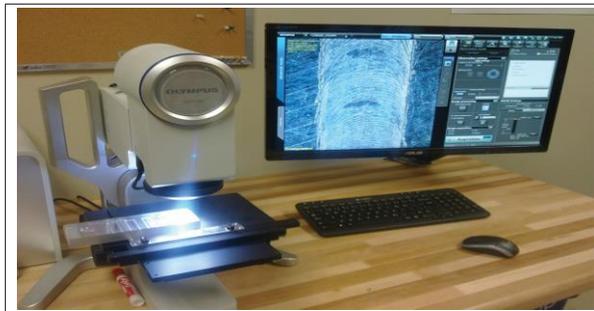


Рисунок 2.3-Оптико-цифровой микроскоп

Для сравнения качества поверхности роботизированной обрабатывающей системы с обычным станком с ЧПУ картина обрабатываемых поверхностей, генерируемых роботом и ЧПУ, представлена на рисунке 2.4. Применяемые параметры обработки одинаковы для обоих случаев, действительно, скорость вращения шпинделя, глубина резания и скорость подачи составляют 28000 об/мин, 0,25 мм и 4 мм/сек, соответственно. Что касается фигуры, то качество поверхности, создаваемой станком с ЧПУ, намного лучше, чем качество поверхности, создаваемой роботизированной системой обработки. Резкие следы инструмента на поверхности, обработанной роботизированной системой, демонстрируют наличие сильной вибрации инструмента на низкой частоте.

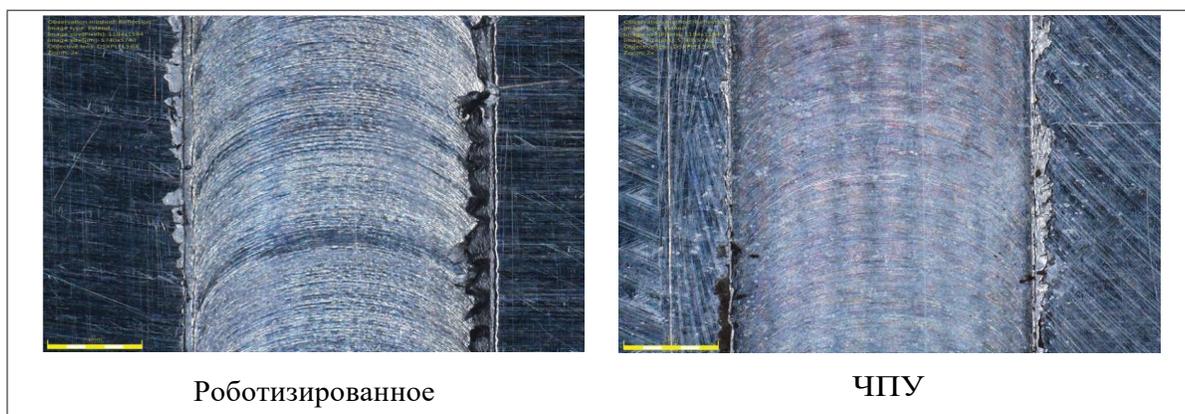


Рисунок 2.4-Поверхность, создаваемая роботизированной системой и обычным ЧПУ Желтые полосы на рисунке показывают 1 мм

Для того, чтобы лучше понять качество обработанных поверхностей, поверхности третьего набора пропилов представлены на рисунках 2.5, 2.6 и 2.7. Несмотря на то, что все рисунки свидетельствуют о низком качестве обработки поверхности, картина реза, обработанного максимальным уровнем скорости подачи, демонстрирует наихудшее качество поверхности.

Несмотря на то, что визуализация обработанных поверхностей дает общее представление о качестве поверхности разрезов, для получения более подробной информации о качестве поверхности необходимо применять точный метод. Для этого на следующем участке качество поверхности проверяется с помощью механического профилировщика поверхности.

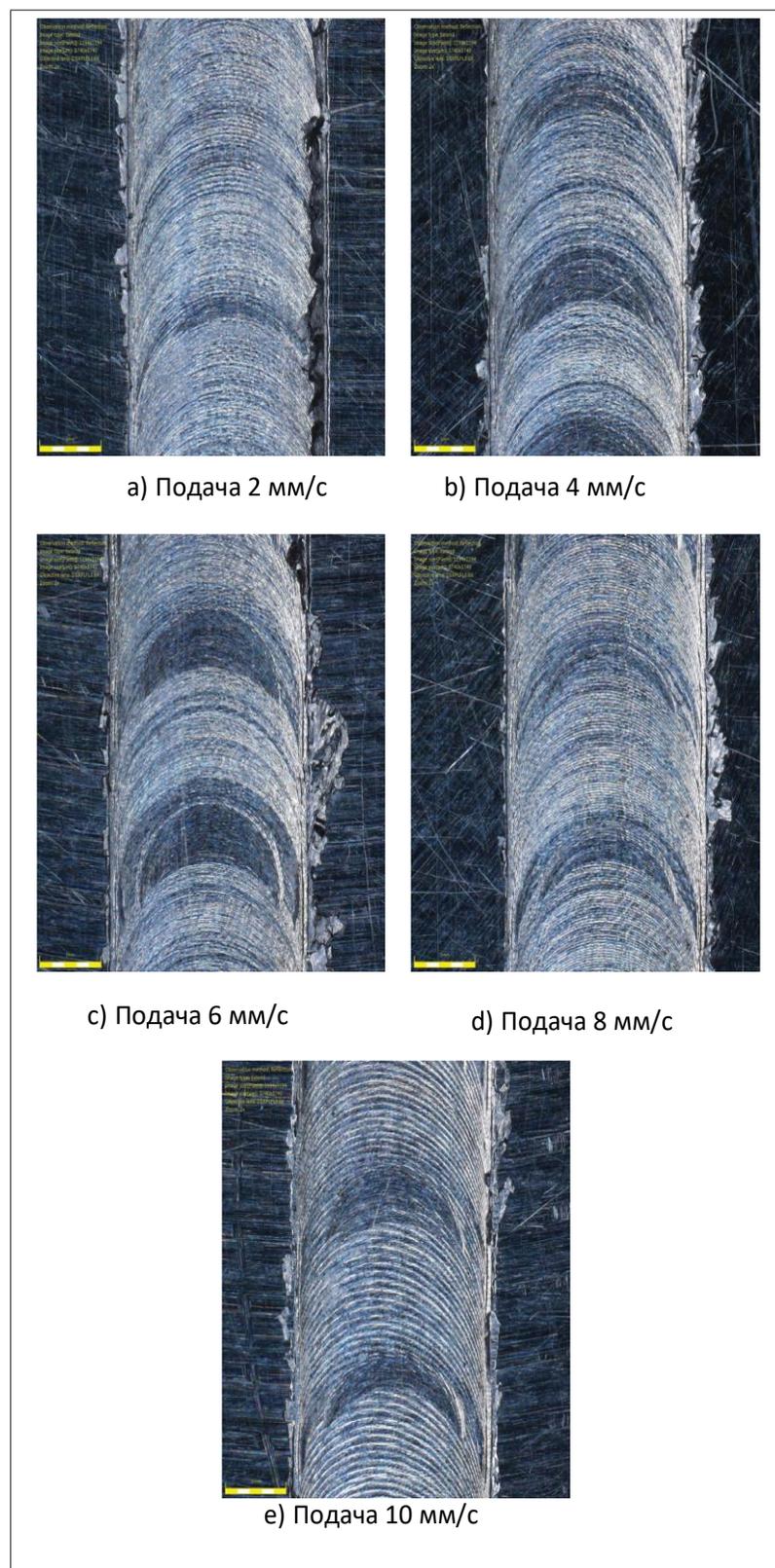


Рисунок 2.5-Обработанные поверхности в направлении +Y Глубина резания равна 0.25 мм. Желтые полосы имеют толщину 1 мм

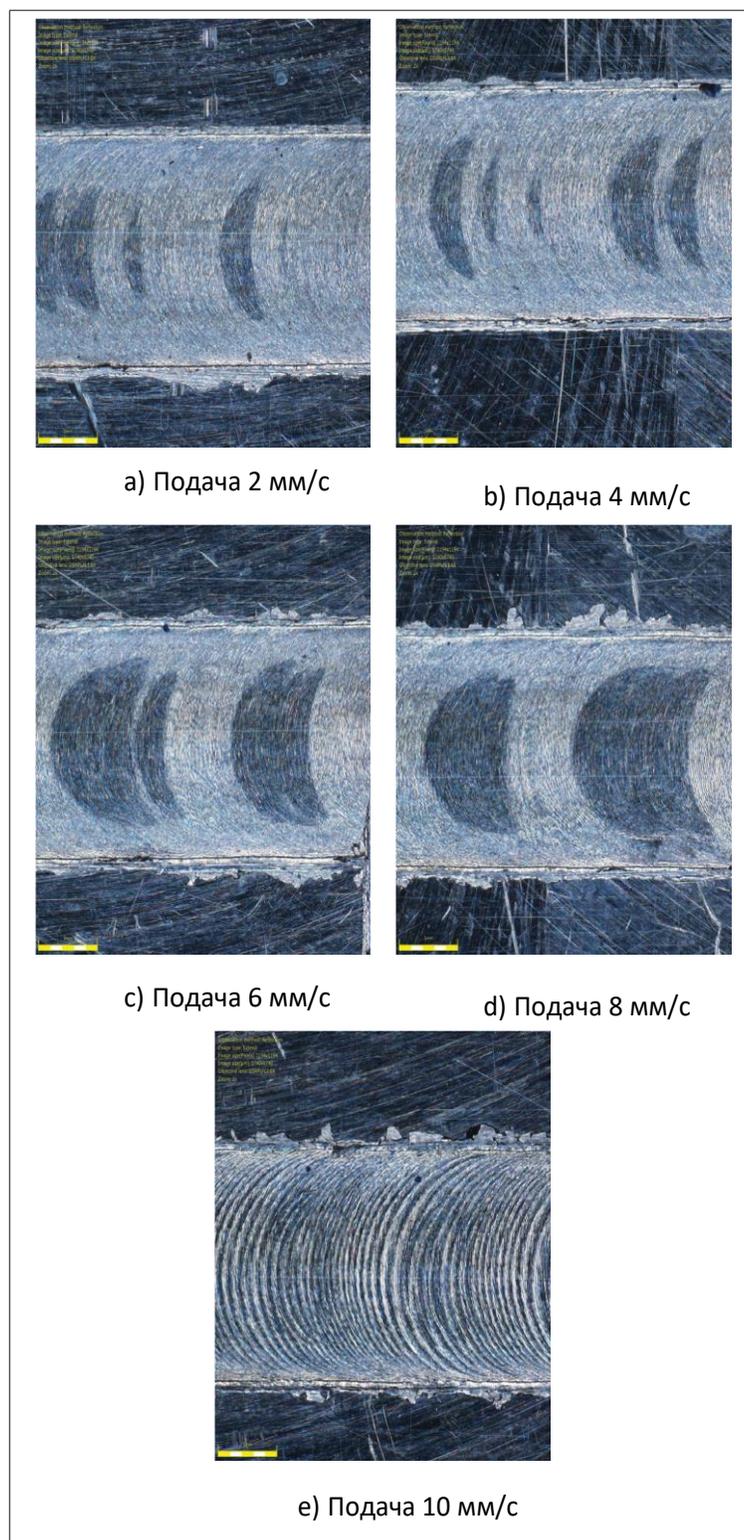


Рисунок 2.6-Обрабатываемые поверхности в направлении +X Глубина резания равна 0.25 мм. Желтые полосы имеют толщину 1 мм

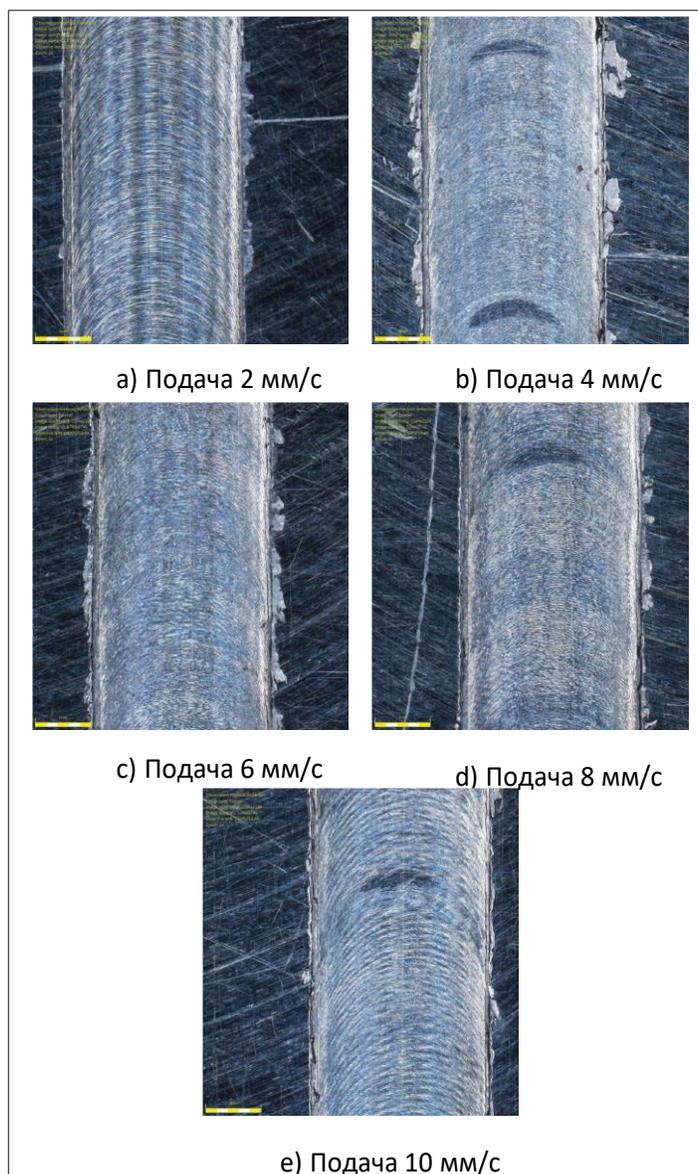


Рисунок 2.7- Обработанные поверхности в направлении –Y Глубина резания равна 0.25 мм. Желтые полосы имеют толщину 1 мм

2.3 Характеристика неровностей обрабатываемой поверхности

Несмотря на то, что микроскопическое изображение показывает общее состояние обрабатываемых поверхностей, механический профилограф, стилус, изображенный на рисунке 2.8, может предоставить больше информации о топологии обрабатываемых поверхностей. Это устройство состоит из острого зонда, линейно перемещаемого по исследуемой поверхности. Во время перетаскивания датчик перемещается вверх и вниз из-за неровностей поверхности, а его положение регистрируется через одинаковые промежутки времени по длине движения. Построение графика зависимости записанных

положений от длины перемещения позволяет получить двумерный график, демонстрирующий неровности поверхности. Этот график называется измеренным профилем поверхности.

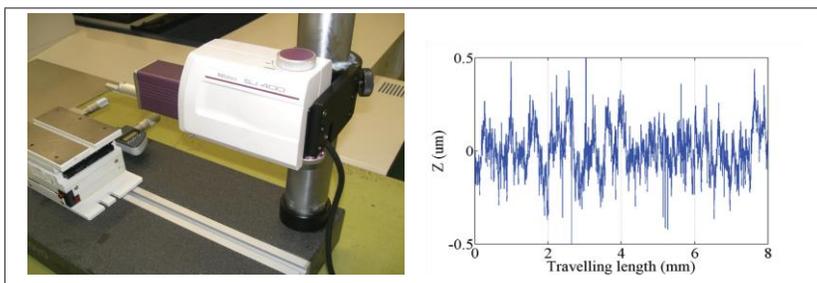


Рисунок 2.8-Щуп и профиль поверхности

Неровности поверхности, показанные измеренным профилем, можно разделить на волнистость и шероховатость. Волнистость- это большие периодические неровности, возникающие из-за вибраций или других вибраций, возникающих в процессе обработки. Шероховатость- это более мелкие периодические неровности, которые фактически накладываются на волнистость. Геометрия наконечника, скорость подачи и кинематика процесса обработки являются основными параметрами, влияющими на шероховатость. Направление неровностей является еще одним параметром, характеризующим топологию обрабатываемых поверхностей. Несмотря на то, что этот параметр влияет на качество поверхности, он не может быть обнаружен на 2-D профиле поверхности. Кроме того, геометрические ошибки системы обработки, например, непрямолинейность и неплоскостность направляющих в станках и смещения соединений и звеньев в роботах, приводят к ошибкам формы, размерам, не влияя на качество поверхности. Упругий прогиб, износ инструмента и несоосность инструмента и заготовки являются другими факторами, определяющими ошибки формы.

Согласно рисунку 2.9,а, измеренный профиль обработанной роботом поверхности имеет характерный наклон, который можно показать красной кривой. Эта ошибка, которая в основном возникает из-за наклонного движения датчика профилографа по отношению к целевой поверхности, формирует форму профиля. Поскольку эта лежащая в основе форма влияет на все измеренные значения, ее необходимо удалить. В этой работе была применена функция Matlab, *detrend()*, для устранения наклона профиля. На рисунке 2.9,б показан профиль без тренда.

После *detrending*, профиль поверхности фильтруется, чтобы лучше отличать волнистость от шероховатости. Действительно, в случае, когда основные неровности скрыты под более мелкими, применяется фильтр низких

частот для того, чтобы отсечь более мелкие неровности. Однако волнистость профиля, представленного на рисунке 2.9,b, характерна, поэтому фильтрация не требуется.

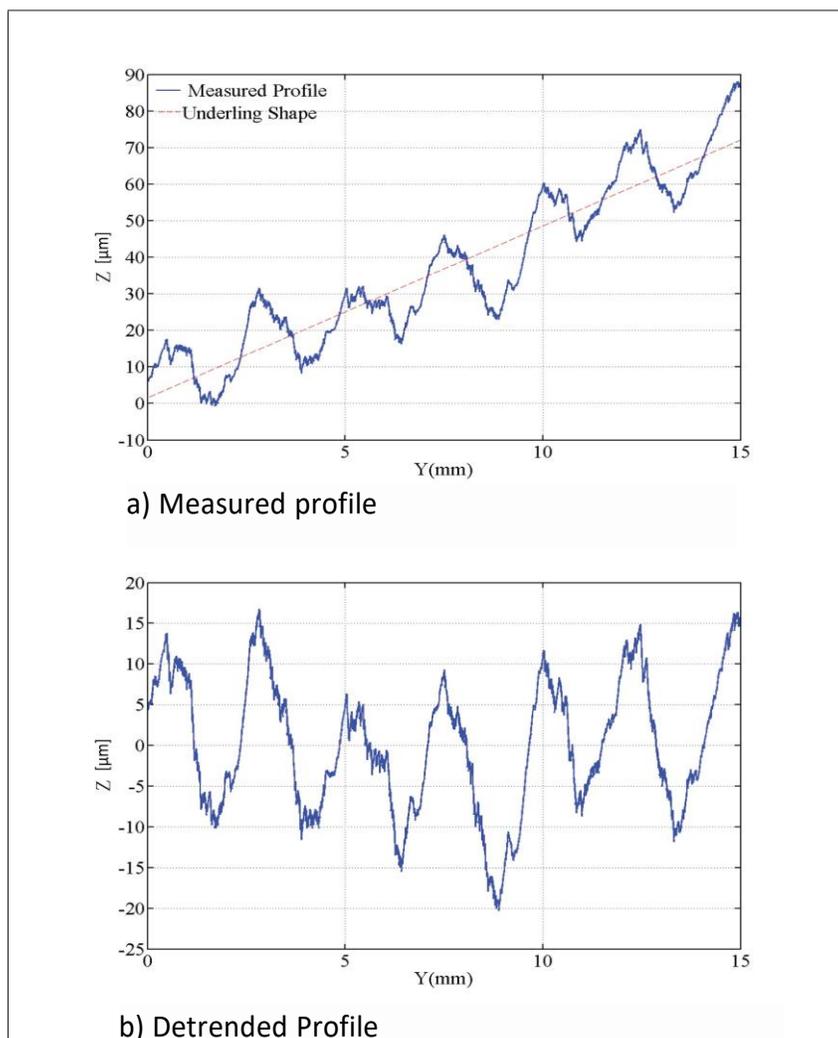


Рисунок 2.9 Измеренный профиль и профиль без тренда

Профили обрабатываемых поверхностей представлены на рисунках 2.13, 2.14, 2.15. Для измерения каждого профиля соответствующую обрабатываемую поверхность помещали под датчик механического профилировщика таким образом, чтобы зонд двигался в том же направлении, что и направление подачи резания, представленное на рисунке 2.10. Что касается цифр, то можно отметить, что основные неровности, волнистость, являются периодическими, а их длины волн почти одинаковы и составляют около 2,5мм. Равенство длин волн доказывает, что какие-то периодические кинематические ошибки обрабатывающей системы, которые будут устранены позже, образуют эти неравномерности, и динамические ошибки не ответственны за их

возникновение. На самом деле, поскольку скорость подачи инструмента не влияет на длину волны основных неоднородностей, можно сделать вывод, что образование этих неровностей связано с положением суставов, а не с их производными.

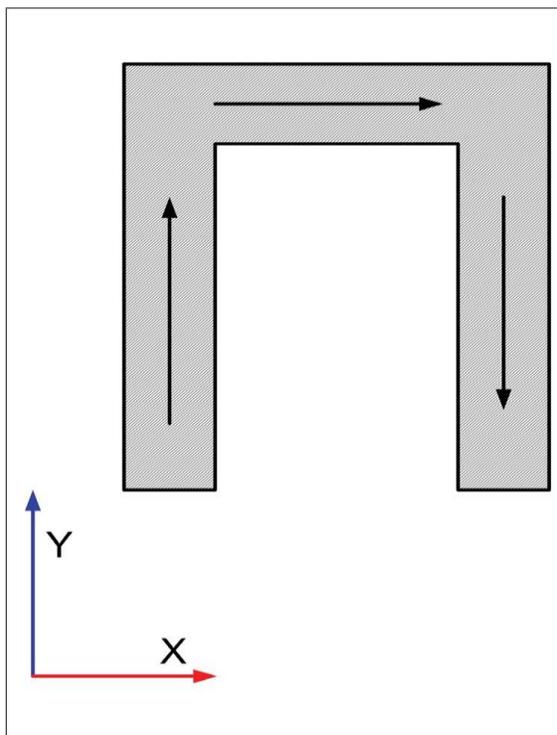


Рисунок 2.10-Направления движения датчика

На рисунке 2.11 волнистость профиля, представленного на рисунке 2.15,а, более четко показана красной кривой. Максимальное расстояние между пиками и впадинами профиля волнистости определяется как максимальная высота, обозначаемая W_t . Эта величина варьируется от нескольких микрометров до нескольких десятков микрометров в зависимости от направления резания; действительно, обработка в направлении X соответствует минимальным значениям W_t , в то время как обработка в направлении $+Y$ обеспечивает максимальное значение.

Длины волн более мелких неровностей изменяются в зависимости от различных уровней скоростей подачи. Из рисунка 2.12 видно, что длина волны шероховатости поверхности, обработанной с использованием минимальной скорости подачи, чрезвычайно короче, чем у поверхности, обработанной с применением максимальной скорости. Таким образом, можно утверждать, что производные от суставных положений эффективны по качеству поверхности. Поэтому необходимо учитывать динамические характеристики робота.

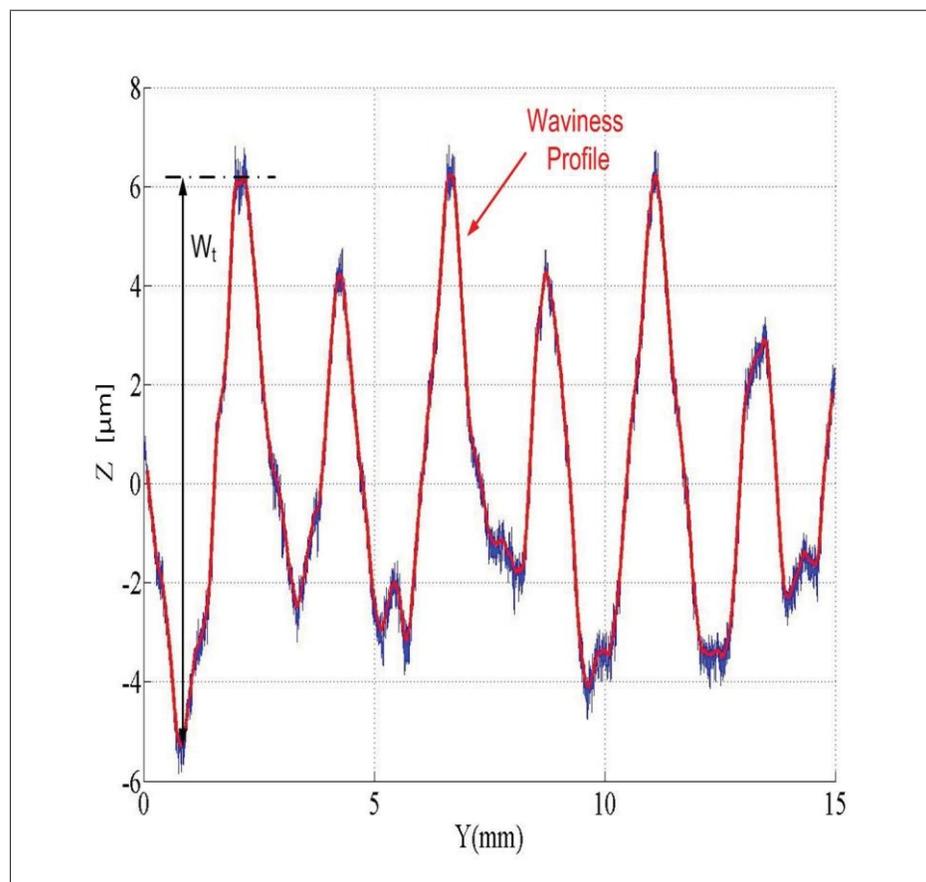
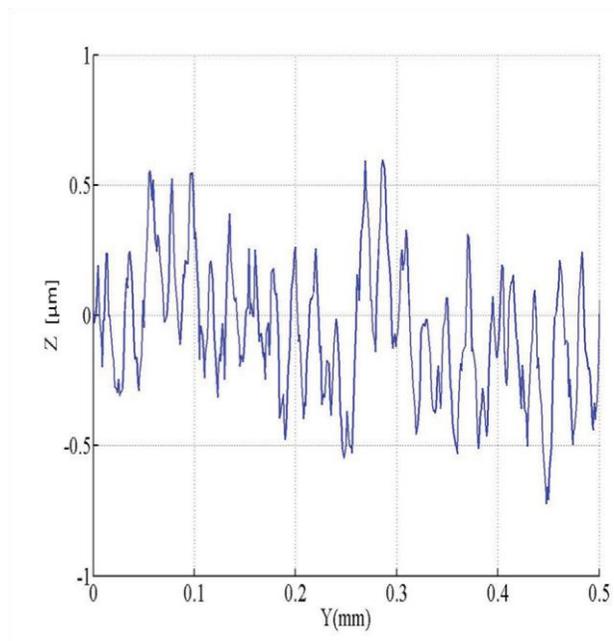
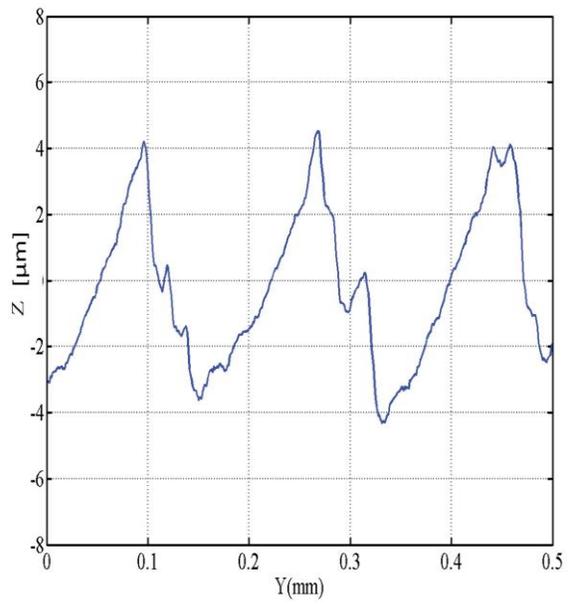


Рисунок 2.11-Профиль волнистости

Как правило, шероховатость и волнистость профиля определяются с помощью фильтра Гаусса. Таким образом, отсечная длина волны λ_c определяет границу между этими двумя типами неоднородностей. Действительно, неровности, длина волны которых больше λ_c , признаются волнистостью, а неровности, волнистость которых меньше λ_c , считаются неровностями шероховатости. Несмотря на то, что фильтрация определяет волнистость и шероховатость профиля поверхности, этот метод не может предоставить полезную информацию о механизмах образования неровностей. Быстрое преобразование Фурье, которое является численным методом, применяемым для анализа цифровых сигналов, используется в этой главе для анализа качества поверхности обрабатываемых деталей. В следующем разделе будет объяснено применение этого метода при анализе качества поверхности



а) Профиль шероховатости. Скорость подачи 2 мм/сек, глубина резания 0,25 мм.



б) Профиль шероховатости. Скорость подачи 10 мм/сек, глубина резания 0,25 мм.

Рисунок 2.12-Профиль шероховатости

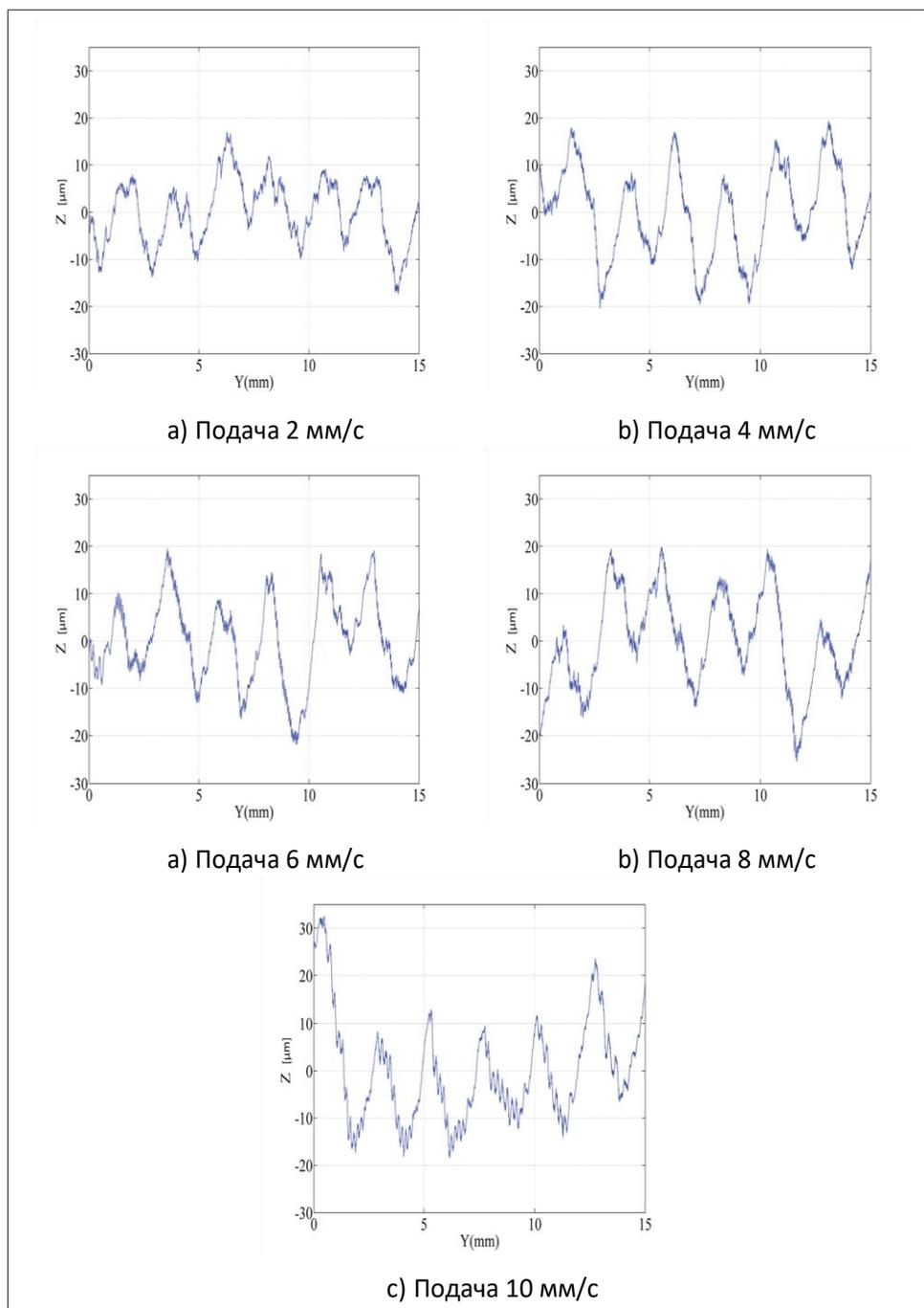


Рисунок 2.13-Профиль резания в направлении +Y, глубина резания 0,25 мм и частота вращения шпинделя 28000 об/мин

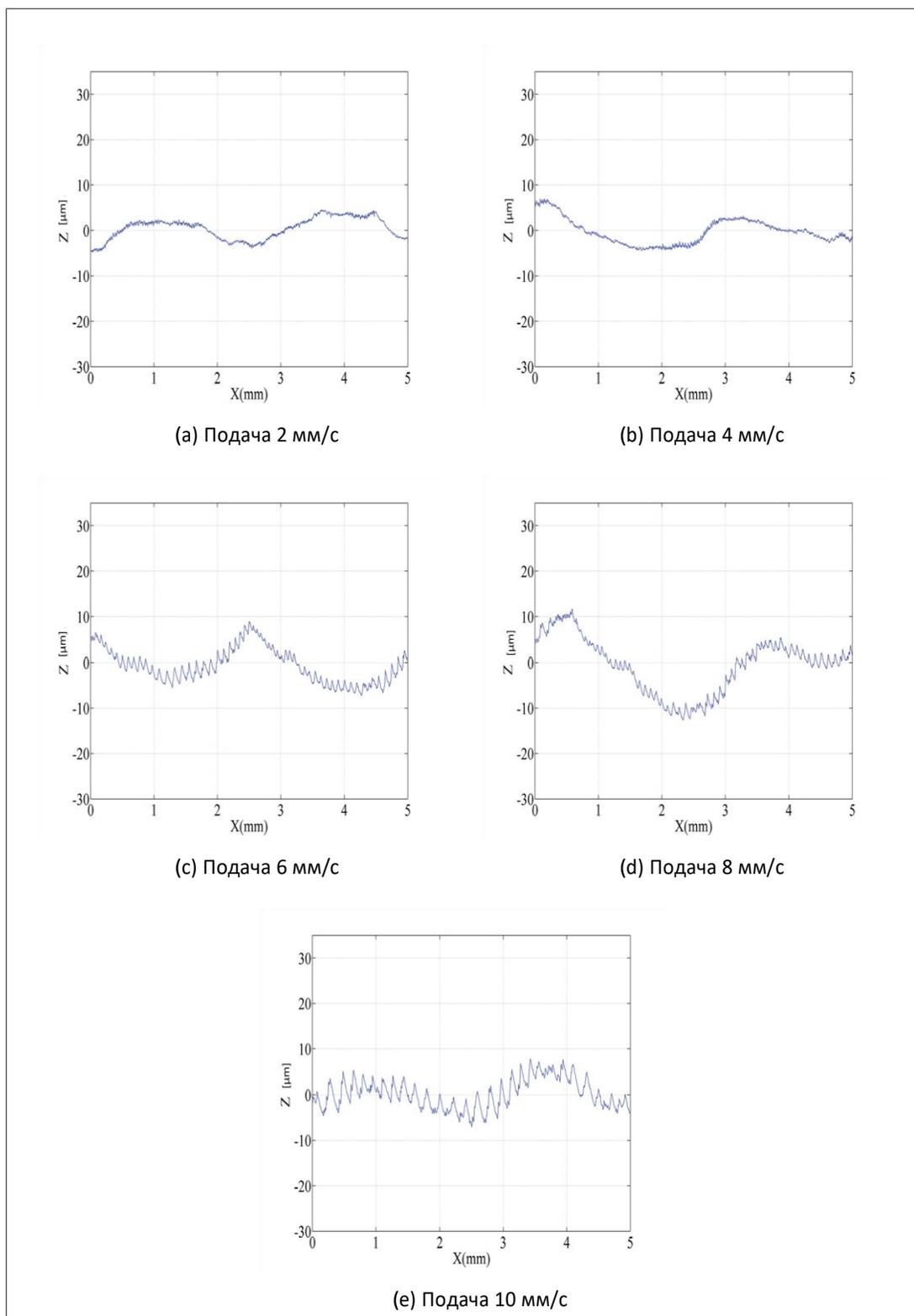


Рисунок 2.14-Профиль резания в направлении +X, глубина резания 0,25 мм и частота вращения шпинделя 28000 об/мин

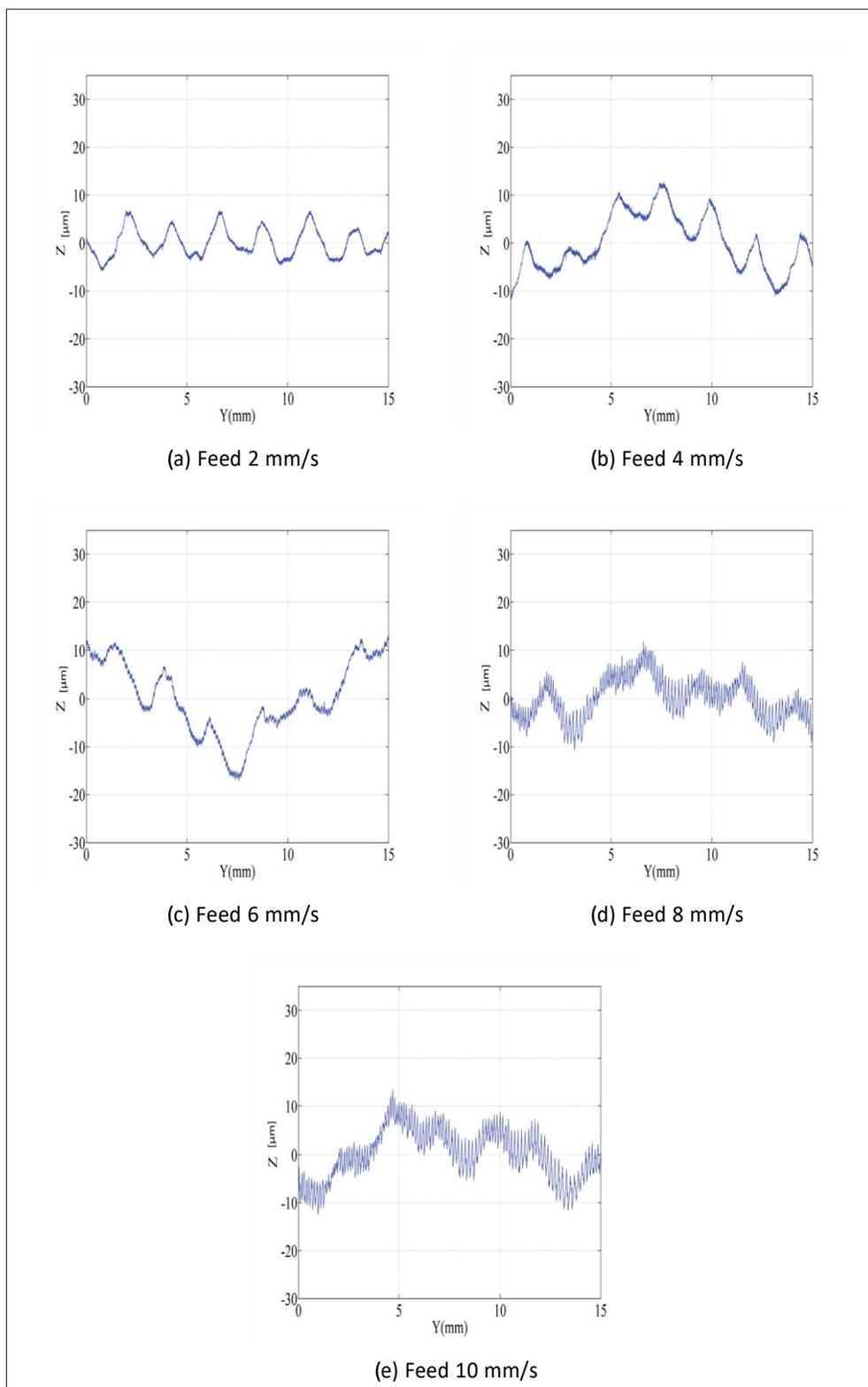


Рисунок 2.15-Профиль резания в направлении $-Y$, глубина резания 0,25 мм и частота вращения шпинделя 28000 об/мин

2.3.1 Анализ спектральной плотности поверхности профилей

Несмотря на то, что фильтрация не дает надлежащей информации о формирующих компонентах профиля поверхности, спектральный анализ, который является методом обработки сигналов, разлагает профиль поверхности на составляющие. Этот метод преобразует периодический сигнал, измеренный в дискретной временной или пространственной области, в его гармонические компоненты в соответствующей частотной области. Таким образом, поскольку движение фрезерного инструмента по обрабатываемой поверхности представляет собой комбинацию гармонических движений, спектральный анализ профиля поверхности может выявить влияние гармонических движений на поверхность. Фактически, спектральный анализ профиля поверхности позволяет получить спектр мощности или энергии профиля в зависимости от пространственной частотной области; Частоты максимальных точек спектра демонстрируют частоты гармонических составляющих.

Дискретное преобразование Фурье, ДПФ, является основным ядром спектрального анализа. ДПФ преобразует действительные величины дискретного сигнала, упорядоченные во временном или пространственном ряду, в комплексные числа, известные как коэффициенты ДПФ, упорядоченные по временной частоте или пространственному частотному ряду, уравнение 2.1 показывает формулу ДПФ:

$$Z(k) = \sum_{n=0}^{N-1} z(n)e^{-j\frac{2\pi kn}{N}} \quad (2.1)$$

где $k = 0, 1, \dots, N - 1$, $Z(k)$ — k -й коэффициент, $z(n)$ — дискретный сигнал, N — количество отсчетов. Как было описано ранее, ДПФ передает сигнал из дискретной временной или пространственной области в соответствующую частотную область. Поэтому необходимо рассчитать соответствующую частоту коэффициента ДПФ. Частота k -го коэффициента определяется f_s как kf_0 , где f_0 — основная частота, равная $\frac{1}{N}$, где: f_s — частота дискретизации N .

Как правило, фаза или амплитуда коэффициента ДПФ представлены в спектре, и построение графиков коэффициентов ДПФ, которые являются комплексными числами, не является континентом. Амплитуда коэффициента ДПФ вычисляется так же, как и для комплексных чисел. Однако в спектральном анализе более желательна нормированная амплитуда коэффициента; Уравнение 2.2 дает нормированную амплитуду:

$$A(k) = \frac{1}{N} |Z(k)| = \frac{1}{N} \sqrt{(\text{Real}(Z(k)))^2 + (\text{Imag}(Z(k)))^2} \quad (2.2)$$

Спектр мощности — еще одна диаграмма, распространенная в спектральном анализе. Нормированную мощность коэффициента ДПФ можно рассчитать по уравнению 2.3:

$$P(k) = \frac{1}{N^2} |Z(k)|^2 = \frac{1}{N^2} (\text{Real}(Z(k))^2 + (\text{Imag}(Z(k)))^2) \quad (2.3)$$

Действительно, плотность спектра мощности является приемлемым методом для анализа неровностей профиля обработанной поверхности. Плотность спектра мощности, ПСМ, профиля поверхности демонстрирует частоты неоднородностей, встроенных в профиль.

По сути, частоты пиков спектра демонстрируют частоту неровностей профиля поверхности. Единицей измерения мощности поверхностного профиля является мкм^2 , а единицей измерения частот — мм^{-1} . На рисунке 2.16 представлен спектр мощности профиля, представленного на рисунке 2.10b. Частота дискретизации или частота дискретизации, f_s и номер дискретизации N равны 800 мм^{-1} и 12000 соответственно. Исходя из частоты дискретизации и количества выборок, основная частота, f_0 , равна 0.067 мм^{-1} .

Следует отметить, что, поскольку спектр симметричен вокруг, $\frac{f_s}{2}$ частотная область спектра охватывается от 0 to $\frac{f_s}{2}$. Расширенный спектр от 0 to $\frac{f_s}{2}$ называется односторонним.

Несмотря на то, что коэффициенты ДПФ могут быть вычислены непосредственно по уравнению 2.1, на практике алгоритм БПФ используется для вычисления коэффициентов быстрее, чем прямой метод. Объяснение этого алгоритма выходит за рамки данного исследования; тем не менее,

заинтересованные читатели могут обратиться к Tan (2013). В этой работе $fft()$, которая является функцией Matlab, использовалась для вычисления коэффициентов ДПФ измеренных профилей.

Спектры мощности профилей поверхности будут представлены в следующем разделе. Однако, поскольку частоты доминирующих пиков очень низкие, как показано на рисунке 2.16, левая часть каждого спектра увеличена для лучшей идентификации неровностей. Для этого каждый спектр строится в двух различных частотных областях. Первый домен, который представляет крайнюю левую часть спектра мощности, охватывается от 0 до 1 мм^{-1} .

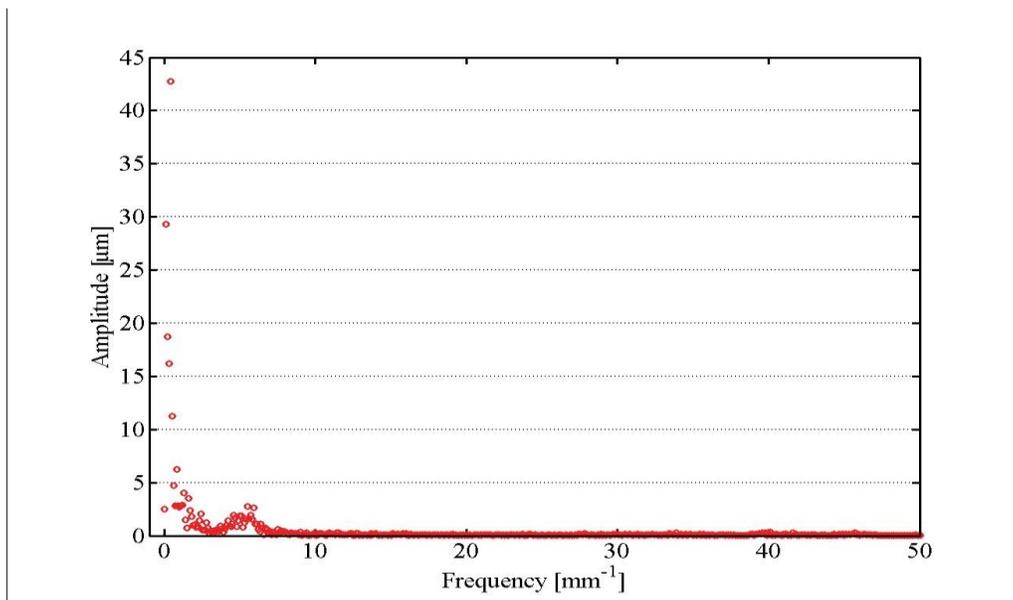
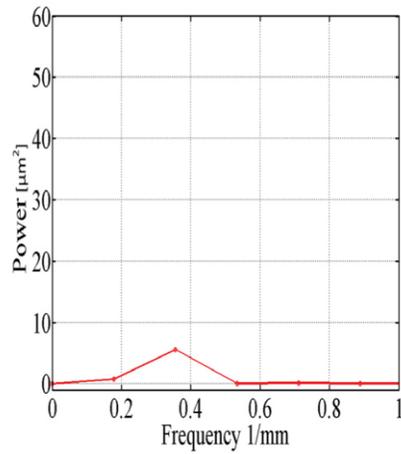
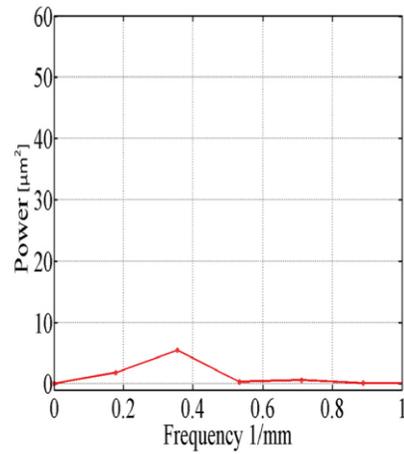


Рисунок 2.16-Спектр мощности на рисунке 2.9,b

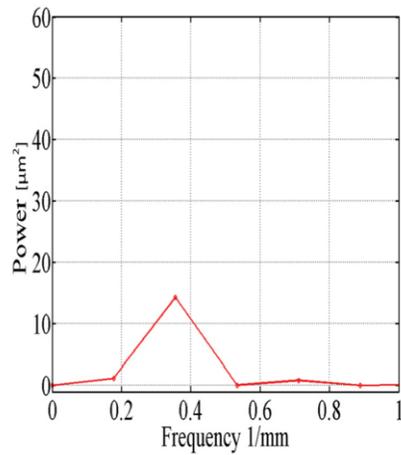
Поскольку длины волн пиков, расположенных в этом диапазоне, являются самыми длинными, предполагается, что в этом диапазоне будут обнаружены неравномерности волнистости. Следующая область охватывает диапазон от 0 до 30 мм^{-1} , и предполагается, что этот диапазон охватывает неровности шероховатости. Цифры силовых спектров третьей серии разрезов представлены на рисунках 2.17, 2.18, 2.19, 2.20, 2.21.



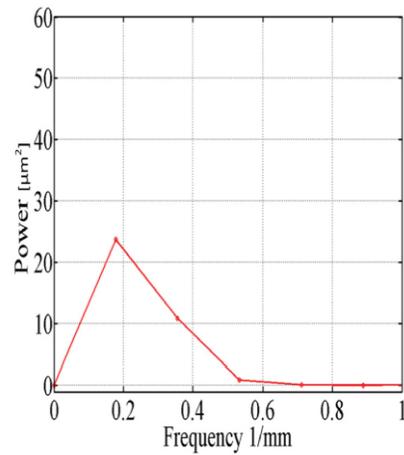
а) Подача 2 мм/с



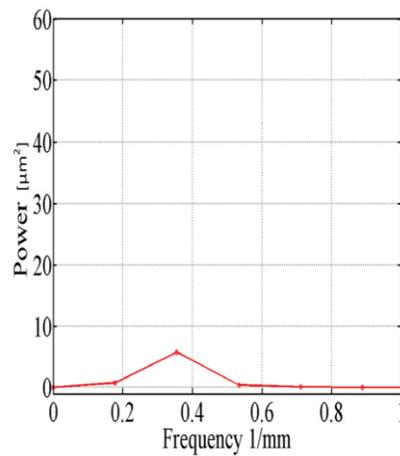
б) Подача 4 мм/с



а) Подача 6 мм/с

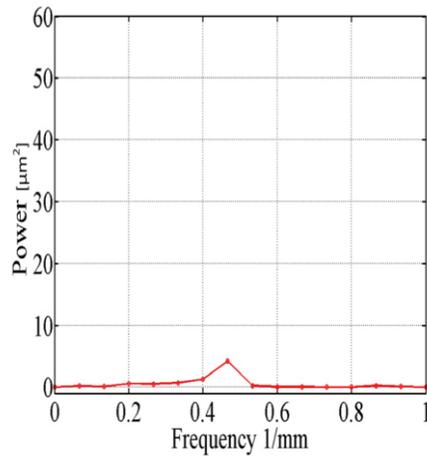


б) Подача 8 мм/с

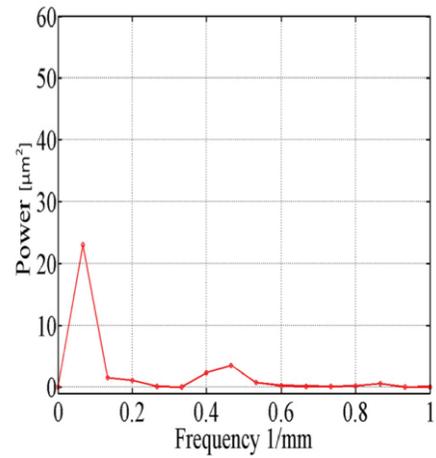


с) Подача 10 мм/с

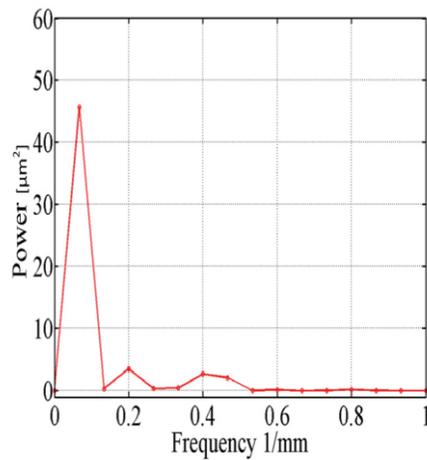
Рисунок 2.17-Спектр мощности пропилов в направлении +X, глубина резания 0,25 мм и частота вращения шпинделя 28000 об/мин



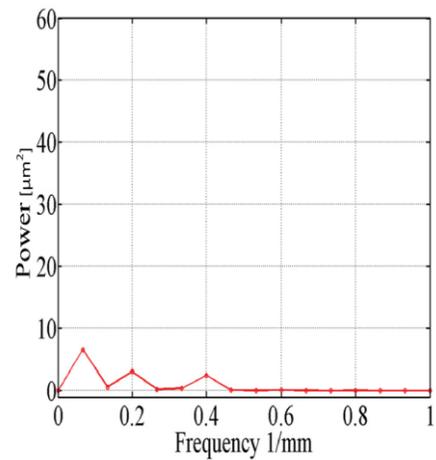
a) Подача 2 мм/с



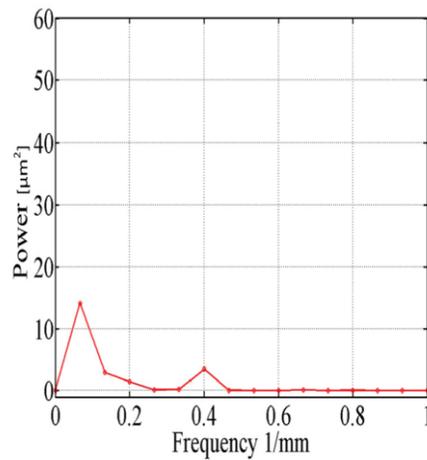
b) Подача 4 мм/с



a) Подача 6 мм/с

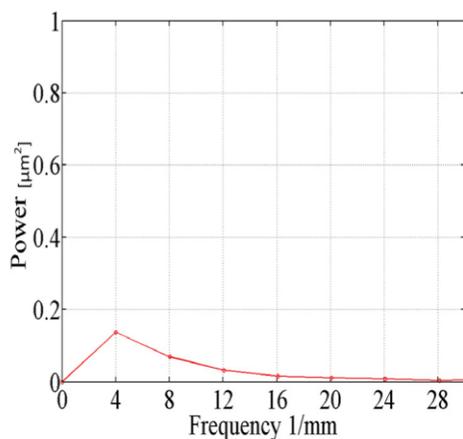


b) Подача 8 мм/с

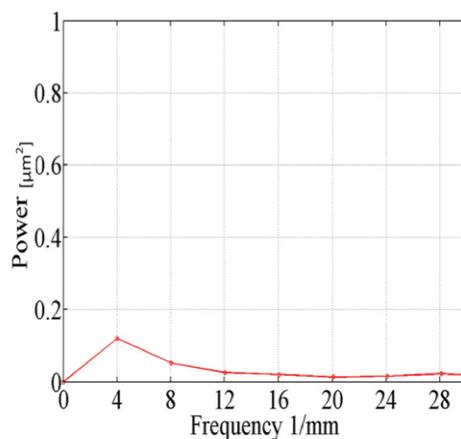


с) Подача 10 мм/с

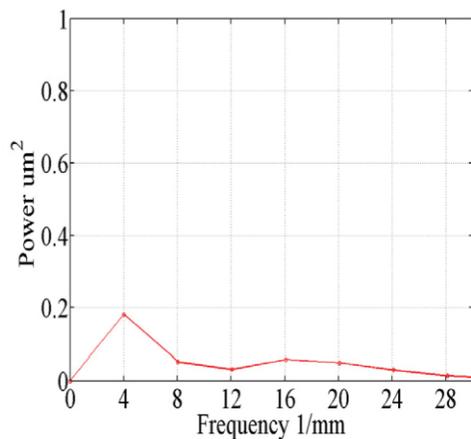
Рисунок 2.18-Спектр мощности резания в направлении –Y, глубина резания 0,25 мм и частота вращения шпинделя 28000 об/мин



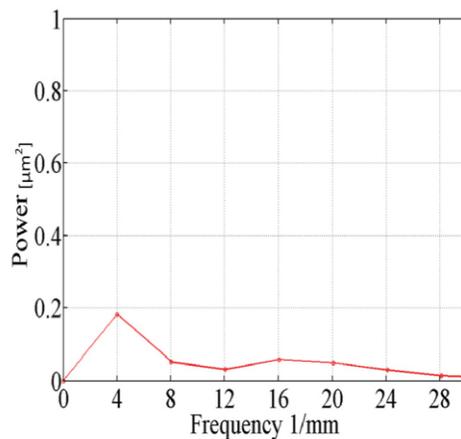
a) Поддача 2 мм/с



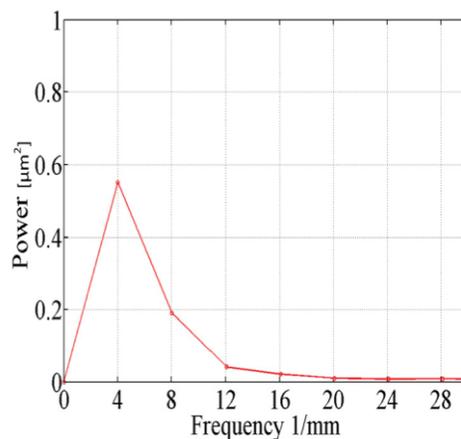
b) Поддача 4 мм/с



a) Поддача 6 мм/с



b) Поддача 8 мм/с



c) Поддача 10 мм/с

Рисунок 2.19-Спектр мощности резания в направлении +Y, глубина резания 0,25 мм и частота вращения шпинделя 28000 об/мин

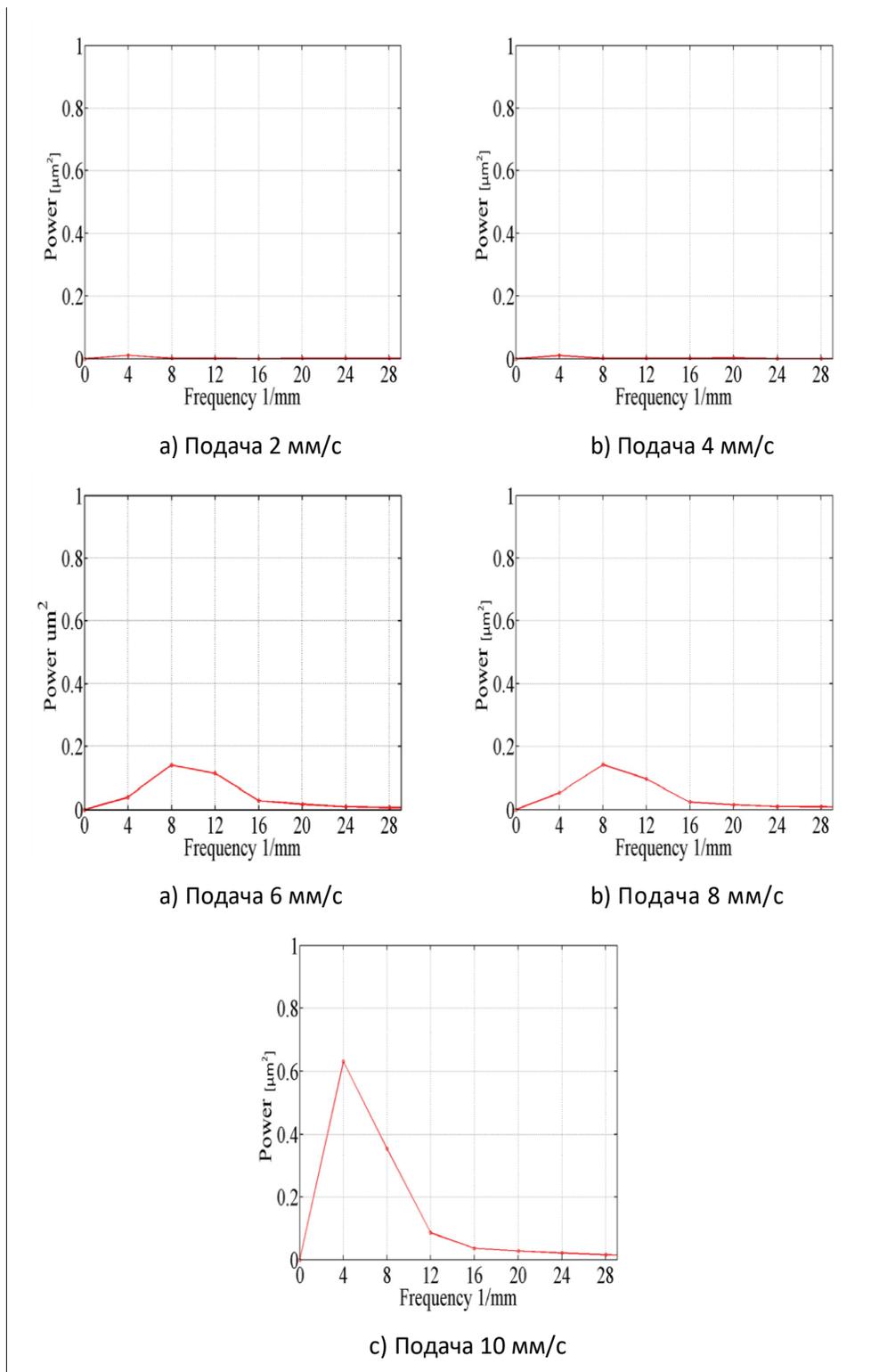


Рисунок 2.20-Спектр мощности резания в направлении X, глубина резания 0,25 мм и частота вращения шпинделя 28000 об/мин

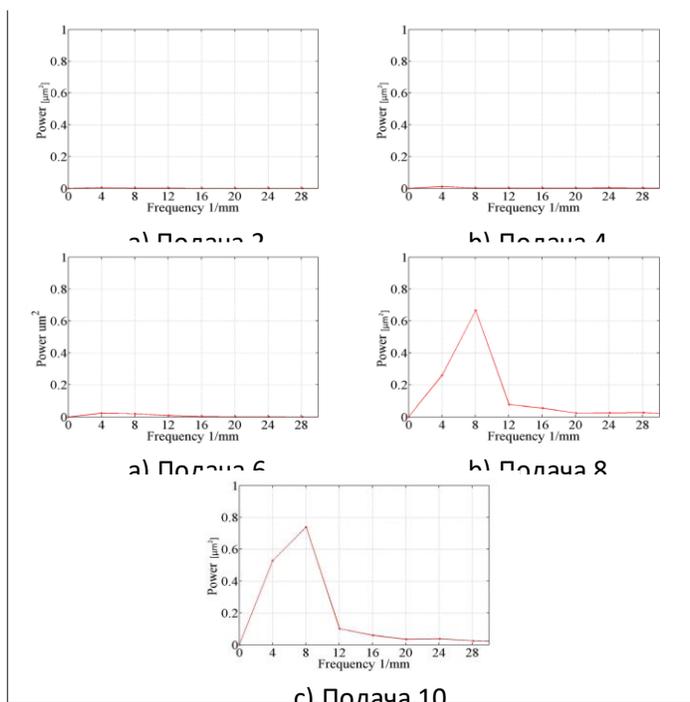


Рисунок 2.21-Спектр мощности резания в направлении $-Y$, глубина резания 0,25 мм и частота вращения шпинделя 28000 об/мин

2.3.2 Среднеквадратичное значение нарушений

Применение ДПФ для анализа обработанной поверхности является распространенным подходом. Действительно, некоторые исследователи, такие как Элсон и Беннетт (1995), использовали ДПФ для вычисления среднеквадратичного значения неровностей поверхности. Исходя из теоремы Парсеваля, сумма квадратов дискретного ряда чисел равна сумме квадратов связанных коэффициентов ДПФ, следовательно, если $z(n)$ демонстрирует ряд профиля поверхности, а $Z(k)$ демонстрирует ряд связанных коэффициентов ДПФ, то:

$$\sum_{n=0}^{N-1} z(n)^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} |Z(k)|^2 \quad (2.4)$$

Кроме того, среднеквадратичное значение неровностей профиля поверхности, например, профиля шероховатости, можно рассчитать по уравнению 2.5:

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} z(n)^2} \quad (2.5)$$

Объединение эквалайзеров. 2.3, 2.4 и 2.5, итоговое уравнение, связывающее мощность коэффициентов ДПФ со среднеквадратичным значением неровностей поверхности:

$$R_q = \sqrt{\sum_{k=0}^{N-1} P(k)} \quad (2.6)$$

Хотя теоретически среднеквадратичное значение неровностей профиля может быть рассчитано через степень коэффициентов ДПФ, на практике, из-за непериодических неоднородностей профиля, результирующее среднеквадратичное значение ненадежно. Увеличение количества образцов снижает достоверность измерений. Однако увеличение количества сокращений требует больше времени и усилий, а в некоторых случаях даже нецелесообразно. Разделение профиля разреза на сегменты одинаковой длины позволяет получить больше образцов без каких-либо дополнительных затрат. Затем, применяя спектральный анализ к сегментам, можно получить более достоверный результат.

С помощью предложенной методики был проведен анализ СКЗ неоднородностей трех серий разрезов, результаты представлены в таблицах 2.1 и 2.2. В таблице 2.1 показано среднее среднеквадратичное значение профилей, полученное при разбиении измеренных профилей на детерминированные сегменты, имеющие 2,5 мм, а в таблице 2.2 представлено *среднеквадратичное значение* детерминированных сегментов, равное 0. Длина 25 мм. Сравнение результатов показывает, что обработка в направлении +Y создает более шероховатую поверхность, чем обработка в других направлениях; более того, увеличение скорости подачи увеличивает амплитуду неровностей.

Таблица 2.1-RMS [мкм] волнистости

Резать	Первый			Второй			Третий		
	+X	+Y	-Y	+X	+Y	-Y	+X	+Y	-Y
1	0,61	2,95	2,17	1,02	3,02	1,40	1,24	5,07	2,45
2	0,95	4,85	2,91	1,27	4,38	2,13	1,42	6,81	2,60
3	1,25	6,43	3,39	1,78	5,51	2,21	2,30	6,50	2,21
4	1,00	6,52	1,90	1,64	5,77	2,07	2,36	5,51	2,28
5	1,15	6,17	1,31	2,55	6,06	1,92	2,20	6,77	2,41

Таблица 2.2RMS [мкм] шероховатости

Резать	Первый			Второй			Третий		
	X	+Y	-Y	X	+Y	-Y	X	+Y	-Y
1	0,18	0,59	0,26	0,23	0,70	0,33	0,25	0,76	0,24
2	0,20	0,72	0,27	0,27	0,81	0,27	0,27	0,77	0,32
3	0,20	0,75	0,30	0,27	0,77	0,34	0,84	0,90	0,39
4	0,23	0,88	0,18	0,30	0,87	0,40	0,84	0,88	1,51
5	0,26	0,79	0,21	0,33	1,21	0,37	1,51	1,21	1,74

3 Анализ качества поверхностей для исследования условий резания

3.1 Силы резания

В предыдущем разделе был проведен анализ качества поверхностей для исследования условий резания. Однако анализ обрабатываемых поверхностей не является единственным критерием, определяющим условия обработки; Действительно, для этой цели можно использовать и другие критерии, такие как усилия обработки или шум обработки. Любое изменение параметров резания напрямую влияет на силы резания. Это свидетельствует о том, что любой тип вибрации или вибрации инструмента, изменяющий параметры резания, может быть обнаружен при правильном измерении и анализе сил резания.

В этом разделе будут исследованы условия обработки роботизированной фрезерной операции путем анализа сил, улавливаемых динамометрическим столом, а также исследуется влияние вибрации инструмента на измеряемые силы. Однако сначала кратко объясняются основы сил резания при фрезеровании.

3.1.1 Основы сил резания при фрезеровании

Кинематика операции роботизированного фрезерования создается вращательным движением инструмента вокруг оси инструмента и относительным движением между инструментом и заготовкой. Механика винтовых концевых фрез была изучена в Altintash (2000); однако, как и в нашем случае, осевая глубина резания значительно меньше его диаметра, уравнение 3.1, которые являются более простыми, могут быть применены:

$$\begin{aligned}F_t(\varphi) &= K_{tc}ah(\varphi) + K_{te}a, \\F_r(\varphi) &= K_{rc}ah(\varphi) + K_{re}a, \\F_a(\varphi) &= K_{ac}ah(\varphi) + K_{ae}a,\end{aligned}\tag{3.1}$$

где, F_t , F_r и F_a –силы, действующие на зубья инструмента соответственно в тангенциальном, радиальном и осевом направлениях, а φ – угол погружения, определяющий угловое положение зубов. Тангенциальная и радиальная силы представлены на рисунке 3.1, но осевая сила не представлена, так как она перпендикулярна поверхности. Силы резания, измеренные в направлениях X и Y , F_x и F_y , являются суммой радиальных и тангенциальных сил, которые проецируются на эти оси. Однако измеренные силы в осевом направлении F_a

просто представляют собой силы резания в направлении Z . Согласно уравнению 3.1, силы резания при фрезеровании являются периодическими, так как толщина стружки периодически изменяется по отношению к углу погружения, $h(\varphi) = c \sin(\varphi)$, где c — скорость подачи на зубья.

Период сил резания определяется скоростью вращения шпинделя, углом погружения и количеством канавок. В этом эксперименте скорость вращения шпинделя составляет 28000 об/мин, угол погружения составляет π .

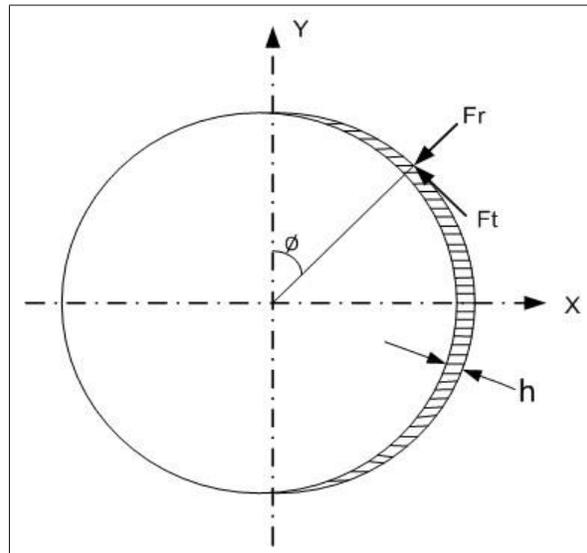


Рисунок-3.1 Тангенциальные и радиальные силы при фрезеровании

Количество флейт – две. На основе этой информации на рисунке 3.2 была смоделирована форма сил резания в направлении Z , независимо от ее амплитуды.

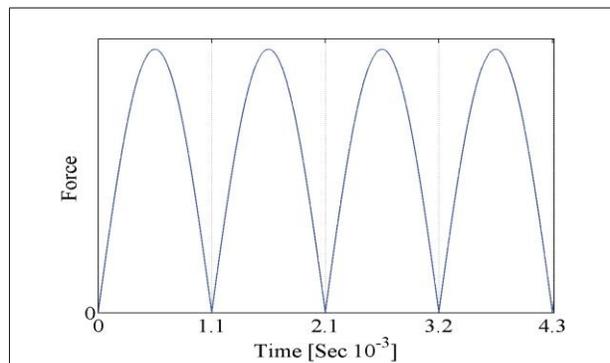


Рисунок 3.2-Моделирование сил резания в направлении Z

3.1.2 Результаты и обсуждение

На рисунке 3.3,а представлены усилия роботизированного фрезерования, которые увеличены на рисунке 3.3,б. Из-за вибрации и других вибраций инструмента увеличенная часть сил резания не представляет гармонических волн, подобных тем, которые смоделированы на рисунке 3.2. Хотя изменение сил резания, представленное на рисунке 3.3,б, не является гармоническим, его можно считать периодическим, поскольку оно создается периодическим движением инструмента во время операции фрезерования. Таким образом, ПСМ может идентифицировать доминирующие волны, встроенные в измеряемые силовые сигналы.

На рисунке 3.4 представлен спектр мощности сил резания, представленный на рисунке 3.3,а. Что касается спектра, то можно понять, что частоты доминирующих пиков могут быть более 10000 Гц . Этот вывод кажется противоречащим результатам, достигнутым в предыдущей главе, объясняющей, что частоты доминирующих пиков очень низкие. Однако следует отметить, что частота дискретизации механического профиля, использованного в предыдущей главе, недостаточна для исследования высоких частот. Действительно, таблица динамометра предоставляет больше информации об условиях обработки, чем профилограф. Поэтому для исследования низкочастотных сил левая часть спектра сил должна быть увеличена. В следующем параграфе объясняются два различных способа визуализации низкочастотных сил.

В предыдущем разделе были выявлены два типа неровностей на обрабатываемых поверхностях. Во-первых, неровности формируют волнистость профиля поверхности. Длины волн этих неоднородностей относительно велики, и кинематические ошибки признаются их порождающими факторами. Во-вторых, более мелкие неровности образуют шероховатость. Динамические ошибки системы признаются генерирующими механизмами. Так как кинематические погрешности зависят от координат соединения, то спектр мощности этих неоднородностей лучше представлять относительно пространственных частот. Таким образом, применение различных скоростей подачи не влияет на частоту неровностей. Аналогичным образом, спектр мощности профилей, сгенерированных из-за динамических ошибок, лучше представлять по сравнению с частотной областью времени. По этой причине каждый спектр мощности представлен как в пространственной, так и во временной частотной области.

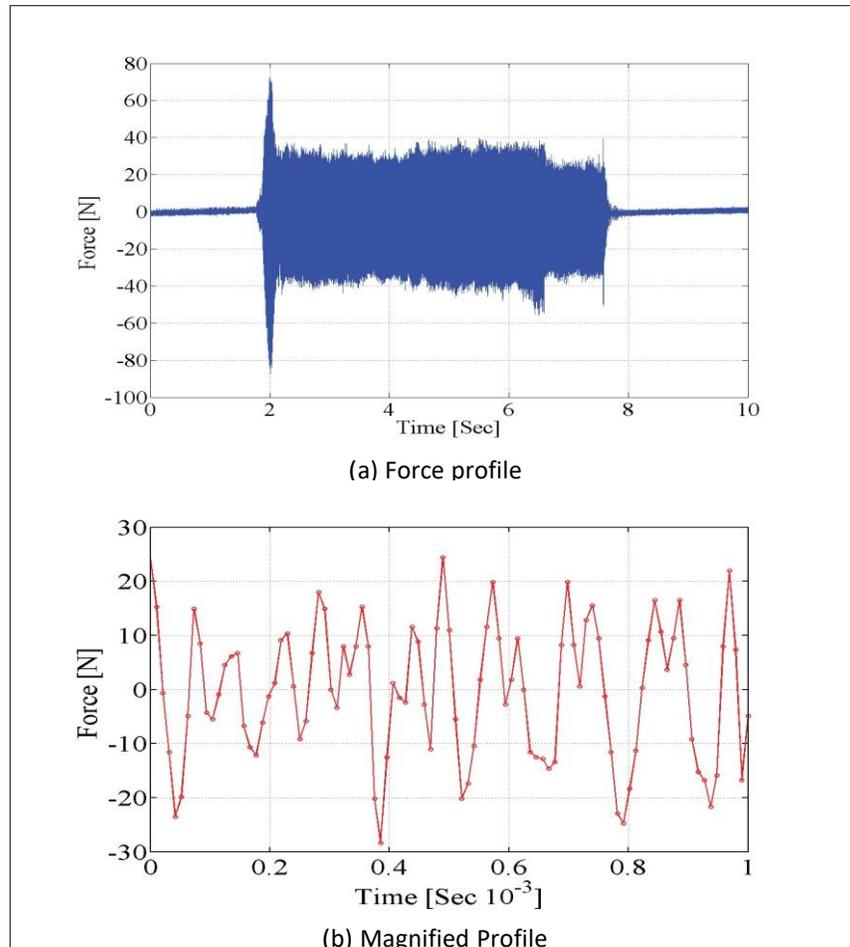


Рисунок 3.3-Измеряемая сила и ее увеличение

На рисунках 3.5, 3.6 и 3.7 представлен спектр каждого профиля третьей серии разрезов в зависимости от низкочастотной пространственной области, ниже $0,5\text{мм}^{-1}$. Эти цифры показывают, что частота кинематических неоднородностей составляет около $0,5\text{мм}^{-1}$. Эта частота соответствует частоте, определяемой при изучении качества поверхности срезов. На рисунках 3.8, 3.9 и 3.10 представлены спектры в зависимости от временной частотной области, охватывающей от 0 Гц до 250 Гц. Все спектры демонстрируют доминирующий пик в диапазоне от 60 Гц до 120 Гц.

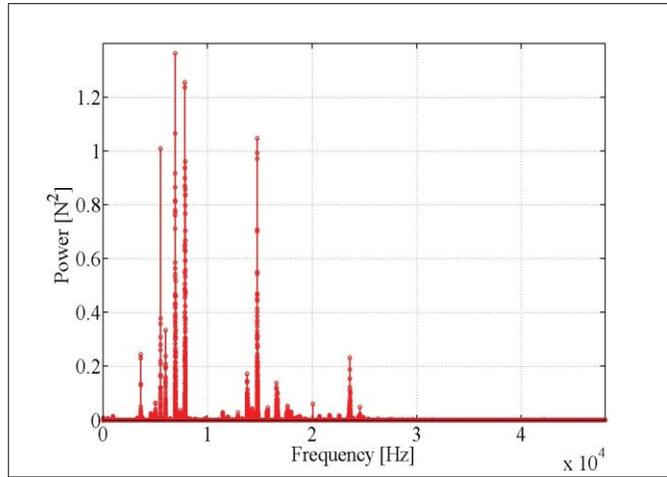


Рисунок 3.4-Мощность сил резания, представленная в 3.3,а

По результатам экспериментов можно заметить, что независимо от направления резки и параметров резки робот вибрирует на низких частотах от 60 до 100 Гц.

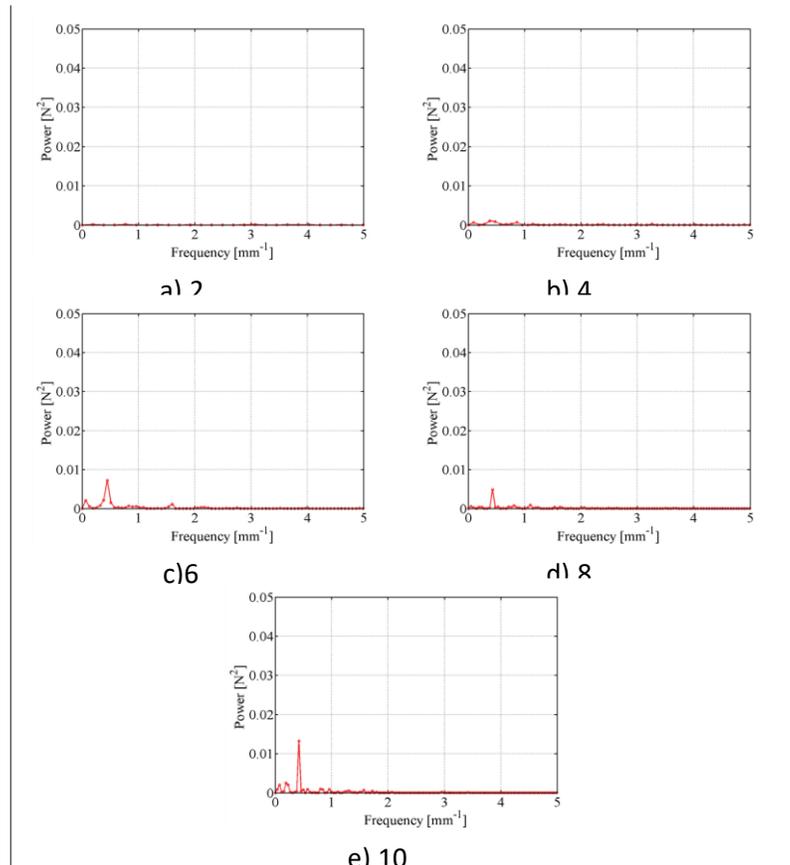
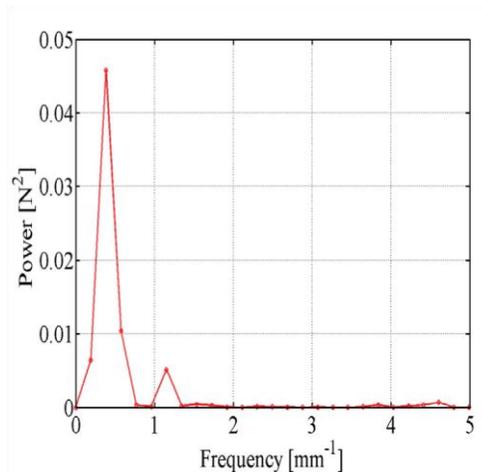
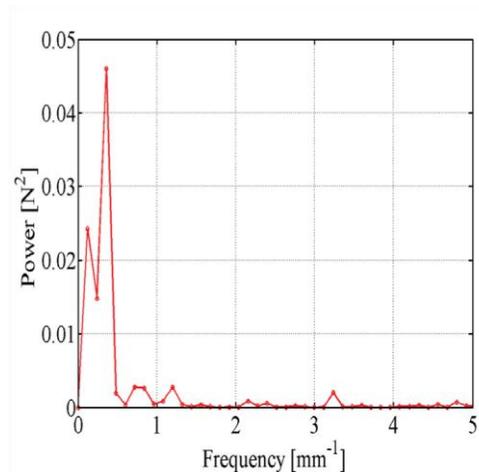


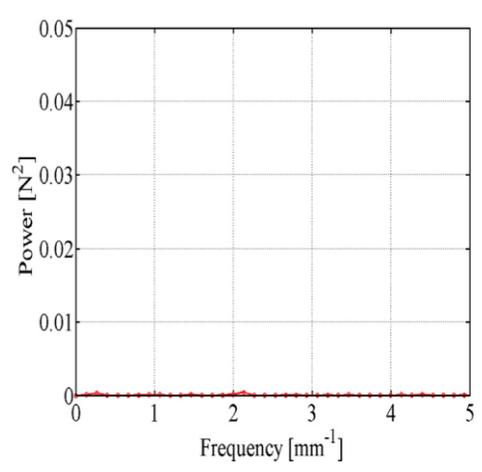
Рисунок 3.5-Спектр мощностей обрабатывающих сил резания выполняется в направлении +Y, скорость вращения шпинделя составляет 28000 об/мин и глубина 0,25 мм



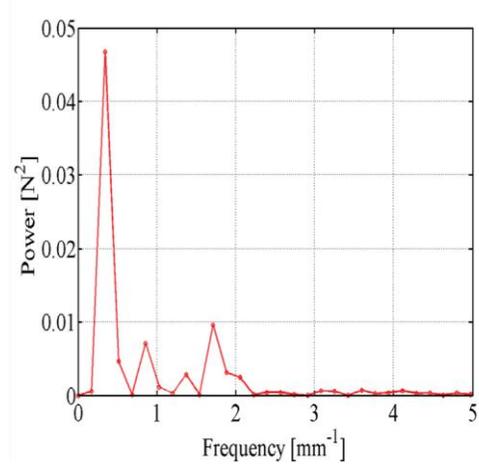
a) 2 mm/Sec



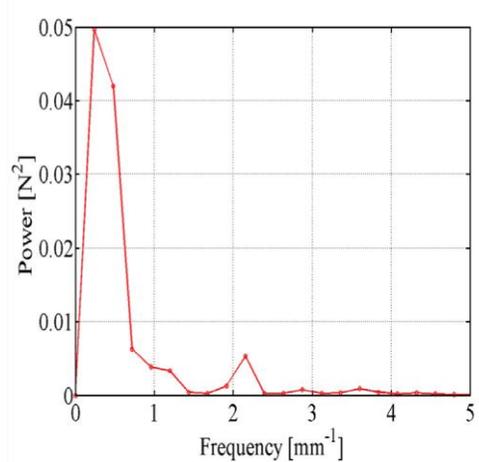
b) 4 mm/Sec



c) 6 mm/Sec



d) 8 mm/Sec



e) 10 mm/Sec

Рисунок 3.6-Спектр мощностей обрабатывающих сил резания выполняется в направлении +X, частота вращения шпинделя составляет 28000 об/мин, а глубина 0,25 мм

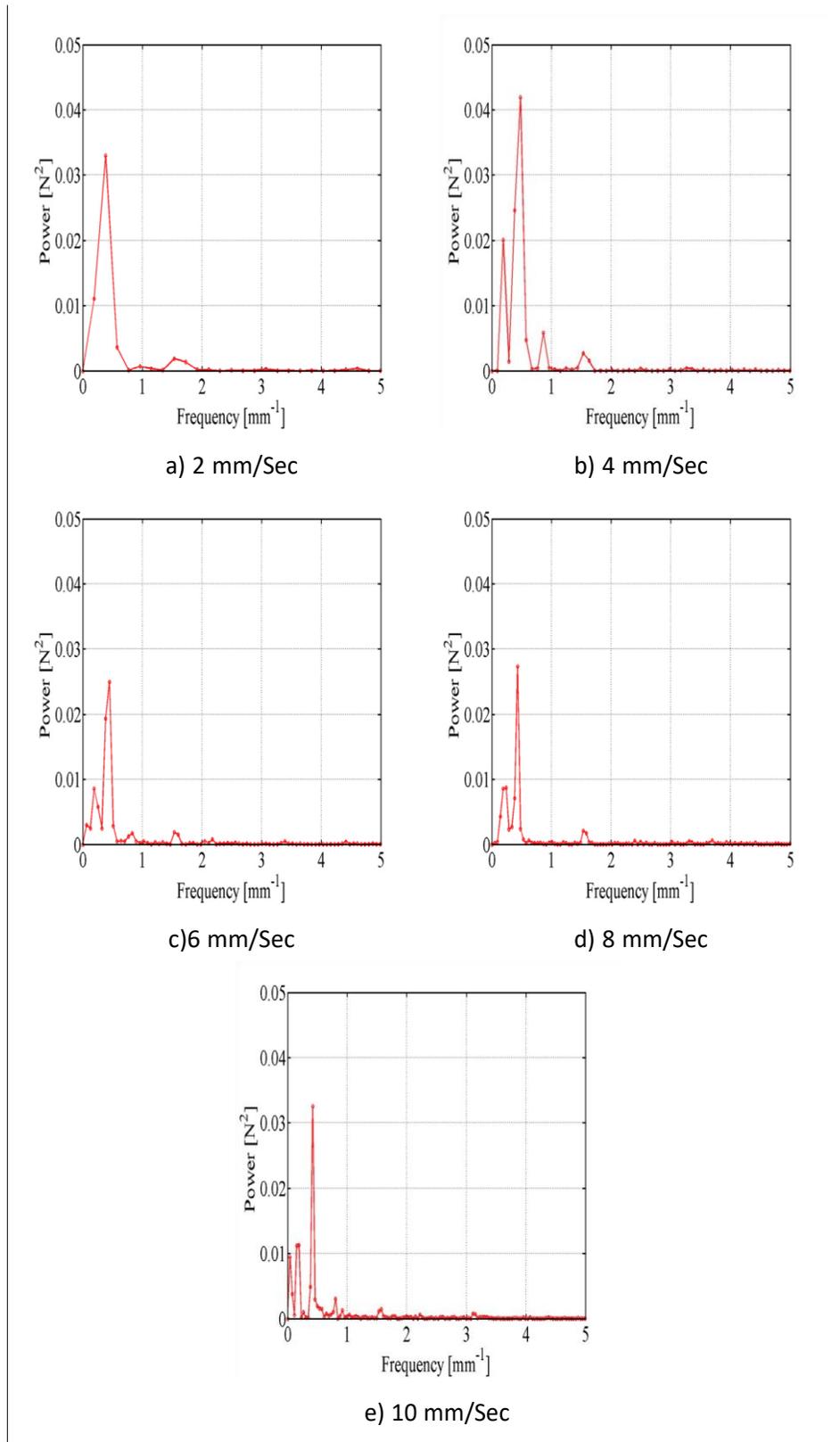
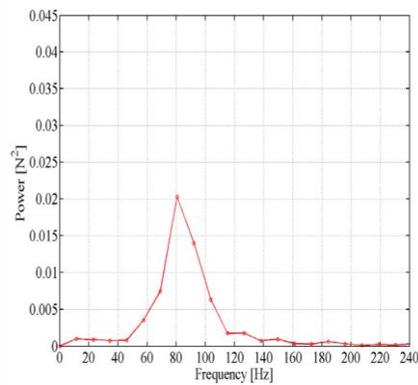
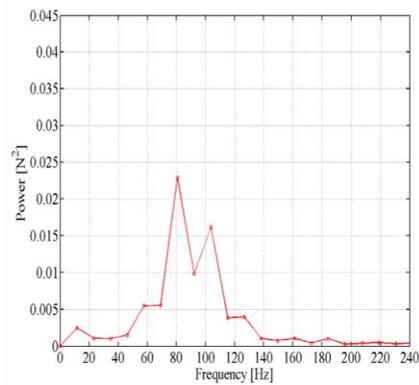


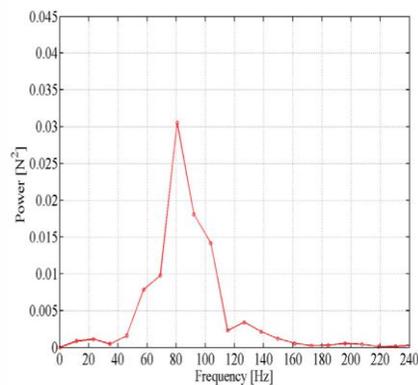
Рисунок 3.7-Спектр мощностей обработки резов, выполняемых в направлении $-Y$, скорость вращения шпинделя составляет 28000 об/мин и глубина 0.25 мм



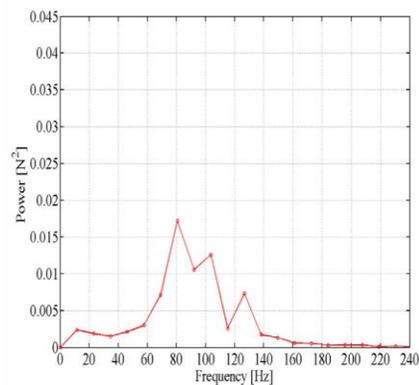
a) 2 mm/Sec



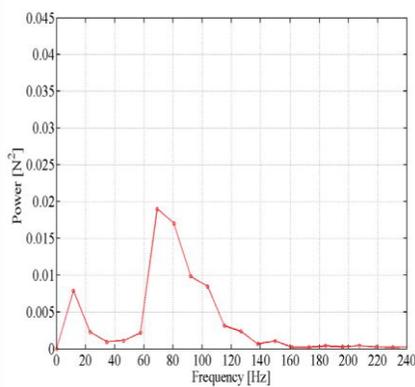
b) 4 mm/Sec



c) 6 mm/Sec

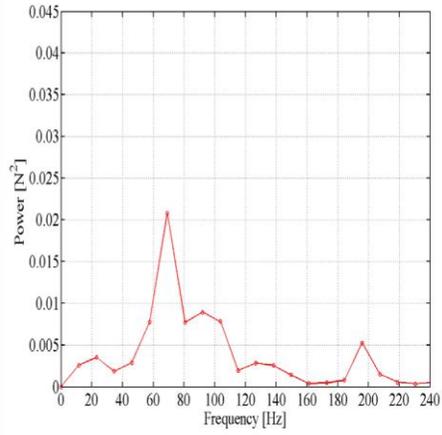


d) 8 mm/Sec

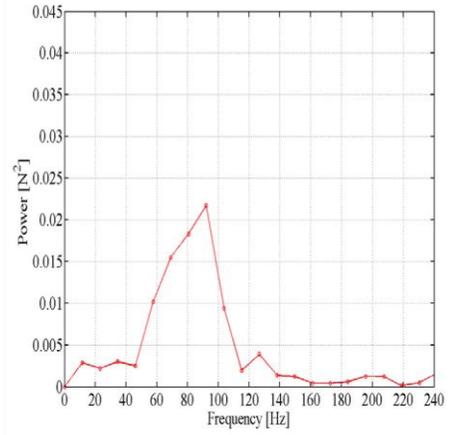


e) 10 mm/Sec

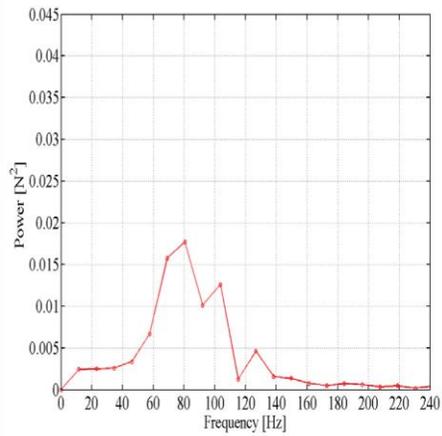
Рисунок 3.8- ПСМ усилий обработки резаний выполняются в направлении +Y



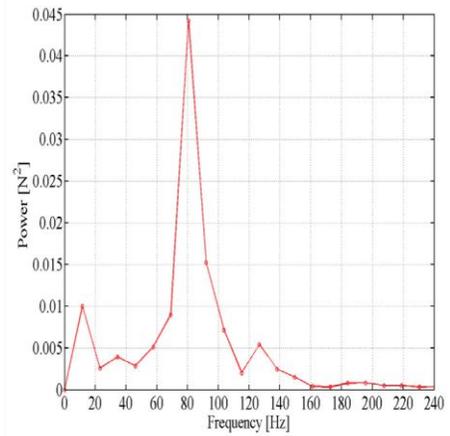
a) 2 mm/Sec



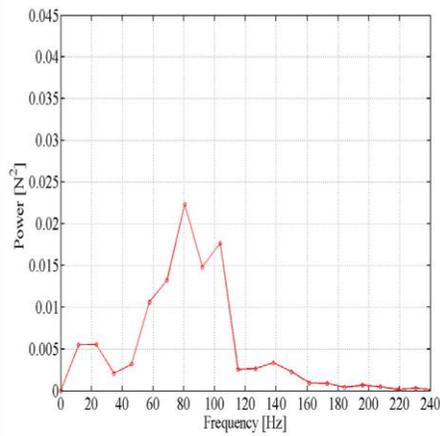
b) 4 mm/Sec



c) 6 mm/Sec



d) 8 mm/Sec



e) 10 mm/Sec

Рисунок 3.9-ПСМ усилий обработки резания выполняются в направлении +X

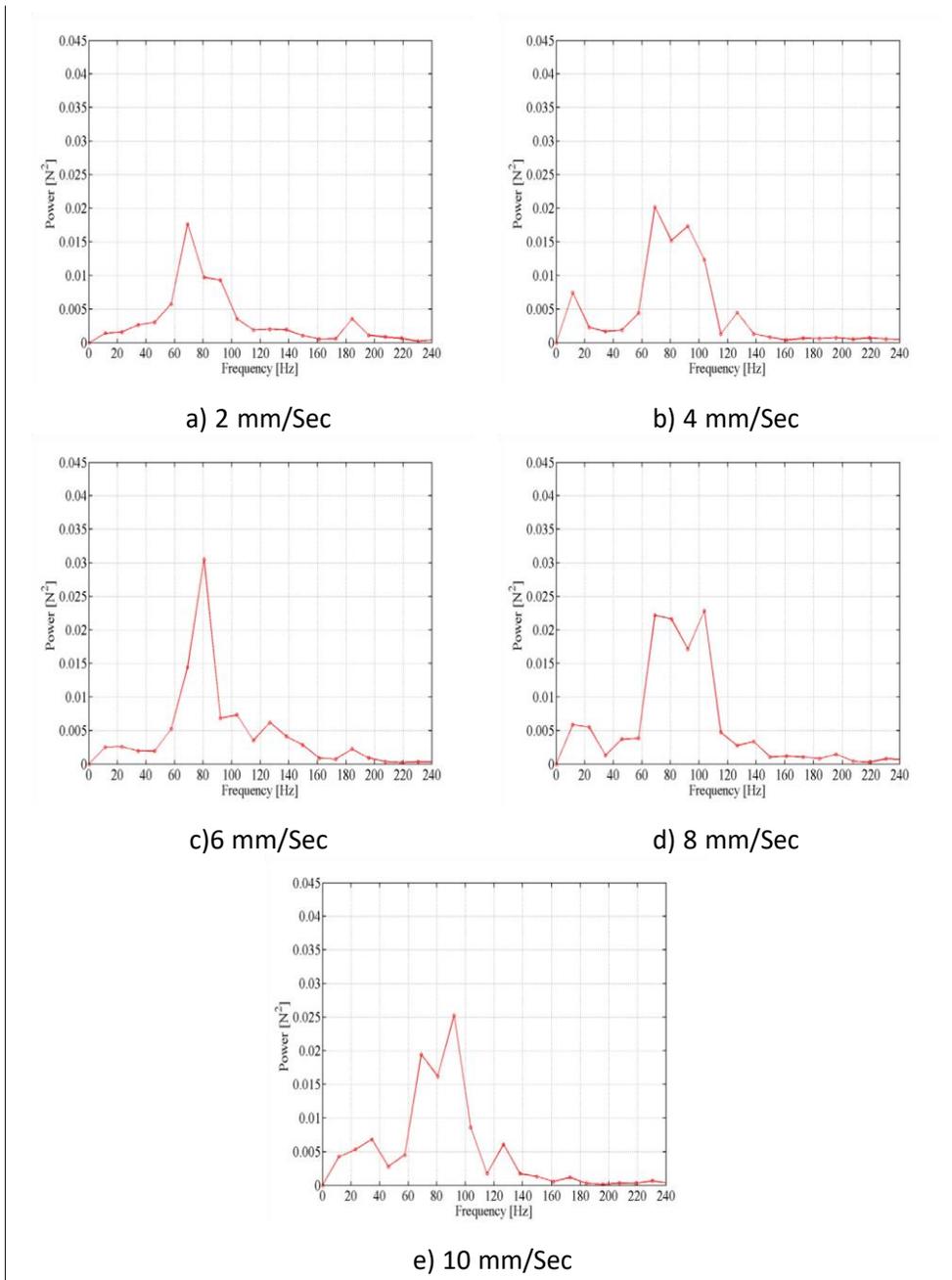


Рисунок 3.10- ПСМ усилий обработки резания, выполняемых в направлении $-Y$

3.2 Контроль прямолинейности траектории движения робота

Производительность роботизированной обрабатывающей системы для перемещения инструмента по траекториям резания оказывает большое влияние на качество обрабатываемых деталей. Точность траектории и повторяемость траектории — термины, которые чаще всего используются для характеристики производительности робота. Точность траектории системы обработки,

определяемая как отклонение инструмента от заданной траектории, влияет на точность размеров обрабатываемых деталей. Повторяемость траектории, определяемая как близость повторяющихся траекторий, также влияет на допуски на размеры изделий. Тем не менее, прямолинейность траектории, еще одна ошибка, связанная с траекторией, также может повлиять на качество обрабатываемых деталей. Прямолинейность траектории определяется как отклонение от прямой линии, и в случае роботизированной обработки ошибки прямолинейности траектории приводят к тому, что инструмент проявляет повторяющиеся малоамплитудные отклонения, перпендикулярные основному направлению движения.

Для измерения прямолинейности траектории робота могут применяться различные оборудование и методы. Лазерная интерферометрия является одним из инструментов, которые были успешно использованы в предыдущих исследовательских работах, Slamani and Bonev (2013) и Pазiani (2019). Несмотря на высокую точность лазерных интерферометров, измерительная установка требует специальной конфигурации, ограничивающей проведение экспериментов. Действительно, потратив несколько часов на настройку, движение инструмента можно было отслеживать только тогда, когда он линейно перемещался между интерферометром и лазерным отражателем. Более того, измерение с помощью имеющегося интерферометрического прибора может быть выполнено только в статическом режиме. Это означает, что измерение положения инструмента во время движения не поддерживается.

В этом эксперименте лазерный трекер FARO, показанный на рисунке 3.11а, который является портативным измерительным устройством, используется для измерения погрешностей прямолинейности робота АВВ. Это устройство способно измерять положение инструмента даже во время движения. С этой целью к фланцу робота был прикреплен артефакт, оснащенный небольшим зеркалом лазерного трекера, представленным на рисунке 3.11b. Затем измеряется положение артефакта при его движении по траекториям резания. Лазерный трекер непрерывно измеряет положение артефакта с частотой 815 Гц. Измеренные положения изначально упорядочены во временном ряду. Однако для сравнения этих измерений с профилями поверхности, представленными в разделе 3.3, измеренные положения переставляются в пространственном порядке.

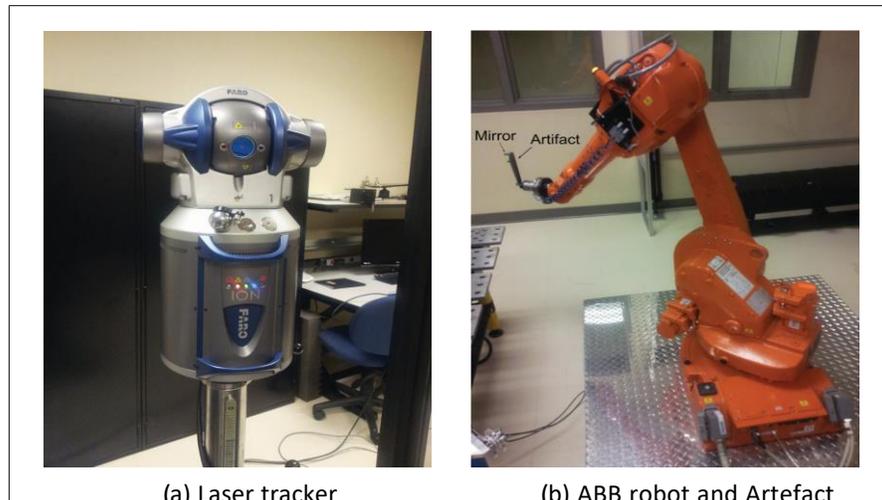


Рисунок 3.11-Лазерный трекер и его мишень, прикрепленные к роботу

Движение артефакта вдоль траекторий резания в направлениях $\pm Y$ представлено на рисунках 3.12 и 3.14. Профиль представленных фигур, особенно тех, которые относятся к более низкой скорости, демонстрирует неровности, длина волны которых составляет около 2 мм. Эта длина волны, которая соответствует длине волны неровностей профиля поверхности, доказывает, что основные неровности на профиле поверхности были созданы из-за ошибки прямолинейности траектории робота. Однако для более точного анализа профилей прямолинейности трассы к ним был применен анализ спектра мощности. На рисунках 3.13 и 3.15 показан спектр мощности профилей движения инструмента. Как и ожидалось, все спектральные графики демонстрируют доминирующие пики на низких частотах; Пространственные частоты этих пиков меньше $0,5 \text{ мм}^{-1}$, что соответствует основным неравномерностям длины волны больше 2 мм.

Сламани и Бонев (2013) отметили, что эксцентриситет зубчатых колес в зубчатых передачах является основным источником ошибок прямолинейности траектории. Поэтому, чтобы исследовать это, были рассчитаны пространственные частоты зубчатых передач в процессе резания. Результаты показывают, что пространственная частота основных неровностей на профилях поверхности согласуется с некоторыми пространственными частотами зубчатых передач.

Представленные профили движения артефакта также изображают более мелкие неровности, которые накладываются на размерные. Эти неравномерности имеют постоянную частоту времени, равную 13 Гц. Поэтому, когда профиль прямолинейности перестраивается в пространственном порядке, их длина волны будет изменяться в зависимости от скорости подачи. Поэтому они сильно упакованы в диаграммах прямолинейности траектории, которые связаны с низкой скоростью подачи. Поскольку эти низкочастотные неровности

не наблюдались в профиле обрабатываемых поверхностей, можно сделать вывод, что в процессе обработки эти типы неровностей были ослаблены.

Профили поверхности пропилов, связанные со скоростью подачи, равной 8 мм/сек или 10 мм/с, изображают более мелкие неровности, наложенные на основные неровности. На рисунке 3.16 изображены эти профили. Для того, чтобы исследовать источник этих неоднородностей, на рисунке 3.17 показан спектральный спектр мощности профилей движения артефакта для одинаковых траекторий резания и одинаковых скоростей подачи. Представленные цифры не показывают какого-либо доминирующего пика на этих частотах. Это доказывает, что движение робота не является источником мелких неровностей. В следующем разделе исследуется динамическое поведение робота, чтобы понять источник этих нарушений.

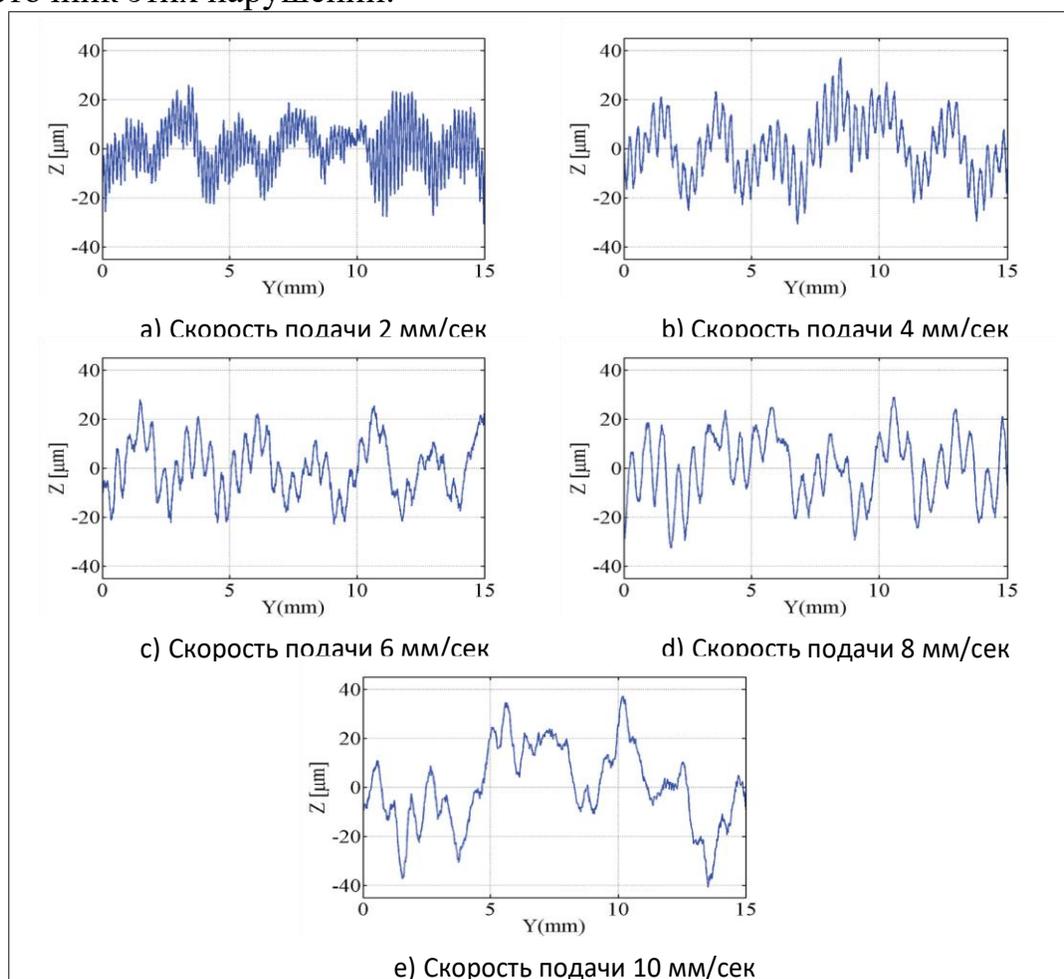
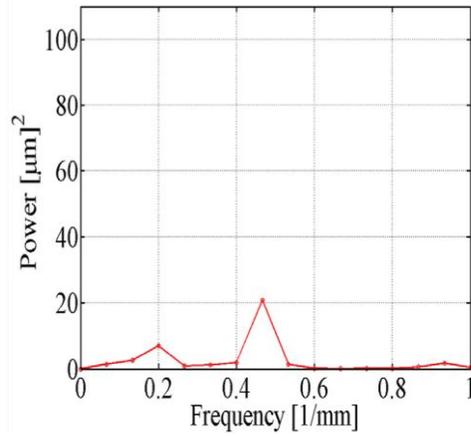
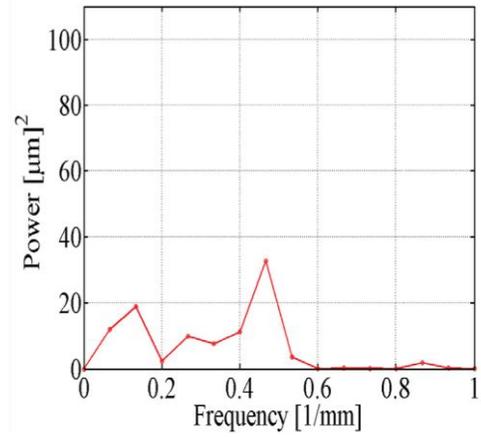


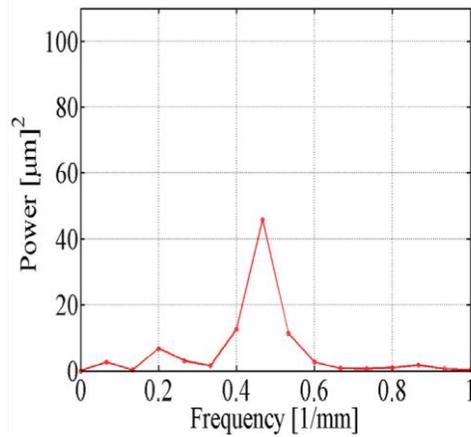
Рисунок 3.12-Отклонение робота, который перемещает артефакт по траектории резки в направлении +Y



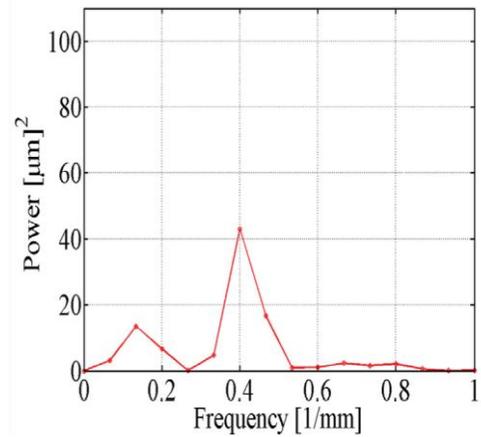
а) Скорость подачи 2 мм/сек



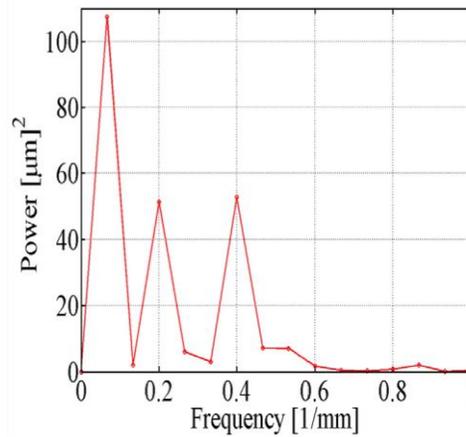
б) Скорость подачи 4 мм/сек



с) Скорость подачи 6 мм/сек



д) Скорость подачи 8 мм/сек



е) Скорость подачи 10 мм/сек

Рисунок 3.13- ПСМ движения робота

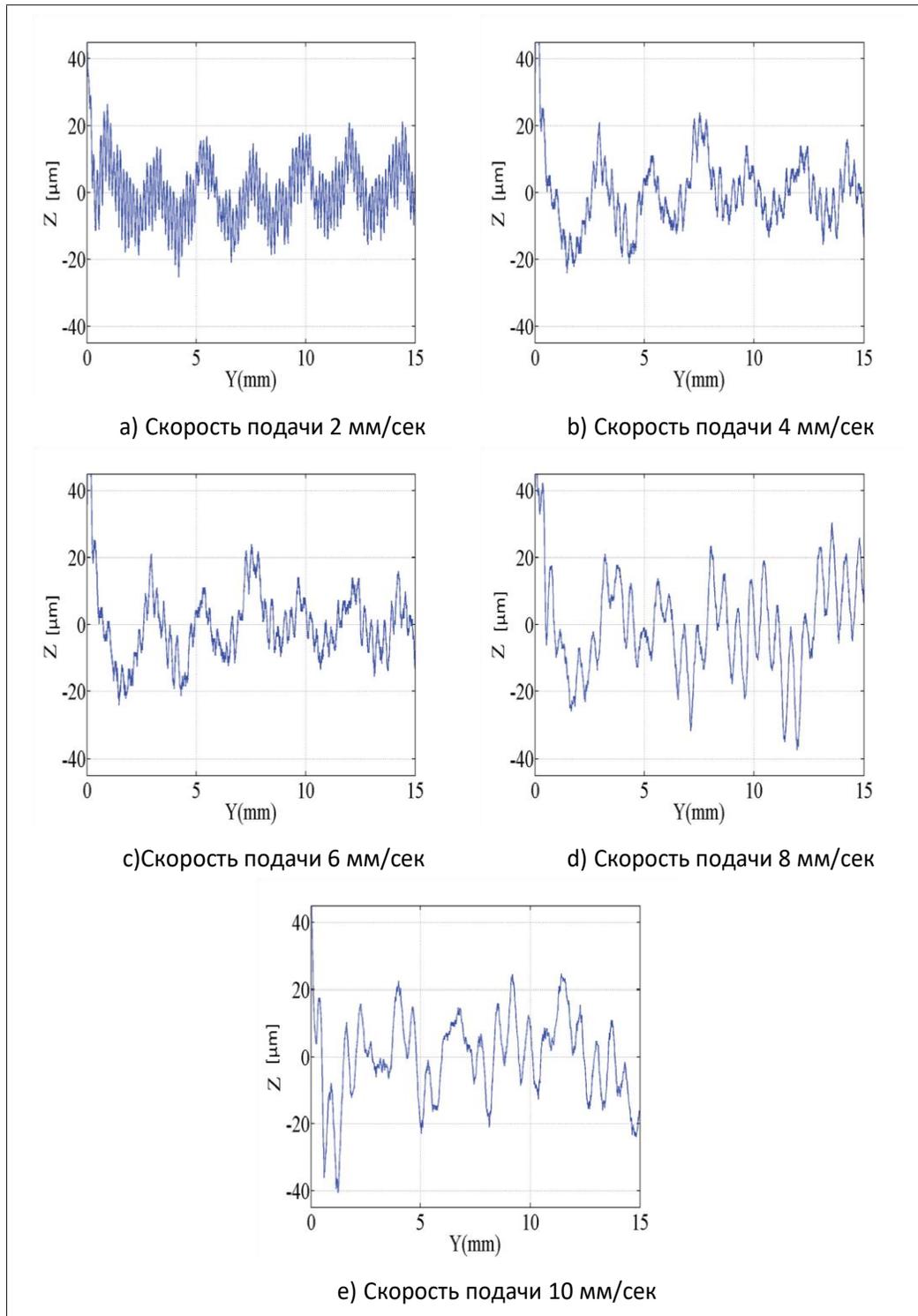
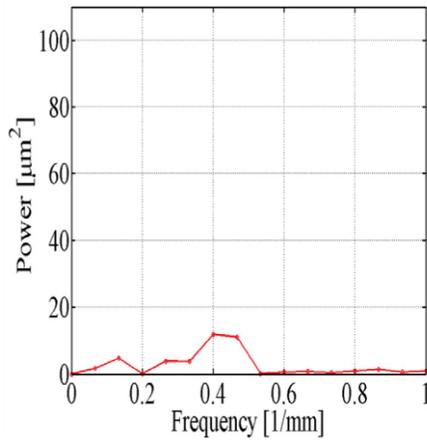
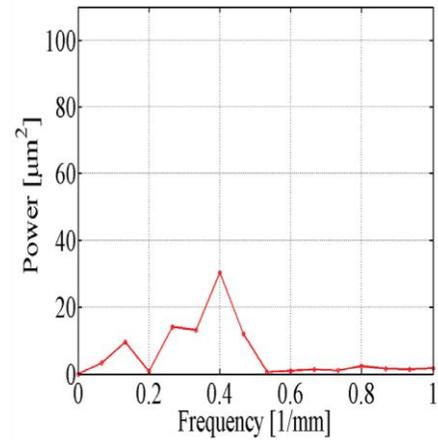


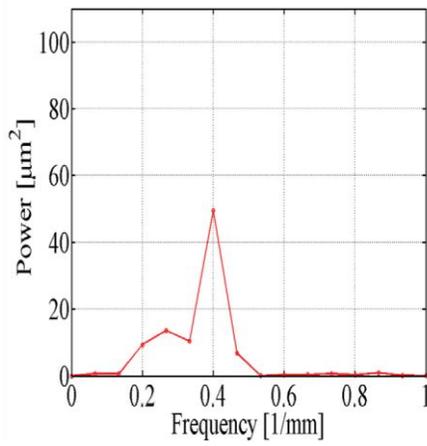
Рисунок 3.14-Отклонение робота, который перемещает артефакт по траектории резки в направлении $-Y$



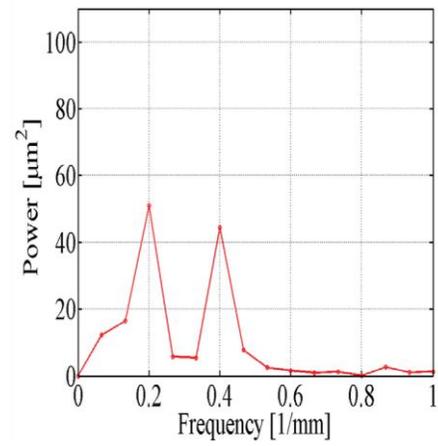
a) Скорость подачи 2 мм/сек



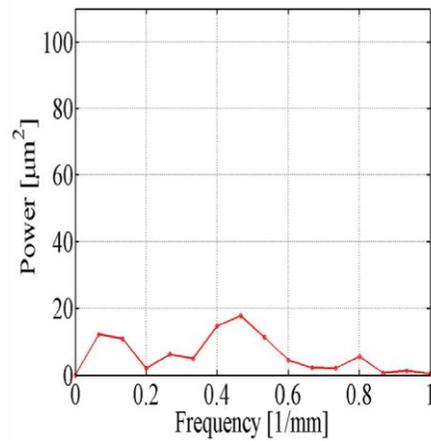
b) Скорость подачи 4 мм/сек



с) Скорость подачи 6 мм/сек



d) Скорость подачи 8 мм/сек



e) Скорость подачи 10 мм/сек

Рисунок 3.15-ПСМ движения робота

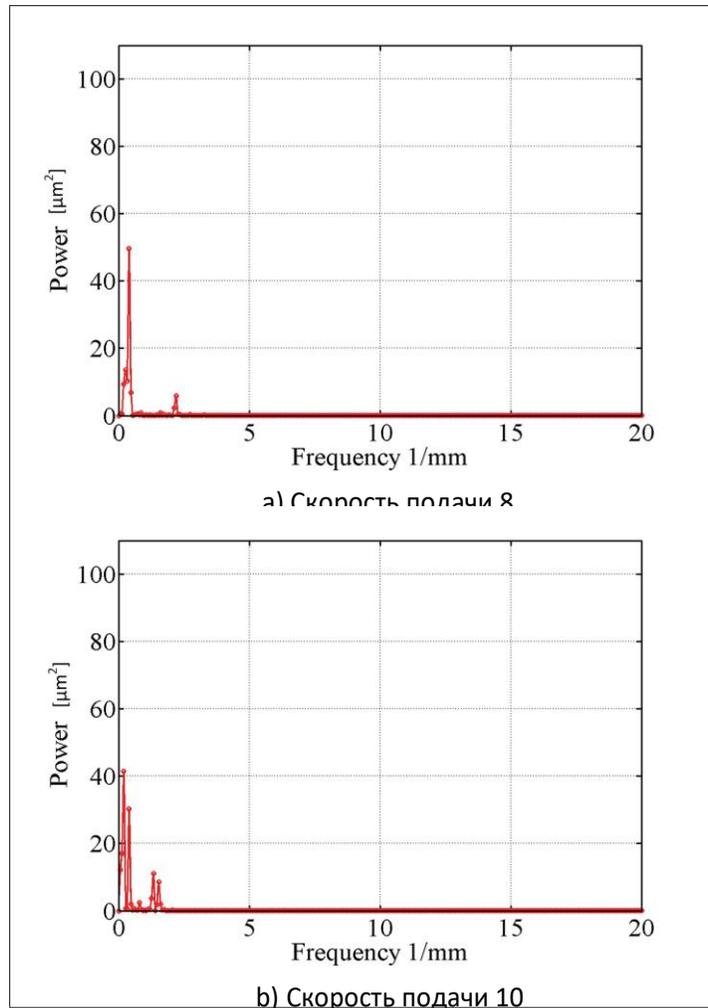


Рисунок 3.16-ПСМ движения робота в направлении $-Y$ на более высоких частотах

3.3 Динамическое поведение

До сих пор на обработанных поверхностях выделялись два типа неровностей; Основные из них возникают из-за кинематических ошибок робота, а второстепенные накладываются на основные. В предыдущих разделах обсуждался механизм генерации основных нарушений, но механизмы генерации малых нарушений будут исследованы в этом разделе.

Профили разрезов, представленные на рисунках 3.16а и 3.16б, демонстрируют незначительные неровности, которые могут быть обнаружены визуально. Спектры мощности этих профилей показывают, что их пространственные частоты составляют около 8 мм^{-1} , что равно 64 Гц и 80 Гц , если пространственная частотная область спектров преобразована во временную частотную область. Тем не менее, существование незначительных неровностей не ограничивается этими вырезами, и незначительные неровности

можно проследить во всех измеряемых профилях силы. Существование пика можно объяснить возбуждением одной или нескольких собственных частот системы, близких к этой частоте. Поэтому идентификация собственных частот системы и механизмов возбуждения в процессе обработки имеет важное значение. Ниже будут введены различные виды вибраций, возникающих в станках и их генерирующих механизмах кратко.

В целом, вибрацию в процессах обработки можно разделить на три группы; свободная, принудительная и самовозбуждающаяся вибрация. Свободная вибрация возникает при механическом воздействии на систему, в этом случае система вибрирует на одной или нескольких собственных частотах. Однако свободная вибрация не длится вечно, и через некоторое время умрет из-за затухания системы. Столкновение между инструментом и заготовкой в точке входа и самопроизвольное движение привода, например, могут действовать как удар и создавать свободную вибрацию.

Принудительная вибрация-это еще один тип вибраций, который очень распространен в станках. Эксцентричное или несбалансированное движение движущейся части в станке может вызвать вынужденную вибрацию.

Когда на механическую систему действует периодическая сила, система проявляет вибрационную реакцию с той же частотой, что и возбуждающая сила. Этот тип вибрации будет разрушительным, если частота колебательной силы соответствует одной из собственных частот системы; В этом случае система обработки резонирует с большой амплитудой.

Самовозбуждающаяся вибрация, дребезжание, является последним типом вибрации, возникающей в станках. Этот тип вибрации взаимодействует с процессом обработки;

Действительно, вибрация создает вибрационные силы обработки, а вибрационные силы, в свою очередь, усиливают вибрацию. По-видимому, механизм генерации этого типа вибраций более сложен, чем у других; тем не менее, существует несколько теорий, объясняющих вибрацию в станках. Регенеративный эффект является наиболее известной теорией для анализа вибраций в станках. Алтынташ (2000) подробно изучил эту форму вибрации при фрезеровании. Исходя из этой теории, силы обработки колеблются, когда станок режет волнистую поверхность, которая обрабатывается на предыдущем обороте. Если частота вибрационных сил соответствует одной из собственных частот системы, система резонирует и усиливает вибрацию. Эта реакция передается инструменту, и волнистость поверхности усиливается. Однако эта теория не объясняет низкочастотные вибрации, которые очень распространены в роботизированной обработке. На самом деле, немногие исследователи, такие как Пан (2016) упоминал вибрацию мод в качестве генерирующих механизмов для такого рода вибраций.

Бутройд и Найт (2016) объяснили вибрацию в станках как результат особого движения инструмента во время обработки. Действительно, если одновременно возбуждаются две моды системы, инструмент вращается по эллиптической траектории, а не в одном направлении. Силы резания увеличивают упругую потенциальную энергию системы на одной половине траектории, где силы резания и движение инструмента находятся в одном направлении. Однако силы резания уменьшают потенциальную энергию системы на другой половине траектории, где силы резания противоречат направлению движения инструмента; эллиптическая траектория инструмента представлена на рисунке 3.17. Поэтому, если вводимая энергия больше приведенной, то эллиптическое движение инструмента в системе будет увеличиваться и возникнет вибрация.

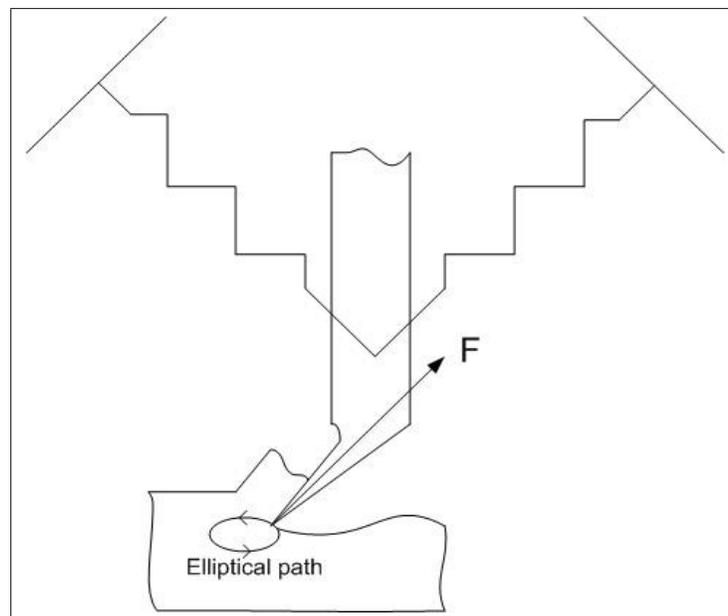


Рисунок 3.17-Модовая муфта

Бутройд и Найт(2016)

В данном разделе выполняется экспериментальный модальный анализ для выявления собственных частот робота, которые могут соответствовать частоте мелких неровностей, образующихся на обрабатываемых поверхностях. Поскольку частота неоднородностей относительно низкая, то есть около 80 Гц, устанавливается модальный экспериментальный тест для оценки собственных частот в низкочастотном диапазоне. В этом разделе сначала будут объяснены основы вибрации, а затем будут представлены испытания на удар и его результаты.

3.3.2 Экспериментальное модальное испытание

Как упоминалось ранее, передаточная функция определяет соотношение входного и выходного сигналов системы, например, уравнение 3.11. Таким образом, передаточная функция может быть идентифицирована путем измерения выходного и входного сигнала системы. Для этого на систему накладывается заранее известная функция форсирования, а затем ее реакция на смещение измеряется соответствующим датчиком. Как правило, акселерометры используются для регистрации откликов систем. Однако в некоторых случаях предпочтение отдается преобразователям скорости.

Электромеханические вибростенды и инструментальные ударные молотки являются распространенным оборудованием, применяемым для экспериментального анализа. Шейкер передает возбуждающую силу с желаемой частотой на подверженную воздействию механическую структуру. В процессе возбуждения отклик системы улавливается датчиком, а затем выводится передаточная функция системы. Ударный молоток, с другой стороны, передает в систему широкий диапазон возбуждающих частот. В этом методе молоток оказывает кратковременное воздействие на систему, возбуждающее собственные частоты системы. Действительно, кратковременное воздействие включает в себя широкий диапазон частот, которые могут возбуждать собственные частоты системы, находящиеся в полосе. Нанесенный удар измеряется датчиком силы, размещенным в головке молотка, а реакция системы, с другой стороны, фиксируется акселерометром, прикрепленным к конструкции объекта. Сила удара и его реакция фиксируются во временной области. Однако для вычисления передаточной функции измеренные значения должны быть перенесены в частотную область. Метод быстрого преобразования Фурье (БПФ) может быть использован для передачи сигналов из временной области в частотную. Действительно, алгоритм БПФ генерирует коэффициенты ДПФ сигналов, которые являются комплексными числами. Разделив мнимую и действительную часть коэффициентов ДПФ ответного сигнала на соответствующую мнимую и действительную часть коэффициента ДПФ силового сигнала, будет вычислена частотная характеристика системы (АЧХ) системы. На рисунке 3.18 показана типичная передаточная функция робота, состоящая из трех подфигур. Верхний подрисунок показывает действительную часть передаточной функции, средний — мнимую часть, а последний подрисунок демонстрирует когерентность.

Как показано на рисунке 3.18, определение собственных частот системы не составит труда. Во-первых, реальная часть отклика показывает локальные максимальные и минимальные значения с разными знаками вокруг своих собственных частот. Во-вторых, мнимая часть передаточной функции

показывает максимум или минимум на этих частотах. И, наконец, когерентность системы на собственных частотах должна быть более 75 процентов, когерентность показывает эффективность оказываемого воздействия на отклик системы. Таким образом, если частота имеет эти условия, то эта частота будет распознана как одна из собственных частот системы.

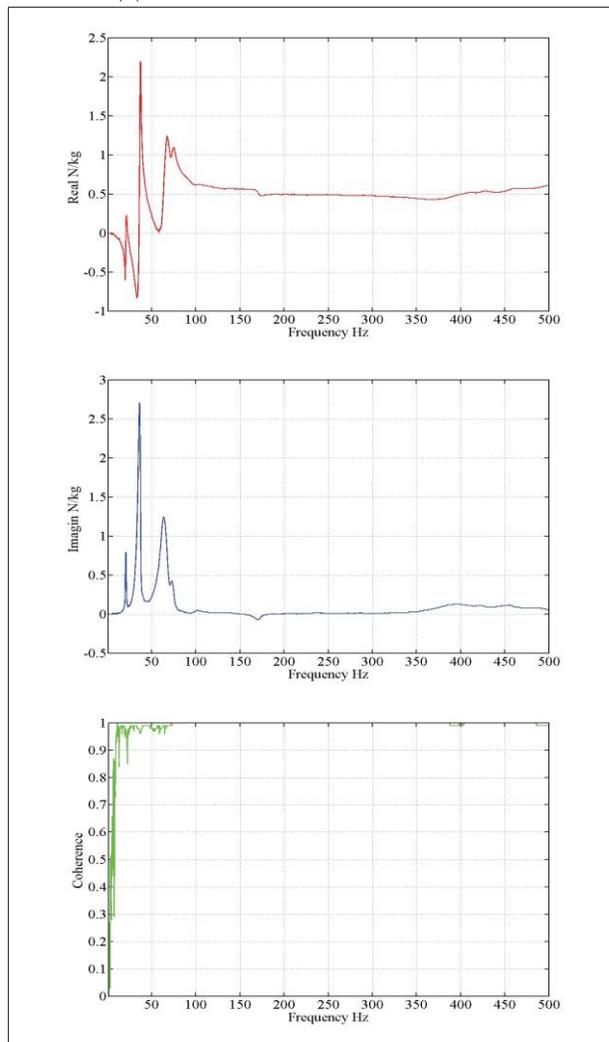


Рисунок 3.18- Действительная и мнимая части многостепенной системы свободы

3.3.3 Испытательная установка

Установка для испытаний на удар состоит из инструментального ударного молотка, акселерометра для измерения отклика системы, многоканального анализатора вибраций и программного обеспечения для постобработки для визуализации частот системы. TestXpress, разработанный компанией LMS, используется для визуализации результатов воздействия. Это программное

обеспечение оснащено функцией автоматической отбраковки, которая автоматически обнаруживает неправильные удары.

В этом эксперименте планировалось воздействовать и измерять отклики как можно ближе к наконечнику инструмента. На рисунке 3.46 показано расположение датчика и удар. Отклик системы измерялся в каждом направлении, в то время как система возбуждалась ударами молотка, оказываемыми во всех направлениях. Таким образом, каждое направление имеет одну прямую передаточную функцию и две перекрестные передаточные функции. Измерение каждого ФЧХ повторялось пять раз, а затем полученные данные усреднялись для получения более надежных результатов. Результаты этого эксперимента представлены на рисунках 3.20, 3.21, 3.22, 3.23, 3.24, 3.25, 3.26, 3.27 и 3.28. Согласно полученным результатам, собственные частоты системы составляют около 20, 35, 60, 67,70 и 72 Гц.

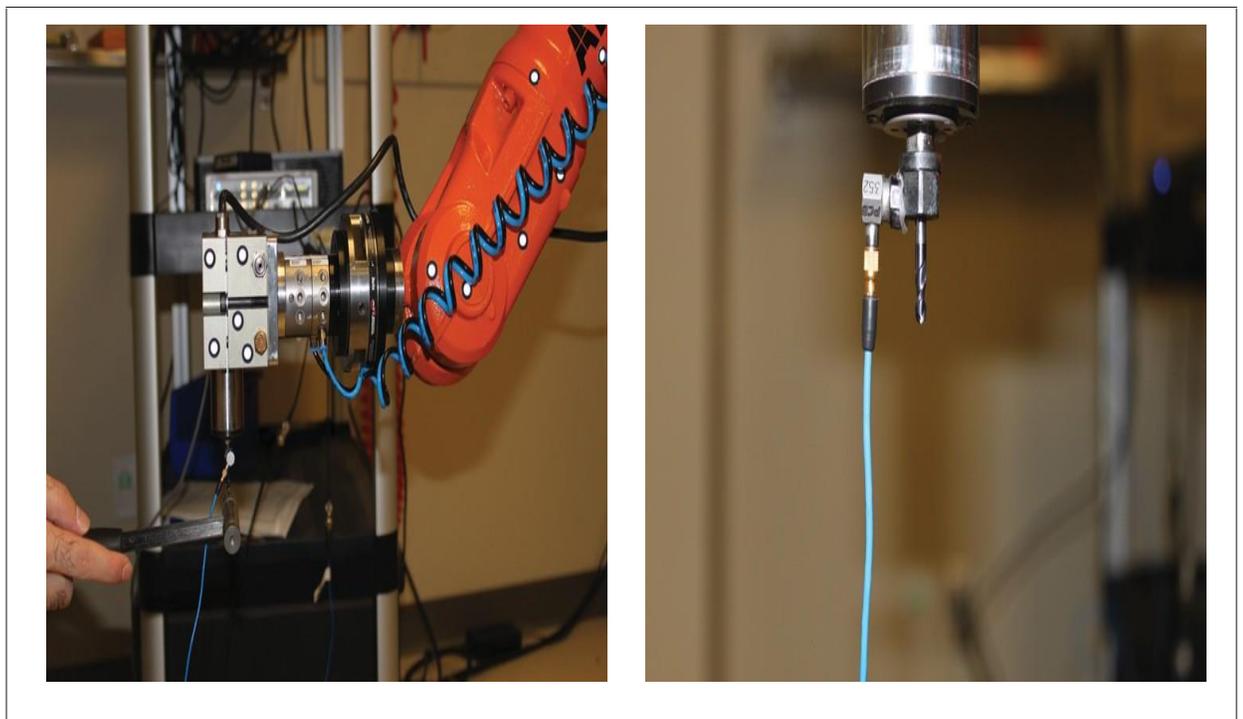


Рисунок 3.19-Испытание на удар

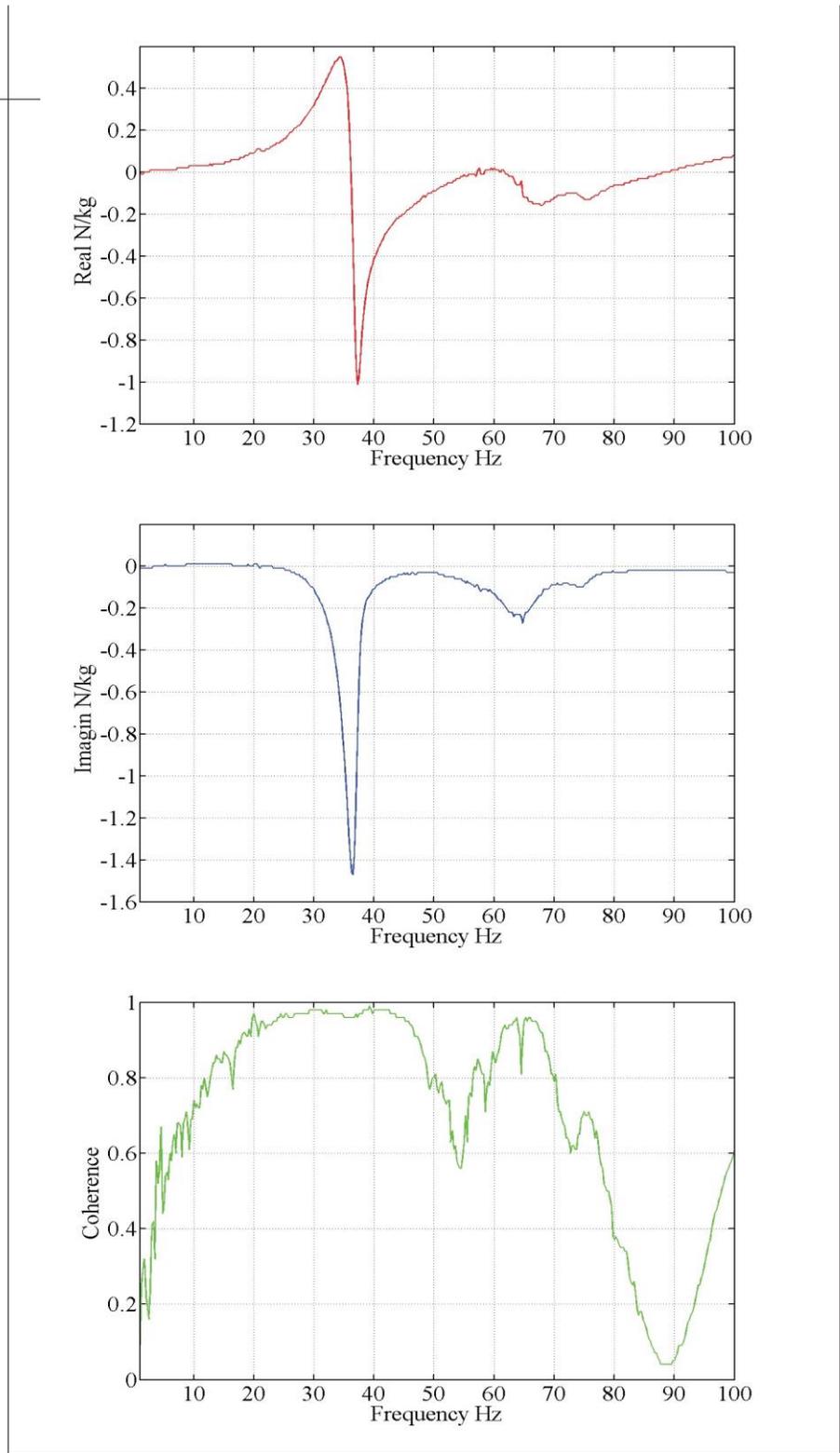


Рисунок 3.20-Влияние диаграммы ФЧХ в направлении X и измерение в направлении X

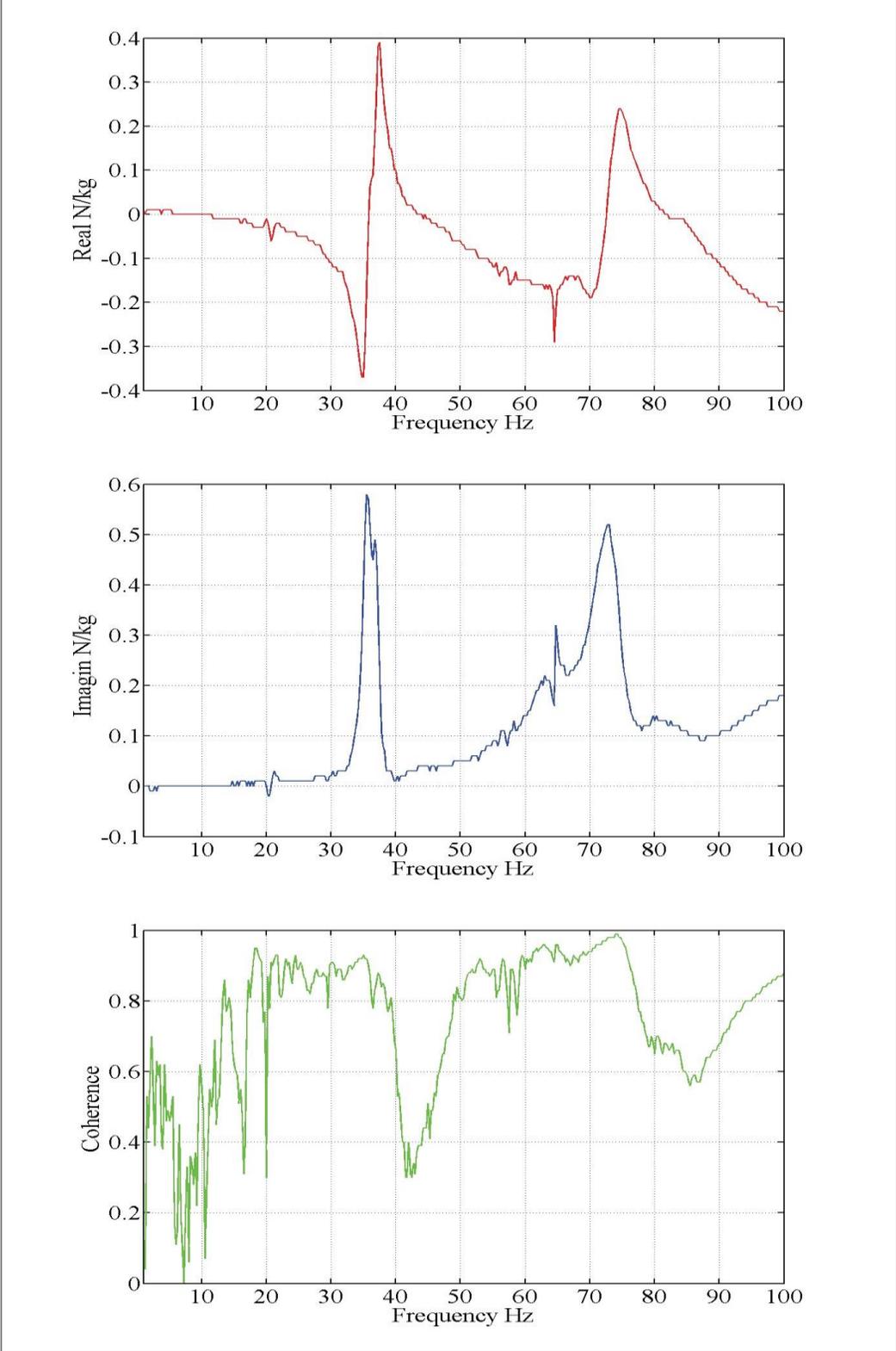


Рисунок 3.21-Влияние диаграммы ФЧХ в направлении Y и измерение в направлении X

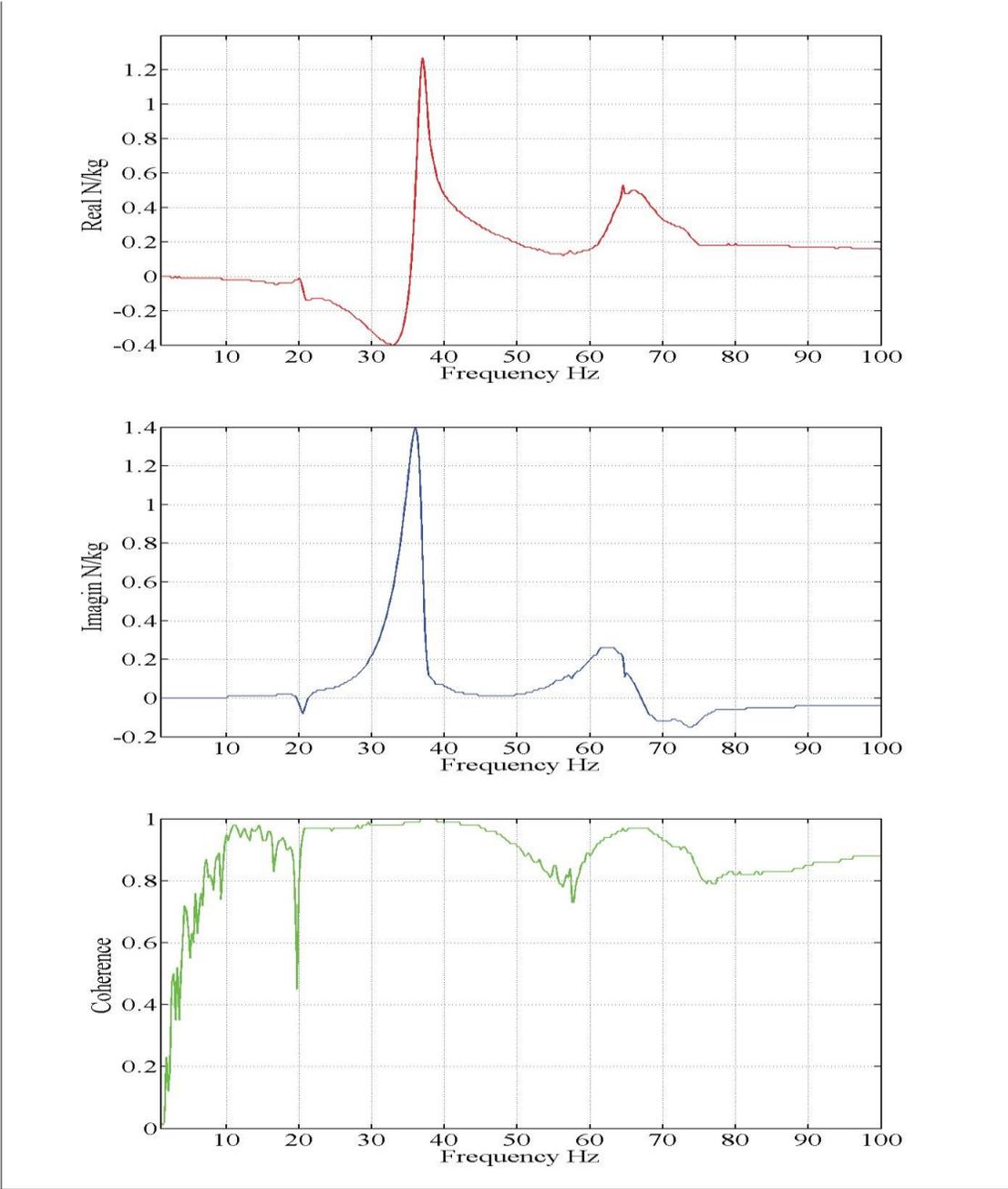


Рисунок 3.22-Влияние диаграммы ФЧХ в направлении Z и измерение в направлении X

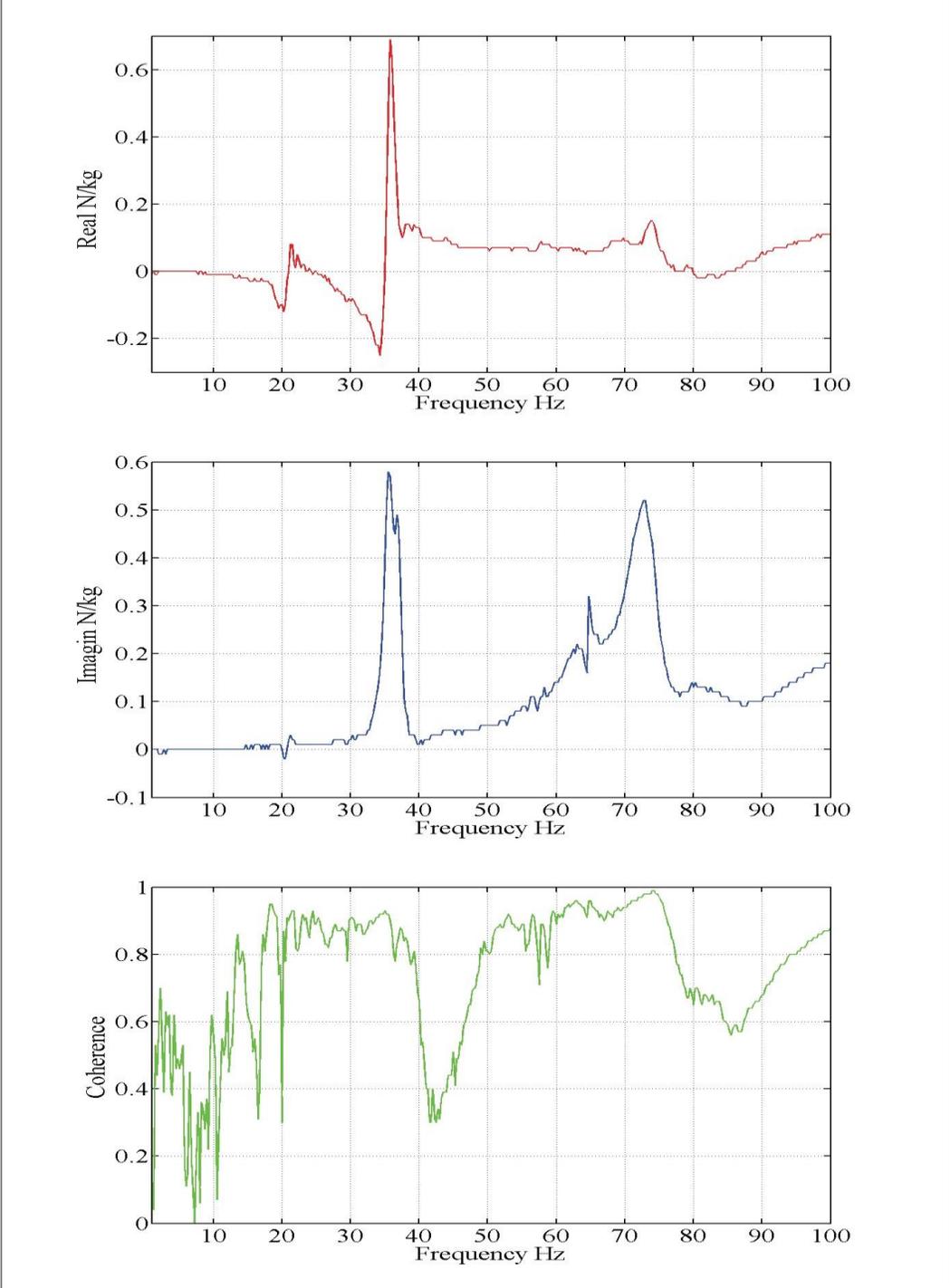


Рисунок 3.23-Влияние диаграммы ФЧХ в направлении X и измерение в направлении Y

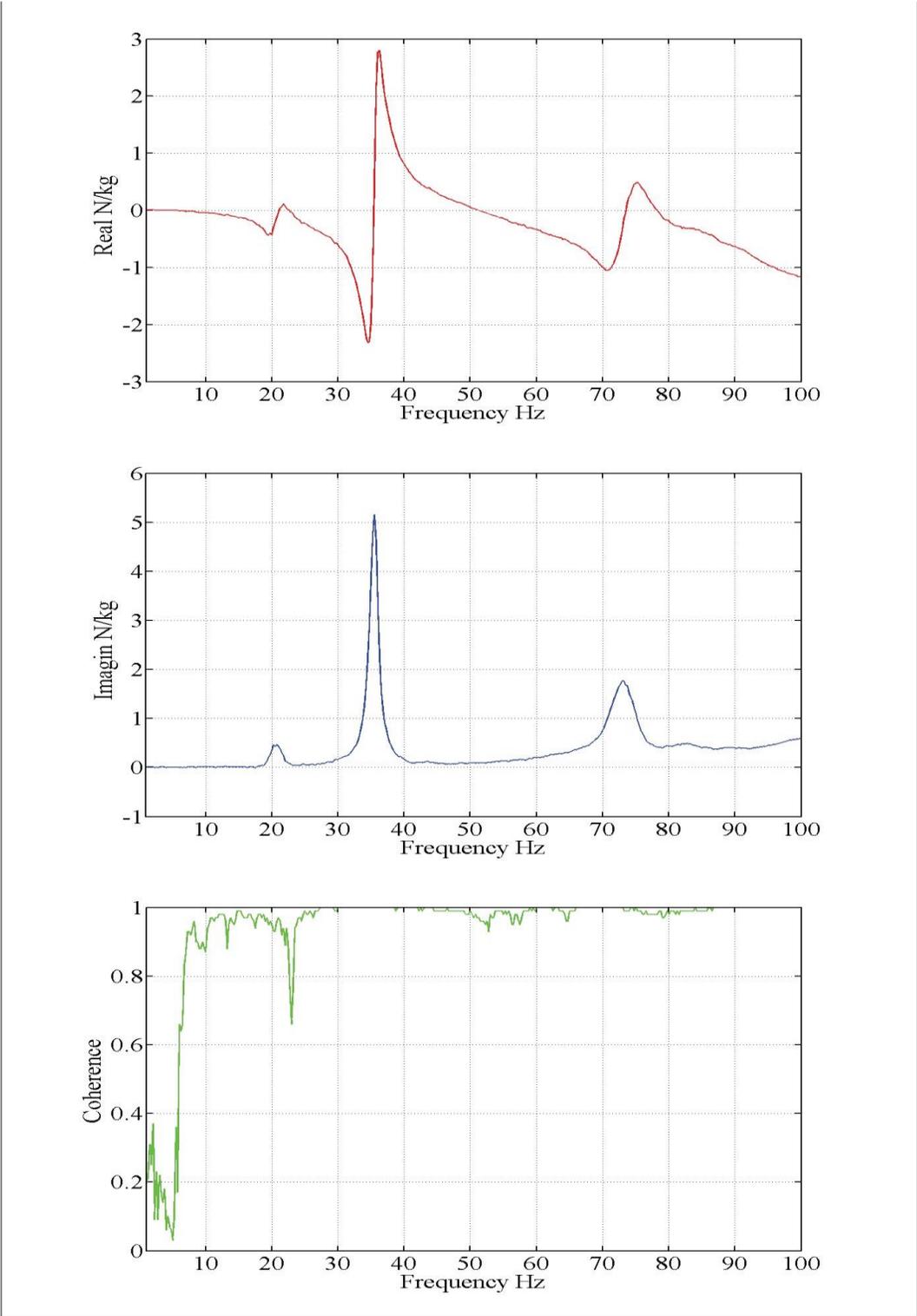


Рисунок 3.24-Влияние диаграммы ФЧХ в направлении Y и измерение в направлении Y

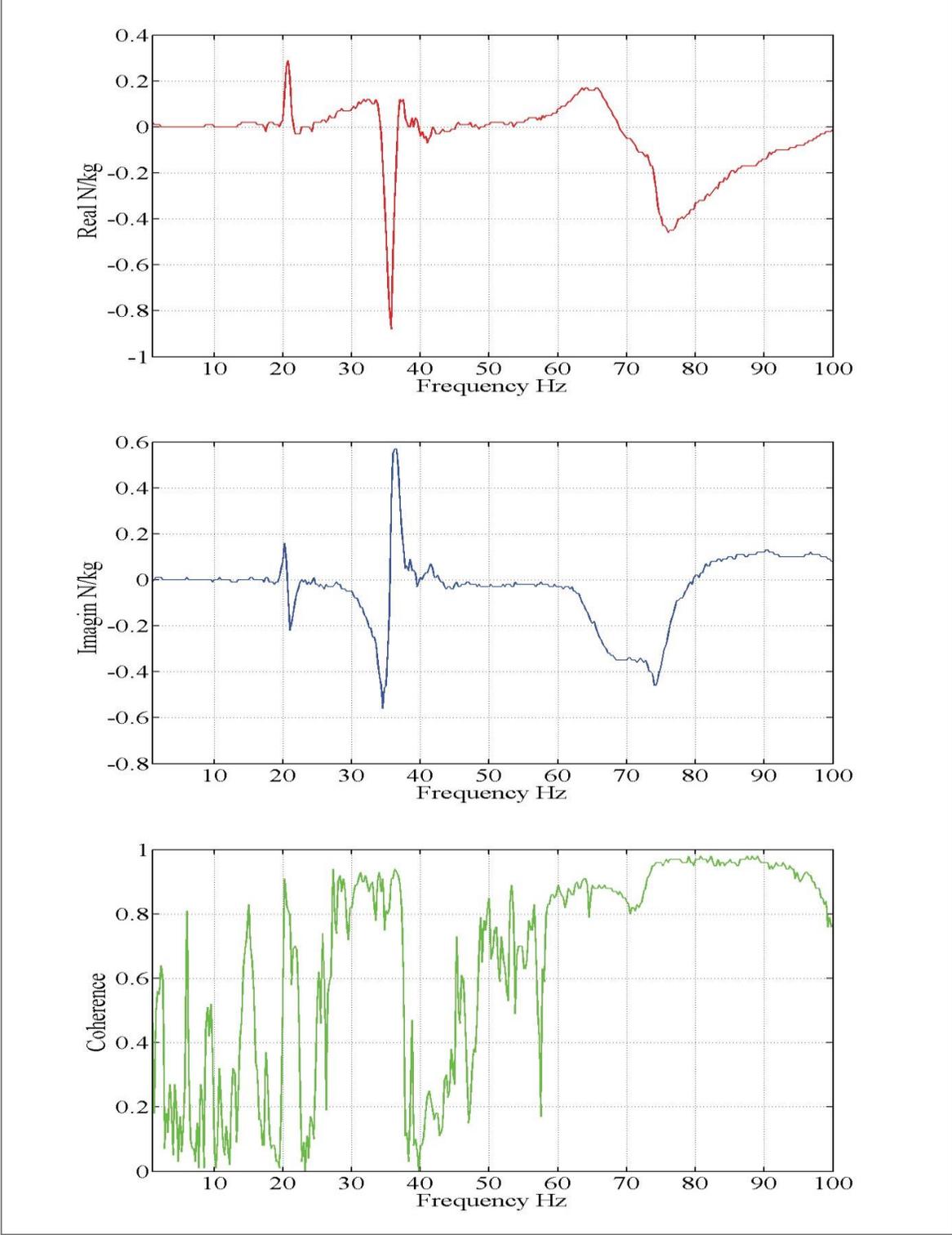


Рисунок 3.25-Влияние диаграммы ФЧХ по оси Z и измерение по оси Y

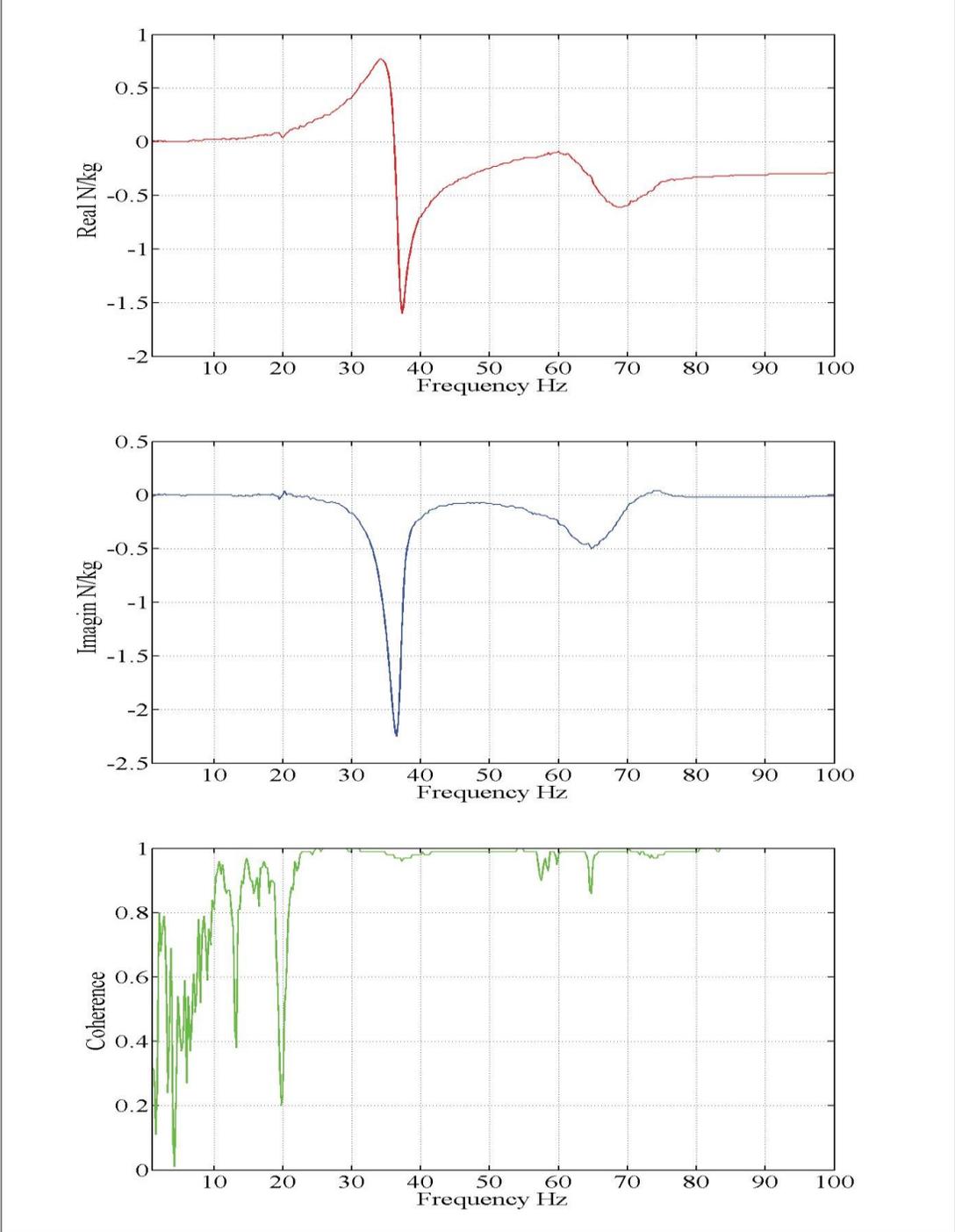


Рисунок 3.26-Влияние диаграммы ФЧХ в направлении X и измерение в направлении Z

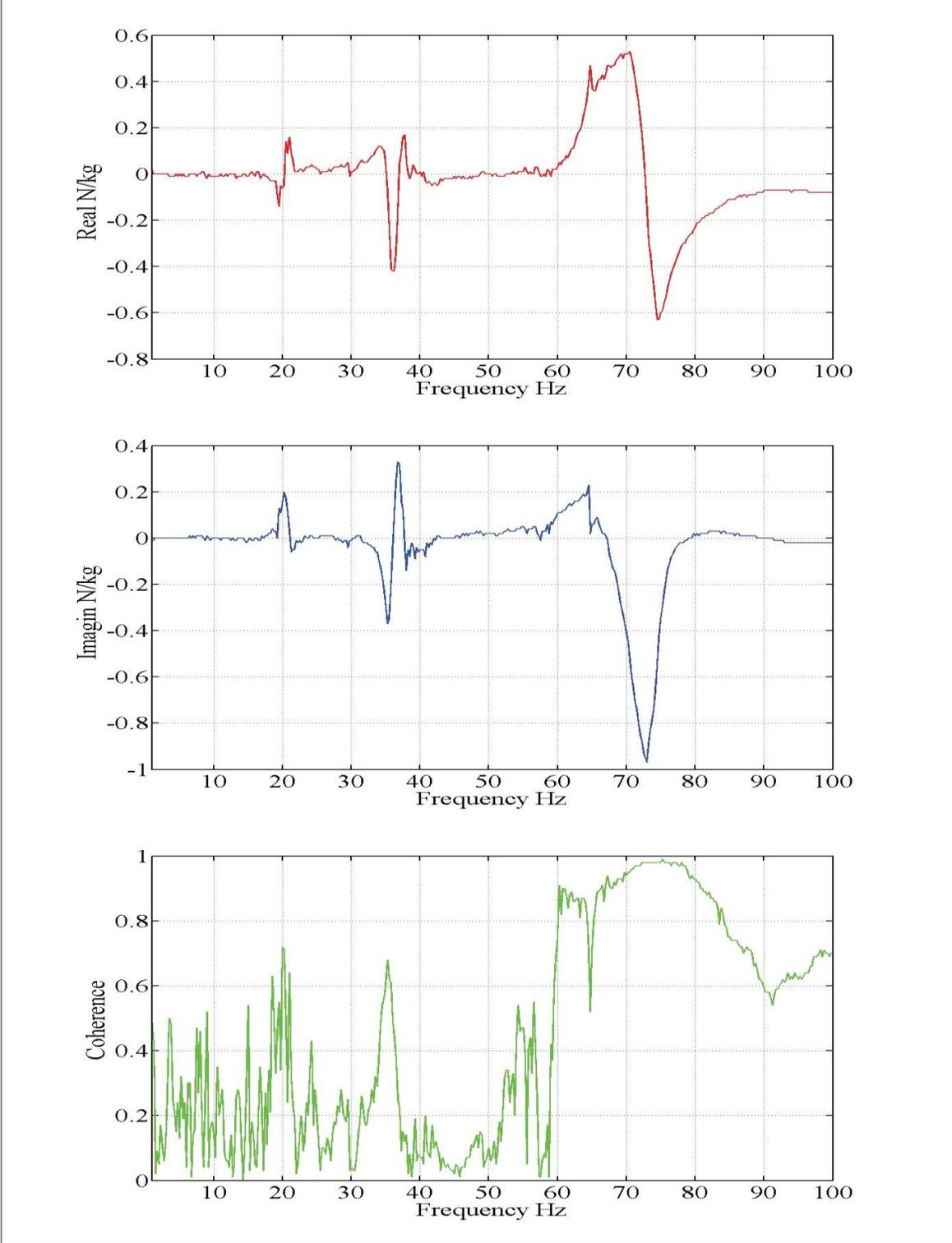


Рисунок 3.27-Влияние диаграммы ФЧХ в направлении Y и измерение в направлении Z

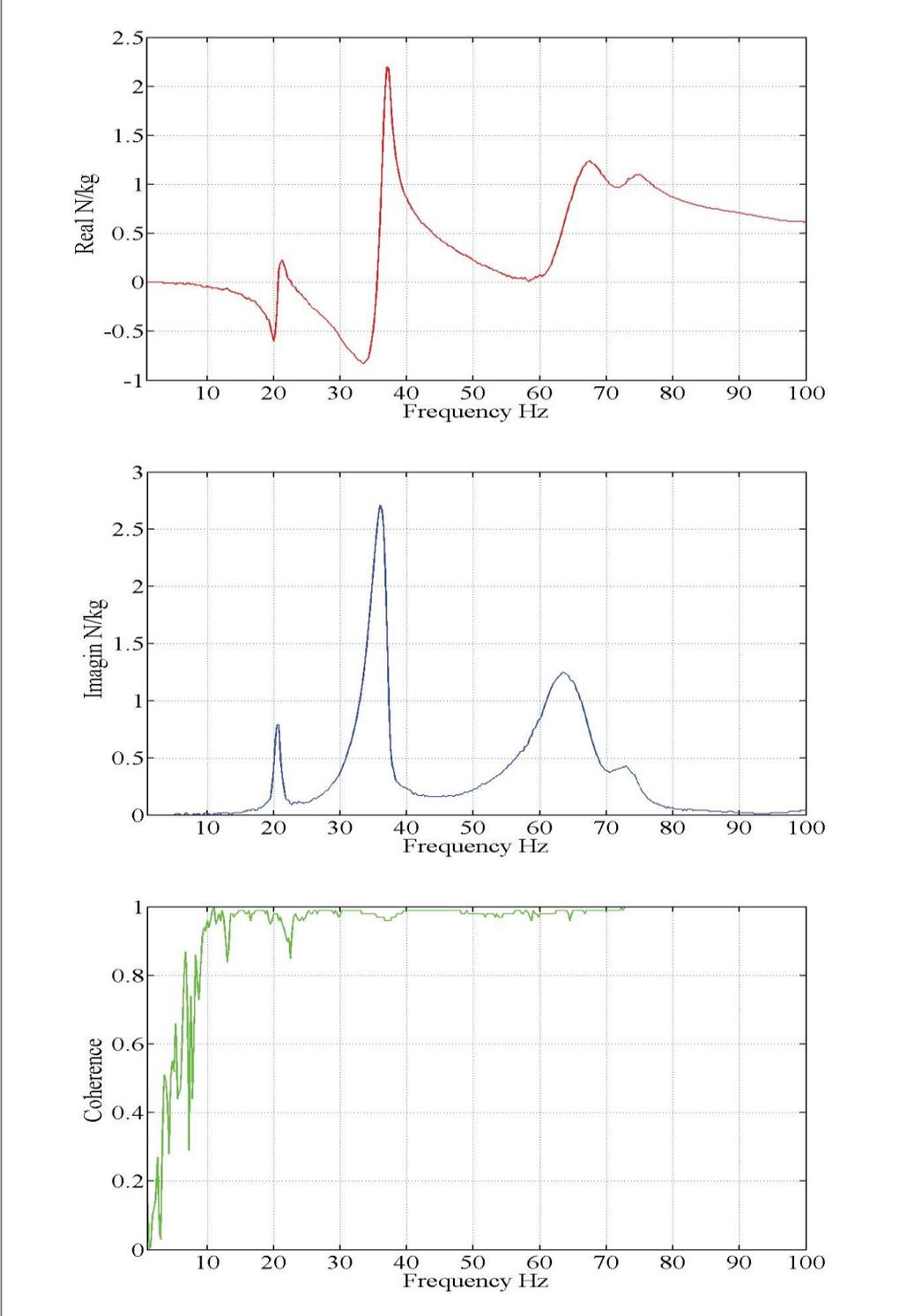


Рисунок 3.28-Влияние диаграммы ФЧХ в направлении Z и измерение в направлении Z

3.7 Заключение

В данной главе была изучена топология обрабатываемых поверхностей, а также выявлено влияние кинематических и динамических свойств робота на качество поверхности. Показано, что геометрические погрешности зубчатых передач оказывают существенное влияние на качество поверхности и создают основные неровности на обрабатываемых поверхностях. Однако было доказано, что незначительные неровности на обработанных поверхностях были созданы из-за низкочастотной вибрации робота. На самом деле, было замечено, что робот имеет две собственные частоты, близкие к частоте вибрации. Близость двух режимов робота к частоте колебаний доказывает, что в роботизированной обработке основным явлением, генерирующим вибрацию инструмента, является модовая связь.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Точность позиционирования робота была исследована в главе 1.3.1, и был представлен гибридный метод калибровки, учитывающий как податливость, так и геометрические несовершенства зубчатых колес. Несмотря на то, что точность позиционирования робота значительно повышается при использовании этого метода калибровки, этого улучшения недостаточно для того, чтобы квалифицировать программное обеспечение для автономного программирования для программирования робота для обработки, где требуется высокая точность. Поэтому рекомендуется использовать дополнительное оборудование, такое как датчики силы или контактные датчики, для повышения точности робота.

Качество обрабатываемых поверхностей было исследовано в главе 2. Результаты показывают, что как кинематические, так и динамические свойства робота влияют на качество поверхности пропилов. Тем не менее, кинематические погрешности оказывают основное влияние. На самом деле, эксцентриситеты зубчатых колес роботизированной системы обработки приводят к тому, что инструмент колеблется во время движения вдоль режущих поверхностей и создает значительные неровности. Поэтому, чтобы улучшить качество поверхности, в первую очередь необходимо учитывать кинематические погрешности. Действительно, без устранения или уменьшения кинематических погрешностей концентрация внимания на вибрации инструмента, такой как вибрация, была бы неэффективной.

Несмотря на то, что динамические свойства обрабатывающей системы были в некоторой степени исследованы, параметры обработки, обеспечивающие обработку без вибраций, не были предоставлены. На самом деле, собственные частоты системы были идентифицированы, и было представлено, что незначительные нарушения системы были вызваны возбуждением одной или нескольких из этих собственных частот; Кроме того, было показано, что направление резания и скорость подачи оказывают существенное влияние на качество обрабатываемых поверхностей, но не была приведена математическая формула, моделирующая вибрацию роботизированной обрабатывающей системы.

Перечень принятых сокращений, терминов

Центральная точка инструмента-ЦТИ

Плотность спектра мощности-ПСМ

Дискретное преобразование Фурье-ДПФ

Функция частотной характеристики-ФЧХ

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Y. Chen, F. Dong, Robot machining: recent development and future research issues, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 66 (9) (2013) 1489–1497, <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4433-4>.
- 2 W. Ji, L. Wang, Industrial robotic machining: a review, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 103 (1) (2019) 1239–1255, <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03403-z>.
- 3 H. Tanaka, T. Yoshita, Machinability evaluation of inclined planetary motion milling system for difficult-to-cut materials, *Key Engineering Materials* 656-657 (2015) 320–327. doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.656 -657.320
- 4 E. Abele, J. Bauer, T. Hemker, R. Laurischkat, H. Meier, S. Reese, O. von Stryk, Comparison and validation of implementations of a flexible joint multibody dynamics system model for an industrial robot, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 4 (1) (2011) 38–43, <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2011>.
- 5 T. Bonnemains, H. Chanal, B. Bouzgarrou, P. Ray, Dynamic model of an overconstrained pkm with compliances: The tripteor x7, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 29 (1) (2013) 180–191, <https://doi.org/10.1016/j.rcim>.
- 6 S. Mousavi, V. Gagnol, B.C. Bouzgarrou, P. Ray, Stability optimization in robotic milling through the control of functional redundancies, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 50 (2018) 181–192, <https://doi.org/10.1016/j.rcim>.
- 7 X. Liu, Y. Li, G. Chen, Multimode tool tip dynamics prediction based on transfer learning, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 57 (2019) 146–154, <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2018.12.001>.
- 8 B. Gherman, D. Pisla, C. Vaida, N. Plitea, Development of inverse dynamic model for a surgical hybrid parallel robot with equivalent lumped masses, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 28 (3) (2012) 402–415, <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2011.11.003>.
- 9 M. Gadaleta, G. Berselli, M. Pellicciari, Energy-optimal layout design of robotic work cells: Potential assessment on an industrial case study, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 47 (2017) 102–111, <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2016.10.002>. SI: FAIM 2015
- 10 E. Abele, M. Weigold, S. Rothenbücher, Modeling and identification of an industrial robot for machining applications, *CIRP Annals* 56 (1) (2007) 387–390, <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2007.05.090>.
- 11 C. Chen, F. Peng, R. Yan, Y. Li, D. Wei, Z. Fan, X. Tang, Z. Zhu, Stiffness performance index based posture and feed orientation optimization in robotic milling process, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 55 (2019) 29–40, <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2018.07.003>.
- 12 G. Xiong, Y. Ding, L. Zhu, Stiffness-based pose optimization of an industrial robot for five-axis milling, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 55 (2019) 19–28, <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2018.07.001>. URL:
- 13 Y. Lin, H. Zhao, H. Ding, Posture optimization methodology of 6r industrial robots for machining using performance evaluation indexes, *Robotics*

and *Computer Integrated Manufacturing* 48 (2017) 59–72, <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2017>.

14 Y. Lin, H. Zhao, H. Ding, Spindle configuration analysis and optimization *Robotics and Computer Integrated Manufacturing* 65 (2020) 10196654 (2018) 83–95, <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2018.05.005>.

15 Y. Guo, H. Dong, Y. Ke, Stiffness-oriented posture optimization in robotic machining applications, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 35 (2015) 69–76, <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2015.02.006>.

16 A. Frommknecht, J. Kuehnle, I. Effenberger, S. Pidan, Multi-sensor measurement system for robotic drilling, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 47 (2017) 4–10, <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2017.01.002>. SI: FAIM 2015

17 P. Yuan, Q. Wang, Z. Shi, T. Wang, C. Wang, D. Chen, L. Shen, A micro-adjusting attitude mechanism for autonomous drilling robot end-effector, *Sci. China Inf. Sci.* 57 (12) (2014) 1–12, <https://doi.org/10.1007/s11432-014-5190-9>.

18 A. Brunete, E. Gambao, J. Koskinen, T. Heikkilä, K.B. Kaldestad, I. Tyapin, G. Hovland, D. Surdilovic, M. Hernando, A. Bottero, S. Anton, Hard material smallbatch industrial machining robot, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 54 (2018) 185–199, <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2017.11.004>.

19 A. de Luca, R. Mattone, Sensorless robot collision detection and hybrid force/motion control, *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (2005), pp. 999–1004, <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2005.1570247>.

20 J. Barnfather, M. Goodfellow, T. Abram, A performance evaluation methodology for robotic machine tools used in large volume manufacturing, *Robotics and Computer Integrated Manufacturing* 37 (2016) 49–56, <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2015>.

21 L. Cen, S.N. Melkote, Effect of robot dynamics on the machining forces in robotic milling, *Procedia Manufacturing* 10 (2017) 486–496, <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.034>. 45th SME North American Manufacturing Research Conference, NAMRC 45, LA, USA

22 S. Garnier, K. Subrin, K. Waiyagan, Modelling of robotic drilling, *Procedia CIRP* 58 (2017) 416–421, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.246>. 16th CIRP Conference on Modelling of Machining Operations (16th CIRP CMMO)

23 Y. Altintas, M. Weck, Chatter stability of metal cutting and grinding, *CIRP Annals* 53 (2) (2004) 619–642, [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60032-8](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60032-8).