

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
Высшего образования  
«Самарский государственный технический университет»  
(ФГБОУ ВО «СамГТУ»)

На правах рукописи

Сидоров Игорь Сергеевич

СТРУКТУРНО – ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ЦИФРОВОГО  
ПОЗИЦИОННО – СЛЕДЯЩЕГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ПЕРЕМЕННОЙ  
ЧАСТОТОЙ КВАНТОВАНИЯ РЕГУЛЯТОРА ПОЛОЖЕНИЯ

Специальность: 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
д.т.н., профессор  
Лысов В.Е.

Самара – 2017

## Оглавление

<b>Введение</b> .....	4
<b>1 Постановка проблемы. Цели и задачи исследования</b> .....	16
1.1 Анализ обеспечения точности позиционно – следящих электроприводов прецизионных станков .....	16
1.2 Техническое описание одностоечного координатно – расточного станка модели 2440СФ4 с УЧПУ.....	19
1.3 Анализ возмущений, приложенных к подвижным органам станка.....	24
1.4 Анализ систем управления позиционно – следящих электроприводов....	29
1.5 Математическая модель позиционно – следящего электропривода при учете дискретности экстраполятора «0» порядка.....	38
1.6 Анализ влияния малых постоянных времени контура скорости на динамические показатели качества управления.....	43
1.7 Постановка задачи исследования.....	44
<b>2 Анализ влияния дискретности в УЧПУ на динамические показатели качества управления позиционно – следящего электропривода</b> .....	45
2.1 Математический метод оценки влияния периода дискретности $T$ экстраполятора нулевого порядка на динамические показатели качества позиционно – следящего электропривода.....	45
2.2 Анализ влияния периода дискретности $T$ экстраполятора нулевого порядка на устойчивость позиционно – следящего электропривода.....	48
2.3 Анализ погрешности в воспроизведении заданной траектории движения позиционно – следящего электропривода с экстраполятором нулевого порядка.....	56
2.4 Анализ влияния периода дискретности экстраполятора $T$ на точность воспроизведения сигнала задания.....	63
<b>Выводы по главе</b> .....	70

<b>3</b>	<b>Разработка интеллектуального модуля управления позиционно – следящего электропривода</b> .....	72
3.1	Методика определения частоты гармонического сигнала задания позиционно – следящему электроприводу при отработке сложных профилей.....	72
3.2	Разработка алгоритма и структурной схемы интеллектуального позиционно – следящего электропривода.....	81
	Выводы по главе.....	85
<b>4</b>	<b>Экспериментальные исследования влияния периода дискретности <math>T</math> экстраполятора нулевого порядка на динамические показатели качества</b> .....	87
4.1	Анализ влияния периода дискретности $T$ экстраполятора нулевого порядка на устойчивость позиционно – следящего электропривода в среде моделирования «MATLAB Simulink».....	87
4.2	Анализ погрешности в воспроизведении заданной траектории движения позиционно – следящего электропривода с экстраполятором нулевого порядка в среде моделирования «MATLAB Simulink».....	90
4.3	Анализ влияния периода дискретности экстраполятора $T$ на точность воспроизведения сигнала задания в среде моделирования «MATLAB Simulink».....	93
4.4	Эксперимент и исследование влияния дискретности вызова программы на качество обработки и производительности станка модели 2440СФ4.....	101
4.5	Верификация экспериментального исследования и теоретического анализа влияния дискретности экстраполятора нулевого порядка.....	106
	Выводы по главе.....	108
	<b>Заключение</b> .....	109
	<b>Библиографический список</b> .....	111
	<b>Приложение 1</b> .....	117
	<b>Приложение 2</b> .....	118
	<b>Приложение 3</b> .....	119

## Введение

Одной из наиболее прогрессивных отраслей промышленности в мире является станкостроение. Станкостроение – базовая отрасль машиностроения, которая является фондообразующей и определяет уровень безопасности и развития страны. За последние 20 лет отечественный рынок станкоинструментальной продукции претерпел количественные и качественные изменения, объем выпуска оборудования снизился по сравнению с 1991 годом с 70 тыс. штук до 4 тыс. в 2015 г (более чем в 15 раз!). Физическая и моральная изношенность основных фондов, в первую очередь металлообрабатывающего оборудования, достигает 60%. Количество занятых в станкостроении за это время упало в 20 раз [19,55]!

Основной доход отечественных станкостроительных предприятий обеспечивается ремонтом и модернизацией старого оборудования (в среднем 80%) [6]. Произведенные в России станки с числовым программным управлением (ЧПУ) почти полностью комплектуются импортными из стран лидеров производства станков системами ЧПУ, датчиками, измерительными системами, роботами, электротехническими и электронными изделиями, гидравлическими системами и т.п. и к электроприводу, как его основной составляющей [10]. Наиболее крупными поставщиками систем ЧПУ и электроприводов в настоящее время являются такие компании как: Siemens, Heidenhain, Fanuc, Omron, Mitsubishi, KEB.

В настоящее время активными поставщиками компонентов для станкостроения являются азиатские страны, которые вытесняют конкурентов из развитых стран, устанавливая более низкие цены на свою продукцию. Из отечественных компаний производителей сервотехники можно выделить: «ЗАО Сервотехника»; «ООО Модмаш – софт», выпускающие цифровые сервоприводы и ЧПУ серии FMS; «ООО Балт – Систем», ЧПУ серии NC, цифровые сервоприводы и комплектующие к ним.

Первые успехи отечественного станкостроения проявляются с 2015г [7,56]. Доля импортного оборудования сократилась с 88% до 80%. Для создания спроса на продукцию станкостроения государством сформированы флагманы отечественного машиностроения: «Ростех», «Росатом», «Объединенная авиастроительная корпорация», «ВПК», которые являются прямыми потребителями станков. Постановлением правительства №1224 от 31 декабря 2014г. вводится запрет на поставку импортных станков для предприятий оборонной промышленности. Доля станков с ЧПУ на внутреннем рынке увеличилась и достигла в 2016г. 33%. Системный генератор отрасли «Станкопром» контролирует импорт оборудования, комбинирует разработки зарубежных и российских компаний, стремится развить НИОКР и их внедрение. Государством ставится задача к 2020г. сократить импорт до 58%.

В настоящее время предпринимаются меры по развитию станкостроения. Вступила в действие программа «Национальная технологическая база», в которой в качестве подпрограммы выступает «Развитие отечественного станкостроения и инструментальной промышленности» с объемом финансирования 56 млрд. рублей в период 2011 – 2016 годы (распоряжение правительства Российской Федерации от 21 октября 2010г. №1824 – р). Вернуть России упомянутые позиции способствует программа «Развитие оборонно – промышленного комплекса РФ на 2011 – 2020 годы». В программе одной из задач ставится разработка прецизионных станков с ЧПУ с точностью до 100 Нм. Ведущим разработчиком назначен МГТУ «Станкин» (постановление правительства РФ от 24 декабря 2013г. №1224).

Согласно упомянутым мерам продукция заводов России на рынке должна подняться с 10% до 40% к 2020 году. Важнейшей задачей вывода отечественного станкостроения на приемлемый уровень является решение подготовки квалифицированных кадров и установить достойный уровень заработной платы [19,55].

Главными направлениями развития станкостроения в области высокотехнологичного и высокоточного производства являются:

1. Повышение гибкости и универсальности металлообрабатывающего оборудования;
2. Повышение производительности и качества производимых деталей;
3. Снижение энергопотребления станком;
4. Понижение стоимости металлорежущих станков.

Требования высокой производительности и качества производимых деталей при использовании станков с ЧПУ занимает одно из важнейших мест. В настоящее время требования к качеству изготовления и обработки деталей для дальнейших технологических операций постоянно возрастает, поле допусков на данный момент составляет 1–2мкм. Точность позиционирования, динамическая точность исполнительных органов [47] является одной из основных характеристик координатно – расточных станков (КРС). Такие ученые как: В. А. Кудинов, В.Г. Митрофанов, Д.Н. Решетов, Ю.М. Соломенцев, Ж. С. Равва, В.Е. Лысов, С.Я Галицков, Г. Шлизингер, Ф. Кенигсберг, И. Тлуст, П. Угринов и др, внесли весомый вклад в области повышения точности КРС за счет введения систем автоматического управления (САУ) подвижными и несущими органами станка.

Известно, что баланс точности [37] обработки на станках с ЧПУ определяется в общем виде зависимостью:

$$\Delta_p = K \sqrt{\varepsilon_{уст}^2 + \Delta_{р_{наст}}^2 + \Delta_{р_{ЧПУ}}^2 + \Delta_{р_{уп}}^2}, \text{ где}$$

$\varepsilon_{уст}$  – поле погрешности установки детали;  $\Delta_{р_{наст}}$  – поле погрешности настройки станка;  $\Delta_{р_{ЧПУ}}$  – поле рассеяния от устройства ЧПУ и электропривода;  $\Delta_{р_{уп}}$  – поле рассеяния от упругих деформаций станка – приспособления – детали (СПИД).

Поэтому для достижения высоких показателей точности, как в динамических режимах, так и при позиционировании подвижных органов станка необходимо стремиться к компенсации действия помех и минимизации упомянутых выше полей рассеяния.

В настоящей работе изучается одна из составляющих погрешности станка с ЧПУ – влияние дискретности [27] в позиционно – следящем приводе подачи координатно – расточного станка особо высокой точности (класс С) на динамическую погрешность и погрешность позиционирования, вносимой системой ЧПУ. Работа выполнена в рамках Федеральной государственной программы «Развитие отечественного станкостроения и инструментальной промышленности».

**Цель диссертационной работы** разработать цифровой позиционно - следящий электропривод с учетом изменения дискретности ЧПУ, позволяющей снизить динамическую погрешность и повысить качество обработки изделий.

Для достижения цели, поставленной в работе, необходимо решить следующие задачи.

1. Анализ влияния дискретности в ЧПУ на динамические показатели качества цифрового позиционно – следящего электропривода, выявить условия выполнения требований по устойчивости, точности воспроизведения сигнала задания.

2. Провести структурно – параметрический синтез устройства автоматической смены дискретности ЧПУ в функции технологических требований к обработке деталей (скорость подачи инструмента –  $V_{зд}$ , радиус обрабатываемого контура –  $R$ , материал, инструмент).

3. Разработать алгоритм функционирования электропривода при переменной частоте управляющих сигналов.

4. Создать компьютерную модель цифрового позиционно – следящего электропривода с переменной частотой квантования регулятора положения.

5. На основе теоретических и экспериментальных исследований разработать опытно – промышленный электропривод и устройство управления многооперационного КРС.

**Предметом исследования** данной работы является структурно – параметрический синтез цифрового позиционно – следящего электропривода, с переменной дискретностью в контуре управления положением.

**Объектом исследования** работы является цифровой позиционно – следящий электропривод прецизионного координатно – расточного станка.

#### **Методы исследования.**

В работе использованы методы теории электропривода, теории автоматического управления аналоговыми и цифровыми системами, методы математического моделирования на персональном компьютере.

Метод экспериментального исследования на стенде – станке использовался для получения исходных данных, проведения и уточнения результатов теоретического анализа.

#### **Научная новизна.**

1. Критерий определения периода дискретности экстраполятора нулевого порядка в цифровом регуляторе положения позиционно – следящего электропривода, отличающийся от известных переменной частотой квантования в функции технологических требований и точности обработки изделий.

2. Алгоритм автоматической смены периода дискретности вызова программы, отличающийся учетом изменения параметров обрабатываемой детали и инструмента в функции параметров: скорость подачи инструмента –  $V_{зд}$ , радиус обрабатываемого контура –  $R$ , динамическая погрешность –  $\delta$ .

3. Структурная схема и методика синтеза «интеллектуального» цифрового позиционно следящего электропривода.

**Практическая значимость работы** состоит в следующем.

1. Создана компьютерная модель, позволяющая оценить влияние периода дискретности на динамические и статические показатели качества управления цифровым позиционно – следящим электроприводом.

2. Разработана методика определения периода дискретности цифрового регулятора положения в функции технологических требований и программное обеспечение.

3. Результаты работы использованы при разработке цифровых позиционно – следящих электроприводов для станка модели 2440СФ4 на предприятии ЗАО «Стан – Самара» (Акт использования в практике инженерного проекта в работе на предприятии ЗАО «Стан – Самара»).

**Достоверность полученных результатов** обеспечивается применением методов теории электропривода, автоматического управления, компьютерного моделирования и сравнение с результатами натуральных экспериментов.

#### **Реализация результатов работы.**

Основные результаты работы были использованы ЗАО «Стан – Самара» (г. Самара) при разработке позиционно – следящего электропривода координатно – расточного станка 2440СФ4, а также в учебном процессе ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» (г. Самара), что подтверждается соответствующими актами внедрения.

#### **Апробация работы.**

Основные положения и результаты работы докладывались на технических советах ЗАО «Стан – Самара», Семинаре ЗАО «Стан – Самара» и фирмы Heidenhain (30 июня – 1 июля 2016г.) г. Самара, а также на технических семинарах кафедры «Электропривод и промышленная автоматика» ФБГОУ ВО «СамГТУ», V международной научно – практической конференции Cals – технологии в авиастроении "Системы управления жизненным циклом изделий авиационной техники: актуальные проблемы, исследования, опыт внедрения и перспективы развития" (24 – 25 ноября 2016г.) г. Ульяновск, XIV международной научно – практической

конференции «Ашировские чтения» (26 сентября 2017г.) СамГТУ, XXIV – й международной научной конференции «Достижения и проблемы современной науки» (4 октября 2017г.) г. Санкт – Петербург.

### **Публикации:**

По теме диссертации опубликовано 10 печатных работ, в том числе 6 из них – в журналах, рекомендованных ВАК РФ (сборник серии «Технические науки», СамГТУ №3(47). – 2015. – С. 142 – 148.; сборник серии «Технические науки», СамГТУ №4(48). – 2015. – С. 70 – 75.; Теоретический и прикладной научно – технический журнал «Мехатроника, Автоматизация, Управление». Том 17. – №10. – 2016. – С.685 – 689.; Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Том 18. – №4(3). – 2016.– С.464 – 469.; Научно – технический журнал «Станки Инструмент». №7. – 2016. – С.18 – 22.; Научно – технический журнал, Известия высших учебных заведений «Электромеханика». №6(548). – 2016. – С.59 – 62.).

**Личный вклад автора состоит** в разработке и анализе структурных схем, выводе дискретных передаточных функций цифрового позиционно – следящего электропривода, анализе влияния дискретности на точность воспроизведения сигнала задания при различных возмущающих воздействиях.

Получил основной критерий расчета периода дискретности экстраполятора в функции технологии обработки изделий: профиля обрабатываемой детали, заданной скорости обработки в зависимости от материала заготовки, параметров режущего инструмента. Провел комплексное моделирование и оценку влияния вариации дискретности на динамические показатели качества управления цифровым позиционно – следящим электроприводом. Осуществил оснастку станка модели 2440СФ4 измерительно – регистрирующим комплексом, провел непосредственно эксперимент с изменением дискретности экстраполятора, с последующей обработкой результатов экспериментов и их анализом. Участвовал в подготовке к публикации результатов исследований, выступал

на конференциях. Все представленные в диссертации результаты получены лично автором.

**На защиту выносятся.**

1. Структурно – параметрический синтез цифрового позиционно – следящего электропривода с учетом автоматического изменения дискретности сигнала с ЧПУ, обеспечивающей повышенную точность и производительность.

2. Математическая модель цифрового позиционно – следящего электропривода с переменной частотой ЧПУ.

3. Алгоритм функционирования цифрового позиционно – следящего электропривода с устройством изменения дискретности ЧПУ в функции технических требований к обрабатываемой детали.

**Научная квалификационная работа на соискание степени кандидата технических наук** выполнена в соответствии с паспортом специальности 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» и соответствует формуле специальности: «...принципы и средства управления объектами, определяющие функциональные свойства действующих или создаваемых электротехнических комплексов и систем промышленного... и специального назначения». Объектом изучения: «... являются электротехнические комплексы и системы... электропривода... промышленных предприятий... специальной техники.

**Область исследований соответствует пунктам:**

1. «Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, физическое... и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем».

2. «Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления...».

3. «Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях».

**Структура и объем:**

Диссертационная работа объемом 119 страниц состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка литературы из 59 наименований, рисунков 56, таблиц 11 и приложений 3.

**Во введении** дано обоснование актуальности работы, посвященной влиянию дискретности экстраполятора нулевого порядка в позиционно – следящем приводе подачи координатно – расточного станка на динамическую погрешность и погрешность позиционирования, вносимой системой ЧПУ. Сформулированы цель и задачи исследования, изложена научная новизна и практическая значимость диссертации.

**В первой главе** представлены показатели качества, необходимые для обеспечения точности обработки на особо точных станках класса «С». Приведена основная идея к задаче повышения точности металлорежущих станков. Также приведено техническое описание одностоечного координатно – расточного станка модели 2440СФ4 с устройством числового программного управления (УЧПУ), на базе которого получены результаты экспериментального исследования, влияния частоты дискретизации цифровой части УЧПУ. Проведен анализ известных возмущений, приложенных к подвижным органам станка, а также представлена схема формирования погрешности в станке, с учетом дискретности цифровой части системы.

Рассмотрен и проведен сравнительный анализ известных систем управления позиционно – следящих электроприводов. Анализ показывает, что в позиционно – следящих электроприводах подачи станков особо высокой точности находят аналого – цифровые или системы прямого цифрового управления с синхронным исполнительным двигателем. Упомянутые системы строятся по принципу систем подчиненного

регулирования (СПР). Проанализировав методы построения структурных схем позиционно – следящих электроприводов, получена структурная схема исследования, которая является математической моделью для исследования влияния дискретности на динамические показатели позиционно – следящего электропривода.

**Во второй главе** показано, что основным элементом, вносящим дискретность является экстраполятор нулевого порядка – электронный фильтр, преобразующий оцифрованный сигнал в непрерывный. Процесс восстановления дискретизированного сигнала называется интерполяцией. Поэтому, при каких условиях процесс интерполяции обеспечивает требуемую точность, является крайне актуальным для прецизионных позиционно – следящих электроприводов. За основу математического анализа процесса интерполяции принята теорема Шеннона – Котельникова.

Проведен анализ влияния периода дискретности  $T$  экстраполятора нулевого порядка на устойчивость позиционно – следящего электропривода, а также воспроизведение сигнала задания и заданной траектории движения позиционно – следящим электроприводом. Анализ влияния периода дискретности  $T$  на показатели качества проведен с помощью  $Z$  – преобразования с последующим переходом в плоскость псевдочастот  $\lambda$ . Это позволит использовать логарифмические амплитудно – фазовые частотные характеристики (ЛАФЧХ), которые наглядно позволят выявить особенности влияния  $T$  на упомянутые выше показатели. Оценку влияния дискретности на показатели качества проводим относительно аналогового прототипа электропривода. Выведена передаточная функция разомкнутой системы электропривода в форме  $Z$  – преобразования. Анализ передаточной функции в общем виде затруднен с точки зрения поставленной задачи, поэтому исследование проводим численным методом с последующим обобщением. Экспериментальный стенд разработан по аналогии с позиционно – следящей системой привода подачи станка 2440СФ4 и позволяет провести исследование влияния периода дискретности.

Также для исследования определены значения периода дискретности экстраполятора. Используя упомянутые методы анализа дискретных систем, получены некоторые зависимости, позволяющие построить логарифмические амплитудно – фазовые частотные характеристики и проведен их анализ. Теоретический анализ, проведенный численным методом, позволяет сделать обобщение. Запасы устойчивости системы, точность воспроизведения заданной траектории и динамическая погрешность удовлетворяют требованиям, сравнимыми с аналоговым прототипом. В этой связи справедливо утверждение, что при увеличении быстродействия электропривода и в целом контура положения, а, следовательно, и при увеличении частоты  $\omega_c$ , необходимо пропорционально увеличивать и частоту дискретизации экстраполятора  $\omega_0$ , поддерживая установленное соотношение.

**В третьей главе** приведена методика определения частоты гармонического сигнала задания позиционно – следящему электроприводу при отработке сложных профилей. В качестве примера рассмотрена круговая интерполяция в двух осях (X, Y).

На основании методики определения частоты квантования  $\omega_0$  разработан алгоритм управления интерполирующими осями позиционно – следящего электропривода в зависимости от профиля обрабатываемой детали и технологии обработки. В качестве примера обрабатываемой детали выбрана заготовка, которая содержит в своей геометрической форме прямолинейные участки и участки с радиусами скруглений. Разработана блок – схема алгоритма управления координатой «X», по аналогии с которой функционирует и координата «Y».

На основании изложенного алгоритма, разработан модуль интеллектуального управления (ИМУ) программированного процесса обработки контура детали. Данный интеллектуальный модуль входит в общую систему ЧПУ электропривода подачи станка.

Таким образом, впервые предложен алгоритм управления  $\omega_0$ , встраиваемый в структуру позиционно – следящего электропривода, обеспечивающий повышенные показатели качества управления в функции параметров обрабатываемого изделия.

**В четвертой главе** проведен анализ и моделирование данных, полученных при теоретическом исследовании в среде моделирования «MATLAB Simulink».

Для подтверждения результатов теоретического исследования влияния периода дискретности  $T$  на устойчивость, качество управления и, как следствие, точность воспроизведения сигнала задания положения рабочего органа станка, был проведен эксперимент на координатно – расточном станке модели 2440СФ4, оснащенной УЧПУ фирмы «Балт – Систем» модели «NC 230».

На основе произведенных в работе теоретических и экспериментальных исследований выведен и обоснован критерий соотношения между частотой квантования экстраполятора нулевого порядка в регуляторе положения цифровой системы и полосой пропускания линейной части электропривода, обеспечивающей заданные показатели по точности и производительности. Разработан новый алгоритм управления частотой квантования  $\omega_0$  в функции технологических параметров процесса обработки изделий. Разработана структурная схема управления электроприводом КРС, отличающейся от известных включением в структурную схему модуля интеллектуального управления частотой квантования ЧПУ.

Работа выполнена на кафедре «Электропривод и промышленная автоматика» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет».

## 1 Постановка проблемы. Цели и задачи исследования

### 1.1 Анализ обеспечения точности позиционно – следящих электроприводов прецизионных станков

Регулируемый электропривод является электромеханической системой, обеспечивающей изменение скорости или позиции в заданном диапазоне с заданной точностью и быстродействием. Позиционно – следящий электропривод – это более сложная система, поскольку в его структуре присутствует интегрирующее звено [4].

В прецизионных координатно – расточных станках привода подачи салазок, стола оснащены позиционно – следящими электроприводами. Последние должны обеспечить точность позиционирования в пределах, показанных в таблице 1.1.

Результатом работы следящего электропривода, является не только точность воспроизведения сигнала задания, но и обеспечение заданной формы и шероховатости обработанного изделия [40].

Таблица 1.1 – Сводные нормы точности станков

Величина перемещения, мм	Класс точности								
	В	А	С	В	А	С	В	А	С
	Накопленное отклонение по осям Z и W, мкм			Накопленное отклонение по осям X и Y, мкм			Среднее квадратичное отклонение, мкм		
До 125	5	2,5	1,2	3	1,6	0,6	0,5	0,3	0,1
Св. 125 до 200	6	3	1,6	4	2	0,8	0,6	0,3	0,2
>> 200 >> 300	8	4	2,0	5	2,5	1,0	0,6	0,3	0,2
>> 320 >> 500	10	5	2,5	6	3	1,2	1	0,5	0,2
>> 500 >> 800	12	6	3	8	4	1,6	1,6	0,8	0,4
>>800 >> 1250	16	8	4	10	5	2,0	1,6	0,8	0,4

Предельные отклонения [37] формы цилиндрической поверхности обработанной детали:

Таблица 1.2

D, мм	До 6	6 – 18	18 – 50	120 – 160	260 – 500
Степень точности, мкм	0,3	0,5	0,8	1,0	1,2

Значения шероховатости [40] по высоте  $R_a$  и длине  $R_z$ :

Таблица 1.3

Класс шероховатости	$R_a$ , мкм	$R_z$ , мкм	Базовая длина, мм
9	0,32 – 0,16	1,6 – 0,8	0,25
10	0,16 – 0,08	0,8 – 0,4	0,25

Такие требования предъявляются при алмазном растачивании, тонком, круговом шлифовании. В процессе обработки сложной поверхности позиционно – следящий электропривод должен воспроизводить гармонический сигнал задания. Одним из основных условий процесса обработки является необходимость поддержания постоянной скорости подачи инструмента  $\mathcal{G}_{30}$  и заданной классом точности станка скоростной ошибки. Скорость подачи определяется технологическим процессом [21]. Связь между круговой частотой задания  $\omega_{30}$  и подачей инструмента, определяется зависимостью:

$$\omega_{30} = \frac{\mathcal{G}_{30}}{X_{30}} \quad (1.1).$$

Для некоторых профилей и заданных скоростей резания частоты задания приведены в таблице 2.3. Диапазон частот  $\omega_{30}$ , в котором требуется обеспечить с заданной точностью показатели качества, изменяется от 0,92 ÷ 1,52 дек. Проанализируем погрешности, влияющие на точность, и определим цели и задачи исследований диссертации. Верификацию результатов исследований проведем на стенде – станке 2440СФ4.

Станки, классов точности «С», обеспечивают требуемую точность только при эксплуатации их в термokonстантных цехах, где поддерживаются постоянные температура и влажность.

ГОСТ 8–82 для всех видов металлорежущих станков устанавливает стандарт общих требований к испытаниям на точность.

Главная идея подхода к задаче повышения точности позиционирования и динамической точности заключается в том, что станок во время функционирования подвергается воздействию случайных возмущений, а также систематических воздействий, приводящих к отклонению его параметров от оптимальных значений, следовательно, к потере точности и производительности станка [2]. Поставленная задача решается выявлением возмущений и параметров станка, влияющих на точность, производительность и надежность технологической машины, измерению отклонений выбранных параметров от оптимальных, анализу полученной информации и компенсации возникших отклонения.

Точность системы станок – инструмент делится на следующие группы[18, 47]:

1. Начальные точности станков: геометрические и кинематические неточности станков.
2. Погрешности инструментов: начальные; размерный износ; затупление и как следствие увеличение силовых и температурных деформаций узлов станка.
3. Точности станков, связанные с режимом работы в данный момент или за тепловой цикл станка: упругие деформации, которые влияют на точность в связи с переменной жесткостью системы, переменными силами трения и др.; колебания; температурные деформации.
4. Погрешности станков, связанные с влиянием временем и условиями длительной эксплуатации станков; износ станков; коробление от остаточных напряжений.

5. Точность позиционно – следящих электроприводов: ошибка позиционирования, скоростная ошибка.

6. Погрешность управления станком, связанная с дискретностью цифровой части системы управления.

7. Погрешности, связанные с работой оператора: погрешности настройки; погрешности установки на размер.

В автоматическом режиме работы станка погрешность обработки не зависит от действий рабочего, а определяется свойствами станка, инструмента и обрабатываемых заготовок, тем самым характеризуя погрешность работы станка. Погрешность работы станка, вне зависимости от нагрузки, возникает от точности настройки системы управления приводами подач исполнительных органов.

## **1.2 Техническое описание одностоечного координатно–расточного станка модели 2440СФ4 с УЧПУ**

Одностоечный координатно–расточный станок модели 2440СФ4 с УЧПУ [52] (рисунок 1.1) предназначен для обработки широкого диапазона деталей, отличающихся конфигурацией, размерами и материалами, к точности формы и взаимного расположения которых предъявляют самые жесткие требования. Станок позволяет осуществлять следующие технологические операции: обработку отверстий с точным расположением осей методом растачивания (получистовое и точное чистовое), развертывание, контурное и прямоугольное фрезерование (получистовое и чистовое), сверление, зенкерование, нарезание резьбы метчиками, выполнение разметки и высокоточных измерений.

Станок предназначен для оснащения инструментальных производств, а также для единичной и серийной обработки широкой номенклатуры изделий на предприятиях машиностроительного профиля.



Рисунок 1.1. Станок координатно–расточный одностоечный

Технические характеристики станка 2440СФ4 приведены в таблице 1.4. Общий вид с обозначением сборочных единиц станка показан на рисунке 1.2. Перечень составных частей станка приведен в таблице 1.5.

Таблица 1.4 – Технические характеристики станка 2440СФ4

№ п/п	Наименование параметра		Значение
1	Размеры рабочей поверхности стола, мм	ширина	400
		длина	800
2	Наибольший ход стола, мм	поперечный	400
		продольный	630
3	Наибольший ход шпиндельной бабки, мм		500
4	Расстояние от торца вертикального шпинделя до рабочей поверхности пола, мм	наименьшее	130
		наибольшее	630
5	Вылет шпинделя (расстояние от стойки до оси шпинделя), мм		450
6	Рабочие подачи, мм/мин: стола, салазок, шпиндельной бабки		0,5–3000
7	Скорость быстрых перемещений стола, шпиндельной бабки, мм/мин		8000
8	Наибольший диаметр обработки, мм	сверление по стали	50
		расточивание	130
9	Частота вращения шпинделя (регулирование бесступенчатое), об./мин		10–3150
10	Наибольшая масса обрабатываемой детали ,кг		400
11	Наибольшее осевое усилие на шпинделе, Н (кГс)		4000(400)
12	Наибольший крутящий момент на шпинделе, Н м		190
13	Основное отклонение позиционирования Ра по осям, мм	X, Y	0,002
		Z	0,0055
14	Мощность электропривода главного движения, кВт,мах		3,0(5,5)
15	Класс точности станка по ГОСТ 8–82		С
16	Мощность электропривода подачи, кВт	X, Y	3,0

Органы управления станком расположены на боковой стенке эл. шкафа, на пультах управления УЧПУ и станочном, пульте шпиндельной бабки, и на гидростанции.

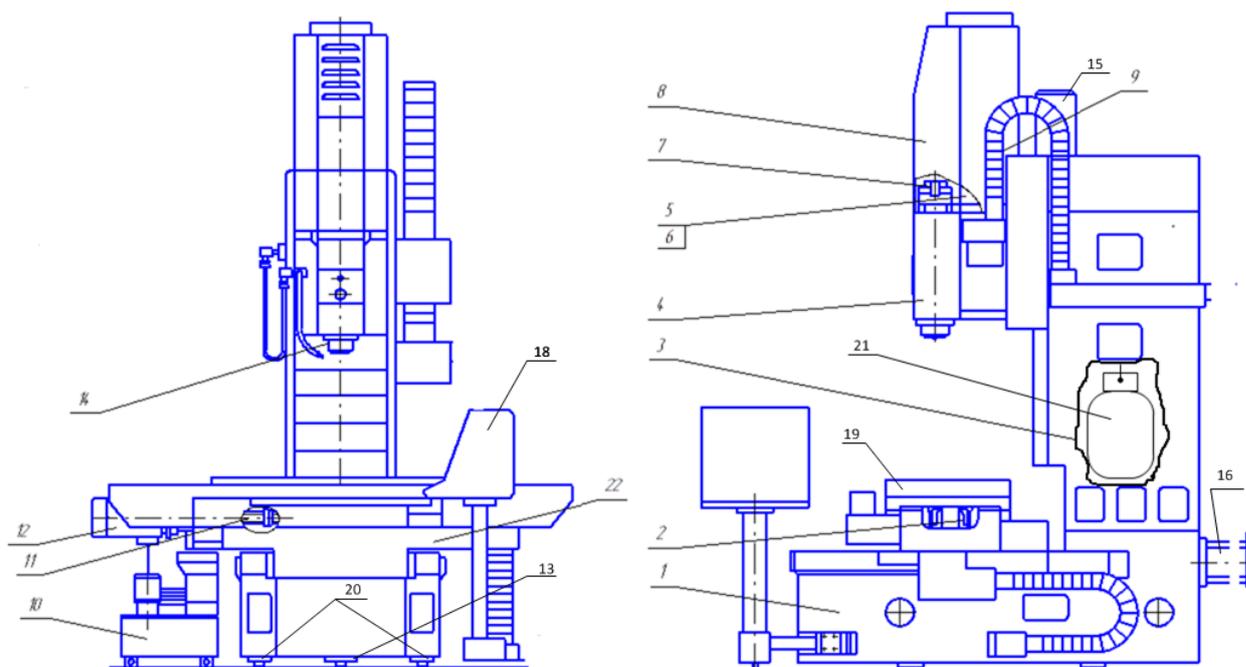


Рисунок 1.2. Общий вид станка 2440СФ4

Таблица 1.5 – Перечень составных частей

Поз	Наименование
1	Станина
3	Стойка
9	Кронштейн
22	Салазки
4	Бабка шпиндельная
8	Кожух
7	Гидроцилиндр отжима инструмента
21	Противовес
18	Система ЧПУ с пультом управления
19	Стол
12,15	Электродвигатель
16	
2,11	Передача винт-гайка качения
5	Коробка скоростей
14	Шпиндельное устройство
6	Гидроцилиндр переключения скоростей
10	Гидростанция
13,20	Опоры

Станина 1 – базовая деталь коробчатой формы с внутренними ребрами жесткости. В верхней части станины расположены V-образная и плоская направляющие. На V-образной и плоской направляющих салазок 22 стола 19 наклеен специальный фторопласт, обеспечивающий плавность перемещения

салазок стола по направляющим станины. Направляющие станины защищены ленточной защитой от попадания грязи и стружки. На переднем торце станины ленты защиты закреплены винтами, другие концы лент натягиваются регулировочными винтами. Ленты огибают ролики, смонтированные в салазках стола. Между направляющими станины установлен позиционно – следящий электропривод перемещения салазок стола. Привод состоит из пары винт – гайка качения 2,11, соединенной с электродвигателем 12 безлюфтовой муфтой. Ходовой винт установлен в двух опорах на подшипниках качения. Для отсчета и контроля перемещения салазок стола применяется преобразователь линейных перемещений «ЛИР – 9» (ЗАО «СКБ ИС» г. Санкт – Петербург) [44]. Станина устанавливается на фундаменте на трех опорах: одна не регулируемая 13 и две регулируемые 20.

Стойка 3 представляет собой коробчатую отливку с вертикальными V-образной и плоской направляющими скольжения. Направляющие предназначены для перемещения каретки шпиндельной бабки. Для защиты от попадания грязи на направляющие скольжения предусмотрена телескопическая защита. На верху стойки установлен двигатель 15, соединенный муфтой с ходовым винтом, при помощи которого обеспечивается перемещение шпиндельной бабки 4. Опоры винта закреплены на стойке, а гайка закреплена на шпиндельной бабке. Противовес 21 перемещается внутри стойки, предназначен для разгрузки по массе шпиндельной бабки. Отсчет перемещения шпиндельной бабки осуществляет преобразователь линейных перемещений ЛИР – 9.

Стол 19 имеет прямоугольную форму, на рабочей поверхности стола прорезаны Т – образные пазы для закрепления деталей. Стол устанавливается на салазках 22. Привод перемещения стола реализован аналогично приводу перемещения салазок. Стол перемещается по направляющим салазок. Направляющие скольжения дают возможность плавно, без рывков перемещать стол и салазки. Направляющие скольжения защищены лентой от попадания грязи и стружки. Принцип защиты направляющих стола тот же,

что и направляющих салазок стола и станины. Для отсчета перемещений стола применяется преобразователь линейных перемещений ЛИР – 9.

Шпиндельная бабка 4 перемещается в вертикальном направлении по направляющим стойки с помощью передачи винт–гайка качения. Винт в опорах укреплен на стойке, гайка на корпусе шпиндельной бабки.

Вращение рабочего инструмента с заданной скоростью и направлением, а также ориентацию рабочего инструмента в шпиндельном устройстве обеспечивает электропривод главного движения.

Режим диалогового общения между УЧПУ станка и оператором (ввод, редактирование и запуск технологических программ в автоматическом режиме; ручное управление; сервисные операции) реализован при помощи пульта управления 18 и ручного минипульта управления [49]. Система автоматического управления станком выполнена на базе ЧПУ Балт – Систем «NC 230», комплекта сервосистемы OMRON серии Accurax G5, включающую в себя сервопривод и синхронный серводвигатель с постоянными магнитами (электроприводы подач) и асинхронного двигателя привода главного движения серии АДМ [48]. В серводвигатели встроены энкодеры, которые реализуют стабилизацию контура скорости. Обратная связь по положению линейных интерполирующих координат X, Y, Z реализована датчиками линейных перемещений типа ЛИР– 9, СКБ ИС, г. Санкт – Петербург [44].

### **1.3 Анализ возмущений, приложенных к подвижным органам станка**

Станкам с ЧПУ характерны расширенные технологические возможности при сохранении высокой надежности работы [51]. Конструкция станков с ЧПУ, как правило, обеспечивает совмещение различных видов обработки (точение–фрезерование, фрезерование–шлифование), удобство установки заготовок, выгрузки деталей (что важно при использовании промышленных роботов), автоматическое или дистанционное управление сменой инструмента во всех режимах работы и т.д. В свою очередь качество

обработки детали на станке связано с его точностью, которая характеризуется степенью влияния различных факторов на станок как на единый комплекс. Показатели данного комплекса в равной степени зависят от качества средств управления, качества и точности положения инструмента и конструктивных особенностей станка.

**Конструктивные особенности станков с ЧПУ [37].** Применение автономных приводов, сокращение по возможности числа механических передач позволяет сократить длину кинематических цепей станка, что позволяет повысить точность и жесткость обычного станка. Это в свою очередь позволяет повысить точность обработки изделия.

Повышение точности возможно при: устранении зазоров в передаточных механизмах приводов подач, снижении потерь на трение в направляющих и других механизмах, повышении виброустойчивости, снижении тепловых деформаций, применении в станках датчиков обратной связи для контроля скорости и положения. Уменьшение тепловых деформаций обеспечивается равномерным температурным режимом в механизмах станка, чему, например, способствует разогрев станка и его гидросистемы до начала работы. Температурную погрешность станка позволяет уменьшить ввод коррекции в приводы подач от сигналов датчиков температур [50].

**Базовые детали** (станины, колонны, салазки). Например, конструкция стола выполнена с продольными и поперечными ребрами в коробчатой форме. Базовые детали изготавливают литыми или сварными. Появилась тенденция изготавливать такие детали из полимерного бетона или синтетического гранита, что позволяет повысить жесткость и виброустойчивость станка.

**Направляющие станков с ЧПУ** имеют высокую износостойкость и малую силу трения. Это позволяет снизить мощность следящих приводов, увеличить точность перемещений, уменьшить рассогласование в следящей системе. Направляющие скольжения станины и суппорта создают в виде

пары скольжения "сталь (или высококачественный чугун) – пластиковое покрытие (фторопласт и др.) в целях уменьшения коэффициента трения. Направляющие качения, по сравнению с направляющими скольжения, характеризуются высокой долговечностью, небольшим трением, коэффициент трения практически не зависит от скорости движения. В качестве тел качения используют ролики. Предварительно ролики натягиваются, что повышает жесткость направляющих в 2...3 раза. Для создания натяга используют регулирующие устройства.

**Шпиндели** станков с ЧПУ необходимо выполнять жесткими, с повышенной износостойкостью шеек, посадочных и базирующих поверхностей. Встроенные в шпиндель устройства автоматического отжима и зажима инструмента, датчики при адаптивном управлении и автоматической диагностике, значительно усложняют его конструкцию.

**Опоры шпинделя** поддерживают точность шпинделя в течение длительного времени в переменных условиях работы. Обеспечивают повышенную жесткость, небольшие температурные деформации. Высокая точность изготовления подшипников обеспечивает точность вращения шпинделя.

В опорах шпинделей, как правило, применяют подшипники качения. Уменьшение влияния зазоров и повышение жесткости опор обычно обеспечивается установкой подшипников с предварительным натягом или увеличением числа тел качения. Подшипники скольжения в оправках шпинделей применяют реже. Только при наличии устройств с ручным или автоматическим регулированием зазора в осевом или радиальном направлении. В прецизионных станках находят применение аэроэластические подшипники. В их конструкции между шейкой вала и поверхностью подшипника находится сжатый воздух, благодаря этому снижается износ и нагрев подшипника, повышается точность вращения и т.п.

**Вспомогательные механизмы станков с ЧПУ [41].** К ним относят: устройство смены инструмента, систему смазки узлов станка, зажимные

приспособления и т.д. Группа вспомогательных механизмов в станках с ЧПУ имеет значительные отличия от аналогических механизмов, используемых в обычных универсальных станках. Например, повышение производительности станков с ЧПУ привело к резкому увеличению количества сходящей стружки в единицу времени. Это привело к необходимости создания специальных устройств, для отвода стружки. Для уменьшения времени на загрузку заготовки применяют приспособления, позволяющие одновременно устанавливать заготовку и снимать деталь в процессе обработки другой заготовки.

**Привод позиционирования [20]** должен обладать высокой жесткостью и обеспечивать плавность перемещения при малых скоростях, большую скорость вспомогательных перемещений рабочих органов (до 10 м/мин и более). Развитием микропроцессорной техники позволило применять преобразователи для приводов подачи и главного движения с полным микропроцессорным управлением – цифровые приводы представляют собой электродвигатели, которые работают на постоянном или переменном токе. Позиционно – следящие системы с ЧПУ являются основными при синтезе электроприводов подачи металлорежущих станков и в, частности, координатно – расточных (КРС) особо высокой точности. В структуре таких систем команды от вычислителя ЧПУ [28] передаются на усилители мощности питающие электродвигатели подвижных органов станка через экстраполятор нулевого порядка [14, 27]. Дискретность последнего вносит погрешность в воспроизведении задания в динамических режимах, которые характерны при обработке изделия со сложным профилем.

На основе изложенных выше фактов составлена схема формирования погрешностей в станке (рисунок 1.3). На данной схеме показано влияние возмущающих воздействий на основные элементы станка, указано влияние дискретности экстраполятора нулевого порядка на точность воспроизведения сигнала задания, а так же технические решения по снижению их влияния.

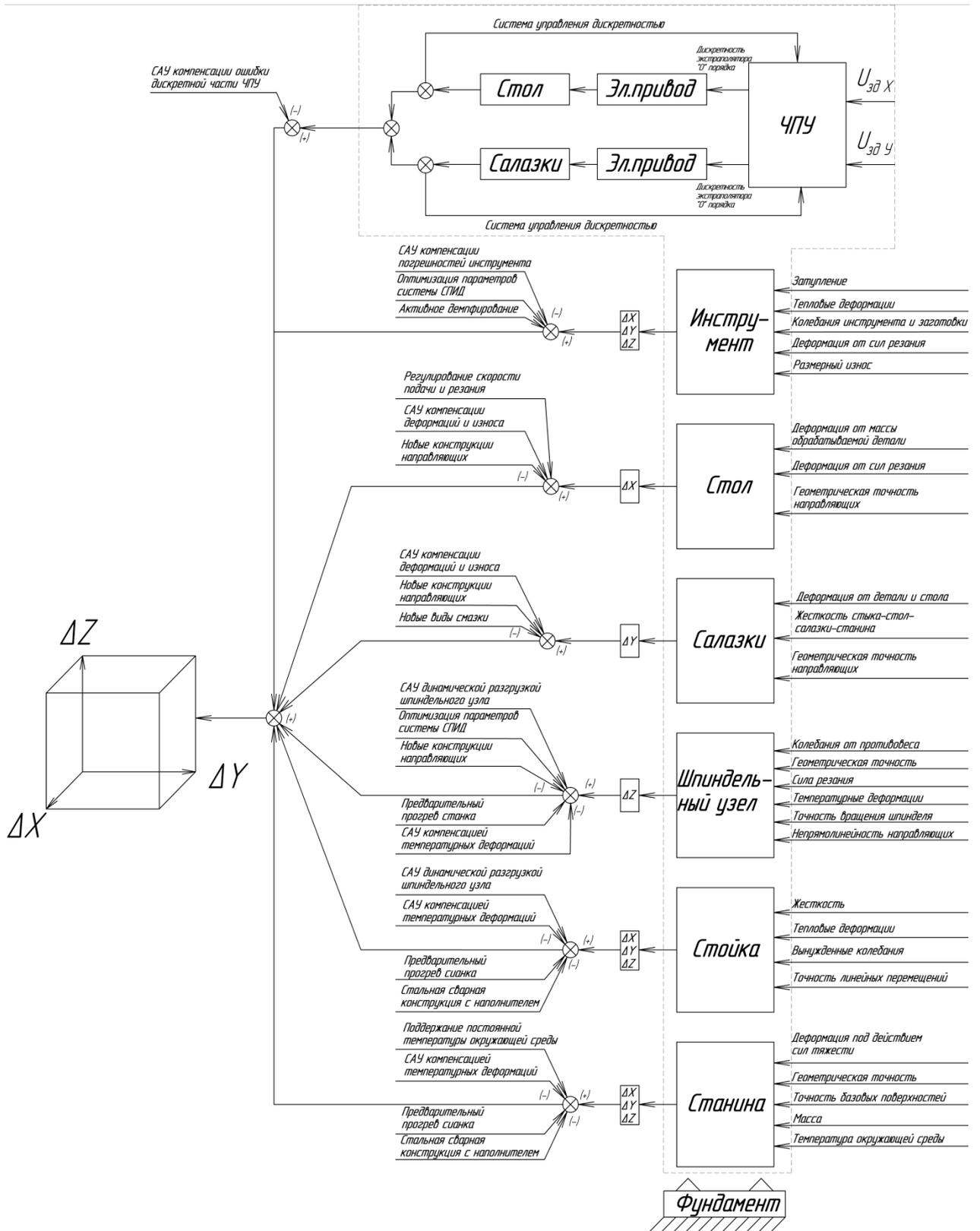


Рисунок 1.3. Схема формирования погрешности в станке

## 1.4 Анализ систем управления позиционно – следящих электроприводов

Управление станком – процесс воздействия на него для обеспечения выполнения требуемого технологического процесса обработки детали. Высокие требования по точности, производительности, созданию гибких производственных систем используют только автоматическое управление процессом обработки. Система автоматического управления (САУ) – это комплекс устройств и средств связи, которые обеспечивают точное и согласованное во времени взаимодействие рабочих и вспомогательных исполнительных механизмов станка [1].

Большинство современных позиционно – следящих электроприводов строятся по принципам систем подчиненного регулирования (СПР) координат [39]. При этом, как правило, при создании позиционно – следящего электропривода принимают за основу серийно выпускаемый привод стабилизации скорости и организуют дополнительно контур регулирования положения. Применительно к следящему электроприводу с синхронным исполнительным двигателем, работающим в режиме ВД или СДПТ, его структурная схема представлена на рисунке 1.4 [26]. Структурная схема содержит контуры тока, скорости и положения. Для организации трех контуров в систему введены датчики обратных связей с соответствующими коэффициентами передачи: по току –  $k_{oct}$ , по угловому положению  $\varphi_{об}$  вала двигателя –  $k_{он1}$ . Причем рисунок 1.4 учитывает особенности конкретной технической реализации, когда датчик положения вала двигателя (резольвер) используется для измерения скорости вращения посредством дифференцирования его выходного сигнала звеном с передаточной функцией  $W_{оз}(p)$ . Выходные сигналы датчиков подаются на инвертирующие входы соответствующих регуляторов: тока  $W_{рТ}(p)$ , скорости  $W_{рС}(p)$  и положения  $W_{рП}(p)$ . В структурной схеме также учтено, что в электроприводе имеется ряд фильтров – по сигналу задания контуру скорости  $W_{\phi}(p)$  и

сигналу обратной связи  $W_{\phi c}(p)$ . Силовой преобразователь представлен передаточной функцией  $W_{cn}(p)$ . Остальные звенья системы управления рассматриваемой системы управления представляют собой математическую модель синхронного электродвигателя с исполнительным механизмом. Тип и параметры регуляторов  $W_{PT}(p)$ ,  $W_{PC}(p)$  и  $W_{PI}(p)$  выбираются в соответствии с известной методикой, разработанной для систем подчиненного регулирования [39]. В частности, при настройке на технический оптимум [28], регулятор тока и скорости должны быть пропорционально – интегральными, а регулятор положения – пропорциональным.

Структурная схема приведена как современный базовый пример (рисунок 1.4). Основываясь на нее можно рассмотреть более общий подход к построению следящего электропривода, использующего идеологию СПР (рисунок 1.5). В электроприводах, в которых находит применение аналоговый привод стабилизации скорости, для связи цифровой части системы с аналоговой применяется цифро – аналоговый преобразователь [24] с коэффициентом передачи  $k_{цап}$ .



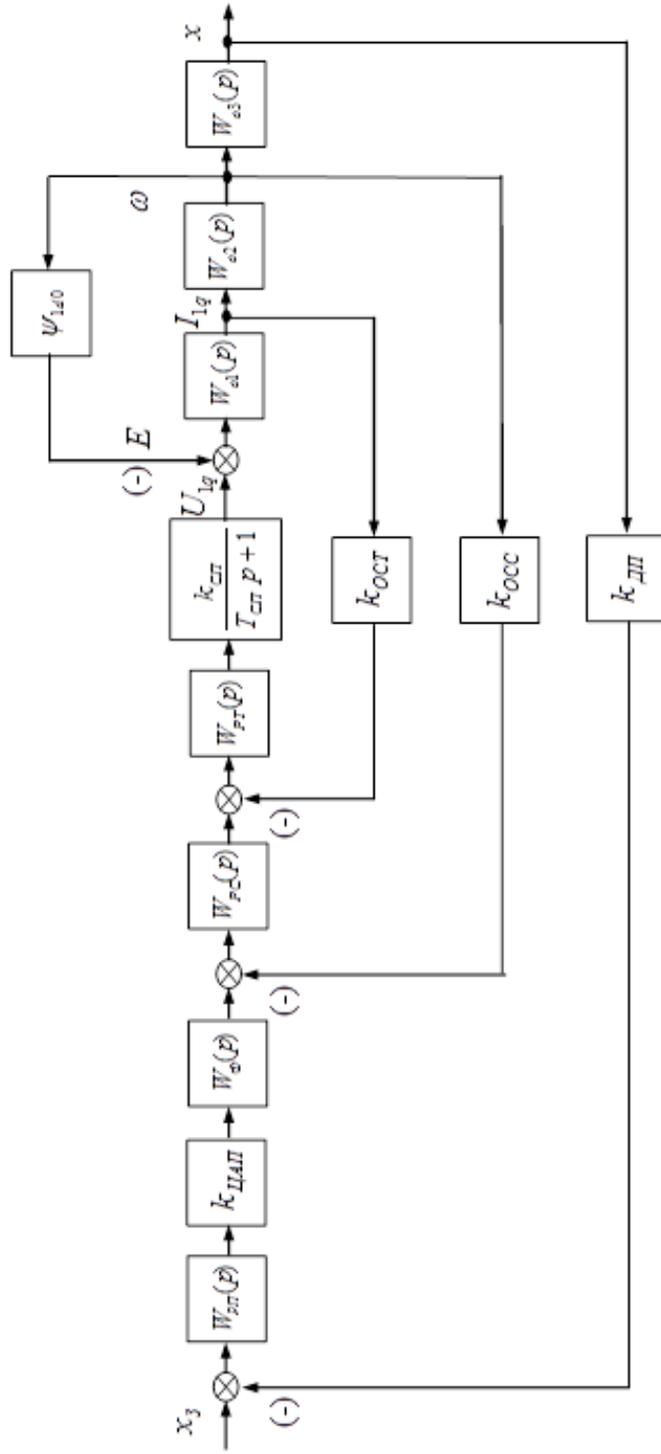


Рисунок 1.5. Обобщенная структурная схема следящего электропривода построенного по принципу СРР с синхронным исполнительным двигателем

В этом случае измерение скорости вращения вала двигателя производится аналоговым датчиком скорости, на пример, тахогенератором. Объект управления (синхронный электродвигатель совместно с исполнительным механизмом) разделен на три динамических звена с передаточными функциями  $W_{o1}$ ,  $W_{o2}$  и  $W_{o3}$ . Выходной координатой следящего электропривода является линейное или угловое перемещение  $x$  исполнительного механизма.

Мировая практика показывает, что встречаются модификации следящих СПР, в которых с целью упрощения применяют пропорциональный регулятор тока [22]. Но такой подход, как правило, только снижает быстродействие электропривода.

Можно встретить также электроприводы с синхронной машиной, работающей в режиме вентильного двигателя, и приводы постоянного тока, в которых применяется релейный регулятор тока [17]. Тем не менее, упрощение технической реализации контура тока приводит к ухудшению динамических характеристик электроприводов.

Увеличение быстродействия следящего электропривода с синхронной машиной, работающей в режиме ВД, и построенного по принципам СПР обеспечивается с помощью метода статической коррекции характеристик [39], адаптивных регуляторов [45] и программную коррекцию [46]. При этом время переходного процесса в следящем электроприводе в лучшем случае уменьшается до 1,2 с [14].

Другой подход к технической реализации следящих электроприводов постоянного тока, а также электроприводов с синхронным исполнительным двигателем, заключается в использовании принципов построения многоконтурных систем управления с одной измеряемой координатой (МСОИК) [8]. Двухконтурная следящая МСОИК для управления двигателем постоянного тока и синхронной машиной, работающей в режиме ВД, получила название структурно – минимального электропривода (СМЭП).

Структурная схема такого следящего электропривода приведена на рисунке 1.6.

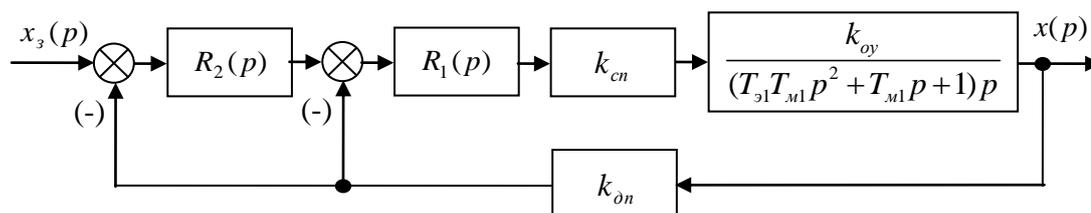


Рисунок 1.6. Структурная схема следящего электропривода с синхронным исполнительным двигателем, построенного по принципу МСОИК

При синтезе регуляторов  $R_1(p)$  и  $R_2(p)$  рассматриваемого электропривода полагают, что транзисторный силовой преобразователь можно представить в виде безынерционного звена с коэффициентом передачи  $k_{cn}$ . Под объектом управления с коэффициентом передачи  $k_{oy}$  в системе принимается совокупность синхронного электродвигателя, работающего в режиме ВД или БДПТ, и исполнительного механизма. Регулятор внутреннего контура выбирается пропорционально – дифференциальным (ПД) с передаточной функцией:

$$R_1(p) = k_{нд}(T_{нд}p + 1),$$

где  $k_{нд}$  и  $T_{нд}$  – коэффициент передачи и постоянная времени ПД-регулятора.

Величина, постоянная времени  $T_{нд}$ , принимается равной, либо:

$$T_{нд} = T_2,$$

где  $T_2$  – наибольшая постоянная времени, получающаяся из разложения знаменателя передаточной функции объекта управления, либо:

$$T_{нд} = 2T_{э1},$$

если двигатель с исполнительным механизмом представляет собой интегроколебательное звено.

Для компенсации всех помех, охваченных обратной связью, регулятор внешнего контура выбирается интегральным с передаточной функцией

$$R_2(p) = \frac{1}{T_u p},$$

где  $T_u$  – постоянная времени интегрирования.

Расчет параметров регуляторов, а именно  $k_{no}$  и  $T_u$ , как правило, производят исходя из обеспечения монотонного характера переходного процесса [3].

Быстродействие следящего электропривода, построенного по принципу МСОИК, характеризуется временем переходного процесса порядка 0,4 с. Двухконтурная МСОИК или СМЭП имеют недостаток, заключающийся в относительно низком быстродействии. Помимо того, пренебрежение быстродействием силового преобразователя при выборе параметров регуляторов является неверным с методической точки зрения обеспечения высокого быстродействия следящего электропривода.

Следует отметить также подход к построению следящего привода, представляющего собой некую комбинацию СПР и МСОИК (рисунок 1.7) [8].

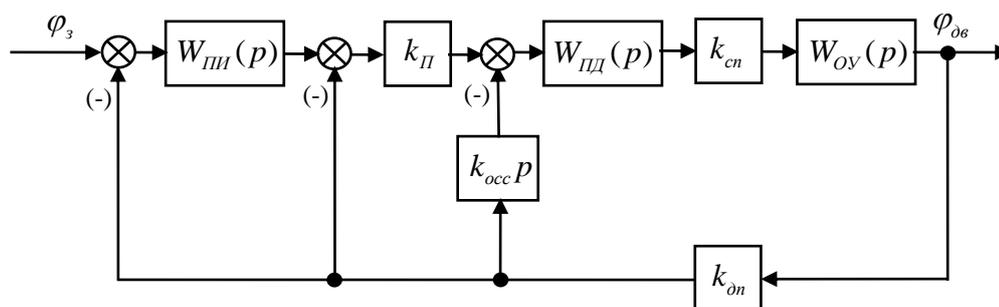


Рисунок 1.7. Структурная схема следящего электропривода, представляющего собой комбинацию СПР и МСОИК

Авторы в контуре скорости предлагают использовать ПД – регулятор  $W_{IV}(p)$ , в первом (внутреннем) контуре положения – пропорциональный регулятор  $k_{II}$ , а во внешнем контуре – пропорционально – интегральный регулятор  $W_{III}(p)$ . Измерение скорости производится дифференцированием

сигнала датчика положения, причем коэффициент передачи  $k_{occ}$  обратной связи по скорости по своей сути представляет собой постоянную времени дифференцирования. Объект управления с передаточной функцией  $W_{Oy}(p)$  представляет собой в общем случае совокупность асинхронного двигателя и исполнительного механизма, а в простейшем случае – просто двигатель, выходной координатой которого является угол  $\varphi_{ov}$  поворота вала. Однако вызывает сомнение, что методика синтеза регуляторов, предложенная в [8], позволит получить работоспособный быстродействующий электропривод.

Анализ показывает, что в позиционно – следящих электроприводах подачи станков особо высокой точности находят аналого – цифровые или системы прямого цифрового управления [11, 28]. Упомянутые системы строятся по принципу СПР. Обобщенная функциональная схема представлена на рисунке 1.8. На рисунке пунктиром показана дополнительно вводимая структура устройства, воздействующего на изменение частоты квантования экстраполятора нулевого порядка в составе регулятора положения, с целью компенсации динамической погрешности от воздействия дискретности.

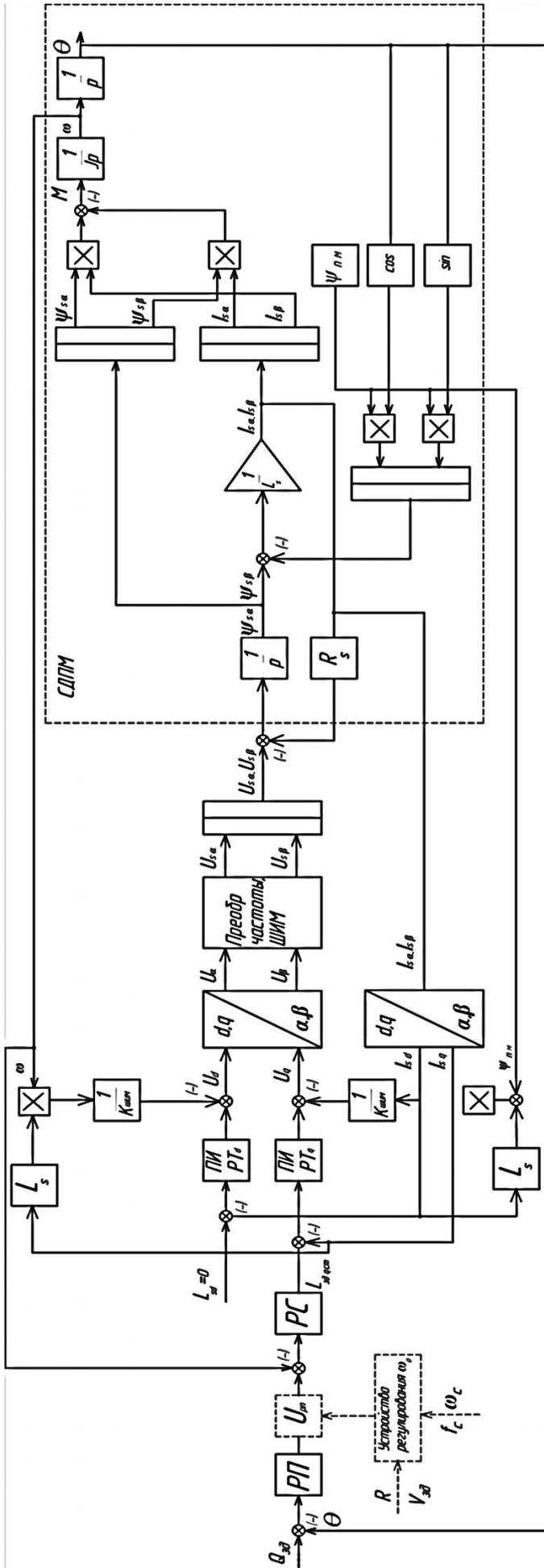


Рисунок 1.8. Обобщенная функциональная схема управления позиционно – следящего электропривода с синхронным исполнительным двигателем, построенным по принципу СДП, с постоянными магнитами (СДПМ)

### 1.5 Математическая модель позиционно – следящего электропривода при учете дискретности экстраполятора «0» порядка

Анализ структурного построения позиционно – следящих систем показал, что наиболее целесообразным является СПР. Обобщенная структурная схема (рисунок 1.5) и функциональная схема (рисунок 1.8) показывают, что с целью повышения точности и независимости от дискретности управления нужно иметь либо ПИ – регулятор скорости, либо И – регулятор положения [3]. Проанализируем эти схемы, чтобы обосновать схему для дальнейших исследований по влиянию дискретности управления на точность, устойчивость системы. При составлении модели следует учесть обратную связь по противоЭДС двигателя. Если регулятор скорости пропорциональный, то под действием внешней нагрузки  $I_{ст}$  варьирует статическая ошибка  $\delta$  в контуре [1] скорости:

$$\delta = \frac{\Delta\omega_{зам}}{\Delta\omega_{раз}} = \frac{4T_{ПП}}{T_M} \quad (1.1).$$

Где  $T_{ПП}$  – постоянная времени силового преобразователя;  $T_M$  – электромеханическая постоянная времени электродвигателя.

Для прецизионных станков это недопустимо. Чтобы избавиться от этой ошибки необходимо, чтобы регулятор скорости имел ПИ составляющую. Для этого существует несколько подходов.

I. Разрабатывается двух контурная система:

На рисунке обозначено:  $W_{PC1}(p), W_{PC}(p)$  – ПФ регуляторов скорости;  $W_{зг}(p)$  – ПФ замкнутого контура тока;  $\frac{R_{я}}{T_M p C_e \Phi}$  – ПФ электродвигателя;  $K_{осс}$  – коэффициент обратной связи по скорости.

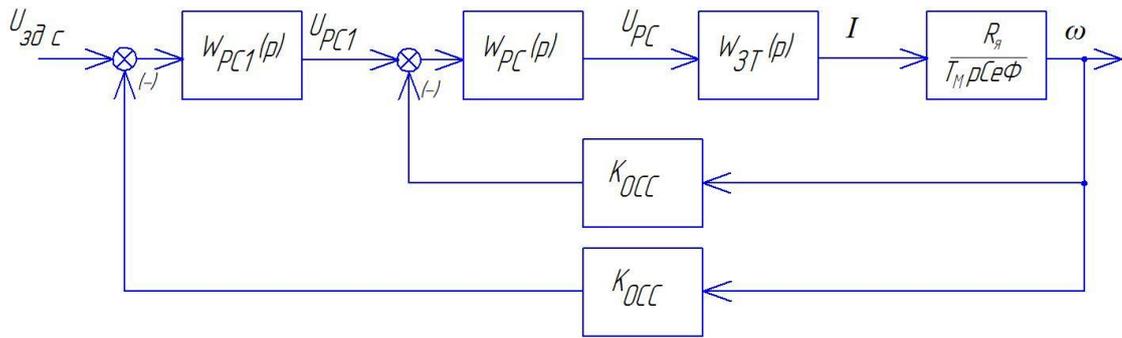


Рисунок 1.9. Структурная схема контура скорости

Для того, чтобы компенсировать действие ЭДС вводим регулятор третьего контура  $W_{PC1}(p)$  и настраиваем из условия технического оптимума (ТО) [20].

Из структурной схемы следует, что передаточная функция разомкнутой системы имеет вид:

$$W_{PA3}(p) = W_{PC1}(p) \cdot \frac{1}{4T_{III}p + 1} \cdot K_{OCC}$$

$$\text{Желаемая ПФ разомкнутой системы: } W^{TO}_{PЖ}(p) = \frac{1}{8T_{III}p(4T_{III}p + 1)}$$

Приравнявая правые части выражений  $W^{TO}_{PЖ}(p)$  и  $W_{PA3}(p)$ , и из этого равенства выразим передаточную функцию регулятора скорости  $W_{PC1}(p)$ :

$$W_{PA3}(p) = \frac{1}{8T_{III}p(4T_{III}p + 1)} = W_{PC1}(p) \cdot \frac{1}{4T_{III}p + 1} \cdot K_{OCC}$$

Из этого выражения следует, что регулятор скорости должен быть реализован схемой И – регулятора:  $W_{PC1}(p) = \frac{1}{8T_{III}p}$ .

Методом структурных преобразований преобразуем структурную схему к одноконтурной:

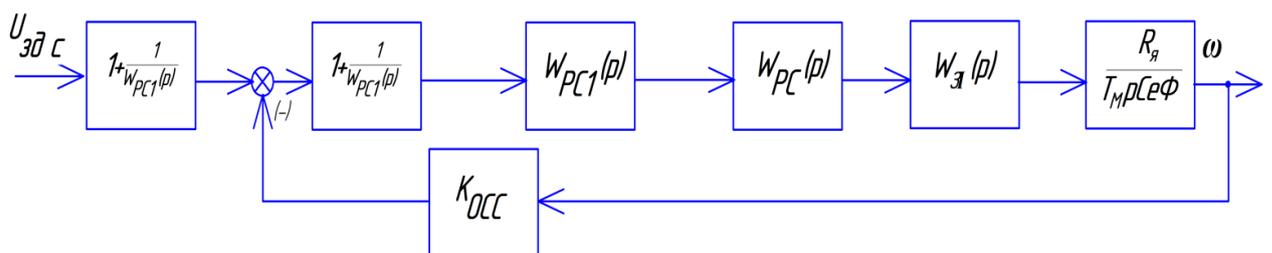


Рисунок 1.10. Структурная схема одноконтурной системы

Передаточная функция регулятора скорости и входного фильтра определяется:

$$W_F(p) = \frac{1}{1 + 8T_{\text{III}}p}, \quad K_{PC} = \frac{Ce\Phi \cdot K_{OCC}}{K_{OCC} \cdot R_{\text{я}}},$$

$$W_{PC}^*(p) = \left(1 + \frac{1}{W_{PC1}(p)}\right) \cdot W_{PC1}(p) \cdot W_{PC}(p) = (8T_{\text{III}}p + 1) \cdot \frac{T_M}{4T_{\text{III}}} \cdot K_{PC} \cdot \frac{1}{8T_{\text{III}}p} =$$

$$\frac{(8T_{\text{III}}p + 1)T_M Ce\Phi \cdot K_{OCC}}{32T_{\text{III}}^2 p \cdot K_{OCC} \cdot R_{\text{я}}}.$$

Таким образом, получаем ПИ – регулятор. Это принципиально важно, поскольку если разность  $l_{\text{з\o}} - l$  дает значение меньше чем 1 разряд регулятора скорости, то на его выходе отсутствует сигнал и интегрирующая часть двигателя не работает, а следовательно это уже не позиционно – следящая система [22]. Поэтому нужно, чтобы регулятор скорости интегрировал.

Структурная схема одноконтурной системы по скорости имеет вид:

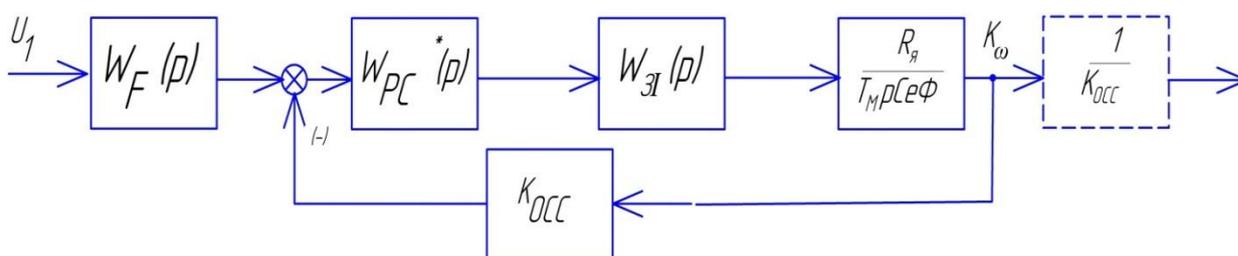


Рисунок 1.11. Структурная схема одноконтурной системы по скорости

Тогда замкнутый контур скорости с учетом фильтра примет вид:

$$W_{\text{зам}}(p) = \frac{W_F(p) \cdot W_{PC}^*(p) \cdot W_{\text{зам}_1}(p) \cdot \frac{R_{\text{я}} \cdot K_{OCC}}{T_M p \cdot Ce\Phi}}{1 + W_{PC}^*(p) \cdot W_{\text{зам}_1}(p) \cdot \frac{R_{\text{я}} \cdot K_{OCC}}{T_M p \cdot Ce\Phi}} \cdot \frac{1}{K_{OCC}} =$$

$$= \frac{1}{K_{OCC}} \cdot \frac{1}{64T_{\text{III}}^3 p^3 + 32T_{\text{III}}^2 p^2 + 8T_{\text{III}}p + 1}$$

Для регулятора положения считаем, что  $W_{\text{зам}}(p) = \frac{1}{K_{OCC}} \cdot \frac{1}{8T_{\text{III}}p + 1}$ .

Если  $T_{\text{III}} = 0,01c$ , то

$$64T_{\text{III}}^3 = 0,000064c \rightarrow 0,04c, 32T_{\text{III}}^2 = 0,0032c \rightarrow 0,056c, 8T_{\text{III}} = 0,08c$$

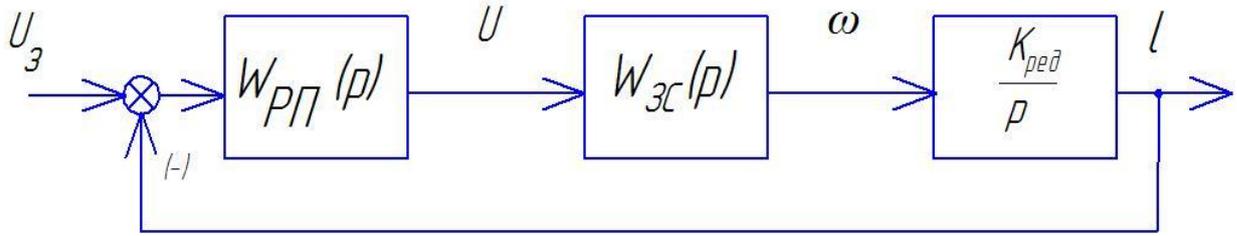


Рисунок 1.12. Структурная схема контура положения

Регулятор положения  $W_{PI}(p)$  настраиваем из условия технического оптимума (ТО). Из структурной схемы следует, что передаточная функция разомкнутой системы имеет вид:

$$W_{PA3}(p) = W_{PI}(p) \cdot W_{3C}(p) \cdot \frac{K_{ред}}{p} = W_{PI}(p) \cdot \frac{1}{K_{OCC}} \cdot \frac{1}{8T_{III}p + 1} \cdot \frac{K_{ред}}{p}$$

$$\text{Желаемая ПФ разомкнутой системы: } W^{TO}_{PЖ}(p) = \frac{1}{16T_{III}p(8T_{III}p + 1)}$$

Приравнивая правые части выражений  $W^{TO}_{PЖ}(p)$  и  $W_{PA3}(p)$ , и из этого равенства выразим передаточную функцию регулятора положения  $W_{PI}(p)$ :

$$\frac{1}{16 \cdot T_{III}p(8T_{III}p + 1)} = W_{PI}(p) \cdot \frac{1}{K_{OCC}} \cdot \frac{1}{8T_{III}p + 1} \cdot \frac{K_{ред}}{p}$$

Из этого выражения следует, что регулятор положения должен быть

реализован схемой П – регулятора:  $W_{PI}(p) = \frac{K_{OCC}}{16 \cdot T_{III} \cdot K_{ред}}$ .

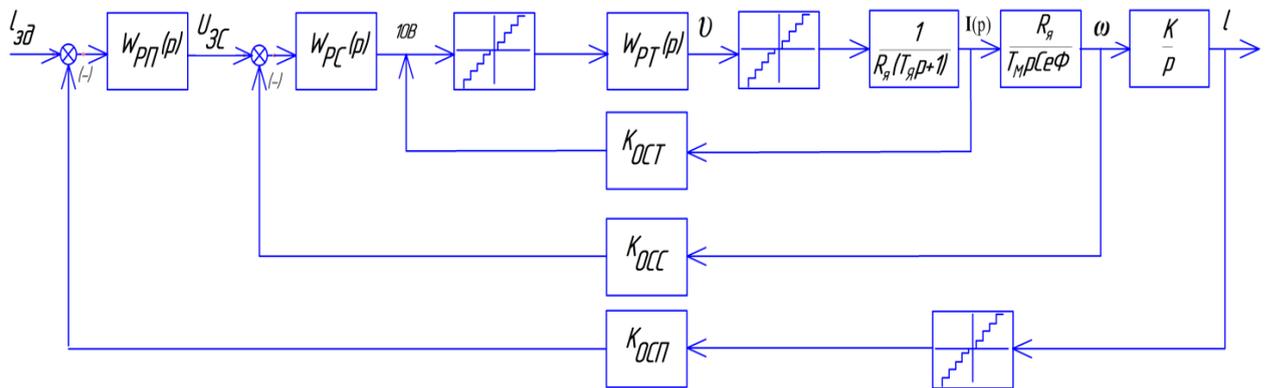


Рисунок 1.13. Структурная схема системы настроенной на ТО

II. Разрабатывается система с одной регулируемой координатой [8].

Рассмотрим структурную схему электропривода, представленную на рисунке 1.14.

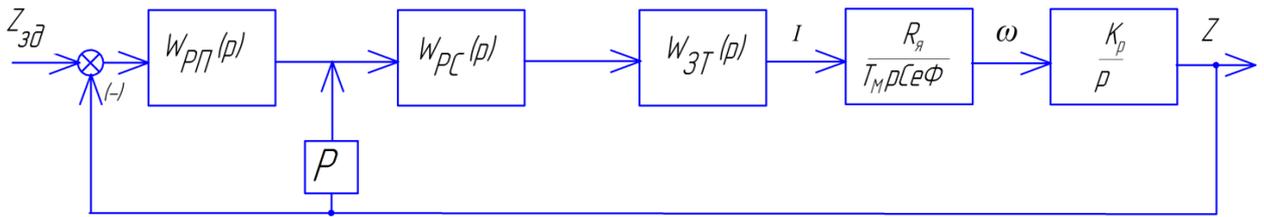


Рисунок 1.14. Структурная схема с одной регулируемой координатой

Регулятор скорости  $W_{PC}(p)$  настраиваем из условия технического оптимума (ТО). Из структурной схемы следует, что передаточная функция разомкнутой системы имеет вид:

$$W_{PAZ}(p) = W_{PC}(p) \cdot \frac{1}{K_{OCT}} \cdot \frac{1}{2T_{III}p + 1} \cdot \frac{R_{я}}{T_M p \cdot Ce\Phi} \cdot \frac{K_p}{p} \cdot p$$

$$\text{Желаемая ПФ разомкнутой системы: } W_{ЖС}(p) = \frac{1}{4 \cdot T_{III} p (2T_{III} p + 1)}$$

Приравнявая правые части выражений  $W_{PЖ}^{TO}(p)$  и  $W_{PAZ}(p)$ , и из этого равенства выразим передаточную функцию регулятора скорости  $W_{PC}(p)$ :

$$W_{ЖС}(p) = \frac{1}{4 \cdot T_{III} p (2T_{III} p + 1)} = W_{PC}(p) \cdot \frac{1}{K_{OCT}} \cdot \frac{1}{2T_{III} p + 1} \cdot \frac{R_{я}}{T_M p \cdot Ce\Phi} \cdot \frac{K_p}{p} \cdot p$$

Из этого выражения следует, что регулятор скорости должен быть реализован схемой И – регулятора:  $W_{PC}(p) = \frac{1 \cdot K_{OCT} \cdot T_M \cdot Ce\Phi}{4 \cdot T_{III} \cdot R_{я} \cdot K_p \cdot p}$

Передаточная функция замкнутой системы по скорости имеет вид:

$$W_{ЗС}(p) = \frac{1}{4T_{III}p + 1} \cdot \frac{1}{K_{OCC}}$$

Для расчета регулятора положения структурная схема примет следующий вид:

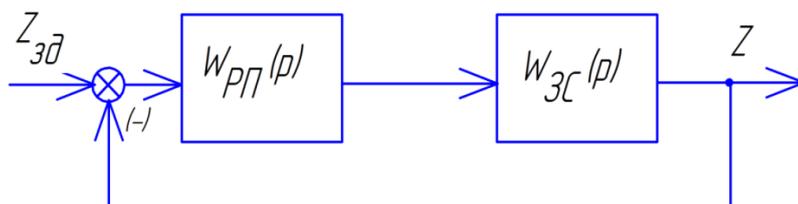


Рисунок 1.15. Структурная схема системы замкнутой по положению

Регулятор положения  $W_{PI}(p)$  настраиваем из условия технического оптимума (ТО). Из структурной схемы следует, что передаточная функция разомкнутой системы имеет вид:

$$W_{PAZ}(p) = W_{PI}(p) \cdot \frac{1}{K_{OCC}} \cdot \frac{1}{4T_{III}p + 1}$$

$$\text{Желаемая ПФ разомкнутой системы: } W_{ЖП}(p) = \frac{1}{8 \cdot T_{III}p(4T_{III}p + 1)}$$

Приравнявая правые части выражений  $W_{РЖ}^{TO}(p)$  и  $W_{раз}(p)$ , и из этого равенства выразим передаточную функцию регулятора положения  $W_{PI}(p)$ :

$$W_{ЖП}(p) = \frac{1}{8 \cdot T_{III}p(4T_{III}p + 1)} = W_{PI}(p) \cdot \frac{1}{K_{OCC}} \cdot \frac{1}{4T_{III}p + 1}$$

Из этого выражения следует, что регулятор положения должен быть реализован схемой И-регулятора:  $W_{PI}(p) = \frac{1 \cdot K_{OCC}}{4T_{III}p} = \frac{K_{PI}}{p}$ .

Рассмотрев подходы построения структурных схем получаем, что замкнутый контур положения можно представить в виде [29]:

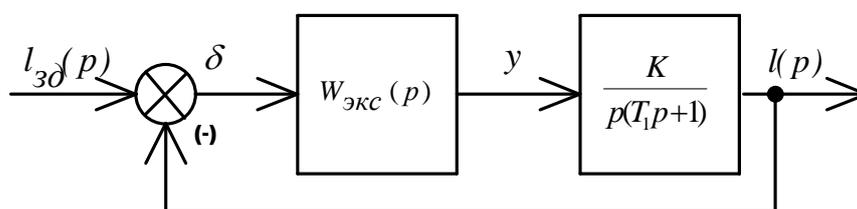


Рисунок 1.16. Структурная схема исследования

На рисунке показана преобразованная схема позиционно – следящего электропривода для исследования влияния периода дискретности  $T$  экстраполятора нулевого порядка на динамические показатели качества регулирования [31].

### 1.6 Анализ влияния малых постоянных времени контура скорости на динамические показатели качества управления

В диссертационной работе был проведен анализ влияния малых постоянных времени контура скорости на динамические показатели качества управления  $\sigma$ , % и  $t_p$ , с. При увеличении периода дискретности  $T$  регулятора положения и учете малых постоянных времени происходит

ухудшение значений показателей качества управления и при меньшем значении  $T$  система теряет устойчивость. Но при значении периода дискретности  $T = 0,04$  с, это отличие составляет 3% и поэтому в дальнейшем для анализа и расчетов в данной работе будем использовать предложенную модель [29].

### **1.7 Постановка задачи исследования**

В данной работе ставится задача компенсации динамических ошибок позиционно – следящего электропривода КРС, возникающих вследствие влияния дискретности экстраполятора цифровой части УЧПУ [5, 15, 27]. Для достижения требований к многооперационному станку необходимо разработать структурную схему электропривода, с регулировкой частотой  $\omega_0$  и обеспечивающей динамическую ошибку станка, соответствующую классу точности станка (А, С) [47]. Разработка САУ позволяет повысить быстродействие системы формирования сигнала задания тем самым повысить быстродействие приводов и в конечном итоге увеличить производительность станка и качество обработки детали.

## **2 Анализ влияния дискретности в УЧПУ на динамические показатели качества управления позиционно – следящего электропривода**

### **2.1 Математический метод оценки влияния периода дискретности $T$ экстраполятора нулевого порядка на динамические показатели качества позиционно – следящего электропривода**

В предыдущей главе было доказано, что математической моделью для исследования влияния дискретности на динамические показатели позиционно – следящего электропривода является структурная схема представленная на рисунке 2.1 [29]. Основным элементом, вносящим дискретность является экстраполятор нулевого порядка – электронный фильтр, преобразующий оцифрованный сигнал в непрерывный. Процесс восстановления дискретизированного сигнала называется интерполяцией. Поэтому, при каких условиях процесс интерполяции обеспечивает требуемую точность, является крайне актуальным для прецизионных позиционно – следящих электроприводов. Математической основой анализа процесса интерполяции является теорема Шеннона – Котельникова [27].

При преобразовании непрерывного сигнала  $\delta(t)$  в цифровую форму происходит некоторая потеря информации. Этот процесс определен теоремой Шеннона – Котельникова, которая доказывает, что если частотный спектр непрерывного сигнала строго ограничен полосой  $2\omega_c$ , то представляя такой сигнал импульсами частотой  $\omega_0 > 2\omega_c$ , где  $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$  затем его можно восстановить узкополосным фильтром [4,4]. В практических примерах сигналы имеют неограниченный спектр, а поэтому проявляется эффект Алиасинга (aliasing) [23], который приводит к взаимовлиянию высокочастотных составляющих смещенных спектров сигнала, что следует из представления, например, вещественно – частотной характеристики

дискретной системы в разомкнутом состоянии с экстраполятором нулевого порядка:

$$P_{\Sigma}(\omega) = \frac{1}{T} \sum_{-\infty}^{\infty} P(\omega - m\omega_0) \cdot P_N(\omega - m\omega_0) \quad (1)$$

$P_{\Sigma}(\omega)$ ;  $P(\omega - m\omega_0)$ ;  $P_N(\omega - m\omega_0)$  – вещественно частотные характеристики дискретного сигнала, смещенного непрерывного сигнала и экстраполятора нулевого порядка соответственно.

В (1) принято:  $m$  – номер импульса;  $\omega_0$  – частота квантования экстраполятора;  $\omega$  – текущее значение частоты. Анализ зависимости (1) показывает на то, что чем меньше период дискретности  $T$ , тем меньше взаимодействие смещенных спектров, тем меньше погрешность между непрерывным входным сигналом и восстановленным из дискретного входным сигналом. Однако эта погрешность всегда присутствует. Поэтому крайне важным является исследование влияния периода дискретности на динамические показатели качества управления: устойчивость, точность воспроизведения сигнала задания, оценка погрешности в воспроизведении сигнала задания. Исследование проводим частотным методом на основе  $Z$  – преобразования с последующим переходом в область псевдочастот с использованием билинейного преобразования и затем применяем логарифмические амплитудно – частотные характеристики [22,27].

Структурная схема рассматриваемого электропривода, построенная по принципу подчиненного регулирования [39] и настроенная на реализацию технического оптимума с включением экстраполятора нулевого порядка показана на рисунке 2.1 [29].

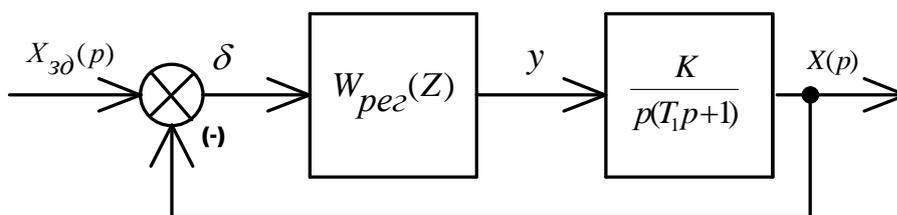


Рисунок 2.1. Структурная схема электропривода

Дискретность системы определяется регулятором  $W_{\text{рег}}(z)$ , который включает в себя преобразователь АЦП, преобразующий непрерывный сигнал  $\delta(t)$  в  $\delta^*(t)$ .

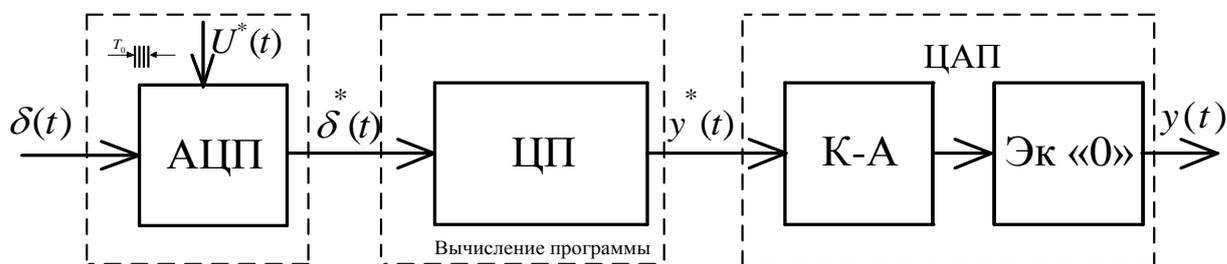


Рисунок 2.2. Структурная схема регулятора

Полученный код подается на центральный процессор, где выполняется программа регулятора и который имеет определенную дискретность в выборке кода с АЦП, обозначая ее  $T$ . В эти же дискретные моменты времени код, полученный в результате вычисления в центральном процессоре подается в ЦАП, который генерирует сигналы управления для аналоговой части электропривода  $y(t)$  усилителя мощности. ЦАП включает в себя экстраполятор нулевого порядка, который удерживает полученный сигнал на протяжении всего периода  $T$  [4,15]. Эта величина определяет дискретность системы. Максимальная частота дискретизации — максимальная частота, на которой ЦАП может работать, выдавая на выходе корректный результат.

В системах управления координатно – расточных станков (КРС) величина периода дискретности  $T$  может достигать 63мс в зависимости от сложности выполнения программы в ЦП [48]. Введение экстраполятора в структурную схему позиционно – следящего электропривода изменяет качество управления.

## 2.2 Анализ влияния периода дискретности $T$ экстраполятора нулевого порядка на устойчивость позиционно – следящего электропривода

Анализ влияния периода дискретности  $T$  на запасы устойчивости по амплитуде  $\Delta A$  и фазе  $\Delta \varphi$  проведем с помощью  $Z$  – преобразования с последующим переходом в плоскость псевдочастот  $\lambda$ . Это позволит использовать логарифмические амплитудно – фазовые частотные характеристики, которые наглядно позволят выявить особенности влияния  $T$  на упомянутые выше показатели.

Расчетная структурная схема дискретной системы настроенной на ТО показана на рисунке 2.3 [29]. Дискретность, вносимую экстраполятором будем оценивать относительно непрерывной САУ, которая служит эталоном.

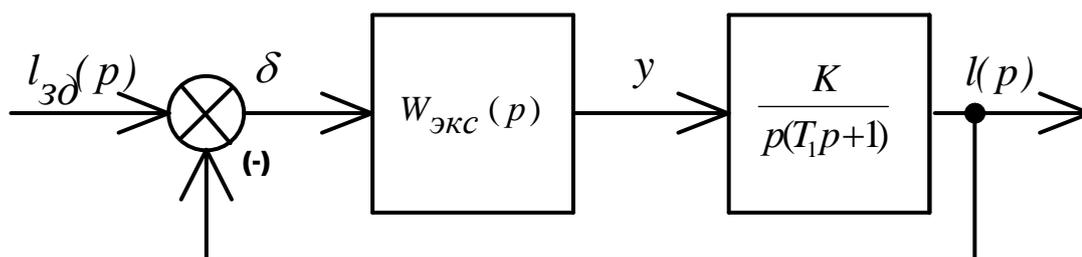


Рисунок 2.3. Структурная схема позиционно – следящего электропривода

Передаточная функция рассматриваемой системы (рисунок 2.3) в разомкнутом состоянии имеет вид [4]:

$$W_p(p) = W_{\text{экс}}(p) \cdot \left( \frac{K}{p(T_1 p + 1)} \right) \quad (2).$$

В (2) обозначено:  $W_{\text{экс}}(p)$  – передаточная функция экстраполятора нулевого порядка равная  $W_{\text{экс}}(p) = \frac{1 - e^{-Tp}}{p}$ ;  $T$  – период дискретности;  $T_1$  – постоянная времени апериодического звена;  $K$  – коэффициент передачи системы в разомкнутом состоянии [29].

Передаточную функцию систем в форме  $Z$  – преобразования будем рассматривать как произведение передаточных функций экстраполятора нулевого порядка и непрерывной части системы. В этом случае выражение (2) примет вид:

$$W_p(Z) = Z \left\{ W_H(p) \frac{1 - e^{-Tp}}{p} \right\} \quad (3).$$

Если иметь в виду, что  $1 - e^{-Tp} = 1 - Z^{-1} = \frac{Z-1}{Z}$ , то выражение (3) примет следующий вид:

$$W_p(Z) = \frac{Z-1}{Z} \cdot Z \left\{ \frac{W_H(p)}{p} \right\} \quad (4).$$

Тогда выражение (2) с учетом экстраполятора нулевого порядка:

$$W_p(Z) = \frac{Z-1}{Z} \cdot Z \left\{ \frac{K}{p^2(T_1p+1)} \right\} = \frac{Z-1}{Z} \cdot W_1(Z) \quad (5).$$

Учитывая, что

$$W_1(Z) = Z \left[ K \left( \frac{1}{p^2} - \frac{T_1}{p} + \frac{T_1}{p + \frac{1}{T_1}} \right) \right] = K \left[ \frac{TZ}{(Z-1)^2} - \frac{T_1Z}{Z-1} + \frac{T_1Z}{Z-d} \right] \text{ выражение (5)}$$

примет вид:

$$W_p(Z) = \frac{Z-1}{Z} \cdot K \left[ \frac{TZ}{(Z-1)^2} - \frac{T_1Z}{Z-1} + \frac{T_1Z}{Z-d} \right] = K \left[ \frac{T}{Z-1} - T_1 + \frac{T_1(Z-1)}{Z-d} \right] = \frac{K[Z(T - T_1 + T_1d) + T_1(1-d) - dT]}{(Z-1)(Z-d)} \quad (6),$$

где  $d = e^{-\frac{T}{T_1}}$ . Анализ (6) в общем виде затруднен с точки зрения поставленной задачи, поэтому для дальнейшего исследования примем передаточную функцию, соответствующей позиционно – следящей системы привода подачи станка 2440СФ4, которая имеет вид:

$W_p(p) = \frac{6,25}{p(0,08p + 1)}$  [29]. Значения периода дискретности экстраполятора выбирались в диапазоне:  $T=0,04с; 0,08с; 0,16с; 0,3с; 0,4с; 0,45с; 0,5с$ .

Подставляя в выражение (6) значение  $T = 0,04с$ , получим передаточную функцию системы в разомкнутом виде:

$$W_p(Z) = \frac{K \cdot [Z(T - T_1 + T_1 d) + T_1(1 - d) - dT]}{(Z - 1)(Z - d)} = \frac{6,25 \cdot \left[ Z \left( 0,04 - 0,08 + 0,08 \cdot e^{-\frac{0,04}{0,08}} \right) + 0,08 \cdot \left( 1 - e^{-\frac{0,04}{0,08}} \right) - e^{-\frac{0,04}{0,08}} \cdot 0,04 \right]}{(Z - 1)(Z - e^{-\frac{0,04}{0,08}})} =$$

$$\frac{6,25 \cdot [Z \cdot 0,08 + 0,08]}{(Z - 1)(Z - 0,6)} = \frac{0,05 \cdot (Z + 1)}{(Z - 1) \cdot (Z - 0,6)} \quad (7).$$

Результаты расчетов для всех значений  $T$  аналогичны и сведены в таблицу 2.1.

Применяемые критерии устойчивости Найквиста и Гурвица для непрерывных САУ базируются на том, что система устойчива, если корни характеристического уравнения замкнутой системы находятся в левой полуплоскости корней [23,27]. Алгебраический критерий Гурвица позволяет судить об этом из решения самого уравнения, а критерий Найквиста определяет положение корней в левой полуплоскости корней, если амплитудно – частотная характеристика разомкнутой системы не охватывает точку  $-1, j0$  в плоскости амплитудно – фазовой частотной характеристики разомкнутой системы.

Для  $Z$  – преобразования использовать прямо упомянутые критерии невозможно, хотя бы потому, что система устойчива, если корни характеристического уравнения замкнутой системы в форме  $Z$  – преобразования расположены внутри окружности единичного радиуса, т.е. в этой окружности корни могут быть и положительными. Поэтому, чтобы применить критерии справедливые для непрерывных САУ, необходимо окружность единичного радиуса развернуть в виде прямой, представляющей мнимую ось плоскости корней. С этой целью вводится билинейное преобразование  $w$  и связано с  $Z$  – преобразованием зависимостью:

$$Z = \frac{1+w}{1-w} \quad (8).$$

В соответствии с этим преобразуем передаточную функцию (7)  $W_p(Z)$  в  $W_p(w)$ :

$$W_p(w) = \frac{0,05 \left( \frac{1+w}{1-w} + 1 \right)}{\left( \frac{1+w}{1-w} - 1 \right) \cdot \left( \frac{1+w}{1-w} - 0,6 \right)} = \frac{0,05 \left( \frac{(1+w) + (1-w)}{(1-w)} \right)}{\left( \frac{(1+w) - (1-w)}{(1-w)} \right) \cdot \left( \frac{(1+w) - 0,6(1-w)}{(1-w)} \right)} =$$

$$\frac{\left( \frac{0,1}{(1-w)} \right)}{\left( \frac{2w}{(1-w)} \right) \cdot \left( \frac{0,4 + 1,6w}{(1-w)} \right)} = \frac{0,1 \cdot (1-w)}{0,8w(1+4w)} \quad (9).$$

Аналогичным преобразованием проведены расчеты для всех значений периодов дискретности  $T$  и сведены в таблицу 2.1.

Для того, чтобы получить выражения амплитудно – фазных частотных характеристик (АФЧХ) и передаточной функции (ПФ), необходимо перейти в область псевдочастот. Для этого, заменяя в полученных  $W_p(w)$  величину  $w$  на  $w = j\lambda \frac{T}{2}$ , получим некоторые зависимости, позволяющие построить ЛАФЧХ разомкнутой системы и дать оценку запасам устойчивости по модулю и по фазе:

$$W_p\left(j\lambda \frac{T}{2}\right) = \frac{0,1 \cdot \left(1 - j\lambda \frac{T}{2}\right)}{0,8j\lambda \frac{T}{2} \left(1 + 4j\lambda \frac{T}{2}\right)} = \frac{0,1(1 - j0,02\lambda)}{j0,016\lambda(1 + j0,08\lambda)} = \frac{6,25(1 - j0,02\lambda)}{j\lambda(1 + j0,08\lambda)} \quad (10).$$

Аналогичным методом рассчитаны передаточные функции  $W_p\left(j\lambda \frac{T}{2}\right)$  для выбранных значений  $T$  и сведены в таблицу 2.1 [27,29].

Таблица 2.1. Расчет логарифмических амплитудно – фазовых частотных характеристик дискретной системы

Период дискретности экстраполлятора «0» порядка Т, с	Передаточная функция разомкнутой системы $W_p(z) = \frac{x(z)}{x_{3д}(z)}$	Передаточная функция разомкнутой системы в виде билинейных преобразований $W_p(w) = \frac{x(w)}{x_{3д}(w)}$	Амплитудно – фазовая частотная характеристика разомкнутой системы в области псевдочастот $W_p(j\lambda \frac{T}{2})$ $\lambda, c^{-1}, \lambda \text{ дек}, K \text{ дБ}$
0,04	$\frac{0,05(Z+1)}{(Z-1)(Z-0,6)}$	$\frac{0,1(1-w)}{0,08w(1+4w)}$	$\frac{6,25(1-j0,02\lambda)}{j\lambda(1+0,08\lambda)}$  $20\lg K = 20\lg 6,25 = 16$ $\lambda_1 = \frac{1}{0,08} = 12,5; \lg 12,25 = 1,097$ $\lambda_2 = \frac{1}{0,02} = 50; \lg 50 = 1,7$
0,08	$\frac{0,135(1,135Z+1)}{(Z-1)(Z-0,366)}$	$\frac{0,318(1-w)(1+0,149w)}{1,268w(1+2,15w)}$	$\frac{6,25(1-j0,04\lambda)(1-j0,006\lambda)}{j\lambda(1+j\lambda 0,086)}$  $\lambda_1 = \frac{1}{0,04} = 25; \lg 25 = 1,4$ $\lambda_2 = \frac{1}{0,006} = 166,6; \lg 166,6 = 2,22$ $\lambda_3 = \frac{1}{0,086} = 11,63; \lg 11,63 = 1,065$
0,16	$\frac{0,3(1,88Z+1)}{(Z-1)(Z-0,134)}$	$\frac{0,936(1-w)(1+0,3w)}{1,732w(1+1,31w)}$	$\frac{6,25(1-j0,08\lambda)(1+j0,024\lambda)}{j\lambda(1+j\lambda 0,105)}$  $\lambda_1 = \frac{1}{0,08} = 12,5; \lg 12,5 = 1,097$ $\lambda_2 = \frac{1}{0,024} = 41,66; \lg 41,66 = 1,62$ $\lambda_3 = \frac{1}{0,105} = 9,52; \lg 9,52 = 0,98$
0,4	$\frac{0,52(4,2Z+1)}{(Z-1)(Z-0,0064)}$	$\frac{1,363(1-w)(1+0,615w)}{w(1+1,013w)}$	$\frac{6,25(1+j0,123\lambda)(1-j0,2\lambda)}{j\lambda(1+j\lambda 0,2)}$  $\lambda_1 = \frac{1}{0,123} = 8,18; \lg 8,1766 = 0,91$ $\lambda_2 = \frac{1}{0,2} = 5; \lg 5 = 0,7$
0,45	$\frac{0,53(4,74Z+1)}{(Z-1)(Z-0,00352)}$	$\frac{1,526(1+0,65w)(1-w)}{w(1+w)}$	$\frac{6,25(1-j0,146\lambda)(1-j0,225\lambda)}{j\lambda(1+j\lambda 0,225)}$

			$\lambda_1 = \frac{1}{0,146} = 6,85; \lg 6,85 = 0,836$ $\lambda_2 = \frac{1}{0,225} = 4,44; \lg 4,44 = 0,65$
0,5	$\frac{0,544(5,25Z+1)}{(Z-1)(Z-0,0019)}$	$\frac{1,7(0,68w+1)(1-w)}{w(1+w)}$	$\frac{6,25(1-j0,17\lambda)(1-j0,25\lambda)}{j\lambda(1+j\lambda0,25)}$ $\lambda_1 = \frac{1}{0,17} = 5,88; \lg 5,88 = 0,77$ $\lambda_2 = \frac{1}{0,25} = 4; \lg 4 = 0,6$

На основании полученных данных и учитывая, что линейная часть САУ имеет значение  $20 \lg 6,25 = 16 \text{дб}$ ;  $\omega_1 = \frac{1}{0,08} = 12,5 \text{с}^{-1}$ ;  $\lg 12,5 = 1,097 \text{дек}$ .

построим соответствующие ЛАФЧХ линейной части САУ и дискретной системы с экстраполятором нулевого порядка. Граничные частоты определяющие разграничение области низких и высоких частот управляющих сигналов определены для каждого значения периода дискретности T:

$$T=0,04 \text{с.}, \lambda_{zp} = \frac{2}{T} = 50 \text{с}^{-1} \rightarrow 1,698 \text{дек};$$

$$T=0,08 \text{с.}, \lambda_{zp} = \frac{2}{T} = \frac{2}{0,08} = 25 \text{с}^{-1} \rightarrow 1,3979 \text{дек};$$

$$T=0,16 \text{с.}, \lambda_{zp} = \frac{2}{T} = \frac{2}{0,16} = 12,5 \text{с}^{-1} \rightarrow 1,097 \text{дек};$$

$$T=0,4 \text{с.}, \lambda_{zp} = 5 \text{с}^{-1} \rightarrow 0,7 \text{дек};$$

$$T=0,45 \text{с.}, \lambda_{zp} = 4,44 \text{с}^{-1} \rightarrow 0,65 \text{дек};$$

$$T=0,5 \text{с.}, \lambda_{zp} = 4 \text{с}^{-1} \rightarrow 0,6 \text{дек}.$$

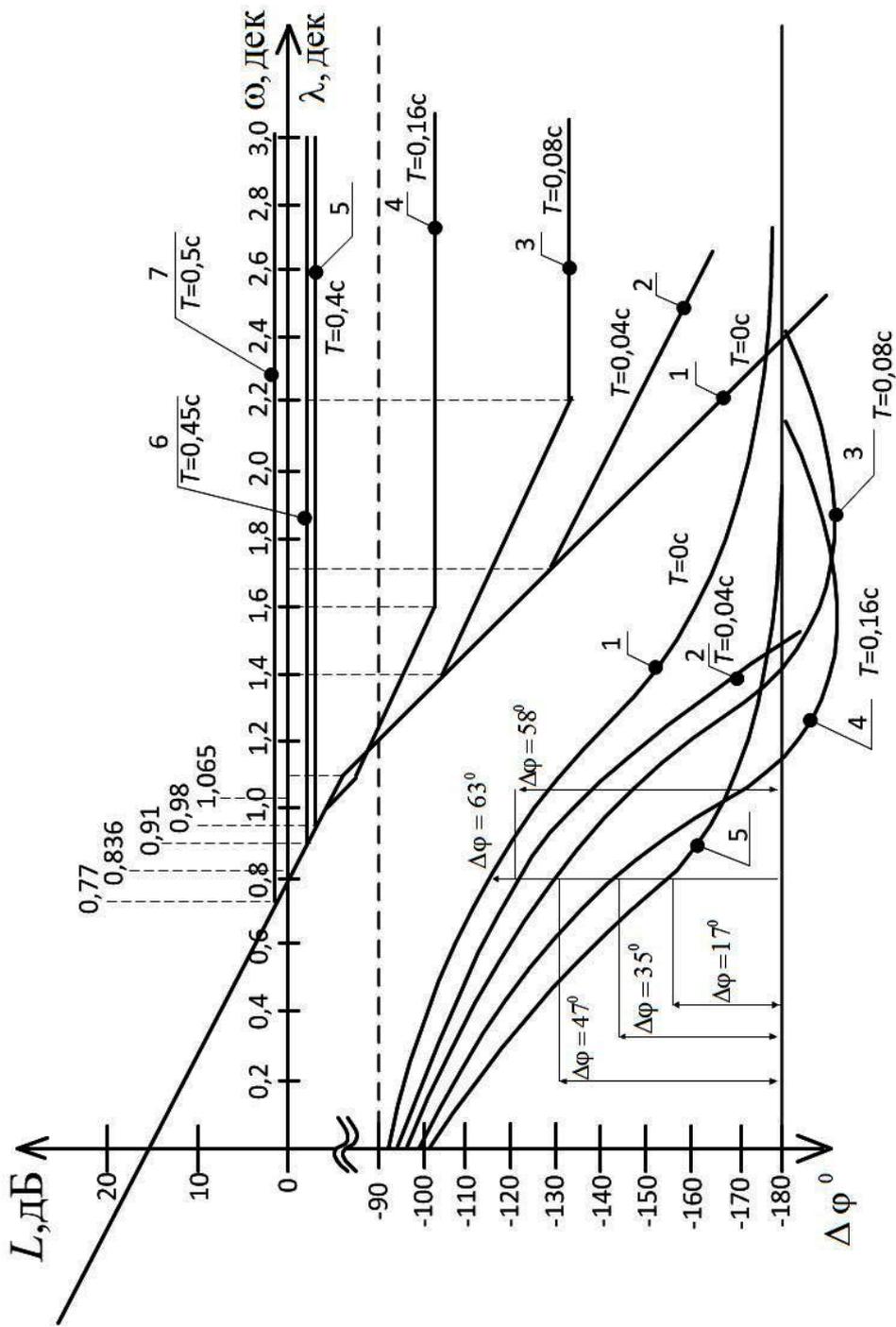


Рисунок 2.4. ЛАФЧХ разомкнутой САУ с экстраполятором «0» порядка:

1 – ЛАФЧХ аналоговой САУ; 2 – ЛАФЧХ дискретной САУ с  $T=0,04c$ ;

3 – ЛАФЧХ дискретной САУ с  $T=0,08c$ ; 4 – ЛАФЧХ дискретной САУ с  $T=0,16c$ ;

5 – ЛАФЧХ дискретной САУ с  $T=0,4c$ ; 6 – ЛАФЧХ дискретной САУ с  $T=0,45c$ ; 7 – ЛАФЧХ дискретной САУ с  $T=0,5c$ .

На основании результатов численного анализа устойчивости и динамических показателей качества на рисунке 2.5 представлены графические зависимости изменения запасов устойчивости  $\Delta\varphi=f(\frac{T}{T_1})$  и  $\Delta A=f(\frac{T}{T_1})$  от дискретности  $T$  экстраполятора.

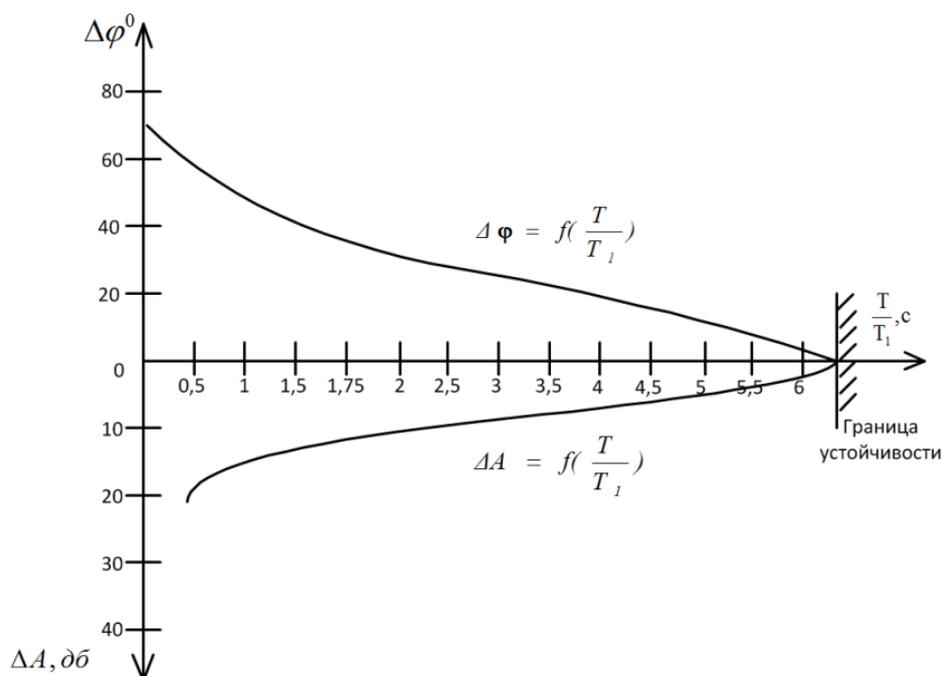


Рисунок 2.5. Зависимость  $\Delta\varphi=f(\frac{T}{T_1})$  и  $\Delta A=f(\frac{T}{T_1})$

Анализ этих зависимостей показывает, что при увеличении дискретности запасы устойчивости снижаются и при  $T \approx 0,5$  с. система в аналоговом виде устойчивая, теряет ее и становится неустойчивой. Таким образом в случае, если спектр сигнала не имеет четкого ограничения, то эффект Алиасинга приведет к более жестким требованиям по эквивалентированию дискретной системы с экстраполятором нулевого порядка к непрерывной. Из приведенного выше анализа следует, что система существенно снижает запасы устойчивости, а, следовательно, существенно изменяет динамические показатели качества управления:  $\sigma\%$ ,  $t_p$  – перерегулирование и время переходного процесса соответственно [4,20].

Для прецизионных САУ требуются более жесткие требования для признания системы эквивалентной аналоговой [18]. В данном случае

приближение возможно при  $T = 0,04$  с. Это в свою очередь говорит о том, что нужно выдержать условие  $\omega_0 = 12,5\omega_c$  [29]. Результаты моделирования для рассматриваемых выше случаев показаны на рисунке 2.6 и полностью подтверждают результаты аналитического анализа.

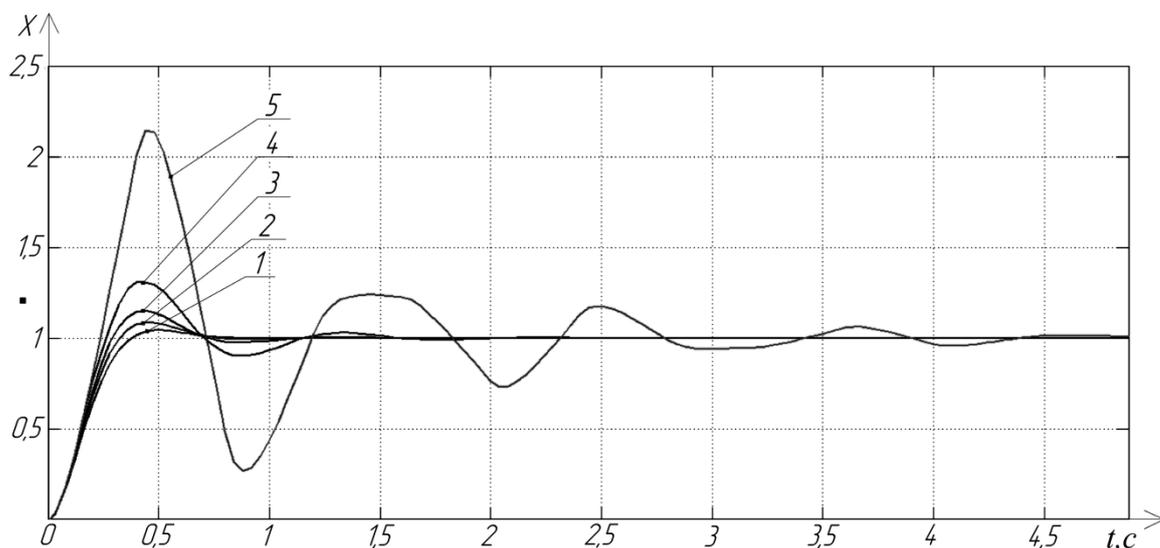


Рисунок 2.6. Переходный процесс в системе с экстраполятором «0» порядка:

1 –  $T=0$ с.,  $\sigma = 4,3\%$ ,  $t_p = 0,3$ с.; 2 –  $T=0,04$ ,  $\sigma = 8,6$ ,  $t_p = 0,5$ ; 3 –  $T=0,08$ ,  $\sigma = 12$ ,  $t_p = 0,7$ ; 4 –  $T=0,16$ ,  $\sigma = 30$ ,  $t_p = 1,1$ ; 5 –  $T=0,4$ ,  $\sigma = 114$ ,  $t_p = 3,7$ .

### 2.3 Анализ погрешности в воспроизведении заданной траектории движения позиционно – следящего электропривода с экстраполятором нулевого порядка

Оценка погрешности, вносимая экстраполятором, является важной составляющей в погрешности воспроизведения заданной траектории движения электропривода  $X_{zd}(p)$ . Это особенно важно для прецизионных позиционно следящих электроприводов, которыми оснащаются координатно – расточные станки особо высокой точности 2440СФ4 [34,45]. Для станков класса «С» при перемещениях подвижного органа станка до 1250 мм погрешность должна составлять до 2 мкм [52]. При обработке сложной поверхности следящий электропривод должен воспроизводить гармонический сигнал [4]. При этом в процессе обработки нужно поддерживать постоянную скорость подачи инструмента ( $V_{zd}$ ), заданную для

данного технологического процесса. Связь между круговой частотой  $\omega_{3d}$ ,  $V_{3d}$  и  $X_{3d}$  устанавливается зависимостью:

$$\omega_{3d} = \frac{V_{3d}}{X_{3d}} \quad (11).$$

Анализ погрешности вносимый экстраполятором нулевого порядка будем проводить с помощью передаточной функции системы по ошибке в форме Z – преобразования:

$$W_{\delta}(z) = \frac{\delta(z)}{X_{3d}(z)} = \frac{1}{1 + W_p(z)} \quad (12).$$

В (12) передаточная функция системы в форме Z – преобразования в разомкнутом состоянии представлена зависимостью (6). С учетом (6) выражение (2) представим в виде:

$$W_{\delta}(z) = \frac{\delta(z)}{X_{3d}(z)} = \frac{1}{1 + W_p(z)} = \frac{1}{1 + \frac{K[Z(T - T_1 + T_1 d) + T_1(1 - d) - dT]}{(z - 1)(z - d)}} \quad (13).$$

$$\frac{(z - 1)(z - d)}{(z - 1)(z - d) + K[z(T - T_1 + T_1 d) + T_1(1 - d) - dT]}$$

Аналитическое исследование зависимости (13) в общем виде не представляется возможным. Поэтому используем численный метод для оценки погрешности, вносимой экстраполятором. Используем те же значения периода дискретности  $T$  :  $T=0,04$ с;  $T=0,08$ с;  $T=0,16$ с;  $T=0,3$ с;  $T=0,4$ с., для исследования погрешности в воспроизведении заданной траектории на станках 2440СФ4, которые определяют частоту квантования  $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$ .

Подставляя в выражение (13) значение  $T = 0,04$ с получим:

$$W_{\delta}(z) = \frac{(z - 1)(z - e^{\frac{0,04}{0,08}})}{(z - 1)(z - d) + 6,8 \left[ Z \cdot (0,04 - 0,08 + 0,08e^{\frac{0,04}{0,08}}) + 0,08(1 - e^{\frac{0,04}{0,08}}) - e^{\frac{0,04}{0,08}} \cdot 0,04 \right]} \quad (14).$$

$$\frac{z - 0,6}{(z - 0,6) + \frac{0,544(z + 1)}{z - 1}}$$

Аналогичным методом проведены расчеты для выбранных значений периода дискретности  $T$  и внесены в таблицу 2.2.

Для дальнейшего анализа перейдем в область псевдочастот  $\lambda$  с использованием билинейного преобразования (8). Это позволит использовать ЛАФЧХ для исследования системы. Подставим в выражение (13) выражение (8) получим:

$$W_s(w) = \frac{\frac{1+w}{1-w} - 0,6}{\frac{1+w}{1-w} - 0,6 + \frac{0,544 \left( \frac{1+w}{1-w} + 1 \right)}{\left( \frac{1+w}{1-w} - 1 \right)}} = \frac{7,407w(1+4w)}{29,62w^2 + 6,41w + 1} \quad (15).$$

Перейдем в область псевдочастот, заменим в (14)  $w = j\lambda \frac{T}{2}$ . Получив

некоторые зависимости, построим ЛАЧХ:

$$W_s\left(j\lambda \frac{T}{2}\right) = \frac{7,407 j\lambda \frac{0,04}{2} \left(1 + j\lambda \frac{0,04}{2}\right)}{29,62 \left(j\lambda \frac{0,04}{2}\right)^2 + 6,41 j\lambda \frac{0,04}{2} + 1} = \frac{0,148 j\lambda(1 + j\lambda 0,08)}{0,0118 j\lambda^2 + 0,128 j\lambda + 1} \quad (16).$$

Для периода дискретности  $T = 0,04$ с вычислим значения:  $20\lg K = 20\lg 0,148 = -16,8$  дБ;  $T_1 = 0,08$ с;  $T_2 = 0,108$ с;  $\lambda_1 = \frac{1}{T_1} = 12,5$ с<sup>-1</sup>;  $\lg 12,5 = 1,1$  дек;

$c \cong 0,58$ ;  $\lambda_2 = \frac{1}{T_2} = 9,26$ с<sup>-1</sup>;  $\lg 9,26 = 0,966$  дек.

Аналогично рассчитаны  $W_s\left(j\lambda \frac{T}{2}\right)$  для выбранных значений периода дискретности  $T$  и сведены в таблицу 2.2.

Логарифмическая амплитудно – частотная характеристика аналоговой САУ, принятой за эталон определяются передаточной функцией:

$$W_\delta(p) = \frac{\delta(p)}{X_{зд}(p)} = \frac{1}{1 + W_p(p)} = \frac{1}{1 + \frac{6,25}{(0,08p + 1) \cdot p}} = \frac{0,147p(0,08p + 1)}{0,012p^2 + 0,147p + 1} \quad (17).$$

На основании полученного выражения проведем расчет необходимых параметров для построения ЛАЧХ:

$$20 \lg 0,147 = -16,8 \text{ дБ};$$

$$\omega_1 = \frac{1}{0,08} = 12,5 \text{ с}^{-1}; \lg 12,5 = 1,1 \text{ дек}$$

$$\omega_2 = \frac{1}{0,109} = 9,17 \text{ с}^{-1}; \lg 9,17 = 0,96 \text{ дек}.$$

По расчетным данным таблицы 2.2 и аналоговой системы на рисунке 2.7 представлена логарифмическая амплитудно – частотная характеристика по ошибке позиционно – следящего электропривода [34].

Таблица 2.2 – Расчет логарифмических амплитудно – фазовых частотных характеристик дискретной системы

Период дискретности экстраполятора «0» порядка $T, \text{с}$	Передаточная функция разомкнутой системы $W_p(z) = \frac{x(z)}{x_{зд}(z)}$	Передаточная функция по ошибке системы в форме Z – преобразования $W_\delta(w) = \frac{\delta(z)}{x_{зд}(z)}$	Амплитудно – фазовая частотная характеристика системы по ошибке в области псевдочастот $W_\delta(j\lambda \frac{T}{2})$ $\lambda, \text{с}^{-1}; \lambda, \text{дек}; K, \text{дБ}; T, \text{с}.$
0,04	$\frac{0,05(1,1Z + 1)}{(Z - 1)(Z - 0,6)}$	$\frac{Z - 0,6}{\frac{0,0544(Z + 1)}{z - 1} + (Z - 0,6)}$	$\frac{0,147 j\lambda(1 + j\lambda 0,08)}{0,0116^2 (j\lambda)^2 + 0,125 j\lambda + 1} T_1 = 0,08;$ $T_2 = 0,108.$ $\lambda_1 = \frac{1}{T_1} = 12,5; \lg 12,5 = 1,1. c \cong 0,58$ $\lambda_2 = \frac{1}{T_2} = 9,26; \lg 9,26 = 0,966.$ $20 \lg K = 20 \lg 0,147 = -16,8$
0,08	$\frac{0,143(1,39Z + 1)}{(Z - 1)(Z - 0,366)}$	$\frac{Z - 0,366}{(Z - 0,366) + 0,143 \left( \frac{1,375Z + 1}{Z - 1} \right)}$	$\frac{0,147 j\lambda(1 + j\lambda 0,086)}{0,112^2 (j\lambda)^2 + 0,1136 j\lambda + 1} T_1 = 0,086;$ $T_2 = 0,112.$ $\lambda_1 = \frac{1}{T_1} = 11,63; \lg 11,63 = 1,06.$ $c \cong 0,52$ $\lambda_2 = \frac{1}{T_2} = 8,93; \lg 8,93 = 0,95.$ $20 \lg K = 20 \lg 0,147 = -16,8$
0,16	$\frac{0,325(1,88Z + 1)}{(Z - 1)(Z - 0,134)}$	$\frac{Z - 0,134}{(Z - 0,134) + 0,325 \left( \frac{1,875Z + 1}{Z - 1} \right)}$	$\frac{0,147 j\lambda(1 + j\lambda 0,1)}{0,116^2 (j\lambda)^2 + 0,092 j\lambda + 1} T_1 = 0,1;$ $T_2 = 0,116.$ $\lambda_1 = \frac{1}{T_1} = 10; \lg 10 = 1. c \cong 0,4$

			$\lambda_2 = \frac{1}{T_2} = 8,62; \lg 8,6 = 0,93.$ $20\lg K = 20\lg 0,147 = -16,8$
0,3	$\frac{0,48(3,097Z + 1)}{(Z - 1)(Z - 0,023)}$	$\frac{Z - 0,023}{(Z - 0,023) + 0,48\left(\frac{3,09Z + 1}{z - 1}\right)}$	$\frac{0,146j\lambda(1 + j\lambda 0,157)}{0,109^2(j\lambda)^2 + 0,075j\lambda + 1} T_1 = 0,157;$ $T_2 = 0,108.$ $\lambda_1 = \frac{1}{T_1} = 6,37; \lg 6,37 = 0,8. c \cong 0,347$ $\lambda_2 = \frac{1}{T_2} = 9,26; \lg 9,26 = 0,96.$ $20\lg K = 20\lg 0,146 = -16,8$
0,4	$\frac{0,52(4,21Z + 1)}{(Z - 1)(Z - 0,0066)}$	$\frac{Z - 0,0066}{(Z - 0,0066) + 0,52\left(\frac{4,21Z + 1}{Z - 1}\right)}$	$\frac{0,147j\lambda(1 + j\lambda 0,2)}{0,069^2(j\lambda)^2 + 0,069j\lambda + 1} T_1 = 0,2;$ $T_2 = 0,069.$ $\lambda_1 = \frac{1}{T_1} = 5; \lg 5 = 0,7. c \cong 0,347$ $\lambda_2 = \frac{1}{T_2} = 14,5; \lg 14,5 = 1,16$ $20\lg K = 20\lg 0,147 = -16,8$
0,5			Система не устойчива

Анализ логарифмической амплитудно – частотной характеристики на рисунке 2.7 показывает, что при увеличении периода дискретности экстраполятора  $T$ , существенно возрастает динамическая ошибка в воспроизведении заданной траектории движения. При значении периода дискретности  $T=0,04с$  система совпадает с аналоговым прототипом и обеспечивает лучшее воспроизведение заданной траектории. Увеличивая период дискретности  $T$  до значений  $0,08с$  и  $0,16с$  система теряет свои свойства, но обеспечивает воспроизведение заданной траектории с недопустимой погрешностью [37].

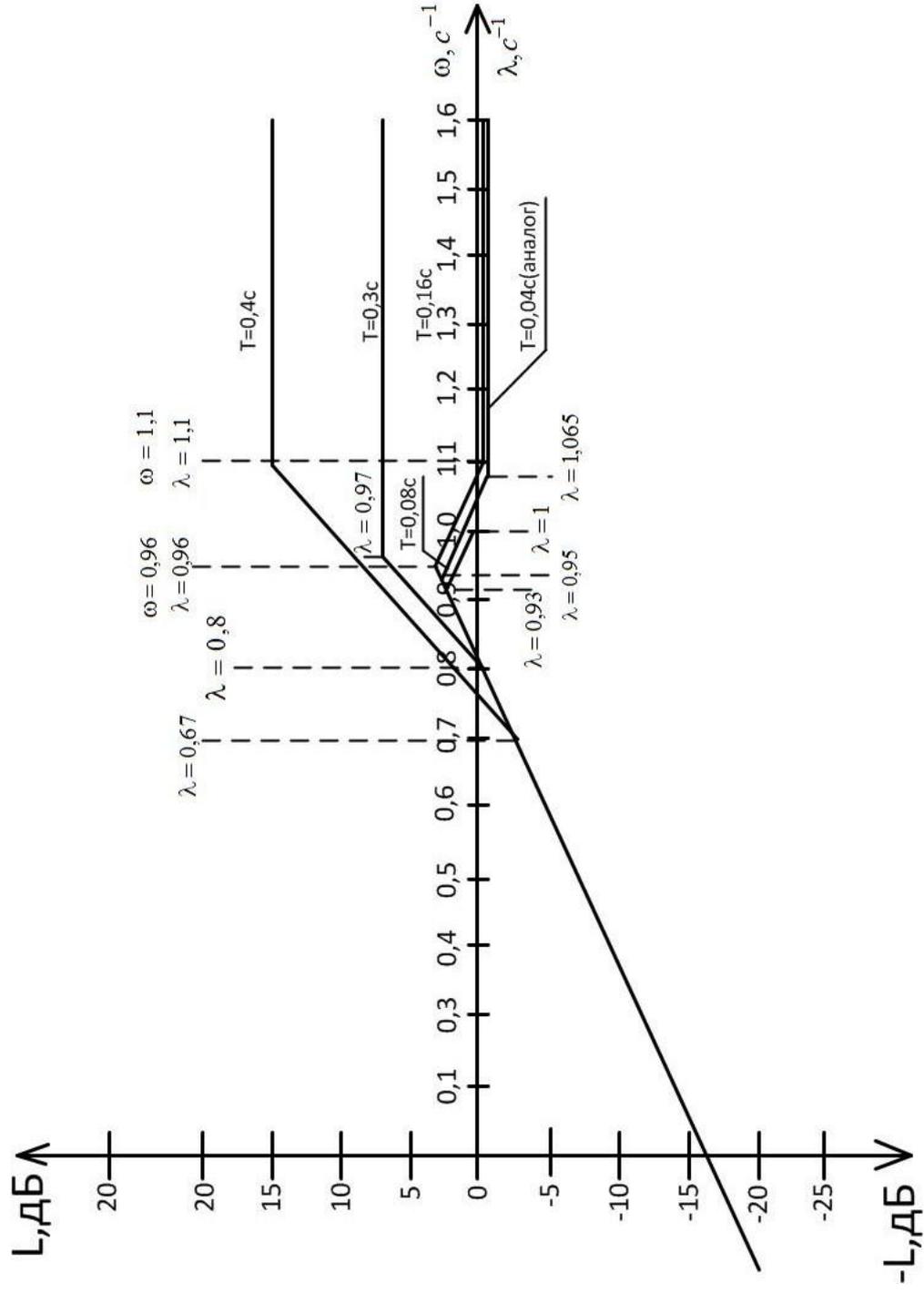


Рисунок 2.7. Логарифмическая амплитудно – частотная характеристика по ошибке

Анализ воспроизведения заданной траектории в зависимости от периода дискретности особенно важен для приводов прецизионных КРС класс С. К станку 2440СФ4, особо высокой точности, при обработке сложных профилей с закруглениями предъявляются вполне определенные требования по скоростям движения приводов подачи [38,49]. Например, в таблице 2.3 приведены значения  $V_{зд}$ ,  $\omega_{зд}$  для различных по твердости заготовок [37,40] (сталь 45Х твердость по Бринеллю 180 – 262 НВ, дюралюминий твердость по Бринеллю 70 НВ ) при радиусах закругления R.

Таблица 2.3

R,мм	$V_{зд}, \frac{м}{мин}$	$\omega_{зд}, с^{-1}$	$lg\omega_{зд}, дек$
1	0,5	8,3	0,92
	1	16,7	1,2
	2	33,3	1,52
2,5	0,5	3,32	0,52
	1	6,68	0,82
	2	13,32	1,12

Заметим, что при  $T=0,04с$  или  $\omega_0 = 157 с^{-1}$  имеем хорошее совпадение с погрешностью аналоговой системы, которая при заданных параметрах имеет полосу пропускания в разомкнутом состоянии  $\omega_c = 7 с^{-1}$ ,  $2\omega_c = 14 с^{-1}$ . Поэтому хорошее совпадение дискретной системы с непрерывным аналогом реализуется, если:  $\frac{\omega_0}{2\omega_c} = \frac{157}{14} = 11,2$ . Поэтому для достижения требуемой точности необходимо, чтобы  $\omega_0 > 2\omega_c$  в 12 раз.

Моделирование системы в среде Matlab подтверждает полученные расчетным путем выводы [12]. Графики отклонения ошибки  $\delta(t)$  дискретной системы от аналогового прототипа показаны на рисунке 2.8 при входном воздействии  $1(t)$ .

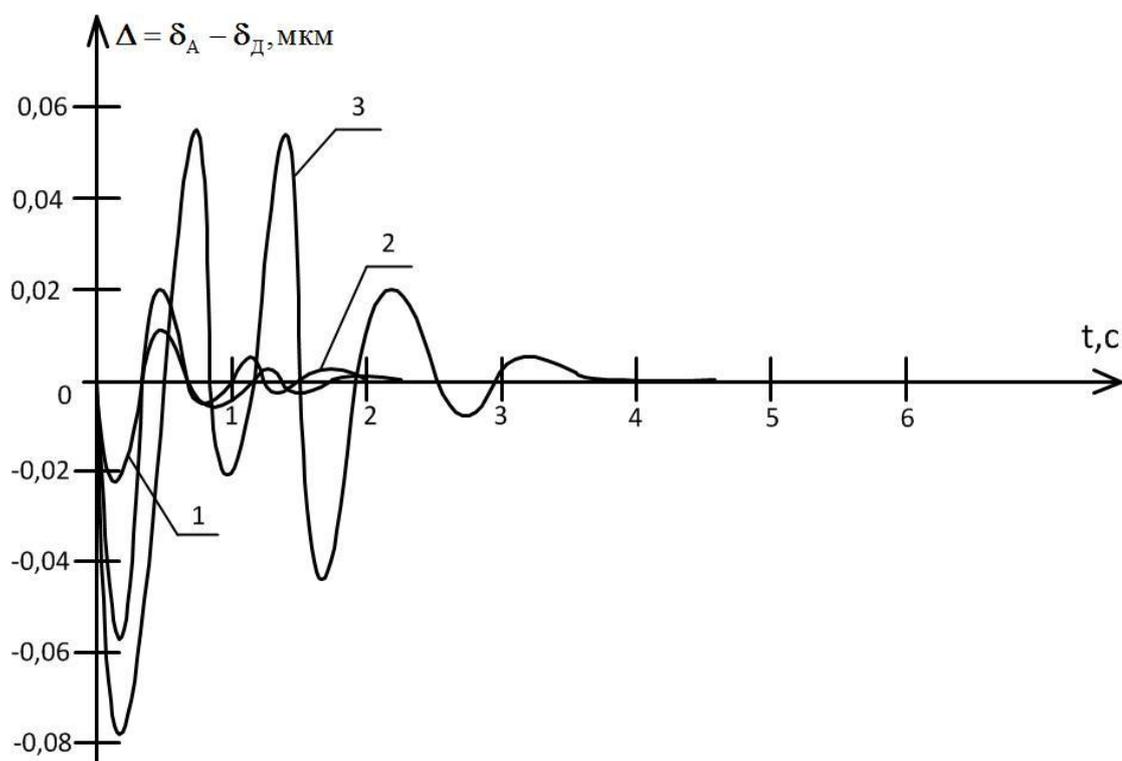


Рисунок 2.8. Отклонение ошибки  $\delta(t)$  дискретной системы от аналогового прототипа:

$$1-T=0,04\text{с}; 2-T=0,08\text{с}; 3-T=0,16\text{с}.$$

На основании рассмотренного можно сформулировать вывод. Если линейный прототип удовлетворяет техническим требованиям по ошибке воспроизведения заданной траектории, то дискретный регулятор может внести дополнительную погрешность, что может привести к увеличению погрешности и неудовлетворению технических требований. В этом случае требуется либо увеличить частоту  $\omega_0$  экстраполятора, либо увеличить быстродействие аналоговой части системы.

#### **2.4 Анализ влияния периода дискретности экстраполятора $T$ на точность воспроизведения сигнала задания**

Структурная схема позиционно – следящего привода принятого в данном исследовании показана на рисунке 2.3 [32]. Частота сигнала задания для электропривода подачи подвижного органа (например салазок)  $\omega_{зд}$  определяется выражением:

$$\omega_{3d} = \frac{V_{3d}}{A_{3d}} \quad (18).$$

В (18)  $V_{3d}$  – линейная скорость подвижного органа относительно инструмента,  $A_{3d}$  – амплитуда. Задаваясь амплитудами сигнала задания  $A_{3d}$  согласно зависимости (18) можно определить весь спектр частот  $\omega_{3d}$  для выполнения технологических операций с требуемыми технологическими скоростями  $V_{3d}$ . В таблице 2.4 даны значения  $\omega_{3d}$ ,  $f_{3d}$ ,  $T_{3d}$  для технологических режимов при обработке деталей аппроксимируемых окружностями радиусов 1мм, 2,5мм и  $V_{3d}$  от 0,5 до 8 м/мин.

Таблица 2.4

	$V_{3d}=0,5$ м/мин			$V_{3d}=1$ м/мин			$V_{3d}=2$ м/мин		
$A_{3d}$ мм	$\omega_{3d}, c^{-1}$ $\omega, дек$	$f_{3d}$ Гц	$T_{3d}$ с	$\omega_{3d}, c^{-1}$ $\omega, дек$	$f_{3d}$ Гц	$T_{3d}, c$	$\omega_{3d}, c^{-1}$ $\omega, дек$	$f_{3d}$ Гц	$T_{3d}, c$
1	8,3 0,92	1,322	0,76	16,7 1,22	2,659	0,38	33,3 1,52	5,303	0,19
2,5	3,32 0,52	0,529	1,89	6,68 0,82	1,064	0,94	13,32 1,12	2,12	0,47
	$V_{3d}=3$ м/мин			$V_{3d}=5$ м/мин			$V_{3d}=8$ м/мин		
$A_{3d}$ мм	$\omega_{3d}, c^{-1}$ $\omega, дек$	$f_{3d}$ Гц	$T_{3d}$ с	$\omega_{3d}, c^{-1}$ $\omega, дек$	$f_{3d}$ Гц	$T_{3d}$ с	$\omega_{3d}, c^{-1}$ $\omega, дек$	$f_{3d}$ Гц	$T_{3d}$ с
1	50 1,7	7,962	0,12	83,3 1,92	13,26	0,08	133,3 2,12	21,2	0,05
2,5	20 1,3	3,185	0,31	33,3 1,52	5,3	0,19	53,3 1,73	8,49	0,12

Согласно данным таблицы проанализируем область частот сигнала задания с областью частот ограниченной периодом дискретности

экстраполятора нулевого порядка. Оценим влияние дискретности в воспроизведении сигнала задания.

Передаточная функция рассматриваемой системы в разомкнутом состоянии в форме  $Z$  – преобразования имеет вид (6) [32].

Для оценки воспроизведения сигнала задания необходимо анализировать передаточную функцию системы в замкнутом состоянии:

$$W_3(z) = \frac{W_p(Z)}{1 + W_p(Z)} = \frac{\frac{K[Z(T - T_1 + T_1 d) + T_1(1 - d) - dT]}{(Z - 1)(Z - d)}}{1 + \frac{K[Z(T - T_1 + T_1 d) + T_1(1 - d) - dT]}{(Z - 1)(Z - d)}} = \frac{K[Z(T - T_1 + T_1 d) + T_1(1 - d) - dT]}{(Z - 1)(Z - d) + K[Z(T - T_1 + T_1 d) + T_1(1 - d) - dT]} \quad (19).$$

Зависимость (18) в полной мере способствуют анализу динамики системы в области псевдочастот  $\lambda$ . Для этого в выражении (18) передаточной функции в форме  $Z$ –преобразования заменяем  $Z = \frac{1+w}{1-w}$  и переходим к билинейному преобразованию затем, заменяя  $w = j\lambda \frac{T}{2}$  – переходим в частотную плоскость в функции абсолютной псевдочастоты  $\lambda$ .

Анализ АФЧХ в области псевдочастот  $\lambda$ , полученной из выражени (18), в общем виде практически невозможно осуществить. Поэтому анализ будем проводить численным методом. Для этого, используя те же вычисленные значения  $W_p(j\lambda \frac{T}{2})$  из таблицы 2.1 для известных диапазонов  $T$  вычислим ПФ.

Для  $T = 0,04$ с ПФ  $W_3(j\lambda \frac{T}{2})$  имеет вид:

$$W_3(j\lambda \frac{T}{2}) = \frac{\frac{6,25(1 - j0,02\lambda)}{j\lambda(1 + j0,08\lambda)}}{1 + \frac{6,25(1 - j0,02\lambda)}{j\lambda(1 + j0,08\lambda)}} = \frac{(1 - j0,02\lambda)}{0,11^2(j\lambda)^2 - 0,125j\lambda + 6,25} \quad (20).$$

Аналогично рассчитаны значения для периода дискретности  $T = 0,08\text{с}; 0,16\text{с}; 0,3\text{с}; 0,4\text{с}; 0,45\text{с}; 0,5\text{с}$ . и сведены в таблицу 2.5.

Аналоговый прототип имеет ЛАФЧХ построенную по следующим данным:  $20\lg K = 20\lg 6,25 = 16,65\text{дб}$ ;  $\omega_1 = \frac{1}{T_1} = \frac{1}{0,08} = 12,5\text{с}^{-1}$ ;

$\lg \omega_1 = \lg 12,5 = 1,097\text{дек} \approx 1,1\text{дек}$ .

Передаточная функция замкнутой системы:

$$W_3(p) = \frac{W_p(p)}{1 + W_p(p)} = \frac{1}{0,01166p^2 + 0,147p + 1}; \quad 20\lg K = 20\lg 1 = 0 \text{ дб}; \quad T_1 = 0,108\text{с};$$

$$\omega_1 = \frac{1}{T_1} = \frac{1}{0,108} = 9,26\text{с}^{-1}; \quad \lg \omega_1 = \lg 9,26 = 0,97\text{дек}; \quad \text{коэффициент демпфирования } c = 0,68.$$

Таблица 2.5 – Расчет логарифмических амплитудно частотных характеристик дискретной системы

Период дискретности экстраполятора «0» порядка $T, \text{с}$	Передаточная функция разомкнутой системы $W_p(z) = \frac{x(z)}{x_{зд}(z)}$	Амплитудно – фазовая частотная характеристика разомкнутой системы $W_p(j\lambda \frac{T}{2})$ $\lambda, \text{с}^{-1}, \lambda \text{ дек}, K \text{ дб}$	Амплитудно – фазовая частотная характеристика замкнутой системы $W_3(j\lambda \frac{T}{2})$ $\lambda, \text{с}^{-1}, \lambda \text{ дек}, K \text{ дб}$
0,04	$\frac{0,05(1,1Z + 1)}{(Z - 1)(Z - 0,6)}$	$\frac{6,25(1 - j0,02\lambda)}{j\lambda(1 + 0,08\lambda)}$ $20 \lg K = 20 \lg 6,25 = 16,25$ $\lambda_1 = \frac{1}{0,02} = 50;$ $\lg 50 = 1,7$ $\lambda_2 = \frac{1}{0,08} = 12,5;$ $\lg 12,25 = 1,097$	$\frac{(1 - j0,02\lambda)}{0,108^2(j\lambda)^2 + 0,127j\lambda + 1}$ $20 \lg K = 20 \lg 1 = 0$ $\lambda_1 = \frac{1}{0,02} = 50;$ $\lg 50 = 1,7$ $\lambda_2 = \frac{1}{0,108} = 9,26;$ $\lg 9,26 = 0,966$ $c = 0,58$
0,08	$\frac{0,143(1,39Z + 1)}{(Z - 1)(Z - 0,366)}$	$\frac{6,25(1 - j0,04\lambda)}{j\lambda(1 + j\lambda 0,086)}$ $20 \lg K = 20 \lg 6,25 = 16,25$	$\frac{(1 + j\lambda 0,04)}{0,112^2(j\lambda)^2 + 0,113j\lambda + 1}$ $\lambda_1 = \frac{1}{0,04} = 25;$ $\lg 25 = 1,4.$

		$\lambda_1 = \frac{1}{0,04} = 25;$ $\lg 25 = 1,4$ $\lambda_2 = \frac{1}{0,086} = 11,63;$ $\lg 11,63 = 1,065$	$\lambda_2 = \frac{1}{0,112} = 8,93;$ $\lg 8,93 = 0,95.$ $20 \lg K = 20 \lg 1 = 0$ $c \cong 0,51$
0,16	$\frac{0,325(1,88Z + 1)}{(Z - 1)(Z - 0,13)}$	$\frac{6,25(1 - j0,08\lambda)(1 + j0,024\lambda)}{j\lambda(1 + j\lambda 0,105)}$ $20 \lg K = 20 \lg 6,25 = 16,25$ $\lambda_1 = \frac{1}{0,08} = 12,5;$ $\lg 12,5 = 1,097$ $\lambda_2 = \frac{1}{0,024} = 41,66;$ $\lg 41,66 = 1,62$ $\lambda_3 = \frac{1}{0,105} = 9,52;$ $\lg 9,52 = 0,98$	$\frac{(1 - j\lambda 0,08)(1 + j\lambda 0,024)}{0,116^2(j\lambda)^2 + 0,091j\lambda + 1} \lambda_1 = \frac{1}{0,08} = 12,5;$ $\lg 12,5 = 1,1.$ $\lambda_2 = \frac{1}{0,024} = 41,66; \lg 41,66 = 1,62.$ $\lambda_3 = \frac{1}{0,116} = 8,62; \lg 8,62 = 0,935.$ $20 \lg K = 20 \lg 1 = 0 \quad c \cong 0,39$
0,3	$\frac{0,48(3,09Z + 1)}{(Z - 1)(Z - 0,023)}$	$\frac{6,25(1 - j0,15\lambda)(1 + j0,0765\lambda)}{j\lambda(1 + j\lambda 0,157)}$ $20 \lg K = 20 \lg 6,25 = 16,25$ $\lambda_1 = \frac{1}{0,15} = 6,66;$ $\lg 6,66 = 0,82$ $\lambda_2 = \frac{1}{0,157} = 6,37;$ $\lg 6,37 = 0,8$ $\lambda_3 = \frac{1}{0,0765} = 13,1;$ $\lg 13,1 = 1,12$	$\frac{(1 - j\lambda 0,15)(1 + j\lambda 0,765)}{0,109^2(j\lambda)^2 + 0,0765j\lambda + 1} \lambda_1 = \frac{1}{0,15} = 6,66;$ $\lg 6,66 = 0,82.$ $\lambda_2 = \frac{1}{0,109} = 9,17; \lg 9,17 = 0,96.$ $\lambda_3 = \frac{1}{0,0765} = 13,1; \lg 13,1 = 1,12.$ $20 \lg K = 20 \lg 1 = 0 \quad c \cong 0,35$
0,4	$\frac{0,52(4,21Z + 1)}{(Z - 1)(Z - 0,0066)}$	$\frac{6,25(1 - j0,2\lambda)(1 + j0,12\lambda)}{j\lambda(1 + j\lambda 0,2)}$ $20 \lg K = 20 \lg 6,25 = 16,25$ $\lambda_1 = \frac{1}{0,2} = 5; \lg 5 = 0,7$ $\lambda_2 = \frac{1}{0,12} = 8,12;$ $\lg 8,12 = 0,919$ $\lambda_3 = \frac{1}{0,2} = 5;$ $\lg 5 = 0,7$	$\frac{(1 - j\lambda 0,2)(1 + j\lambda 0,12)}{0,069^2(j\lambda)^2 + 0,069j\lambda + 1}$ $\lambda_1 = \frac{1}{0,12} = 8,12; \lg 8,12 = 0,919.$ $\lambda_2 = \frac{1}{0,2} = 5;$ $\lg 5 = 0,7.$ $\lambda_3 = \frac{1}{0,069} = 14,5; \lg 14,5 = 1,16.$ $20 \lg K = 20 \lg 1 = 0 \quad c \cong 0,51$
0,45	$\frac{0,534(4,74Z + 1)}{(Z - 1)(Z - 0,0035)}$	$\frac{6,25(1 - j0,146\lambda)(1 - j0,225\lambda)}{j\lambda(1 + j\lambda 0,225)}$ $20 \lg K = 20 \lg 6,25 = 16,25$	$\frac{(1 + j\lambda 0,146)(1 - j\lambda 0,225)}{0,0153^2(j\lambda)^2 + 0,068j\lambda + 1}$ $\lambda_1 = \frac{1}{0,225} = 4,44;$ $\lg 4,44 = 0,65.$

		$\lambda_1 = \frac{1}{0,225} = 4,44;$ $\lg 4,44 = 0,648$ $\lambda_2 = \frac{1}{0,146} = 6,85;$ $\lg 6,85 = 0,836$ $\lambda_3 = \lambda_1 = 0,648$	$\lambda_2 = \frac{1}{0,146} = 6,85;$ $\lg 6,85 = 0,836.$ $\lambda_3 = \frac{1}{0,0153} = 65,36; \lg 65,36 = 1,81.$ $20 \lg K = 20 \lg 1 = 0$ $c \cong 2$
0,5	$\frac{0,54(5,33Z + 1)}{(Z - 1)(Z - 0,0019)}$	$\frac{6,25(1 - j0,171\lambda)(1 - j0,25\lambda)}{j\lambda(1 + j\lambda 0,25)}$ $20 \lg K = 20 \lg 6,25 = 16,25$ $\lambda_1 = \frac{1}{0,17} = 5,88;$ $\lg 5,88 = 0,77$ $\lambda_2 = \frac{1}{0,25} = 4;$ $\lg 4 = 0,6$ $\lambda_3 = \lambda_2 = 0,6$	$\frac{(1 + j\lambda 0,17)(1 - j\lambda 0,25)}{-0,077^2(j\lambda)^2 + 0,068j\lambda + 1} \lambda_1 = \frac{1}{0,17} = 5,88;$ $\lg 5,88 = 0,77.$ $\lambda_2 = \frac{1}{0,25} = 4;$ $\lg 4 = 0,6.$ $\lambda_3 = \frac{1}{0,077} = 13; \lg 13 = 1,11.$ $20 \lg K = 20 \lg 1 = 0$ $c \cong 0,435$

По полученным данным построим ЛАЧХ замкнутой системы. При значениях периода дискретности  $T=0,04с., 0,08с., 0,16с.$  из рисунка 2.10 видно, что построенные характеристики имеют наклон  $-20дБ$  и  $-40дБ$  и соответственно система воспроизводит сигнал задания [25]. При увеличении периода  $T$  снижается качество воспроизведения сигнала. Характеристика при значениях периода дискретности  $T = 0,3с., 0,4с.$  имеют наклон  $+20дБ$  и  $+40дБ$  и следовательно система не воспроизводит сигнал задания.

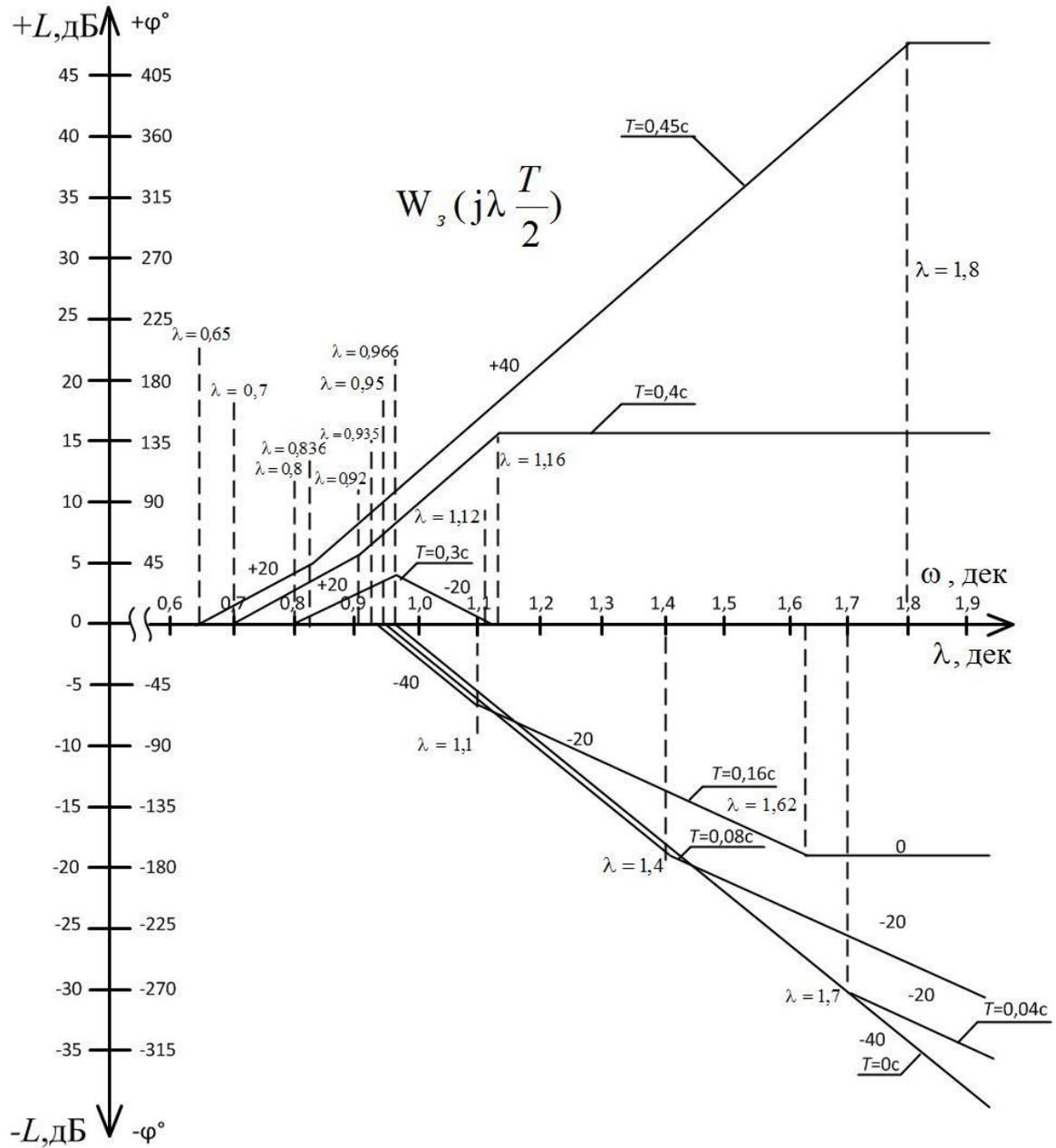


Рисунок 2.10. Логарифмическая амплитудно – частотная характеристика замкнутой системы

Из полученных ЛАЧХ следует, что точность воспроизведения сигнала задания замкнутой системы имеет хорошее совпадение с аналоговым прототипом, в пределах технологических частот задания  $\omega_{зд}$  от 0,92 до 1,52 дек (таблица 2.5) при дискретности экстраполятора нулевого порядка  $T = 0,04c$ . Это соответствует частоте  $\omega_{0_1} = \frac{6,25}{0,04} = 157c^{-1} \lg 157 = 2,19$  дек. Здесь

также хорошее совпадение дискретной САУ с непрерывным прототипом реализуется при условии  $\frac{\omega_0}{2\omega_c} = \frac{157}{14} = 12$ , т.е. при  $\omega_0 \geq 2\omega_c$  в 12 раз.

На основании теоретического анализа влияния периода дискретности экстраполятора нулевого порядка на динамические показатели качества управления и точности воспроизведения сигнала задания установлено, что частота квантования определяет заданную точность в случае, если соотношение между  $\omega_0$  и  $\omega_c$  будет  $\omega_0 \geq 12\omega_c$ . В этом случае и запас устойчивости дискретной САУ приближается с точностью до 3% к аналоговому прототипу. Следует отметить, что в случае повышения быстродействия аналоговой части системы и расширения  $\omega_c$  необходимо пропорционально увеличивать  $\omega_0$ .

На основании анализа следует также, что в случае невысоких требований по точности (станки класса Н) частота квантования может быть снижена. Кроме того и для станков класса «С» на профилях более простых она также должна быть снижена, а это приведет к снижению нагрузки на микропроцессор, тем самым позволив проводить анализ и контроль других параметров работы оборудования станка. Таким образом, целесообразно изменять  $\omega_0$  в функции  $R$ ,  $V_{зд}$  и других технологических параметров заготовки и инструмента (твердость, скорость резания).

### **Выводы по главе**

На основании проведенных теоретических исследований по анализу влияния дискретности в УЧПУ на динамические показатели качества управления позиционно – следящего электропривода КРС можно сформулировать следующие выводы:

1. Установлен критерий соотношения между частотой квантования  $\omega_0$  и полосой пропускания линейной части САУ  $\omega_c$ , обеспечивающего заданные показатели качества управления: точности, быстродействия.

2. Показано, что исследование с помощью частотного метода является наглядным. Введение билинейного преобразования позволило применить к исследованию цифровых САУ известные методы и методики для непрерывных САУ.

3. Исследование показывает, что при увеличении быстродействия электроприводов необходимо пропорционально увеличивать и частоту квантования  $\omega_0$ .

### **3 Разработка интеллектуального модуля управления позиционно – следящего электропривода**

#### **3.1 Методика определения частоты гармонического сигнала задания позиционно – следящему электроприводу при отработке сложных профилей**

Системы ЧПУ развиваются непрерывно с момента появления и по настоящее время. Это связано с современными требованиями, которые предъявляются производством. Современное производство включает в себя такие компоненты как, высокое качество полученных деталей в совокупности с высокой скоростью обработки [21].

Архитектурно системы ЧПУ претерпевают изменения, которые несут в себе удобство, простоту использования системы и улучшенные технические характеристики. Развитие микропроцессорной техники позволяет получить системы, которые обрабатывают с высокой производительностью большие объемы информации и способны выдавать с высокой скоростью управляющие команды в следящие электропривода металлорежущих станков [24,35]. Рост степени интеграции в микропроцессорной технике и переход от микропроцессоров к микроконтроллерам с встроенным набором специализированных периферийных устройств, сделали необратимой тенденцию массовой замены аналоговых систем управления приводами на системы прямого цифрового управления [51,58].

В настоящее время системы ЧПУ различаются формой сигнала задания, измерения скорости, положения, формирования алгоритмов управления и классифицируются на:

- цифровые системы;
- аналоговые системы.

Цифровой системе характерно свойство прямого цифрового управления, т.е. сигнал задания поступает в электропривод в цифровой форме и после преобразований управляет ключами силового преобразователя

электропривода [5]. Наличие квантователя сигналов по уровню в цепях обратных связей, в цепях параллельной коррекции и в ряде случаев в устройстве задающего сигнала, является главной особенностью цифровых систем управления [59]. Погрешность цифровых устройств не превышает величины единичного значения младшего разряда кода, с которым эти устройства оперируют. Помимо квантования по уровню цифровым системам свойственно квантование по времени. Период (такт) временного квантования  $T_0$  для большинства систем лежит в пределах 0,001-0,01 с. Следовательно, что для обеспечения высокого качества управления, такт квантования следует выбирать как можно меньшим.

В качестве примера цифровой системы ЧПУ рассмотрим системы производства фирмы Heidenhain модели TNC-620. Данной системой оснащаются станки фирмы ЗАО «Стан – Самара», моделей 2440СФ4 и СКР 400. Функциональная схема системы представлена на рисунке 3.2 [54].

В цифровой системе управления HEIDENHAIN регуляторы тока, скорости и положения реализованы в программном виде. Структурная схема представлена на рисунке 3.1. Все компоненты САУ связаны друг с другом через цифровой интерфейс – компоненты системы ЧПУ с помощью интерфейса HSCI (HEIDENHAIN Serial Controller Interface), для Fast-Ethernet используется HEIDENHAIN-протокол реального времени, а датчики с помощью двунаправленного интерфейса EnDat 2.2 (рисунок 3.2) [54]. В САУ прецизионными металлорежущими станками, построенного на модулях HEIDENHAIN (УЧПУ TNC-620), частота замыкания контура тока достигает порядка 10 кГц, контура скорости – 1 кГц, контура положения – 100-1000 Гц.

Таким образом, достигается высокая безотказность в эксплуатации системы в целом, простота диагностики, высокая помехоустойчивость – от основного компьютера до измерительных датчиков.

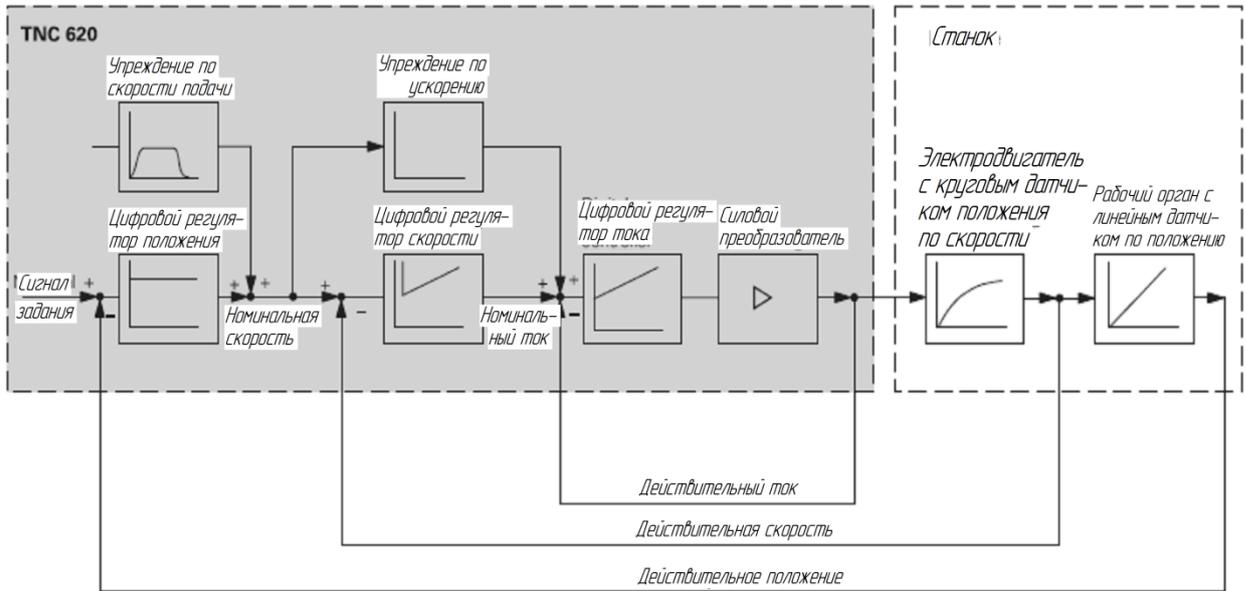


Рисунок 3.1. Структурная схема цифровой САУ на базе ЧПУ TNC 620

Основные преимущества системы управления с HSCI:

- Аппаратная платформа для гибкой и масштабируемой системы управления (например, децентрализованная систем осей);
- Высокая помехозащищенность благодаря цифровой передаче данных между компонентами.

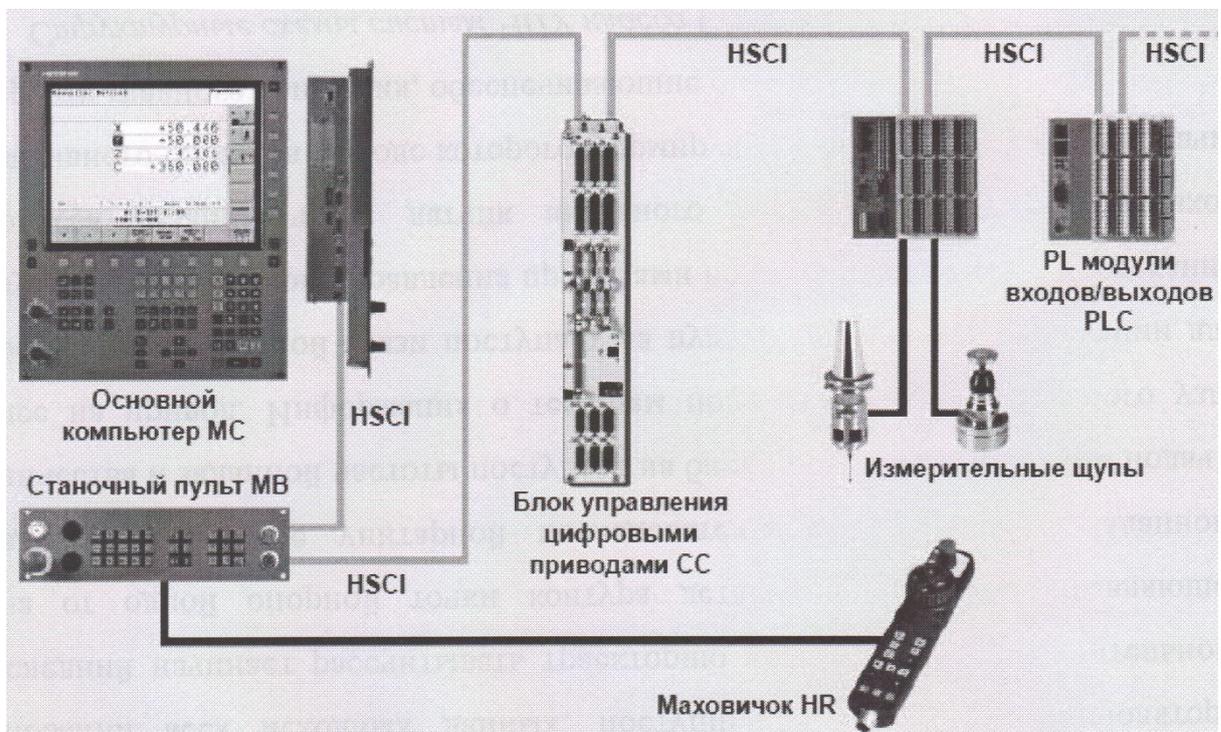


Рисунок 3.2. Схема соединений модулей с TNC 620

Важнейшей технической характеристикой систем ЧПУ является ее

разрешающая способность или дискретность, т.е. минимально возможная величина линейного и углового хода исполнительного органа (ИО) станка, соответствующая одному управляющему импульсу, т.е. контролируемая в процессе управления [48]. Практически все современные системы ЧПУ поддерживают интерполяцию с малой дискретностью вычислений («наноинтерполяцию») и алгоритмы «предпросмотра». Алгоритмы «предпросмотра» позволяют просчитать траекторию инструмента и заранее снизить скорость перед её резкими изменениями (что особенно актуально для обработки на больших скоростях).

В данной работе исследуется вопрос влияния частоты дискретизации экстраполятора нулевого порядка  $\omega_0$ , на показатели качества САУ. Следует отметить, что выбор частоты дискретизации, при которой обеспечиваются оптимальные показатели качества, будет правильным для цифроаналоговой системы, в которой регулятор положения цифровой, а тока и скорости аналоговые. Аналоговую систему можно отнести в какой то степени к цифровой, т.к. обработка всей информации, поступающей от задающей программы и от датчика обратной связи (ДОС) в аналоговой форме с периферии в микроконтроллер, а затем в центральный процессор после преобразований в АЦП, происходит в цифровой форме[48]. Но отличительной особенностью является то, что сигнал задания поступает в аналоговой форме в аналоговые позиционно следящие электропривода и уже в структуре электропривода данный сигнал обрабатывается и управляет работой силового преобразователя. В аналоговых системах ЧПУ в формировании сигнала задания скорости участвует ЦАП. Частота дискретизации является основной характеристикой ЦАП. Она говорит о том, на какой частоте может работать ЦАП, выдавая на выходе корректный сигнал [15,57]. На рисунке 3.3 представлена структурная схема аналоговой САУ, спроектированной на базе ЧПУ и электропривода фирмы ООО «Балт – Систем».

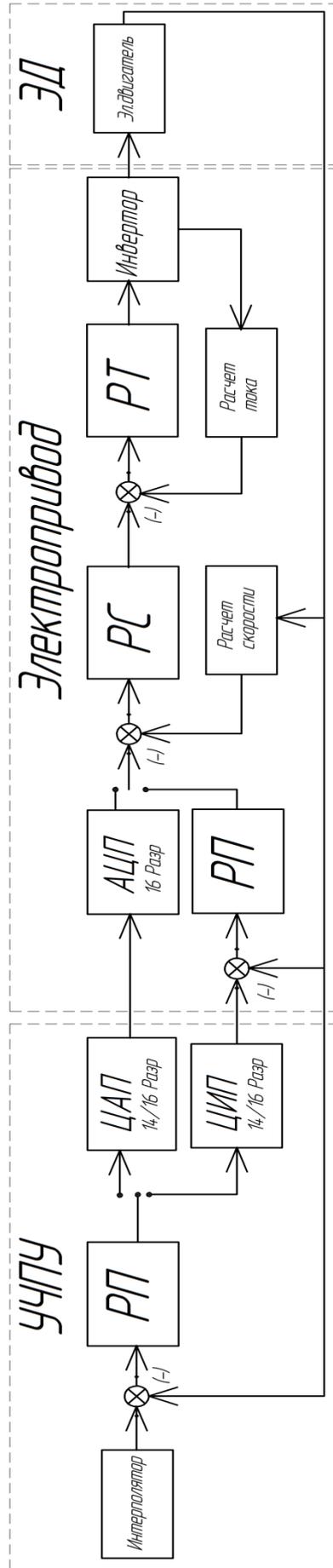


Рисунок 3.3. Структурная схема аналоговой САУ на базе ЧПУ NS – 220

В структуре УЧПУ находится регулятор положения и цифро – аналоговый преобразователь. В систему поступает и сравнивается с заданным положением фактический сигнал с датчика положения. После этого в ЦАП формируется сигнал задания, который поступает на вход электропривода. В структуре электропривода содержатся регуляторы тока и скорости. После того как сигнал задания в аналоговой форме поступает в определенный канал электропривода, он оцифровывается посредством АЦП и уже в структуре электропривода происходят дальнейшие преобразования для целей управления серводвигателем [48]. Основной задачей при передаче сигнала задания от УЧПУ к электроприводу является защита сигнала от помех, т.е. его помехозащищенность. В случае плохой защиты в канал будет наводиться напряжение помехи, которое влияет на устойчивость САУ и будет приводить к увеличению рассогласования. Также необходимо свести к минимуму «дрейф нуля» АЦП, тем самым обеспечив стабильность системы при позиционировании.

Для математического исследования влияния частоты дискретизации в данной работе, как уже было отмечено, используется экстраполятор нулевого порядка и говорится о его дискретности. В позиционно – следящих электроприводах оснащенных ЧПУ появляется, как уже отмечалось выше, ошибка связанная с дискретностью экстраполятора «0» порядка в контуре положения. Это приводит к тому, что при малых радиусах обработки изделий ( $R=1,2,3$  мм) необходимо обеспечить частоту квантования экстраполятора в 20 раз выше полосы пропускания линейной (аналоговой) части системы [33]. В этом случае можно существенно усовершенствовать процесс обработки изделий. В настоящее время при выходе на поворот по заданному радиусу предусматривают снижение  $V_{зд}$  (скорости обработки). Это позволяет компенсировать ошибку за счет инерционности электропривода. Снижение скорости приводит к снижению производительности. Этого можно избежать путем изменения частоты квантования экстраполятора и тем самым

поддерживать оптимальную скорость резания в соответствии с технологической картой обработки изделия [50].

Представим методику выбора частот управляющих воздействий поступающих на вход системы. Для этого необходимо определить значение амплитуд и частот сигнала задания, необходимых для реализации технологического процесса и пропускаемых САУ. При этом будем считать, что в общем случае обрабатывается сложная поверхность, которая требует задания на каждый следящий электропривод гармонического сигнала [1,5].

В качестве примера, рассмотрим обработку круговой интерполяции в двух осях (x;y). Для обработки деталей цилиндрической формы с радиусом  $r = A_{30}$ , необходимо дать закон движения салазкам  $x = A_{30} \sin \omega_{30} t$ , а столу  $y = A_{30} \cos \omega_{30} t$ . При этом в процессе обработки детали необходимо поддерживать постоянную скорость подачи инструмента ( $V_{30}$ ), заданную для данного технологического процесса. Установим связь между скоростью подачи ( $V_{30}$ ), амплитудой ( $A_{30}$ ) и частотой ( $\omega_{30}$ ) сигнала задания:

$$S_{30X} = A_{30} \sin \omega_{30} t; \quad V_x = \frac{dS_{30X}}{dt} = \omega_{30} A_{30} \cos \omega_{30} t;$$

$$S_{30Y} = A_{30} \cos \omega_{30} t; \quad V_y = \frac{dS_{30Y}}{dt} = -\omega_{30} A_{30} \sin \omega_{30} t;$$

$$V_{30} = \sqrt{(V_{30X})^2 + (V_{30Y})^2} = \omega_{30} V_{30}; \quad \omega_{30} = \frac{V_{30}}{A_{30}}. \quad (3.1)$$

$$\omega_{30} = 2\pi \cdot f_{30}; \quad f_{30} = \frac{\omega_{30}}{2\pi}; \quad (3.2)$$

$$T = \frac{1}{f_{30}}. \quad (3.3)$$

Исходя из заданного диапазона скоростей подачи, необходимых для выполнения технологического процесса, и диапазона амплитуд сигналов задания (при обработке круговой интерполяции численно равного радиусу обрабатываемой окружности), из выражений (3.1) и (3.3) можно найти спектр частот сигнала задания.

Продемонстрируем методику нахождения диапазона частот сигнала задания на основе следящих систем позиционирования стола и салазок координатно – расточного станка модели 2440СФ4. Линейная скорость подачи электроприводов стола и салазок составляет 2м/мин. На станках данной серии производится обработка изделий цилиндрической формы диаметром до 250мм (габаритные размеры стола 630×1120мм) [52]. Линейная скорость, обеспечивающая технологический процесс не превосходит:  $V_{зд} = 5$  м/мин = 8,33 см/сек,  $V_{зд} = 2$  м/мин = 3,33 см/сек и при  $V_{зд} = 1$  м/мин = 1,67 см/сек. При обработке тяжелого материала  $V_{зд} = 0,5$  м/мин = 0,83 см/сек. При обработке заготовки используется инструмент из быстрорежущей стали, твердого сплава и др.

Задаваясь различными значениями  $A_{зд}$ , определим необходимые значения частот сигнала задания  $\omega_{зд}$  для выполнения технологических операций с требуемыми скоростями перемещения  $V_{зд}$ . В таблице 3.1 приведены параметры сигналов задания, требуемых для осуществления круговой интерполяции для диапазона радиусов описываемой окружности от 0,01 до 300мм для диапазонов скоростей подачи от 0,5 до 2 м/мин. Из расчетных данных таблицы 3.1 очевидно, что для выполнения обработки изделий цилиндрической формы диаметром от 5 до 300мм, частота сигнала задания изменяется в диапазоне от 0,004 Гц (для скорости подачи равной 2м/мин и амплитуды сигнала задания 1 мм)

Таблица 3.1 – Параметры сигналов задания электроприводов подачи станка модели 2440СФ4

$A_{30}, мм$	$V_{30} = 0,5 м / мин$			$V_{30} = 1 м / мин$			$V_{30} = 2 м / мин$		
	$\omega_{30}, сек^{-1}$	$f_{30}, Гц$	T, сек	$\omega_{30}, сек^{-1}$	$f_{30}, Гц$	T, сек	$\omega_{30}, сек^{-1}$	$f_{30}, Гц$	T, сек
1	8,3	1,322	0,76	16,7	2,659	0,38	33,3	5,303	0,19
2,5	3,32	0,529	1,89	6,68	1,064	0,94	13,32	2,121	0,47
5	1,66	0,264	7,38	3,34	0,532	1,88	6,66	1,061	0,94
10	0,83	0,132	7,57	1,67	0,266	3,76	3,33	0,530	1,89
20	0,42	0,066	15,1 3	0,84	0,133	7,52	1,665	0,265	3,77
50	0,17	0,026	37,8 3	0,33	0,053	18,80	0,666	0,106	9,43
100	0,08	0,013	75,6 6	0,17	0,027	37,60	0,333	0,053	18,86
200	0,04	0,007	151, 3	0,08	0,013	75,21	0,1665	0,027	37,72
300	0,03	0,004	227	0,06	0,009	112,8	0,111	0,018	56,58

На основании данных таблицы 3.1 на рисунке 3.4 представлены графики зависимости частоты сигнала задания от радиуса воспроизводимой окружности и скорости подачи инструмента  $\omega_{30} = f_{30}(A_{30})$ . Из графика по известным значениям ( $V_{30}$ ) и амплитуды сигнала задания ( $A_{30}$ ), соответствующей радиусу воспроизводимой окружности определяется требуемое значение частоты сигнала задания ( $\omega_{30}$ ).

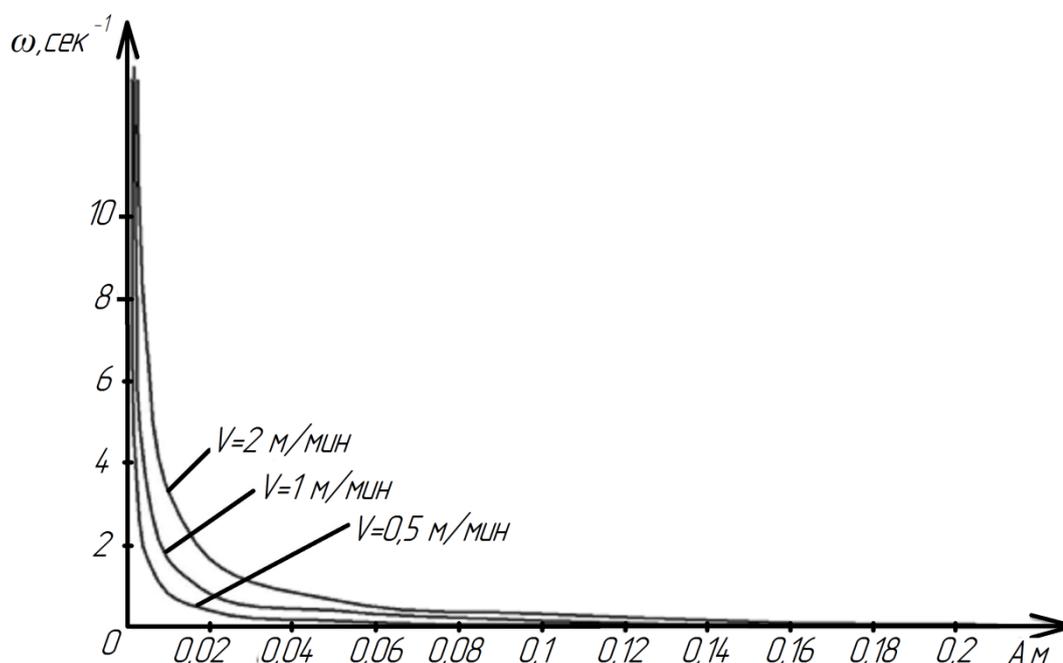


Рисунок 3.4. График зависимости частоты сигнала задания от радиуса воспроизводимой окружности  $\omega_{зд} = f_{зд}(A_{зд})$

Данная методика позволяет программным путем определить частоту квантования  $\omega_0$  и способствует разработке алгоритма управления интерполирующих осей позиционно – следящего электропривода [23].

### 3.2 Разработка алгоритма и структурной схемы интеллектуального позиционно – следящего электропривода

Опираясь на методику определения необходимых частот сигнала задания и учитывая тот факт, что  $V_{зд}$  зависит от инструмента, материала, то необходимо для каждого участка вычислять  $\omega_{зд}$ , что в принципе эквивалентно действию эксперта, а сам алгоритм обладает свойством искусственного интеллекта [36,46]. В зависимости от радиуса воспроизводимой окружности и линейной скорости подачи рабочих органов станка, составим алгоритм интеллектуального управления каждой из осей «X» и «Y» координатно – расточного станка. В качестве примера обрабатываемой детали возьмем деталь, представленную на рисунке 3.5. Обрабатываемый контур данной детали содержит прямолинейные участки и участки с радиусами скруглений. Значение скорости подачи  $V_{зд}$  задается

исходя из материала детали и свойств режущего инструмента. Для материала с высокой твердостью (сталь 45X) скорость подачи  $V_{зд} = 0,1$  м/мин = 0,16 см/сек. Значения  $l_{зд}$  задается исходя из конфигурации детали,  $R_i$  задается исходя из чертежа детали. Все эти данные используются при составлении программ для ЧПУ.

Для наглядности представим в виде блок-схемы алгоритм управления осью «X» на рисунке 3.6. Для оси «У» блок – схема составляется аналогичным образом. Алгоритмы управления функционируют параллельно. В зависимости от типа интерполяции выполняется та или иная часть блок-схемы, которая включает в себя вычисления траектории движения рабочего органа станка и необходимой частоты квантования экстраполятора нулевого порядка.

Рассмотрим алгоритм управления осью «X» более подробно. На начальном этапе указываем необходимые параметры для интерполяции:  $V_{зд X}$  – линейная скорость обхода контура,  $l_{зд X}$  – габариты заготовки по координате «X»,  $R_1 \div R_5$  – значения обрабатываемых радиусов,  $\alpha_1 \div \alpha_6$  – углы, образуемые по отношению к радиусам,  $T_1$  – период квантования экстраполятора. САУ постоянно контролирует положение подвижного органа станка. Как только начинается процесс отработки заданной траектории, происходит сравнение фактического положения рабочего органа с заданным в техническом задании.

Первоначальный участок (рисунок 3.5)  $l_X = l_{X1}$  прямолинейный, для его отработки изменение величины частоты квантования не требуется поэтому  $\omega_{зд г}$  остается прежней величиной. Как только  $l_X$  совпадет по величине с  $l_{X1}$  осуществляется переход на следующую траекторию  $l_{X2}$ . Вычисление траектории происходит наперед и закон отработки траектории известен заранее. Из рисунка видно, что траектория  $l_{X2}$  содержит радиус и для его отработки с высоким качеством необходимо вычислять частоту квантования  $\omega_{зд г}$ . Расчет частоты представлен на блок – схеме алгоритма. Параллельно вычисляется частота среза  $\omega_c$ , необходимая для расчета частоты

квантования. Как только заканчиваются расчеты, рассчитанная частота подается в генератор и затем в экстраполятор нулевого порядка, после чего САУ обрабатывает траекторию с новой частотой квантования, обеспечивающей высокую точность и качество получаемой поверхности. При совпадении значения фактического  $l_x$  и заданного  $l_{x1} + l_{x2}$  блокируются все вычисления данного этапа и происходит переход на следующую обрабатываемую траекторию  $l_{x3}$ . Траектория  $l_{x3}$  не содержит радиусов и поэтому вычисление частоты квантования не требуется и САУ обрабатывает траекторию с заданной на начальном этапе частотой. При  $l_x = l_{x1} + l_{x2} + l_{x3}$  переход на следующую обрабатываемую траекторию  $l_{x4}$ . При этом осуществляются те же операции по вычислению частоты квантования при обработке радиуса и адресации вычисленной частоты в экстраполятор. При совпадении траекторий заданная ветвь расчета блокируется и происходит переход на следующее заданное перемещение.

Если в ходе отработки программы необходимо перемещение только по координате «У», то подвижной орган по координате «Х» блокируется и происходит перемещение по второй координате. Алгоритмы для оси «У» функционируют аналогичным образом, как и для оси «Х». Как только заканчивается процесс по координате «У», «Х» разблокируется вновь, а «У» заблокирует свои вычисления.

Аналогично проделанным вычислениям обрабатываются оставшиеся части контура детали  $l_{x5}, l_{x6}, l_{x7}, l_{x8}, l_{x9}, l_{x10}$ . При равенстве фактического значения положения подвижного органа станка  $l_x$  и заданного значения координаты обрабатываемого контура  $l_{здХ}$  происходит остановка выполняемой операции.

Аналогично построенной блок – схеме по координате «Х» функционирует координата «У». Перемещения по координатам осуществляются одновременно либо поочередно, в зависимости от поставленной задачи, по законам интерполяции.

На основании изложенного алгоритма, разработан модуль интеллектуального управления (ИМУ) программированного процесса обработки контура детали. Данный интеллектуальный модуль входит в общую систему автоматического управления станка и представлен на рисунке 3.7.

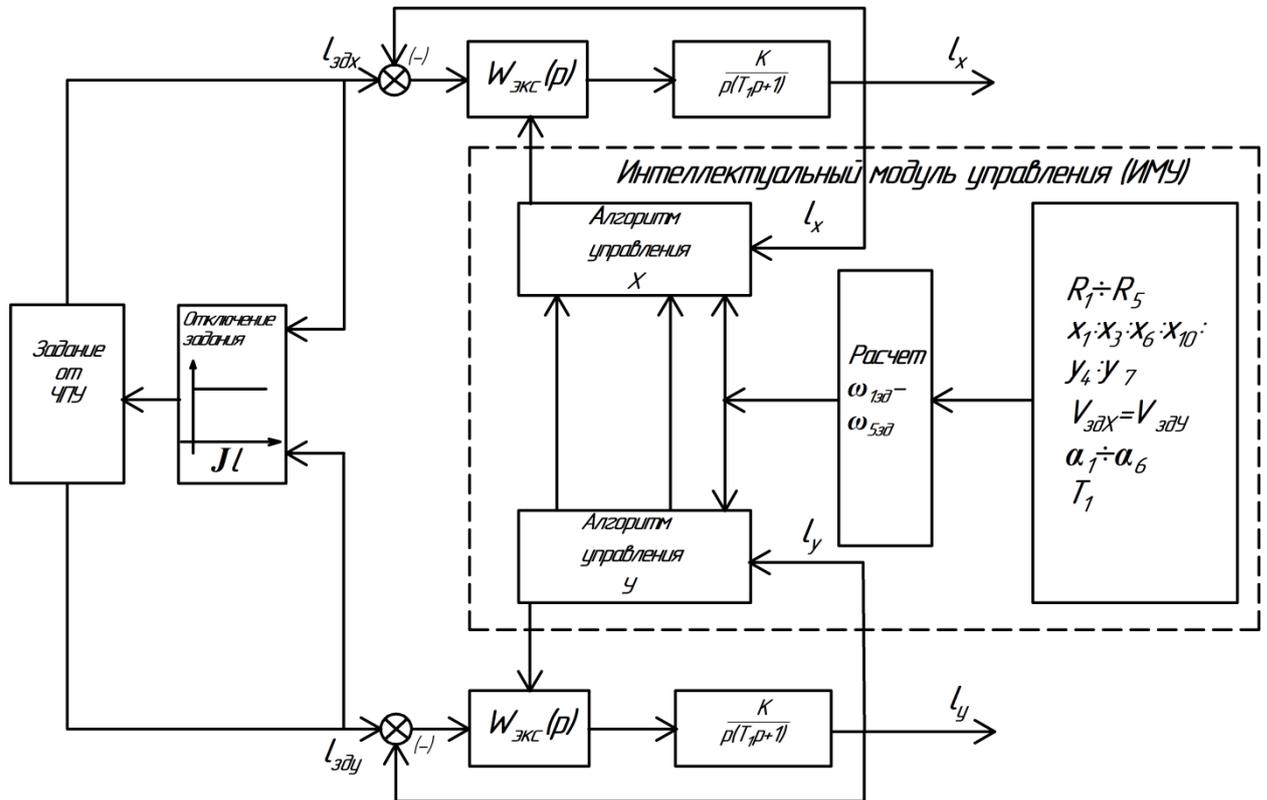


Рисунок 3.7. Функциональная схема системы автоматического управления позиционно – следящими электроприводами станка

В структуре ИМУ происходит расчет необходимых частот задания  $\omega_{эд}$  для экстраполятора нулевого порядка по введенным технологическим данным. Расчет частот происходит в соответствии с алгоритмом управления для соответствующей координаты. Сигнал с датчика положения подвижного органа станка поступает в ИМУ и в зависимости от обрабатываемого контура выдается необходимая частота задания. Алгоритмы управления для каждой координаты постоянно синхронизируются между собой и в зависимости от перемещения той или иной требуемой координаты выдается сигнал для нужной оси («X» или «Y»). ИМУ позволяет корректировать сигнал задания,

поступающий со стороны ЧПУ к электроприводам подачи станка, в соответствии с типом интерполяции. При круговой интерполяции необходимо увеличивать частоту квантования, тем самым обеспечив обход контура с постоянно высокой подачей при этом сохранив качество обрабатываемой детали. При линейной интерполяции разрешается уменьшить частоту, так как не требуется больших математических вычислений и не целесообразно загружать центральный процессор УЧПУ [5]. После окончания процесса обработки изделия происходит отключение сигнала задания.

Таким образом, впервые предложен алгоритм управления  $\omega_{зд}$ , встраиваемый в структуру позиционно – следящего электропривода, обеспечивающий повышенные показатели качества управления.

### **Выводы по главе**

На основании проведенных исследований по разработке интеллектуального модуля управления позиционно – следящего электропривода подачи координатно – расточного станка можно сформулировать следующие выводы:

1. Разработана методика определения частоты квантования сигнала задания  $\omega_{0зд}$  в функции технологических параметров обработки изделия: скорости резания, кривизны обрабатываемой поверхности, твердости материала.
2. Разработан алгоритм автоматического выбора частоты  $\omega_0$ , что придает интеллектуальные свойства электроприводу.
3. Разработана структура позиционно – следящего электропривода с встроенным интеллектуальным модулем управления  $\omega_0$ .

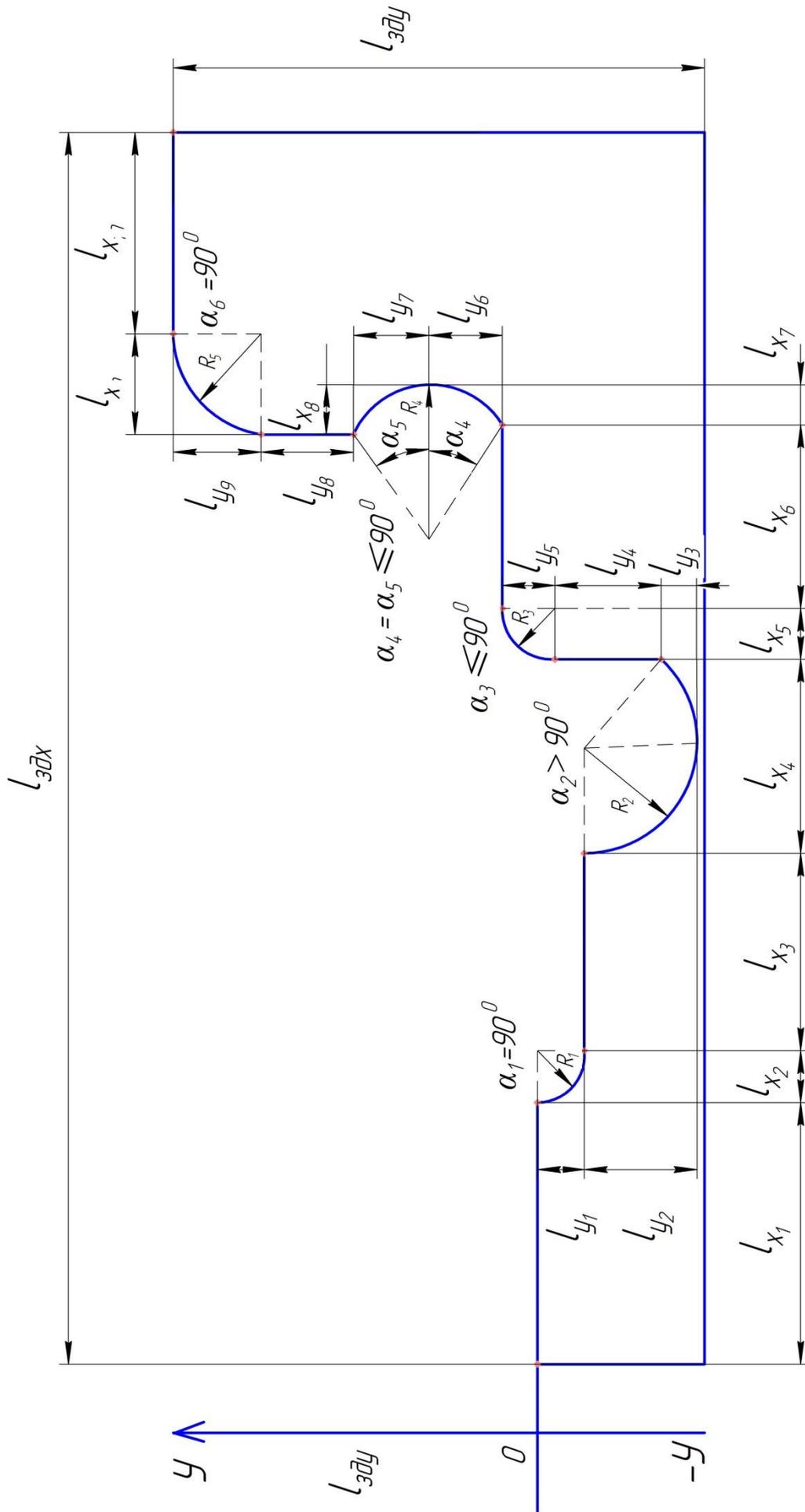


Рисунок 3.5. Обрабатываемый контур детали

## 4 Экспериментальные исследования влияния периода дискретности $T$ экстраполятора нулевого порядка на динамические показатели качества

### 4.1 Анализ влияния периода дискретности $T$ экстраполятора нулевого порядка на устойчивость позиционно – следящего электропривода в среде моделирования «MATLAB Simulink»

Для подтверждения результатов, полученных расчетным путем, и анализа влияния периода дискретности  $T$  экстраполятора нулевого порядка на устойчивость позиционно – следящего электропривода используем среду моделирования «MATLAB Simulink» [13]. Модель системы представлена на рисунке 4.1.

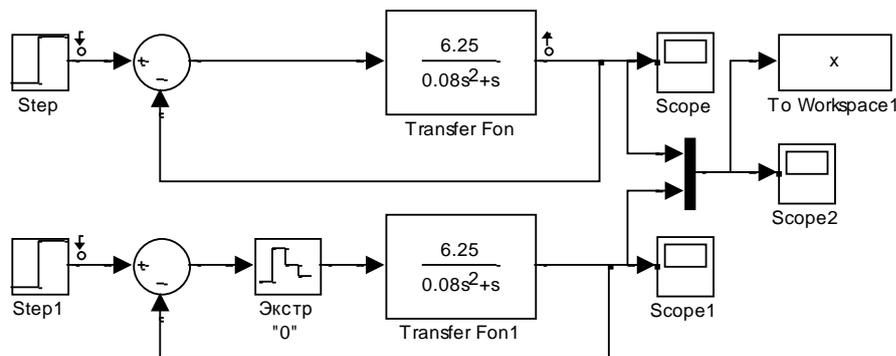


Рисунок 4.1. Модель исследуемой САУ в среде моделирования «MATLAB Simulink»

На рисунке представлены дискретная и аналоговая САУ, как эталон. Изменяя значения периода дискретности  $T$  экстраполятора нулевого порядка в пределах выбранных в исследовании значений, получим графики переходных процессов, показанных на рисунке 4.2.

Анализ графиков переходного процесса показывает, что система существенно снижает запасы устойчивости, а, следовательно, существенно изменяет динамические показатели качества управления:  $\sigma\%$ ,  $t_p$  – перерегулирование и время переходного процесса соответственно, при увеличении периода дискретности экстраполятора  $T$  [16]. При значении  $T =$

0,5с система теряет устойчивость, а при  $T = 0,04с$  приближается к характеристикам аналогового прототипа. Характеристики, построенные в процессе моделирования, полностью подтверждают результат, полученный аналитическим путем.

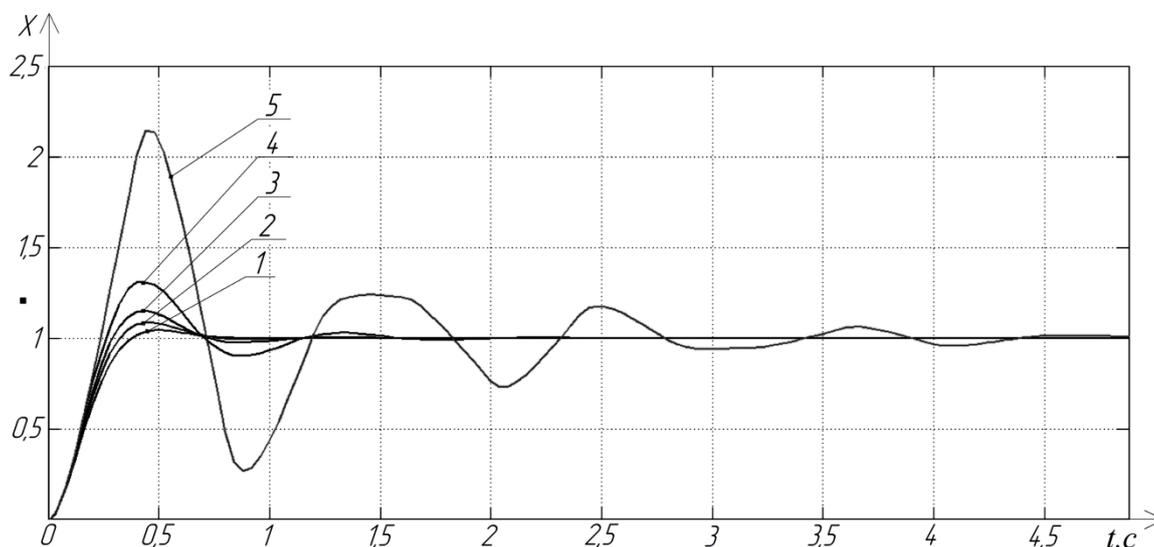


Рисунок 4.2. Графики переходных процессов в системе с экстраполятором нулевого порядка:

1 –  $T=0с.$ ,  $\sigma = 4,3\%$ ,  $t_p = 0,3с.$ ; 2 –  $T=0,04$ ,  $\sigma = 8,6$ ,  $t_p = 0,5$ ; 3 –  $T=0,08$ ,  $\sigma = 12$ ,  $t_p = 0,7$ ; 4 –  $T=0,16$ ,  $\sigma = 30$ ,  $t_p = 1,1$ ; 5 –  $T=0,4$ ,  $\sigma = 114$ ,  $t_p = 3,7$ .

Для оценки влияния периода дискретности экстраполятора нулевого порядка, на запасы устойчивости замкнутой САУ по амплитуде и по фазе построим ЛАФЧХ разомкнутой САУ. Модель разомкнутой САУ в «MATLAB Simulink» представлена на рисунке 4.3.

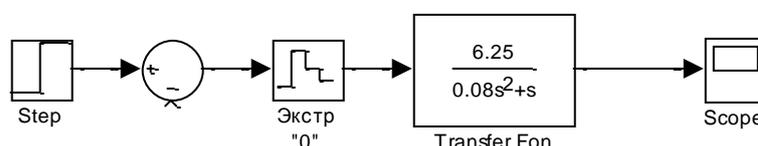


Рисунок 4.3. Модель разомкнутой САУ в среде моделирования «MATLAB Simulink»

Изменяя значения периода дискретности  $T$  экстраполятора в выбранном диапазоне получим ЛАФЧХ разомкнутой САУ (рисунок 4.4).

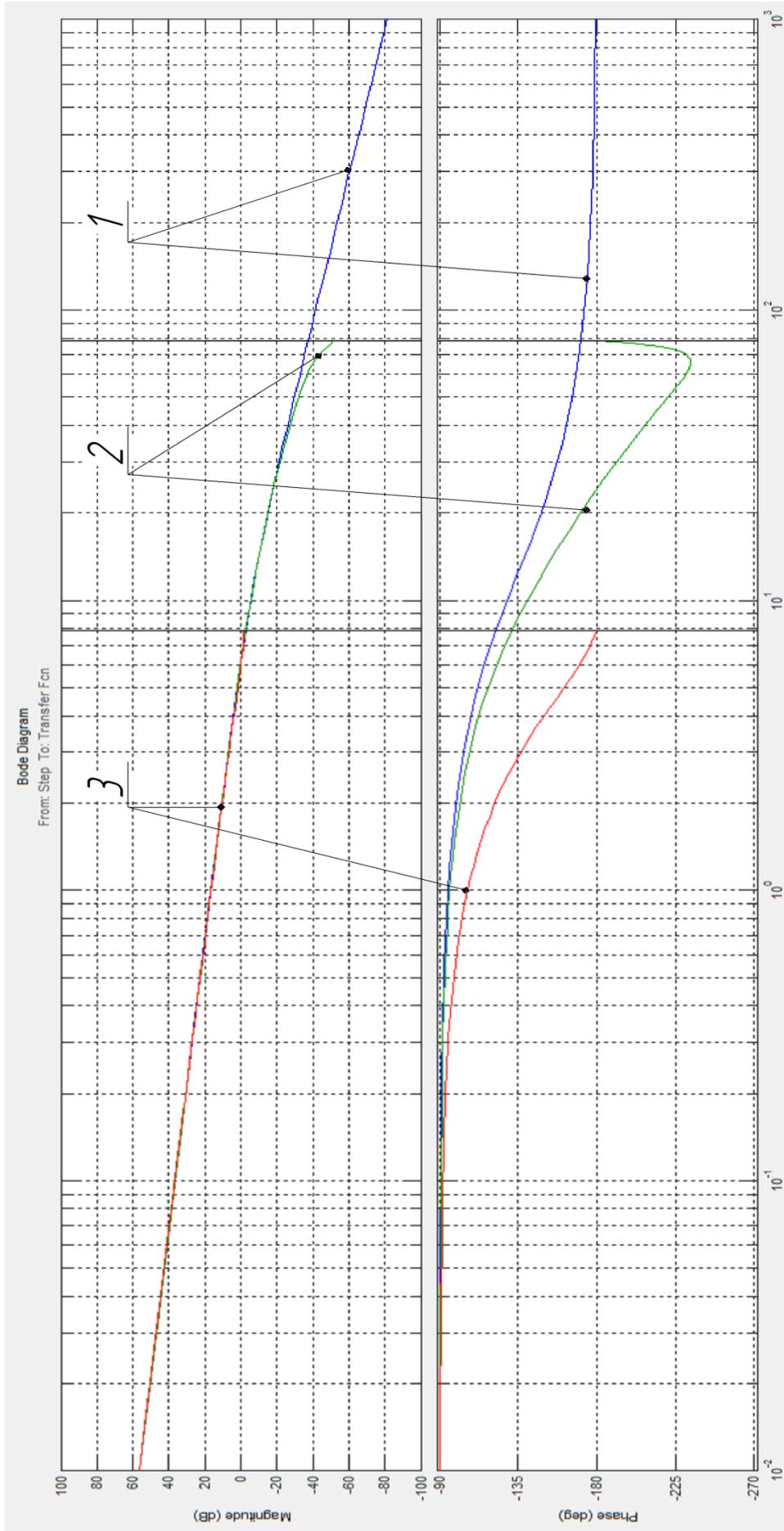


Рисунок 4.4. ЛАФЧХ разомкнутой САУ с экстраполятором «0» порядка:

1 – ЛАФЧХ аналоговой САУ  $\omega_c = 6,15$  рад/с,  $\Delta\varphi = 64^\circ$ ; 2 – ЛАФЧХ дискретной САУ с  $T=0,04$ с,  $\omega_c = 6,15$  рад/с,  $\Delta\varphi = 57^\circ$ ; 3 – ЛАФЧХ дискретной САУ с  $T=0,4$ с,  $\omega_c = 6,15$  рад/с,  $\Delta\varphi = 10^\circ$ .

Анализ характеристик полностью подтверждает результаты расчетов, полученных аналитическим путем. Моделирование показывает, что устойчивость системы, как по фазе, так и по амплитуде снижается с увеличением периода дискретности экстраполятора [17]. При  $T = 0,04\text{с}$  САУ имеет хорошее совпадение с аналоговой системой, а при  $T = 0,4\text{с}$  находится на границе устойчивости.

По результатам моделирования можно сказать, что выводы, сформулированные после аналитического расчета системы, полностью совпадают с результатами моделирования САУ. Это свидетельствует о правильности выполненных расчетов и построенных ранее характеристик. Для достижения заданных показателей качества управления необходимо выполнить условие  $\omega_0 = 12,5\omega_c$ .

#### **4.2 Анализ погрешности в воспроизведении заданной траектории движения позиционно – следящего электропривода с экстраполятором нулевого порядка в среде моделирования «MATLAB Simulink»**

Проведем анализ влияния погрешности заданной траектории движения позиционно – следящего электропривода. Исследуемая структурная схема САУ в среде моделирования «MATLAB Simulink» представлена на рисунке 4.5:

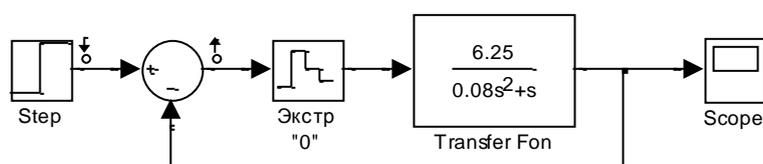


Рисунок 4.5. Структурная схема исследуемой САУ по ошибке в среде моделирования «MATLAB Simulink»

Изменяя значения периода дискретности  $T$  экстраполятора в выбранном диапазоне получим ЛАЧХ САУ по ошибке (рисунок 4.6). Проведем анализ полученных характеристик [2].

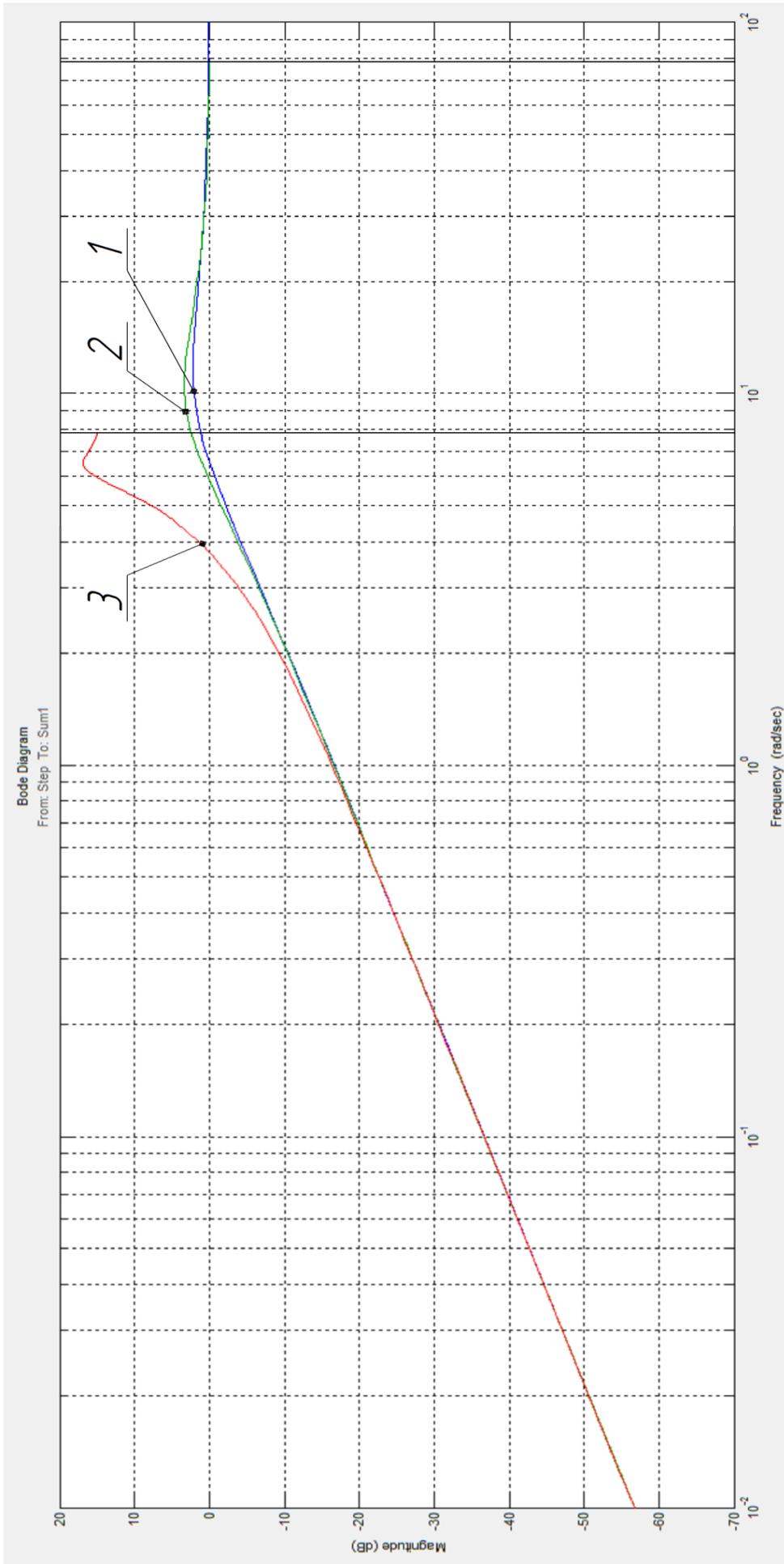


Рисунок 4.6. Логарифмическая амплитудно – частотная характеристика по ошибке:

1 – ЛАЧХ аналоговой САУ с  $T=0,04$ с,  $\omega_c=6,5$  рад/с; 2 – ЛАЧХ дискретной САУ с  $T=0,04$ с,  $\omega_c=5,7$  рад/с;

3 – ЛАЧХ дискретной САУ с  $T=0,4$ с,  $\omega_c=3,7$  рад/с.

Анализ логарифмической амплитудно – частотной характеристики на рисунке 4.6 показывает, что при увеличении периода дискретности экстраполятора  $T$ , существенно возрастает динамическая ошибка в воспроизведении заданной траектории движения. При значении периода дискретности  $T=0,04с$  система совпадает с аналоговым прототипом и обеспечивает лучшее воспроизведение заданной траектории в заданном диапазоне частот задания. При увеличении периода дискретности  $T$  система теряет свои свойства, обеспечивает воспроизведение заданной траектории с недопустимыми погрешностями. При  $T=0,4с$  из графика видно, система имеет повышенную погрешность и практически не воспроизводит заданную траекторию.

Графики отклонения ошибки  $\delta(t)$  дискретной системы от аналогового прототипа показаны на рисунке 4.7 при входном воздействии  $1(t)$ .

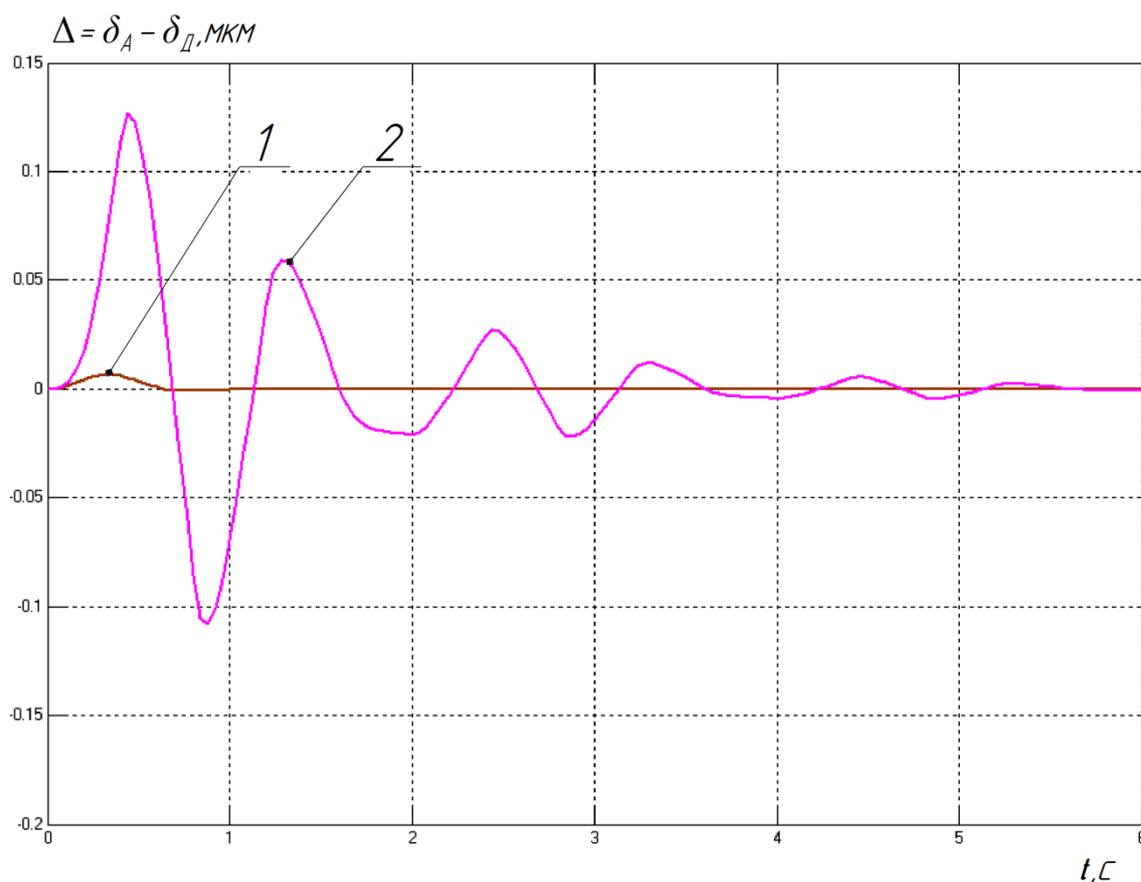


Рисунок 4.7. Отклонение ошибки  $\delta(t)$  дискретной системы от аналогового прототипа:

1– $T=0,04с$ ; 2– $T=0,4с$ .

Результаты моделирования полностью подтверждают результаты, полученные аналитическим путем [18]. Для получения необходимых показателей качества требуется либо увеличить частоту  $\omega_0$  экстраполятора, либо увеличить быстродействие аналоговой части системы.

### 4.3 Анализ влияния периода дискретности экстраполятора $T$ на точность воспроизведения сигнала задания в среде моделирования «MATLAB Simulink»

Структурная схема позиционно – следящего электропривода принятого в данном исследовании в среде моделирования «MATLAB Simulink» показана на рисунке 4.8 [12].

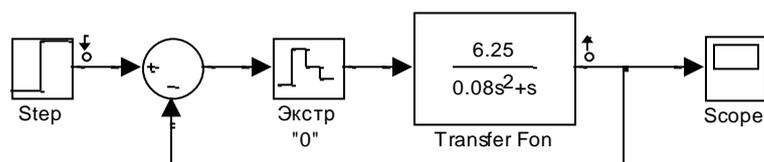


Рисунок 4.8. Структурная схема исследуемой САУ в среде моделирования «MATLAB Simulink»

Для оценки влияния периода дискретности  $T$  на точность воспроизведения сигнала задания построим ЛАЧХ замкнутой САУ и проведем анализ. Зададим значения  $T = 0,04\text{с}$  и  $T = 0,4\text{с}$ . Графики соответствующих ЛАЧХ представлены на рисунке 4.9.

Полученные характеристики полностью подтверждают результаты, полученные расчетным путем. При значении периода дискретности экстраполятора нулевого порядка  $T = 0,04\text{с}$ , САУ полностью воспроизводит заданную траекторию движения и тем самым обеспечивает наименьшую технологическую ошибку. При  $T = 0,4\text{с}$  САУ не воспроизводит заданную траекторию.

Оценим влияние периода дискретности экстраполятора на точность воспроизведения гармонического сигнала ( $S_{зл} = A \cdot \sin \omega t$ ) задания.

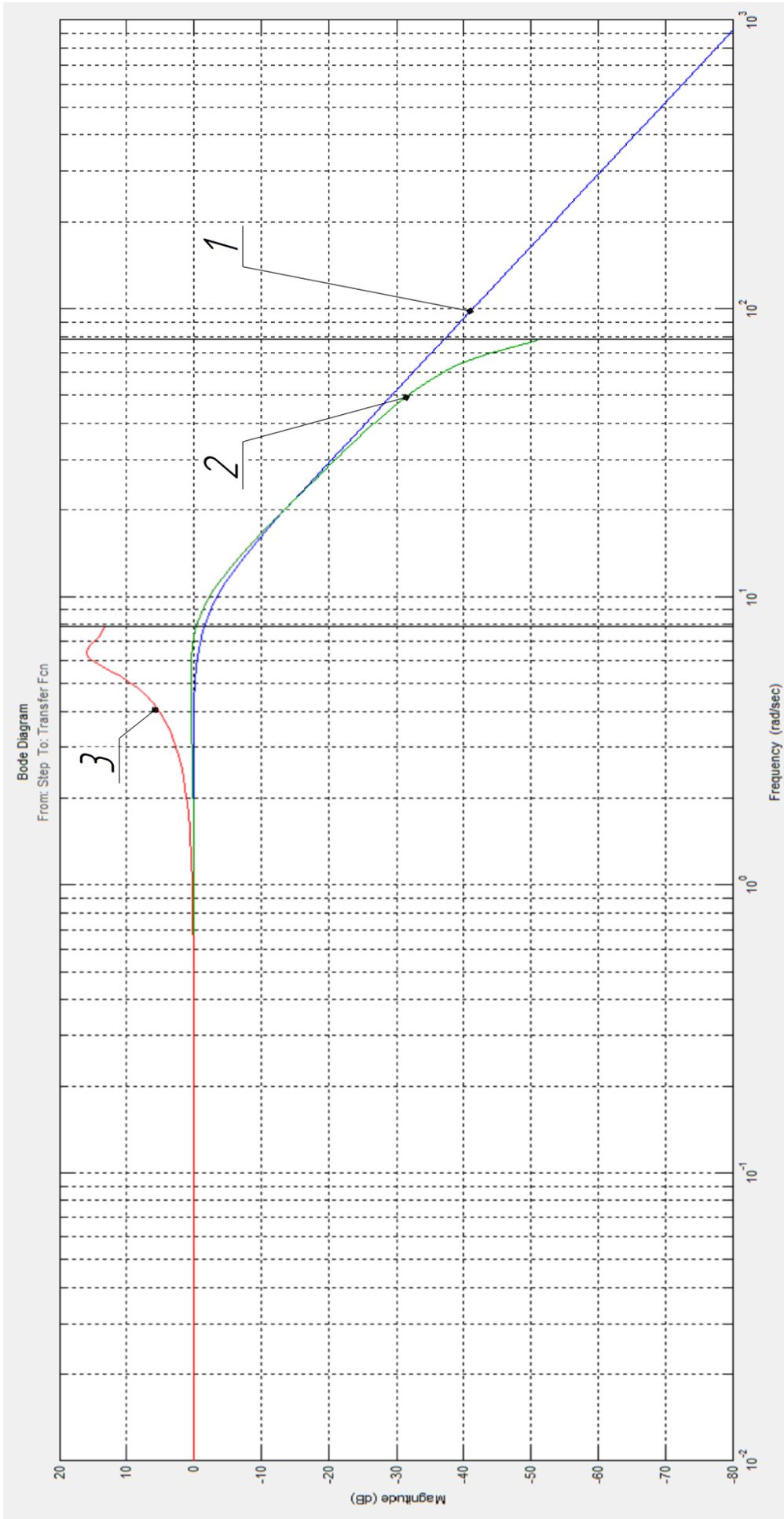


Рисунок 4.9. Логарифмическая амплитудно – частотная характеристика замкнутой системы:  
1 – ЛАЧХ аналоговой САУ; 2 – ЛАЧХ дискретной САУ с  $T=0,04$ с; 3 – ЛАЧХ дискретной САУ с  $T=0,4$ с.

Такой вид сигнала подается на вход привода подачи при обработке станком круговой интерполяции в плоскости оси, за перемещение в которой и отвечает привод. Возможность синхронного перемещения управляемых осей с заданной максимальной величиной рассогласования является функциональной особенностью станков управляемых от ЧПУ [28,33]. Структурная схема САУ представлена на рисунке 4.10.

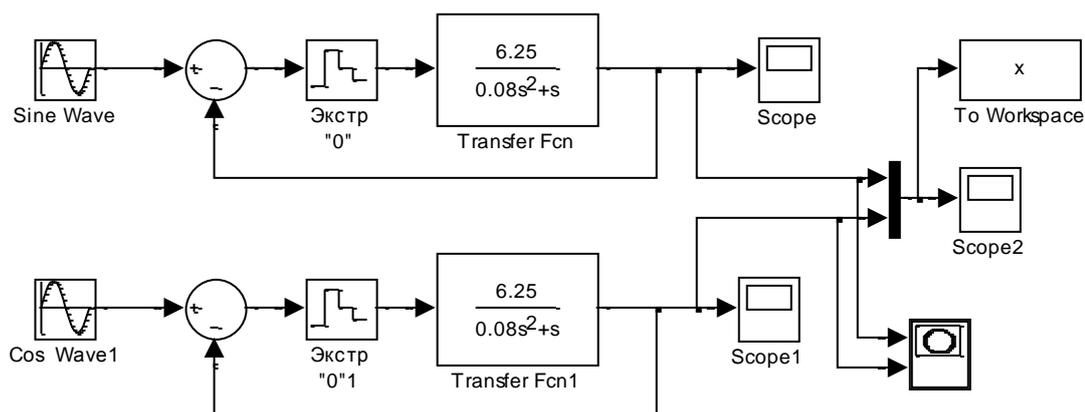


Рисунок 4.10. Структурная схема САУ для анализа круговой интерполяции в среде моделирования «MATLAB Simulink»

Для осуществления обработки круговой интерполяции со скоростью линейной подачи  $V_{зд} = 0,5 \text{ м/мин}$  и  $R_{зд} = A_{зд} = 1 \text{ мм} = 1000 \text{ мкм}$ , сигнал задания привода подачи будет представлять собой гармонический сигнал, описываемый следующим выражением:

$$S_{здx} = A_{зд} \sin(\omega_{зд} t) = \sin(8,3t);$$

$$S_{здy} = A_{зд} \sin(\omega_{зд} t + 90^\circ) = \sin(8,3t + 90^\circ) = \cos(8,3t);$$

где  $\omega_{зд} = 8,3 \text{ с}^{-1} = 1,32 \text{ Гц}$  рассчитано и выбрано из таблицы 3.1. Сигнал задания определим в форме синуса для канала X и косинуса для Y. Значения периода дискретности экстраполятора нулевого порядка выберем из ряда значений принятых в данной работе. Для целей сравнения получим эталонную окружность, смоделировав аналоговую САУ. Полученный результат представлен на рисунке 4.11. Анализ полученной окружности показывает, что САУ обрабатывает ее с требуемыми показателями, тем

самым обеспечив высокие параметры обработки, это шероховатость и геометрия окружности [40,41].

Добавим экстраполятор нулевого порядка и зададим период  $T = 0,04\text{с}$ . Полученная окружность представлена на рисунке 4.12. Экстраполятор вносит погрешность в систему, но при данном значении периода дискретности она не значительна. Полученная окружность это доказывает, сохраняя при этом геометрию фигуры и тем самым подтверждая результаты расчетов. Величина рассогласования между аналоговой и дискретной САУ составляет  $\Delta = \delta_A - \delta_D = 2\text{мкм}$ . График величины рассогласования представлен на рисунке 4.13.

Увеличим значение периода дискретности экстраполятора до значения  $T = 0,16\text{с}$ . Полученная окружность представлена на рисунке 4.14. По геометрии окружности можно сказать, что система находится на границе устойчивости, но уже не может обеспечить нужную геометрию фигуры и уходит за ее пределы. Это говорит о том, что при данном значении периода дискретности  $T$ , мы не обеспечиваем требуемые технологические параметры обработки [47]. Величина рассогласования между аналоговой и дискретной САУ составляет  $\Delta = \delta_A - \delta_D = 600\text{ мкм}$ . График величины рассогласования представлен на рисунке 4.15.

Моделирование САУ при различных условиях и полученные графики процессов показывают, что система работоспособна и обеспечивает требуемые показатели качества [37,40]. Соблюдая условия, при которых САУ обеспечивает нужные требования модель можно рекомендовать для практического тестирования и анализа [45].

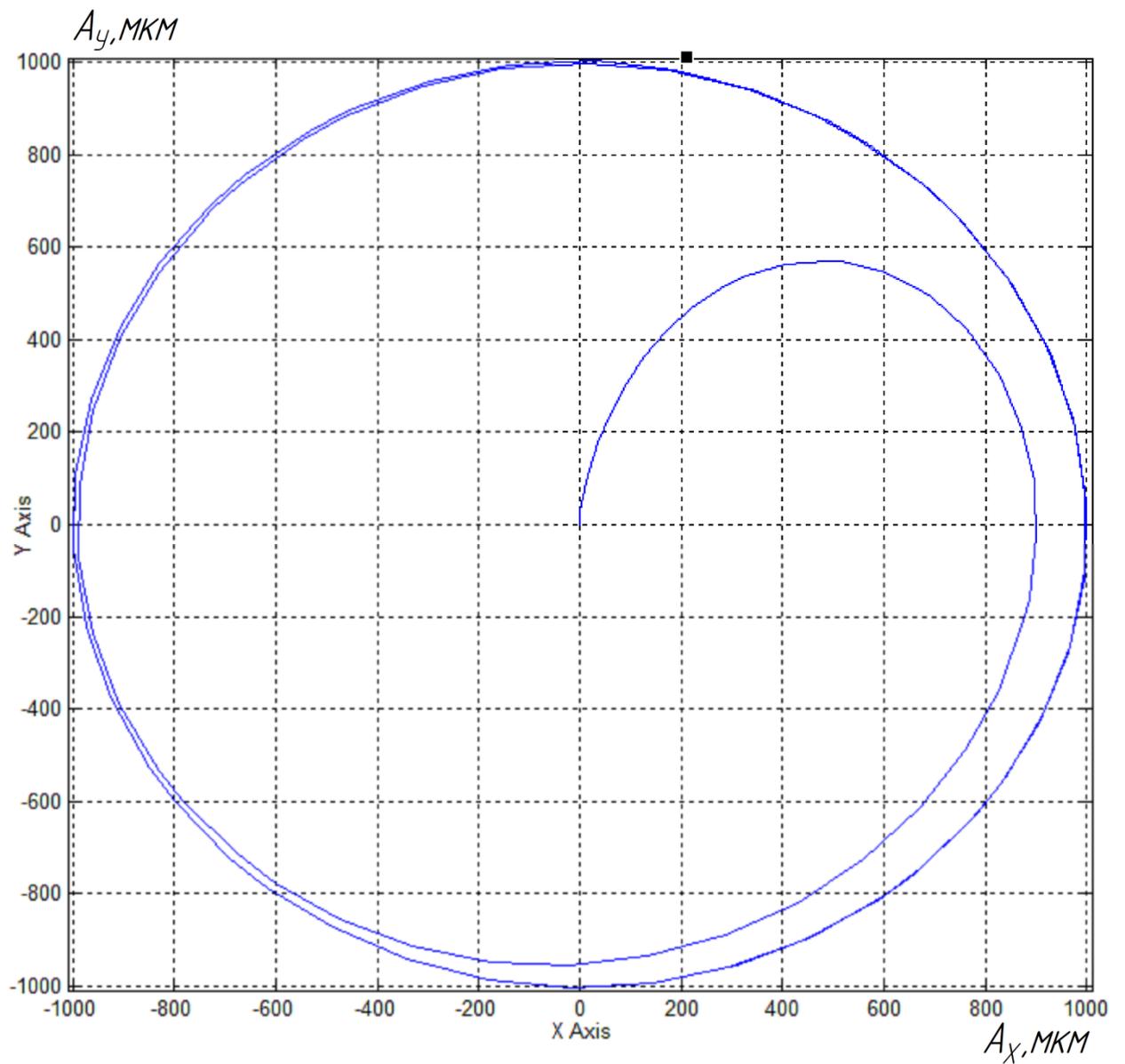


Рисунок 4.11. Эталонная окружность, полученная при моделировании аналоговой САУ

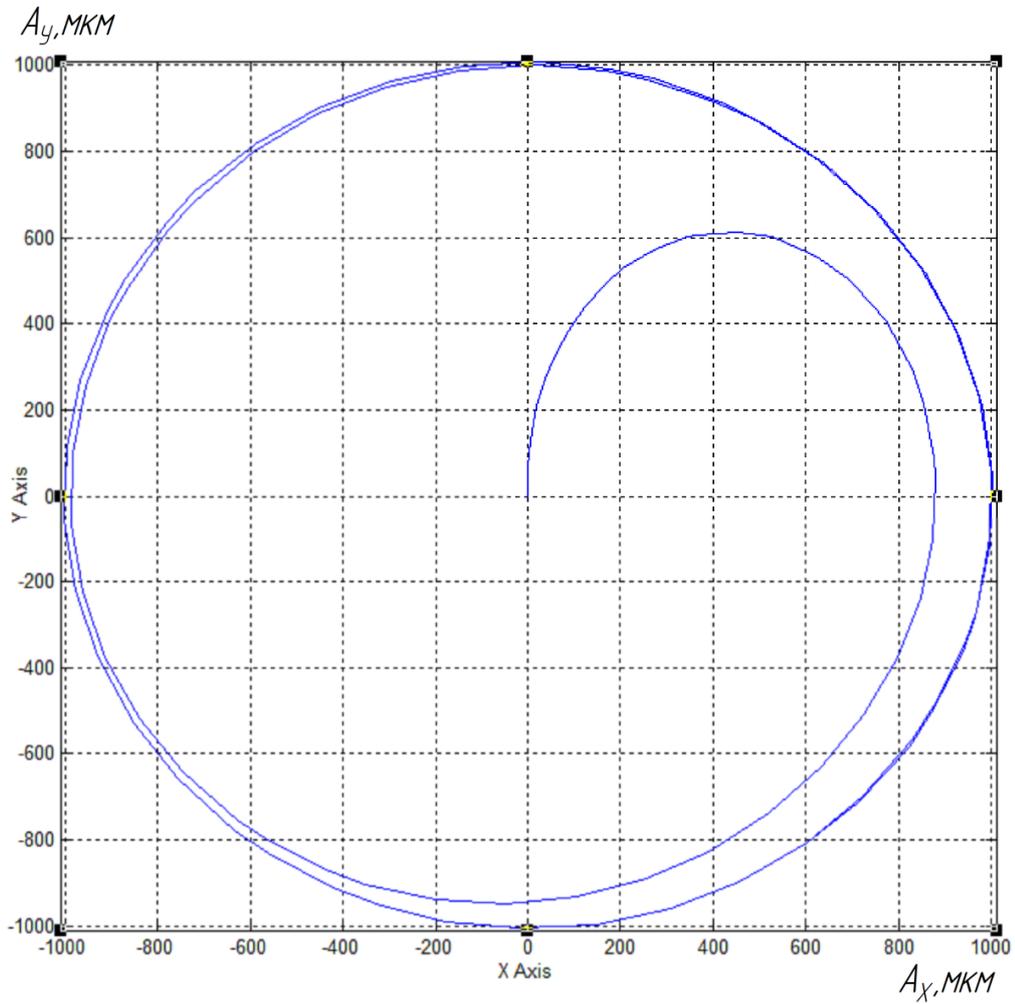


Рисунок 4.12. Окружность, полученная при моделировании САУ с  $T = 0,04\text{с}$ .

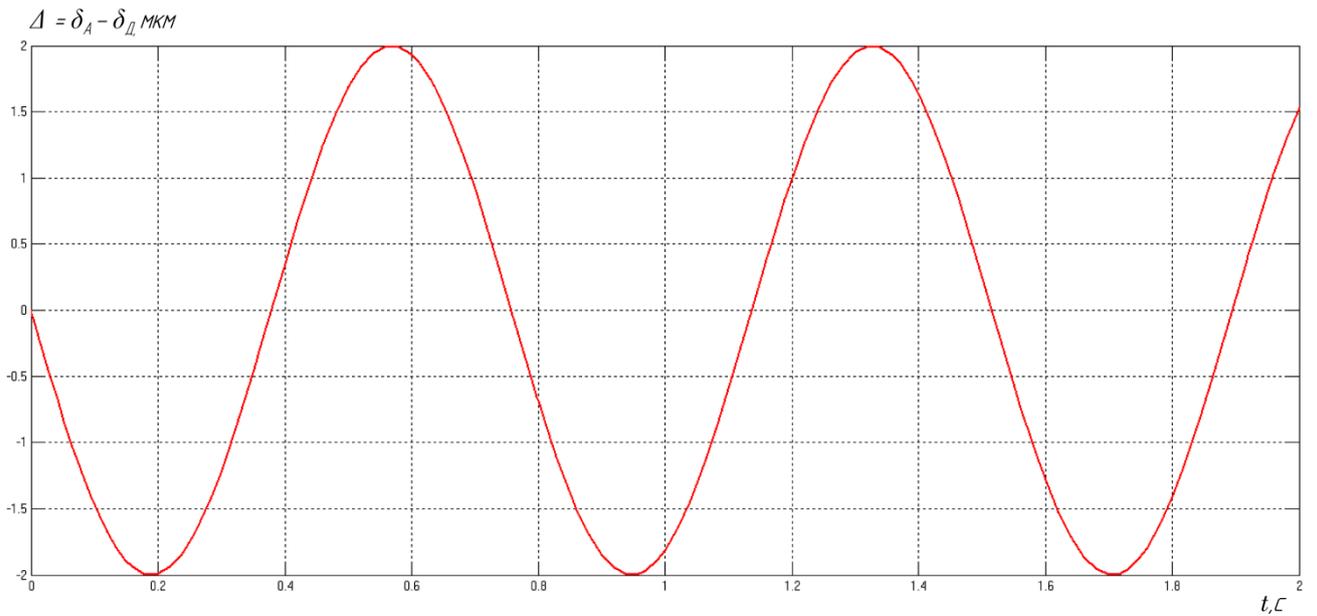


Рисунок 4.13. Рассогласование между дискретной САУ с  $T = 0,04\text{с}$ . и аналоговой

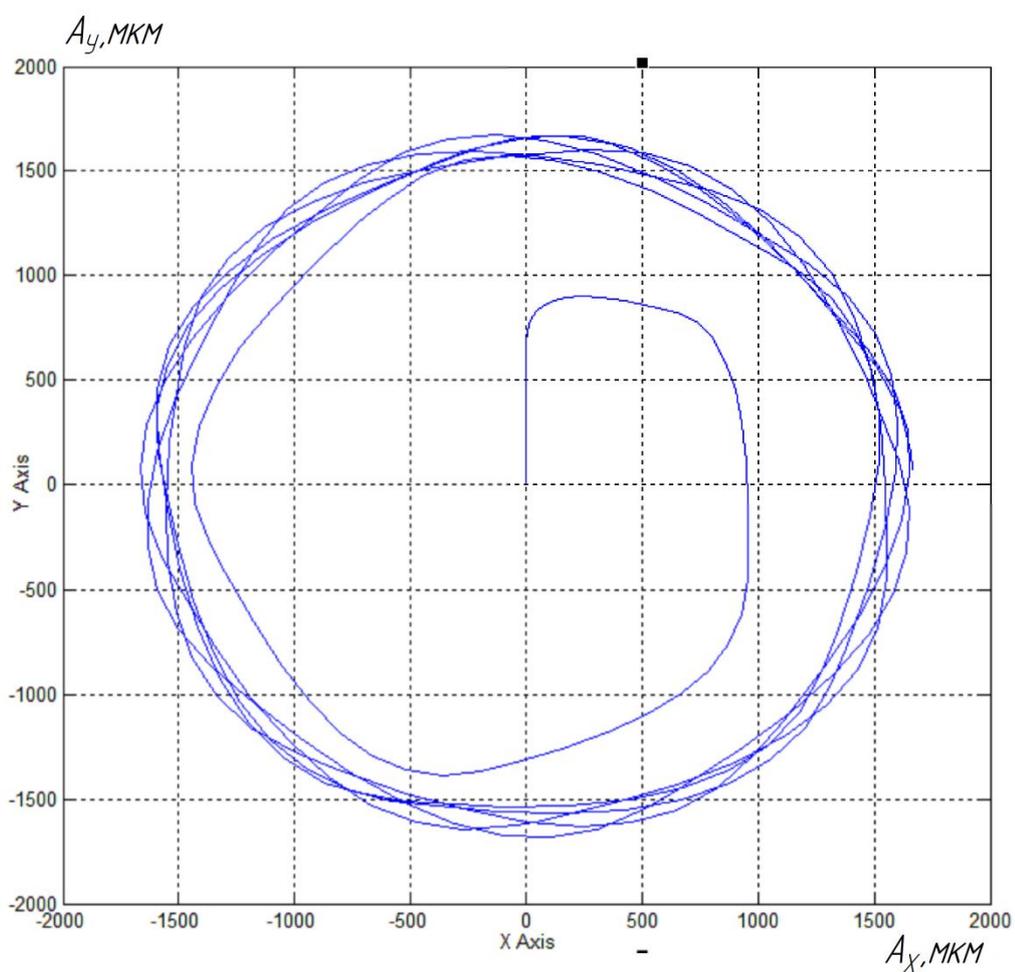


Рисунок 4.14. Окружность, полученная при моделировании САУ с  $T = 0,16$ с.

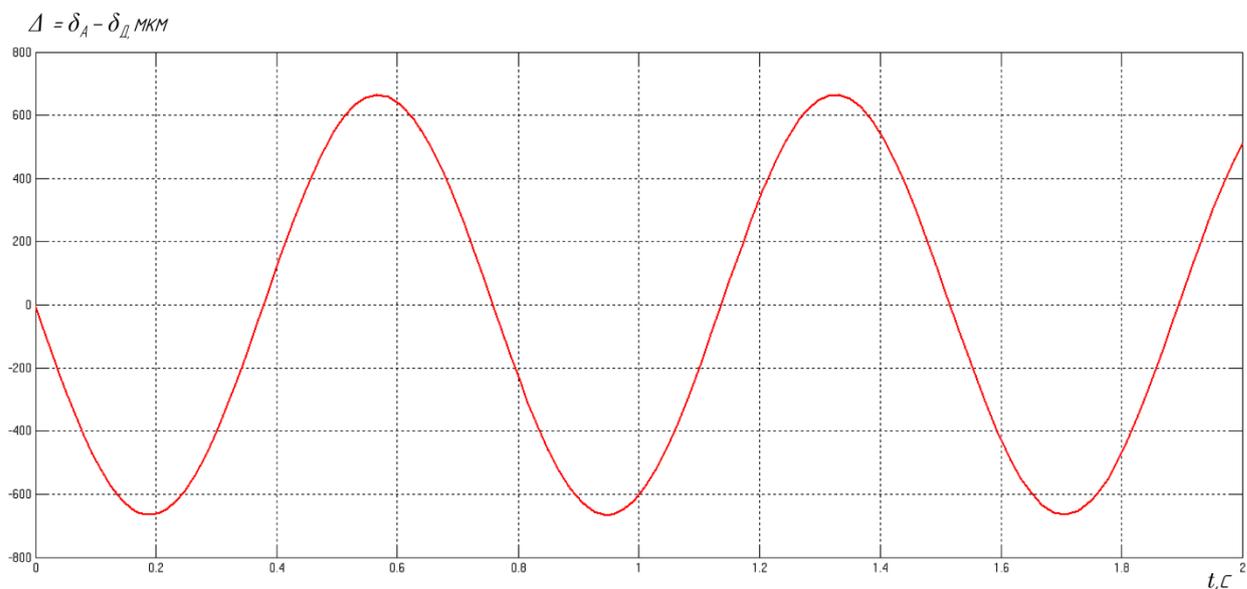


Рисунок 4.15. Рассогласование между дискретной САУ с  $T = 0,16$ с. и аналоговой

Используя вышеупомянутый метод осуществления отработки круговой интерполяции в среде моделирования «MATLAB Simulink» [12,13], а также задаваясь рядом значений диаметра обрабатываемой окружности  $D_{\text{ОКР}}$  в диапазоне 1 — 250 мм для выбранных значений периода дискретности  $T$  определим зависимость  $\Delta_{\text{Г.Ф.}} = f(D_{\text{ОКР}})$ . Диапазон значений обрабатываемых окружностей  $D_{\text{ОКР}}$  выбран из технических характеристик координатно — расточного станка модели 2440СФ4 [52]. Результат моделирования представлен на рисунке 4.16 в виде семейства графиков зависимости  $\Delta_{\text{Г.Ф.}} = f(D_{\text{ОКР}})$  для выбранных значений периода дискретности  $T$  при линейной подаче обхода контура  $V_{\text{зд}} = 0,5\text{ м/мин}$ .

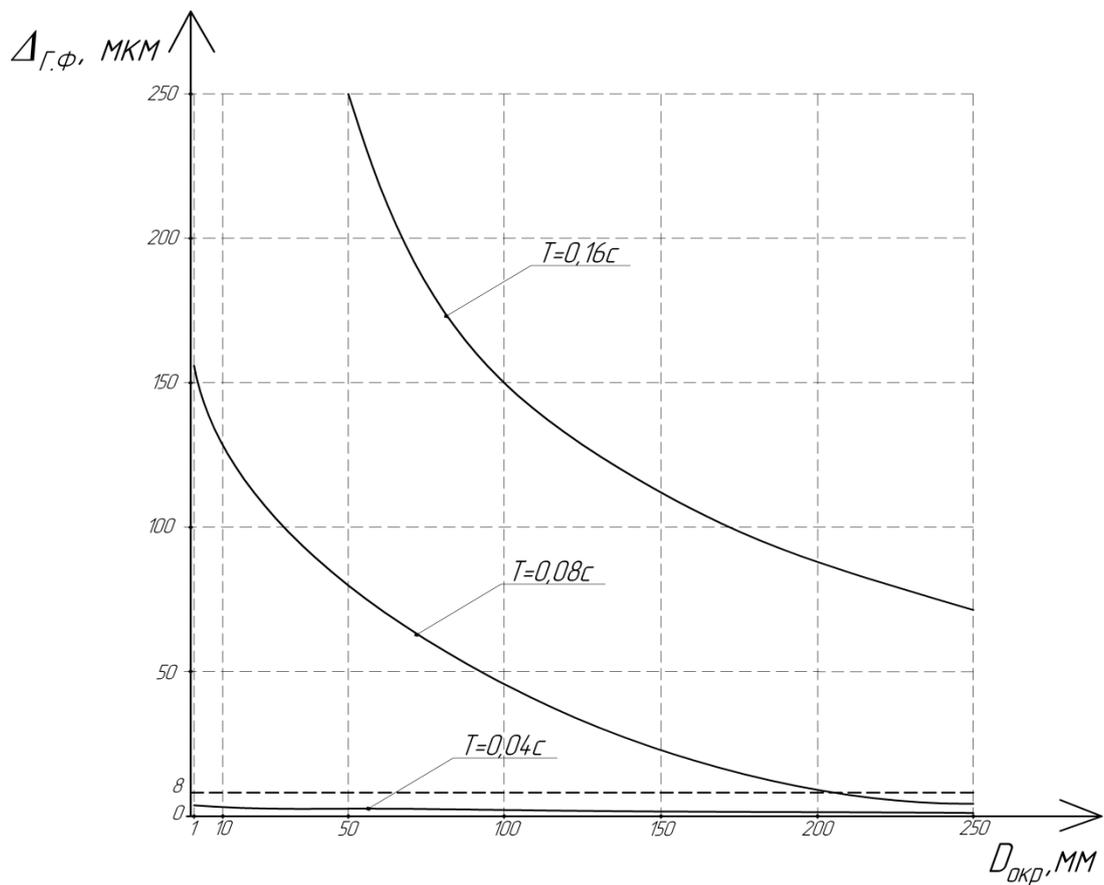


Рисунок 4.16. Семейство графиков зависимости  $\Delta_{\text{Г.Ф.}} = f(D_{\text{ОКР}})$  для значений периода дискретности  $T = 0,04\text{ с}$ ,  $0,08\text{ с}$  и  $0,16\text{ с}$ .

Из анализа представленных выше графиков следует возможность выбора такого значения периода дискретности  $T$ , при котором обеспечивается допустимая величина погрешности отклонения от геометрической формы

$\Delta_{г.ф.}$ . Для исследуемого в данной работе станка допустимая погрешность  $\Delta_{г.ф.} = 8$  мкм [52]. Полученные характеристики подтверждают результаты теоретического исследования. Допустимая величина погрешности достигается при величине  $T = 0,04$ с, что обеспечивает нам геометрическую форму обрабатываемой окружности на всем диапазоне технических характеристик станка [49].

#### **4.4 Эксперимент и исследование влияния дискретности вызова программы на качество обработки и производительности станка модели 2440СФ4**

Для подтверждения результатов теоретического исследования влияния периода дискретности  $T$  на устойчивость, качество управления и, как следствие, точность воспроизведения сигнала задания положения рабочего органа станка, был проведен эксперимент на координатно – расточном станке модели 2440СФ4, оснащенной УЧПУ фирмы «Балт – Систем» модели «NC 230» [48,49]. В качестве измерительных элементов положения стола и салазок использовались фотооптические инкрементальные линейки типа ЛИР-9 фирмы СКБИС [44]. Точность данных фотооптических линеек – 0,5 мкм. Каждая интерполирующая координата исследуемого станка прошла процедуру юстировки, которая обеспечивает точность позиционирования подвижного органа на уровне  $\pm 2,5$  мкм, что соответствует классу точности «С» [45,47].

В качестве образца для механической обработки была выбрана деталь, представленная на рисунке 4.17. Материал образца: Д16Т ГОСТ 21488-97. Экспериментальное исследование проводилось при программном задании отработки эталонной траектории, в качестве которой использовалась эталонная окружность диаметром  $D = 80$  мм. Проводилась технологическая обработка фрезерованием двухперой фрезой [35,40].

Измерение отклонений круглости от геометрической формы обрабатываемой окружности проводилась прибором «TALYROND» Model №2 (рисунок 4.18) [53].

Максимальная точность шкалы измерений по техническим характеристикам прибора составляет 0.2 мкм при использовании щупа длиной  $L = 62$  мм. Для измерений отклонения от геометрической формы обрабатываемой окружности был использован щуп длиной  $L = 125$  мм, т.к. щуп меньшей длины не позволяет выполнить измерения на данном образце [52].

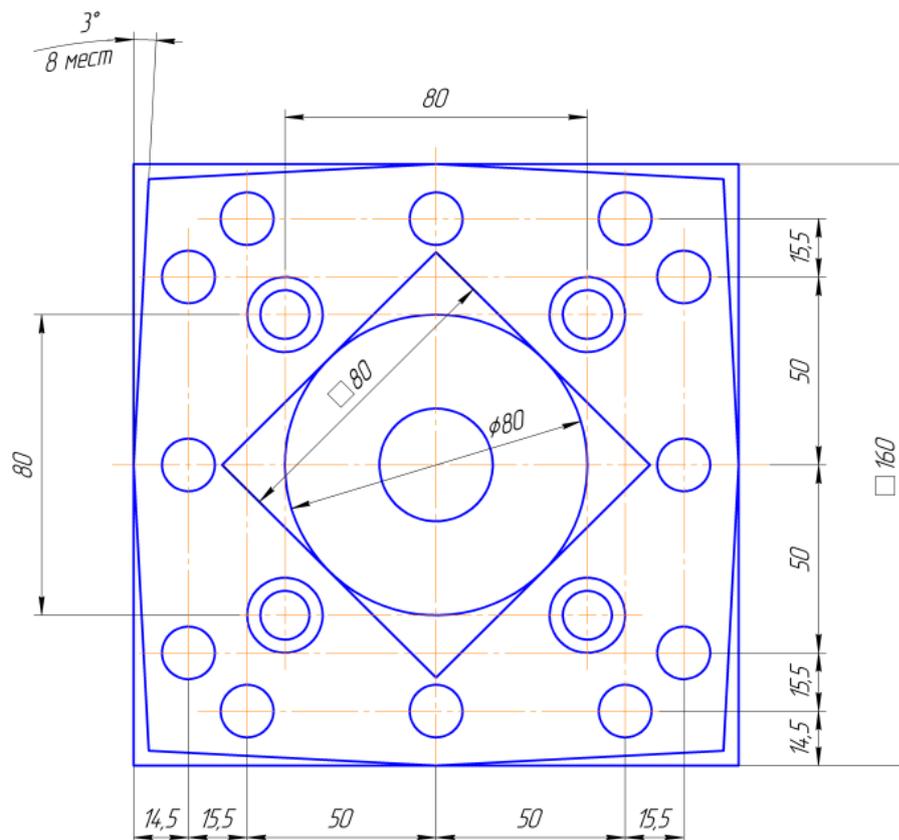


Рисунок 4.17. Образец для испытания станка 2440СФ4 на точность

Точность шкалы измерений в соответствии с характеристиками прибора составляет 1 мкм, что соответствует классу «С» точности станка. Прибор «TALYROND» Model №2 сертифицирован и зарегистрирован в реестре средств измерений.

Параметры шероховатости обрабатываемой поверхности измеряли с помощью прибора «Taylor – Hobson Surtronic 3+» (рисунок 4.19) [49,53].



Рисунок 4.18. Прибор для измерений отклонений от геометрической формы детали «TALYROND» Model №2

Диапазон датчика  $\pm 150$  мкм, разрешение 0,01 мкм, скорость перемещения 1 мм/сек, предельная погрешность 3%. Точность измерений в соответствии с характеристиками прибора соответствует классу точности станка «С». Прибор «Taylor – Hobson Surtronic 3+» сертифицирован и зарегистрирован в реестре средств измерений.



Рисунок 4.19. Прибор для измерений параметров шероховатости детали «Taylor – Hobson Surtronic 3+»

Обработка эталонной окружности проводилась с линейной скоростью подачи  $V_{зд} = 0,2$  м/мин. На качество воспроизведения окружности подвижными органами прецизионного металлорежущего станка, влияет период  $T_{рп}$  вызова подпрограммы регулятора положения. Период  $T_{рп}$  в УЧПУ NC «230» определяется параметром `servo_tick` инструкции CAS. Такт интерполятора  $T_{и}$  – параметром `int_tim`, причём  $T_{и} = 2$  мс = const [48].

Зададим значение  $T_{рп} = 2$  мс, что соответствует дискретности  $\omega_0 = \frac{1}{T_{рп}} = \frac{1}{0,002} = 500$  Гц и проведем обработку эталонной окружности (рисунок 4.20).



Рисунок 4.20. Процесс обработки эталонной окружности на станке модели 2440СФ4

После обработки проведено измерение отклонения окружности от геометрической формы и получена диаграмма (рисунок 4.21). Отклонения на детали равны отклонениям, записанным на диаграмме, разделенным на увеличение. Одно деление на шкале диаграммы соответствует 1 мкм. Геометрически диаграмма показывает в значительно увеличенном масштабе изменения радиуса поперечного сечения детали [53].

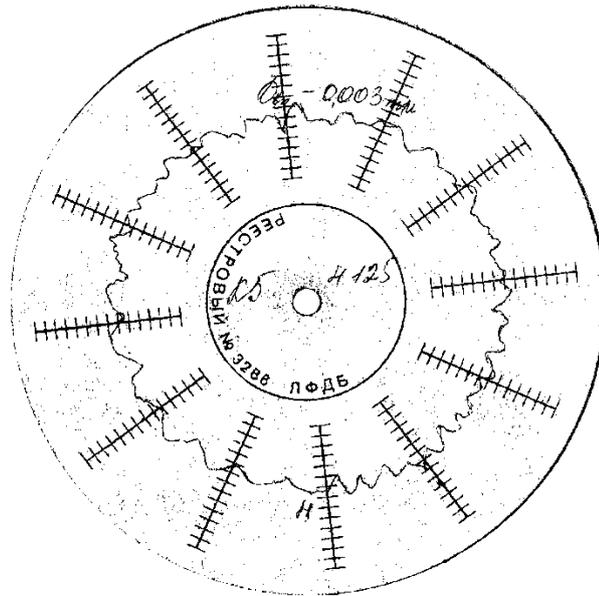


Рисунок 4.21. Диаграмма отклонения окружности от геометрической формы при  $T_{\text{рп}} = 2$  мс

Анализ диаграммы на рисунке 4.21 показывает, что максимальное отклонение окружности от геометрической формы составляет  $\Delta D = 0,003$  мм. Шероховатость обработанной поверхности  $R_a = 0,0032$  мм. Данные показатели соответствуют классу точности «С» КРС [47].

Изменим значение  $T_{\text{рп}} = 4$  мс, что соответствует дискретности  $\omega_0 = \frac{1}{T_{\text{рп}}} = \frac{1}{0,004} = 250$  Гц и проведем обработку эталонной окружности при неизменной линейной скорости подачи  $V_{\text{зд}} = 0,2$  м/мин. После обработки проведено измерение отклонения окружности от геометрической формы и получена диаграмма (рисунок 4.22).

Анализ диаграммы на рисунке 4.22 показывает, что максимальное отклонение окружности от геометрической формы составляет  $\Delta D = 0,012$  мм. Шероховатость обработанной поверхности  $R_a = 0,008$  мм. Данные показатели позволяют сделать вывод, что результат обработки не соответствует технологическим параметрам и не соответствует классу точности «С» КРС.

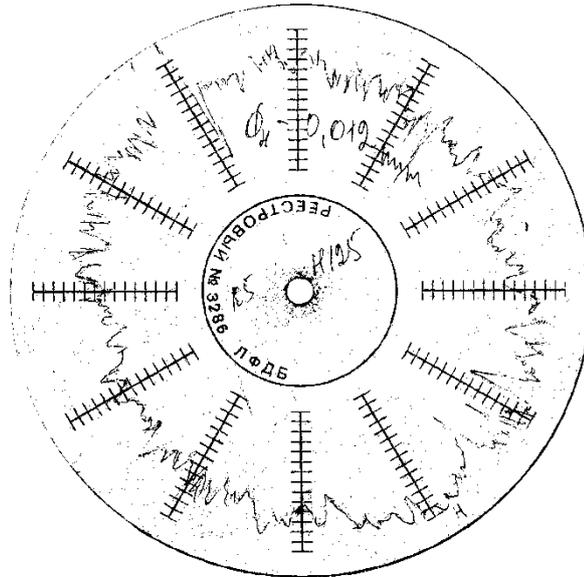


Рисунок 4.22. Диаграмма отклонения окружности от геометрической формы при  $T_{рп} = 4$  мс

Анализ полученных диаграмм при значениях  $T_{рп} = 2$  мс и  $T_{рп} = 4$  мс показывает, что при увеличении частоты  $\omega_0$  в два раза увеличивается погрешность в отклонении геометрической формы обрабатываемого профиля  $\Delta\delta_D = 0,009$  мм. Значение погрешности шероховатости составляет  $\Delta R_a = 0,0048$  мм. Для того, чтобы улучшить технологические параметры обработки детали при  $T_{рп} = 4$  мс необходимо снижать линейную скорость подачи  $V_{зд}$  более чем в 2 раза, что соответственно уменьшает производительность в 2 раза.

#### 4.5 Верификация экспериментального исследования и теоретического анализа влияния дискретности экстраполятора нулевого порядка

Лучшее качество обработки поверхности и наименьшее отклонение геометрической формы окружности в ходе эксперимента было достигнуто при значении периода вызова подпрограммы регулятора положения  $T_{рп} = 0,002$  с. Тогда значение  $\omega_0 = \frac{2\pi}{T_{рп}} = \frac{6,28}{0,002} = 3140$  с<sup>-1</sup> или  $f = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{3140}{6,28} = 500$  Гц [9,48].

В этом случае непрерывная часть системы в виде  $\frac{K}{p(T_1 p + 1)}$  должна иметь полосу пропускания  $\omega_c = \frac{\omega_0}{20} = \frac{3140}{20} = 157 \text{ с}^{-1}$ . При настройке на ТО контур положения  $\omega_c = \frac{1}{2T_\mu}$ , откуда  $T_\mu = \frac{1}{2\omega_c} = \frac{1}{2 \cdot 157} \approx 0,0032 \text{ с}$ . или  $\frac{1}{T_\mu} = \frac{1}{0,0032} = 312,5 \text{ с}^{-1} \rightarrow 2,5 \text{ дек}$ .

Коэффициент передачи системы находим как:  $K = \frac{1}{2T_\mu} = \frac{1}{0,0064} \cong 157 \rightarrow 20 \lg K = 20 \lg 157 = 44 \text{ дБ}$ , а значение  $T_1 = T_\mu = 0,0032 \text{ с}$ .

Тогда линейная часть системы по контуру положения имеет вид:

$$W(p) = \frac{157}{p(0,0032p + 1)}.$$

Таким образом, можно утверждать, что соотношение  $\frac{\omega_0}{2\omega_c} = \frac{3140}{2 \cdot 157} = 10 \dots 12$  верно и для полученных данных в ходе эксперимента.

В теоретическом исследовании линейная часть была принята:

$$W(p) = \frac{6,25}{p(0,08p + 1)}.$$

Полоса пропускания  $\omega_c = \frac{1}{2T_\mu} = \frac{1}{0,08} = 12,5 \text{ с}^{-1}$ , откуда находим  $\lg \omega_c = 1,1 \text{ дек}$ . Значение  $20 \lg K = 20 \lg 6,25 = 15,92 \text{ дек}$  [4,11].

По полученным данным построим ЛАЧХ непрерывной части системы для двух случаев, представленных на рисунке 4.23.

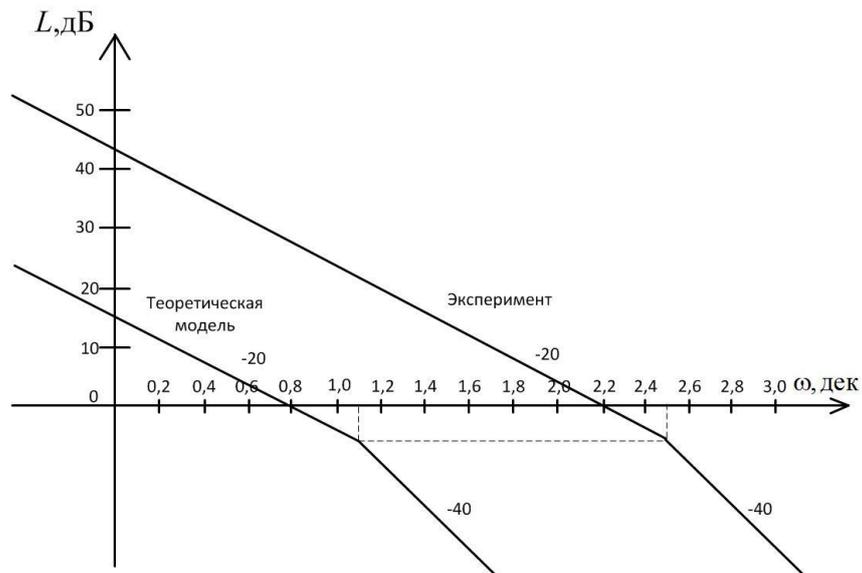


Рисунок 4.23. ЛАЧХ теоретической и экспериментальной модели

По построенным графикам ЛАЧХ можно сделать вывод о том, что соотношение  $\frac{\omega_0}{2\omega_c} = 10 \dots 12$  справедливо для значений экспериментального и теоретического исследования.

### **Выводы по главе**

На основании проведенных экспериментальных исследований по влиянию периода дискретности  $T$  экстраполятора нулевого порядка в составе цифрового регулятора положения позиционно – следящего электропривода на точность воспроизведения сигнала задания при обработке детали со сложным геометрическим профилем можно сформулировать следующие выводы:

1. Эксперимент исследован на модели и на реальном стенде – станке модели 2440СФ4, полностью подтверждается положение о необходимости увеличении частоты квантования  $\omega_0$  при обходе контура с высокой линейной скоростью подачи для улучшения технологических параметров качества обработки детали. В этом случае удастся обеспечить точностные свойства станка, соответствующие классу «С».

2. Управление дискретностью  $\omega_0$  в функции технологических параметров обработки, позволяет улучшить качество обработки материала на 35% и производительность на 40%.

## Заключение

По результатам проведенных в диссертационной работе теоретических и экспериментальных исследований, направленных на оценку влияния дискретности ЧПУ на динамические показатели качества управления цифровым позиционно – следящим электроприводом подачи координатно – расточного станка класса точности «С», можно сформулировать выводы.

1. Проведен анализ влияния дискретности в ЧПУ на динамические показатели качества цифрового позиционно – следящего электропривода, выявлено условие выполнения требований по устойчивости, точности воспроизведения сигнала задания.

2. Выведен и обоснован критерий определения периода дискретности экстраполятора нулевого порядка в цифровом регуляторе положения позиционно – следящего электропривода, отличающегося от известных переменной частотой квантования в функции технологических требований и точности обработки изделий. Для цифровых позиционно – следящих электроприводов прецизионных КРС соотношение, между частотой квантования экстраполятора нулевого порядка в регуляторе положения цифровой системы и полосой пропускания линейной части электропривода, равно  $\frac{\omega_0}{2\omega_c} \geq 12$ .

3. Проведен структурно – параметрический синтез устройства автоматической смены дискретности ЧПУ в функции технологических требований к обработке деталей (скорость подачи инструмента –  $V_{зд}$ , радиус обрабатываемого контура –  $R$ , материал, инструмент).

4. Разработан алгоритм функционирования электропривода для автоматической смены периода дискретности вызова программы, отличающегося учетом изменения параметров обрабатываемой детали и инструмента в функции технологических параметров процесса обработки изделий.

5. Разработана структурная схема и методика синтеза «интеллектуального» цифрового позиционно следящего электропривода.

6. Создана компьютерная модель цифрового позиционно – следящего электропривода с переменной частотой квантования регулятора положения.

7. Проведены экспериментальные исследования на стенде – станке модели 2440СФ4, модели САУ в среде моделирования «Matlab Simulink», которые показали эффективность нового алгоритма управления электропривода, что позволяет увеличить производительность и снизить динамическую ошибку.

### Библиографический список

1. Анучин, А.С. Системы управления электроприводов: учебник для вузов / А.С. Анучин. – М.: Издательский дом МЭИ, 2015. – 373 с.: ил.
2. Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова. – М.: Наука, 1976. – 279 с.
3. Александров, А.Г. Методы построения систем автоматического управления / А.Г. Александров. – М.: Физматизд, 2008. – 230 с.
4. Бессекерский, В.А. Теория автоматического управления / В.А. Бессекерский, Е.П. Попов. – М.: Наука, 2010.
5. Бессекерский, В.А. Цифровые автоматические системы / В.А. Бессекерский. – М.: Наука, 1976.
6. Борисов В.Н. Роль импортозамещения в машиностроении / В.Н. Борисов, О.В. Почукаева, Е.А. Балагурова, Т.Г. Орлова // Научные труды: Институт народного прогнозирования РАН. – 2015. – №13. – 24 с.
7. Возвращательный момент // Вестник СНК «Стратегия и конкурентоспособность». – 2007. – №6 (18). – С. 38 – 40.
8. Галицков С.Я., Галицков К.С. Многоконтурные системы управления с одной измеряемой координатой: Монография. – Самара: СГАСУ, 2004.–140с.
9. Галицков С.Я., Лысов С.Н., Стариков А.В. Монотонность позиционирования рабочих органов прецизионных станков / Сб.: Мехатронные системы и их элементы. – Новосибирск, 1991. – С. 86 – 92.
10. Григорьев, С.Н. Тенденция развития мирового станкостроения / С.Н. Григорьев, А.А. Грибков, Д.В. Захарченко // Вестник МГТК «Станкин» – 2013. – №1. – С. 18 – 20.
11. Гусев, Н.В. Системы цифрового управления многокоординатными следящими электроприводами: Учебн. пособ. / Н.В. Гусев, В.Г. Букреев – Томск: Изд – во Томского политехнического университета, 2007. – 213 с.

12. Дьяконов, В.П. MATLAB 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6 в математике и моделировании. Серия «Библиотека профессионала» / В.П. Дьяконов. – М.: Солон – Пресс, 2005.
13. Дьяконов, В.П. MATLAB 6/6.1/6.5 + Simulink 4/5. Основы применения. Полное руководство пользователя / В.П. Дьяконов. – М.: Солон – Пресс, 2002. – 768 с.
14. Душин, С.Е. Теория автоматического управления / С.Е. Душин, А.С. Зотов и др: под ред. В.Б. Яковлева. – М.: Высшая школа, 2005. – 567 с.
15. Динамика цифровых следящих систем / под ред. Б.К. Чемоданова. – М.: Энергия, 1970. – 496 с.
16. Дьяконов, В.П. Анализ, идентификация и моделирование систем. Специальный справочник / В.П. Дьяконов. – СПб.: Питер, 2002. – 448 с.: ил.
17. Ерофеев, А.А. Теория автоматического управления / А.А. Ерофеев // Учебн. – Санкт – Петербург, 2003. – 302 с.
18. Естафиева, С.В. Моделирование следящего электропривода подачи современных станков с ЧПУ / С.В. Естафиева // Журнал «Мехатроника, Автоматизация, Управление», вып. 9, 2010. – С. 37 – 45.
19. Калинов, В.В. Развитие отечественного станкостроения как отражение процессов деиндустриализации и демодернизации страны на рубеже XX – XXI вв. / В.В. Калинов, Е.В. Бодрова // Журнал «Наука и современность». – 2016. – №42. – 5 с.
20. Ключев, В.И. Теория электропривода / В.И. Ключев.– М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.
21. Кудинов, В.А. Динамика станков / В.А. Кудинов. – М.: Машиностроение, 1984. – 359 с.
22. Коновалов, Б.И. Теория автоматического управления: Учебное пособие / Б.И. Коновалов, Ю.М. Лебедев. – М.: Лань, 2010. – 220 с.
23. Кочетков, В.П. Основы теории управления / В.П. Кочетков. – Ростов – на – Дону: Феникс, 2012. – 411 с.

24. Куо, Б. Теория и проектирование цифровых систем управления: Пер с англ. – М.: Машиностроение. – М.: Наука, 1976.
25. Кочетков, В.П. Основы теории управления / В.П. Кочетков. – М.: Феникс, 2012. – 411 с.
26. Лисин, С.Л. Структурно – параметрический синтез быстродействующего следящего электропривода с синхронным исполнительным двигателем: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.09.03 / С.Л. Лисин. – М.: 2015. – 22 с.
27. Лысов, В. Е. Теория автоматического управления / В. Е. Лысов. – М.: Машиностроение, 2010. – 500 с.
28. Лебедев, М.Н. Следящие электроприводы станков с ЧПУ / Р.Т. Орлова, А.В. Пальцев, М.Н. Лебедев. – М.: Энергоиздат, 1988. – 223 с.
29. Лысов, В.Е. Анализ устойчивости позиционно – следящего электропривода с учетом дискретности экстраполятора нулевого порядка / В.Е. Лысов, И.С. Сидоров // Вестник СамГТУ. Серия «Технические науки» №3(47). – 2015. – С. 142 – 148.
30. Лысов, В.Е. Анализ погрешности в воспроизведении заданной траектории движения позиционно – следящего электропривода с учетом дискретности экстраполятора нулевого порядка / В.Е. Лысов, И.С. Сидоров // Вестник СамГТУ. Серия «Технические науки» №4(48). – 2015. – С. 70 – 75.
31. Лысов, В.Е. Анализ влияния частоты квантования цифрового регулятора положения позиционно – следящего электропривода на динамические показатели качества управления / В.Е. Лысов, И.С. Сидоров // Теор. и прикл. научн. – техн. журнал «Мехатроника, Автоматизация, Управление». Том 17. – 2016. – №10. – С.685 – 689.
32. Лысов, В.Е. Анализ влияния дискретности цифрового регулятора положения на точность воспроизведения сигнала задания в позиционно–следящем электроприводе / В.Е. Лысов, Я.И. Пешев, И.С. Сидоров // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Том 18. – 2016. – №4(3). – С.464 – 469.

33. Лысов, В.Е. Интеллектуальный позиционно – следящий электропривод подачи прецизионного координатно – расточного станка / В.Е. Лысов, Я.И. Пешев, И.С. Сидоров // Научн. – техн. журнал «Станки Инструмент», 2016. – №7. – С.18 – 22.

34. Лысов, В.Е. Анализ влияния периода квантования цифрового регулятора положения позиционно – следящего электропривода на качество воспроизведения заданной траектории / В.Е. Лысов, Я.И. Пешев, И.С. Сидоров // Научн. – техн. журнал, Известия высших учебных заведений «Электромеханика», 2016. – №6(548). – С. 59 – 62.

35. Ловыгин, А.А. Современный станок с ЧПУ и САД/САМ – система / А.А. Ловыгин, Л.В. Тверовский. – М.: ДМК, Пресс, 2012. – 279 с.: ил.

36. Макаров, И.М. Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления / И.М. Макаров, В.М. Лохин, С.В. Манько, М.П. Романов. – М.: Наука, 2012. – 336 с.

37. Металлорежущие станки: Учебник для машиностроительных вузов / под ред. В.Э. Пуша. М.: Машиностроение, 1985. – 256 с.

38. Михайлов, О.П. Современный электропривод станков с ЧПУ и промышленных роботов / О.П. Михайлов. – М.: Высшая школа 1989.–111с.

39. Методические указания к расчету и проектированию систем подчинённого регулирования электроприводов постоянного тока по курсу "Системы управления электроприводами" для студентов специальности 0628. / Сост. Рапопорт Э.Я. – Куйбышев: КПТИ, 1985. –29с.

40. Неизвестных, А. Г. Анализ точности обработки деталей на станках с ЧПУ / А.Г. Неизвестных, Е. Г. Крылов // Известия ВолГТУ, 2008. – том 9.– С.89 – 81.

41. Онищенко, Г.Б. Автоматизированный электропривод промышленных установок / Г.Б. Онищенко, М.И. Аксенов, В.П. Грехов, М.Н. Зарицкий, А.В. Куприков, А.И. Нитиевская. – М.: РАСХН, 2001. – 520 с.: ил.

42. Поспелов, Г.С. Искусственный интеллект основа новой информационной технологии / Г.С. Поспелов. – М.: Наука, 1988. – 280 с.

43. Поздеев, А.Д. Электромагнитные и электромеханические процессы в частотно – регулируемых электроприводах / А.Д. Поздеев. – Чебоксары: Изд – во Чувашского университета, 1988. – 250 с.
44. Паспорт на датчики линейных перемещений СКБ ИС. – СПб., 2016.
45. Равва, Ж. С. Новое в повышении точности станков. Адаптация систем со смешанным трением / Ж.С. Равва. – Куйбышевское книжное издательство, 1974. – 318 с.
46. Рассел, С. Искусственный интеллект. Современный подход / С. Рассел, П. Норвит. – М.: Вильямс, 2007. – 141 с.
47. Решетов, Д.Н. Точность металлорежущих станков / Д.Н. Решетов, В.Г. Портман. – М.: Машиностроение, 1986. – 336 с.
48. Руководство по характеристике ЧПУ NC – 230: Балт – Систем. – СПб., 2016. – 145 с.
49. Руководство по эксплуатации 2440СФ4.00.00.000. РЭ. Часть 1. – Самара, 2016. – 40 с.
50. Соломенцев, Ю.М. Автоматизированное проектирование и производство в машиностроении / Ю.М. Соломенцев. – М.: Машиностроение, 1985. – 2018 с.
51. Сосонкин В.Л. Системы числового программного управления: Учебн. пособие / В.Л. Сосонкин, Г.М. Мартинов. – М.: Логос, 2005. – 296 с.
52. Технический паспорт на станок 2440СФ4. – Самара: ЗАО «Стан – Самара», 2016.
53. Третьяк, Л.М. Обработка результатов наблюдений: Учебное пособие / Л.М. Третьяк. – Оренбург: ГОУ ОГЦ, 2004. – 171 с.
54. Technical manual TNC 620. DR. JOHANNES HEIDENHAIN GmbH, 83301 Traunreut, Germany. – October 2010.
55. URL: [http://newsruss.ru/doc/index.php/Станкостроение\\_России](http://newsruss.ru/doc/index.php/Станкостроение_России)
56. URL: <http://www.stankoinstrument.ru>
57. Manfred Weck. Werkzeugmaschinen 3: Mechatronische Systeme, Vorschubantriebe, Prozessdiagnose. – Springer Berlin Heidelberg, 2006. – 424 p.

58. Xun W. Xu., Stephen T. Newman Making CNC machine tools more open, interoperable and intelligent—a review of the technologies / Computers in Industry, 2006. – Vol.12. № 2. P. 141–152.

59. William Bolton. Instrumentation and Control Systems (Second Edition). Newnes, 2015. – P. 281–302.

Приложение 1

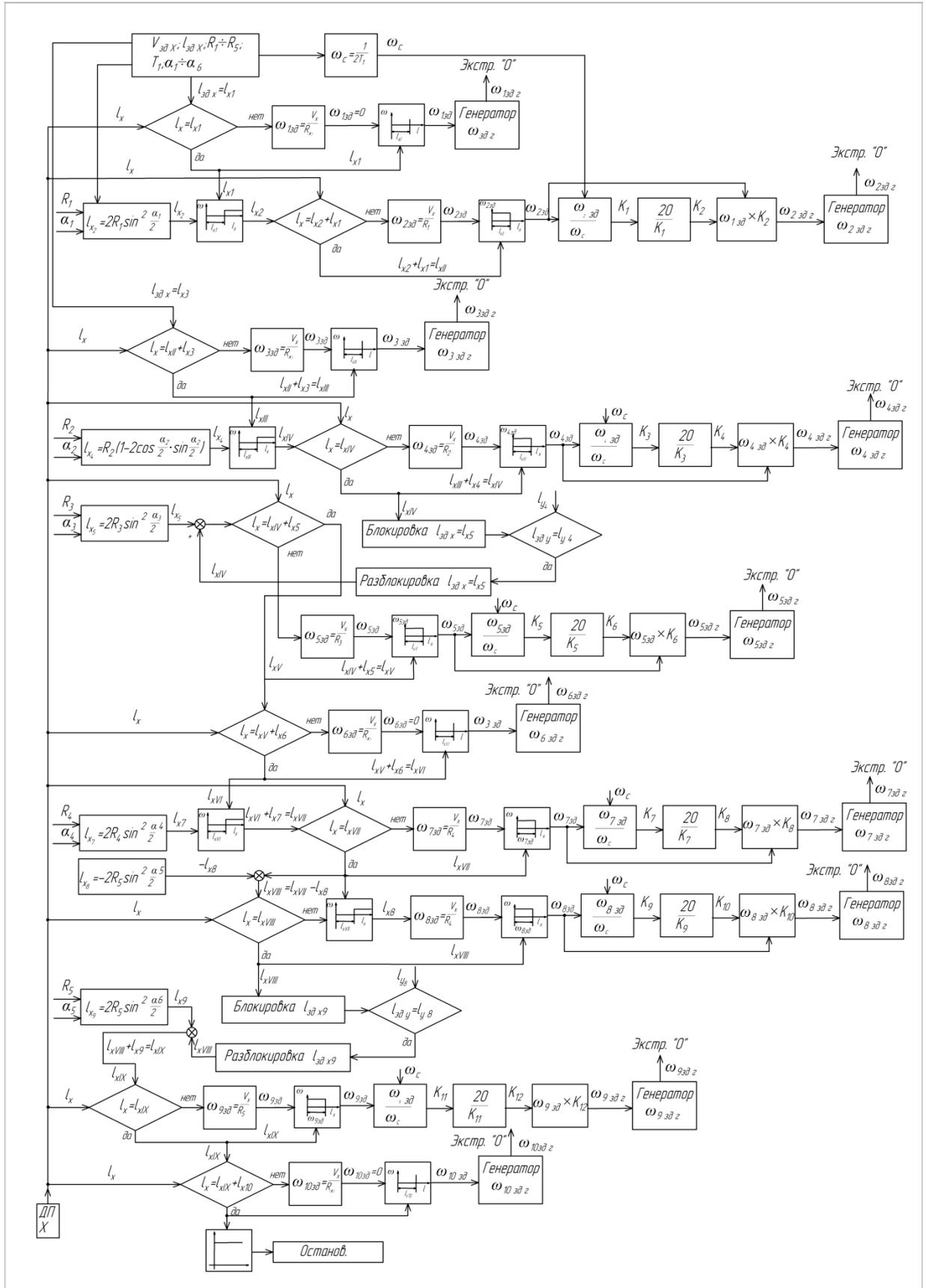


Рисунок 3.6. Алгоритм интеллектуального управления позиционно-следящим электроприводом прецизионного станка. Ось "X"

## Приложение 2

ЗАВОД КООРДИНАТНО-РАСТОЧНЫХ СТАНКОВ

JIG-BORING MACHINE PLANT

**СТАН**-САМАРА

**STAN**-SAMARA

Россия, 443022, г. Самара, ул. XXII Партсъезда, 7а, тел.: (846) 955-30-83, тел./факс: (846) 992-69-84  
E-mail: stan@samara.ru www.stan-samara.ru



«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ЗАО «Стан-Самара»

Царфин А.Н.

2017г

### АКТ

о внедрении результатов кандидатской диссертационной работы аспиранта  
ФГБОУ ВО СамГТУ Сидорова Игоря Сергеевича

**«Структурно - параметрический синтез цифрового позиционно -  
слеящего электропривода с переменной частотой квантования регулятора  
положения».**

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы  
в виде разработанного алгоритма управления позиционно-слеящим  
электроприводом подачи использованы в структурном построении  
электропривода с ЧПУ координатно-расточного станка модели 2440СФ4,  
выпускаемого ЗАО «Стан-Самара».

Научный руководитель

работы д.т.н., проф.

 Лысов В.Е.

Гл. конструктор

ЗАО «Стан-Самара»

 Филиппов В.Н.

### Приложение 3



МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Самарский государственный технический университет»  
(ФГБОУ ВО «СамГТУ»)

Утверждаю  
Первый проректор СамГТУ  
по научной работе  
Д.т.н., профессор М.В.Ненашев



20\_\_ г.

#### Акт

о внедрении результатов кандидатской диссертационной работы аспиранта СамГТУ Сидорова И.С. «Структурно - параметрический синтез цифрового позиционно-следающего электропривода с переменной частотой квантования регулятора положения».

Настоящий акт составлен «20 мая 2017года» представителями Самарского государственного технического университета.

- Заведующий кафедрой «Электропривод и промышленная автоматика»

д.т.н., профессор Стариков А.В.

Д.т.н. профессор кафедры «Электропривод и промышленная автоматика»

Кузнецов П.К.

Д.т.н. профессор кафедры «Электропривод и промышленная автоматика»

Лысов В.Е.

в том, что результаты диссертационной работы Сидорова И.С. использованы при разработке лабораторной работы и написании методического руководства к ней по дисциплине «Дискретные системы автоматического управления» выполняемой в учебном процессе на кафедре «Электропривод и промышленная автоматика» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» по специальности 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника».

Зав. каф. «Электропривод и промышленная автоматика»

д.т.н. проф.

\_\_\_\_\_  
Стариков А.В.

Д.т.н. профессор кафедры «Электропривод и промышленная автоматика»

\_\_\_\_\_  
Кузнецов П.К.

Д.т.н. профессор кафедры «Электропривод и промышленная автоматика»

\_\_\_\_\_  
Лысов В.Е.