

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Самарский государственный технический университет»

На правах рукописи

Костю

Костюков Владислав Дмитриевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ И ЖЕСТКОСТИ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОДШИПНИКОВ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ
НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМОВ УПРАВЛЕНИЯ**

Специальность 2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы

**Диссертация на соискание
ученой степени кандидата технических наук**

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор Макаричев Ю.А.

Самара 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1 ОБЗОР МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ПОДШИПНИКАМИ (ЭМП) ..	15
1.1 Конструктивные особенности агрегатов с электромагнитными подшипниками.....	15
1.2 Обзор линеаризованных математических моделей и передаточных функций электромагнитного подшипника как объекта управления	16
1.3 Основные принципы построения систем управления ЭМП.....	19
1.4 Дискретные математические модели ЭМП	24
1.5 Цель и задачи диссертационной работы.....	28
1.6 Выводы по первой главе	29
ГЛАВА 2 ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭМП	30
2.1 Определение величины смещения центра магнитной системы электромагнитного подшипника относительно оси вращения ротора, обеспечивающей компенсацию веса ротора при равных токах электромагнитов	31
2.2 Примеры расчёта величины смещения центра магнитной системы радиальных электромагнитных подшипников	38
2.3 Работа радиальных электромагнитных подшипников турбоагнетателя БТК-Э при смещении центра магнитной системы относительно оси вращения и вариации напряжения питания	42
2.4 Анализ устойчивости системы управления радиальным электромагнитным подшипником турбоагнетателя БТК-Э во всем диапазоне перемещений ротора	49

2.5 Анализ работы радиальных электромагнитных подшипников нагнетателя газоперекачивающего агрегата ГПА Ц-16 при смещении центра магнитной системы	55
2.6 Устойчивость системы управления радиального ЭМП нагнетателя газоперекачивающего агрегата ГПА Ц-16 во всем возможном диапазоне перемещений ротора.....	60
2.7 Выводы по второй главе.....	64
ГЛАВА 3 СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОДШИПНИКОМ С УЧЕТОМ СМЕЩЕНИЯ ЦЕНТРА МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ И РАЗДЕЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ ПРОТИВОПОЛОЖНЫХ МАГНИТОВ	66
3.1 Линеаризованная математическая модель электромагнитного подшипника при раздельном регулировании напряжений противоположных магнитов	66
3.2 Оценка адекватности предлагаемой линеаризованной математической модели электромагнитного подшипника	72
3.3 Структурный синтез системы управления.....	80
3.4 Методика выбора параметров регуляторов.....	84
3.5 Пример расчета и результаты компьютерного моделирования системы управления электромагнитным подшипником с раздельным регулированием напряжений и токов противоположных магнитов	88
3.6 Выводы по третьей главе	95
ГЛАВА 4 ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССОВ КВАНТОВАНИЯ СИГНАЛОВ ПО ВРЕМЕНИ И УРОВНЮ НА РАБОТУ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОДШИПНИКОМ С НЕЗАВИСИМЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ НАПРЯЖЕНИЙ ПРОТИВОПОЛОЖНЫХ МАГНИТОВ	97

4.1 Структурные схемы цифровой системы управления электромагнитным подшипником.....	97
4.2 Дискретная математическая модель непрерывной части цифровой системы управления электромагнитным подшипником.....	100
4.3 Оценка адекватности дискретной математической модели цифровой системы управления радиального электромагнитного подшипника.....	108
4.4 Дискретная математическая модель цифровой системы управления электромагнитным подшипником с раздельным регулированием напряжений противоположных магнитов.....	111
4.5 Оценка адекватности дискретной математической модели цифровой системы управления электромагнитным подшипником с учетом квантования по уровню.....	118
4.6 Верификация математической модели электромагнитного подшипника как объекта управления на основе данных натуральных экспериментов.....	125
4.7 Выводы по четвертой главе.....	133
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	135
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	138
ПРИЛОЖЕНИЯ	151

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы

Электромагнитные подшипники (ЭМП) находят применение в электротехнических комплексах и системах подвеса вращающихся роторов, в которых использование традиционных подшипников качения или скольжения невозможно по разным причинам, например, из-за высокой скорости вращения или большой массы ротора. Они являются альтернативой гидростатических или гидродинамических подшипников скольжения системам, где к подшипниковым узлам предъявляются повышенные требования по снижению коэффициента трения, пожаро и взрывобезопасности, надежности и сроку службы. В качестве примера эффективного использования электромагнитного подвеса ротора можно назвать центробежные компрессоры газоперекачивающих агрегатов [1 – 12], высокоскоростные шпиндели, гироскопы и гиродины [13].

Для электромагнитного подвеса ротора электроагрегата с горизонтальной осью вращения, которая не изменяет свое положение в рабочем режиме, применяется совокупность электромагнитных подшипников, содержащая осевой и два радиальных электромагнитных подшипника. Необходимо отметить, что радиальный электромагнитный подшипник имеет две магнитные оси, по каждой из которых относительно ротора располагаются два противоположных магнита, действующих на притяжение. Аналогично устроен осевой подшипник, у которого противоположные магниты воздействуют на опорный диск.

Электромагнитные подшипники в соответствии с принципами их работы потребляют электрическую энергию. Величина потребляемой мощности в номинальном режиме для ЭМП турбонагнетателей газоперекачивающих агрегатов с массой ротора 1000 и более килограмм составляет 2-15 кВт. От значения этой мощности зависят не только расходы на электроэнергию, но и стоимость аккумуляторной батареи с системой бесперебойного питания на ее основе, которая является обязательной частью комплекса ЭМП. Поэтому поиск способов снижения потребления

электрической энергии электромагнитными подшипниками является актуальной задачей.

Отличительной особенностью электромагнитного подшипника как объекта управления является его неустойчивость, поэтому он принципиально не может работать без системы управления, контролирующей положение вращающегося ротора по каждой оси относительно центра магнитной системы (датчики положения ротора по каждому каналу управления), или стабилизированной иным способом. То есть каждая ось современного электромагнитного подвеса ротора представляет собой цифровой следящий электропривод, выбор параметров регуляторов которого обеспечивает устойчивость и требуемые жесткостные свойства электромагнитного подшипника. Следует также отметить, что повышение жесткости электромагнитного подшипника приводит к снижению колебаний ротора под воздействием внешних возмущающих воздействий. Кроме того, повышение жесткости опор приводит к изменению собственных механических резонансных частот ротора, смещая их в более высокочастотную область, что благоприятно сказывается на повышении надежности и срока безаварийной работы газоперекачивающего агрегата. В связи с этим разработка новых принципов построения и методик синтеза цифровых систем управления электромагнитными подшипниками, позволяющих повысить динамическую жесткость подшипников, также является актуальной задачей.

Разработка цифровых систем управления электромагнитными подшипниками, использующих новые способы регулирования напряжений электромагнитов и обеспечивающих снижение потребляемой электрической энергии, невозможно реализовать без математического описания ЭМП как объекта управления, что, безусловно, подтверждает актуальность задачи определения новых непрерывных и дискретных математических моделей электромагнитных подшипников.

Степень разработанности проблемы

Вопросам разработки и совершенствования электромагнитных подшипников посвящен значительный перечень трудов отечественных и зарубежных ученых [1 – 88].

Однако, большинство этих работ посвящены электромагнитным подшипникам, в которых используется так называемый дифференциальный закон регулирования, при котором увеличение напряжения на одном электромагните, на определенную величину, способствует пропорциональному уменьшению напряжения, на эту же величину, на противоположном электромагните, что, в свою очередь, предопределяет величину потребляемой активной мощности электромагнитным подшипником. Кроме того, большинство известных математических моделей электромагнитного подшипника как объекта управления [13, 17, 18, 36, 44] соответствуют именно дифференциальному закону регулирования.

Структурно-параметрический синтез любых систем управления производится на основе результатов математического моделирования исследуемого объекта, что, непосредственно, требует определения и знания математической модели. Ввиду чего, дифференциальный закон регулирования напряжений противоположных электромагнитов и соответствующие ему математические модели, являются основополагающими для большинства известных принципов создания систем управления электромагнитными подшипниками (СУ ЭМП), а также методик синтеза регуляторов, обеспечивающих их устойчивость и требуемые параметры [13, 14, 27, 28, 35, 42, 45, 48 – 56, 58, 62].

Дискретные математические модели цифровых систем управления электромагнитными подшипниками, как правило также описывают процессы, соответствующие структурам систем с дифференциальным законом регулирования напряжений и токов [41, 58, 59, 61 – 63].

Проблемы, возникающие при несимметричных режимах работы ЭМП, как показал анализ работ по исследуемой теме, освещены недостаточно полно, а некоторые аспекты, вообще не нашли своего отражения в научных статьях, что позволило сформулировать цель и задачи диссертации.

Цель диссертационной работы – разработка и параметрический синтез электротехнического комплекса электромагнитных подшипников с независимым регулированием напряжений противоположных полюсов, обеспечивающих повышение жесткости опор и снижение потребления электрической энергии.

Задачи диссертационного исследования

1. Определение величины смещения центра магнитной системы радиального электромагнитного подшипника, компенсирующего в номинальном режиме вес ротора и обеспечивающего снижение потребляемой мощности.

2. Анализ устойчивости и работоспособности системы управления электромагнитным подшипником при смещении оси вращения и вариации напряжения питания.

3. Разработка линеаризованной математической модели электромагнитного подшипника при раздельном управлении напряжениями противоположных магнитов и смещении оси вращения ротора относительно центра магнитной системы.

4. Разработка цифровой системы управления магнитным подвесом ротора и его дискретной математической модели для раздельного регулирования напряжений противоположных магнитов, учитывающих смещение оси вращения относительно центра магнитной системы.

Объектом исследования является радиальный электромагнитный подшипник ротора с горизонтальной осью вращения.

Предмет исследования – процессы, протекающие в радиальных электромагнитных подшипниках при смещении центра магнитной системы относительно оси вращения, вариации напряжения питания и раздельном управлении напряжениями электромагнитов.

Методы решения

В диссертации применялись методы теоретических основ электротехники, теории современных систем управления, непрерывного прототипа, линеаризации нелинейных дифференциальных уравнений и численного моделирования.

Научная новизна

1. Разработана линеаризованная математическая модель радиального электромагнитного подшипника, отличающаяся учетом возможности раздельного регулирования напряжений противоположных электромагнитов и смещения оси вращения ротора относительно центра магнитной системы.

2. Получено аналитическое выражение, позволяющее определить величину смещения центра магнитной системы электромагнитного подшипника относительно оси вращения, для которой происходит компенсация силы веса ротора при равных токах в противоположных магнитах.

3. Разработана система управления радиальным электромагнитным подшипником со смещенным центром магнитной системы, отличающаяся наличием двух каналов регулирования напряжений противоположных магнитов.

4. Предложена методика параметрического синтеза регуляторов системы управления электромагнитным подшипником с отдельным регулированием напряжений противоположных магнитов, отличающаяся учетом смещения центра магнитной системы относительно оси вращения ротора.

5. Разработана дискретная математическая модель электромагнитного подшипника, отличающаяся учетом отдельного цифрового регулирования напряжений противоположных магнитов.

Практическая значимость результатов работы

1. Смещение центра магнитной системы относительно оси вращения ротора, на рассчитанную рациональную величину, способствует снижению собственного электропотребления электромагнитными подшипниками.

2. Предложенная СУ ЭМП с отдельным регулированием напряжений противоположных электромагнитов позволяет повысить быстродействие и динамическую жесткость магнитного подвеса.

Достоверность полученных результатов подтверждается хорошим совпадением расчетов с результатами компьютерного моделирования и натурных экспериментов, а также с результатами, полученными другими авторами.

Реализация результатов работы

В основу методики и программы расчёта системы электромагнитного подвеса перспективного турбоагнетателя БТК-Э железнодорожного дизеля (НПО «Шторм» г. Самара) положены ключевые результаты и положения диссертационной работы, которые применялись на этапе проектирования и промышленной реализации.

Алгоритм и программа расчета параметров регуляторов системы управления электромагнитными подшипниками применяются в учебном процессе ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» при подготовке магистрантов кафедры электромеханики и автомобильного электрооборудования в курсе «Оптимизация электротехнических комплексов и систем».

Апробация работы

Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на Всероссийской научно-практической конференции «Ашировские чтения» (г. Самара, 2023), Всероссийской научно-практической конференции «Ашировские чтения» (г. Самара, 2024), Международной научно-практической конференции молодых учёных «Энергия молодёжи для нефтегазовой индустрии» (г. Альметьевск, 2023), ЛШ Всероссийской научно-практической конференции «Фёдоровские чтения» (Москва, 2023).

Соответствие паспорту специальности. Научная квалификационная работа на соискание ученой степени кандидата технических наук выполнена в соответствии с паспортом специальности 2.4.2 – «Электротехнические комплексы и системы» и соответствует пункту 3 – «Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления» и пункту 4 – «Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях...».

Публикации

По теме диссертации опубликованы 14 печатных работ общим объемом 6,4 п.л., в том числе 8 статей в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях из перечня ВАК РФ и 2 патента на изобретение.

Личный вклад автора состоит в аналитическом решении задачи расчета рациональной величины смещения центра магнитной системы электромагнитного подшипника относительно оси вращения ротора; в определении передаточных

функций электромагнитного подшипника с учетом возможности отдельного регулирования напряжений противоположных электромагнитов; в разработке системы управления электромагнитными подшипниками с отдельным регулированием напряжений противоположных магнитов и методики синтеза ее регуляторов; в разработке дискретной математической модели цифровой системы управления электромагнитным подшипником с отдельным регулированием напряжений противоположных магнитов.

На защиту выносятся:

1. Линеаризованная математическая модель радиального электромагнитного подшипника, для отдельного регулирования напряжений противоположных электромагнитов и смещения оси вращения ротора относительно центра магнитной системы.

2. Аналитические выражения и результаты расчета величины смещения центра магнитной системы радиального электромагнитного подшипника относительно оси вращения, при которой происходит компенсация силы веса ротора при равных токах в противоположных магнитах.

3. Система управления электромагнитным подшипником с отдельным регулированием напряжений противоположных магнитов.

4. Методика параметрического синтеза регуляторов системы управления радиальным электромагнитным подшипником и его дискретная математическая модель для отдельного регулирования напряжений противоположных магнитов.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка и приложения. Основная часть работы изложена на 138 страницах машинописного текста, иллюстрирована 58 рисунками и 16 таблицами. Библиографический список содержит 109 наименований на 13 страницах.

Содержание работы

Во введении представлена тема диссертационного исследования, посвященного разработке несимметричных режимов работы радиальных электромагнитных

подшипников, подтверждена ее актуальность и перспективность дальнейшего совершенствования систем электромагнитного подвеса вращающихся роторов агрегатов, сформулирована цель работы и обозначен перечень решаемых задач для ее достижения, определена научная новизна и практическая значимость ключевых положений и результатов диссертации.

В первой главе представлены ключевые особенности реализации электромагнитного подвеса вращающихся роторов агрегатов с применением комплекта электромагнитных подшипников, обозначен его базовый состав и рассмотрено конструктивное исполнение агрегата с ЭМП. Рассмотрены известные линеаризованные математических модели и передаточные функции электромагнитного подшипника как объекта управления, отмечены их недостатки и возможности применения. Представлены ключевые принципы построения цифровых систем управления электромагнитными подшипниками и рассмотрены известные дискретные математические модели СУ ЭМП.

Во второй главе приведено аналитическое решение задачи определения величины смещения центра магнитной системы радиального электромагнитного подшипника относительно оси вращения ротора, обеспечивающей компенсацию силы веса при равенстве токов противоположных магнитов. Приведены примеры расчета величины смещения центра магнитной системы центра магнитной системы относительно оси вращения ротора двух агрегатов с электромагнитными подшипниками, отличающихся своими массогабаритными и мощностными показателями. Проанализировано функционирование электромагнитных подшипников при смещении центра магнитной системы и вариации напряжения питания. Показано, что смещение центра магнитной системы относительно оси вращения ротора позволяет снизить напряжение питания и ток катушек электромагнитного подшипника на 16,6%, а потребляемую мощность – на 30%. Проанализирована устойчивость системы управления электромагнитным подшипником при параметрах регуляторов, выбранных для центрального положения ротора относительно магнитной системы, во всем возможном диапазоне перемещения ротора в рамках зазора страховочных

подшипников. Показано, что система управления будет сохранять устойчивость, в том числе и при пониженном напряжении питания электромагнитов.

В третьей главе найдена линеаризованная математическая модель радиального электромагнитного подшипника как объекта управления при отдельном регулировании напряжений противоположных магнитов. Получены передаточные функции по управляющим напряжениям двух противоположных магнитов и по основному возмущающему воздействию – внешней силе, действующей на ротор. Показано, что полученные передаточные функции справедливы для любого закона регулирования напряжений противоположных магнитов, в том числе и дифференциального. В связи с этим произведена оценка адекватности новой математической модели электромагнитного подшипника как объекта управления методом сравнения с ранее известной передаточной функцией, адекватность которой подтверждена натурными экспериментами. Основная особенность полученных передаточных функций заключается в возможности учета начальных значений скорости изменения токов в обмотках электромагнитов и скорости перемещения ротора. Произведен структурный синтез системы управления электромагнитным подшипником с отдельным регулированием напряжений электромагнитов. Разработана методика параметрического синтеза регуляторов предложенной системы управления и приведен пример расчета. Компьютерное моделирование показало, что предложенная система управления электромагнитным подшипником с отдельным регулированием напряжений противоположных электромагнитов позволяет повысить быстродействие системы при обработке управляющих воздействий, как минимум в 2 раза, а динамическую жесткость подшипника – в 1,25 раза.

В четвертой главе отмечено, что все современные системы управления электромагнитами подшипниками являются цифровыми, обладающими эффектами квантования сигналов по времени и уровню. В связи с этим разработаны структурные схемы предложенной системы управления с учетом квантования по времени. Проанализированы корни знаменателей новых непрерывных передаточных функций электромагнитных подшипников как объектов управления, полученных в тре-

твѣй главѣ, во всем возможном диапазоне перемещений ротора и изменения начальных значений токов. С учетом этого найдены дискретные передаточные функции непрерывной части цифровой системы управления ЭМП, в которой силовые преобразователи, регулирующие напряжения противоположных электромагнитов, выполняют также функции экстраполяторов нулевого порядка. Сравнительное моделирование непрерывных и дискретных передаточных функций показало расхождение результатов, не превышающее 0,5%, что свидетельствует об адекватности полученных дискретных передаточных функций.

Найдена дискретная передаточная функция разработанной цифровой системы управления электромагнитным подшипником с отдельным регулированием напряжений противоположных магнитов. Полученная дискретная передаточная функция позволяет на этапе проектирования сформулировать требования к времени выполнения алгоритма программы и вычислительным характеристикам контроллера или микроконтроллера, планируемого в дальнейшем для технической реализации цифровой системы управления ЭМП. Методом моделирования показано, что полученная дискретная передаточная функция достаточно точно описывает протекание процессов в предложенной цифровой системе управления ЭМП, поскольку величина найденной погрешности составляет менее 3,4%. Выполнено компьютерное моделирование, в программной среде Matlab, цифровой системы управления радиальным электромагнитным подшипником нагнетателя газоперекачивающего агрегата ГПА Ц-16 с дифференциальным законом регулирования напряжений противоположных магнитов с учетом новой математической модели объекта. Показано, что при смещении ротора относительно центра магнитной системы на 30 мкм расхождение времени переходного процесса по графику, полученного методом моделирования, с аналогичным временем, зафиксированным в ходе натурального эксперимента при запуске агрегата, не превышает 5%.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

ГЛАВА 1 ОБЗОР МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ПОДШИПНИКАМИ (ЭМП)

1.1 Конструктивные особенности агрегатов с электромагнитными подшипниками

Для электромагнитного подвеса ротора используется один осевой и два радиальных электромагнитных подшипника. Центробежные компрессоры газоперекачивающих агрегатов (ГПА) являются одним из примеров эффективного использования электромагнитного подвеса вращающегося ротора, осуществляемого применением совокупности электромагнитных подшипников. На структурной схеме (рисунок 1.1) представлено конструктивное устройство такого агрегата с ЭМП.

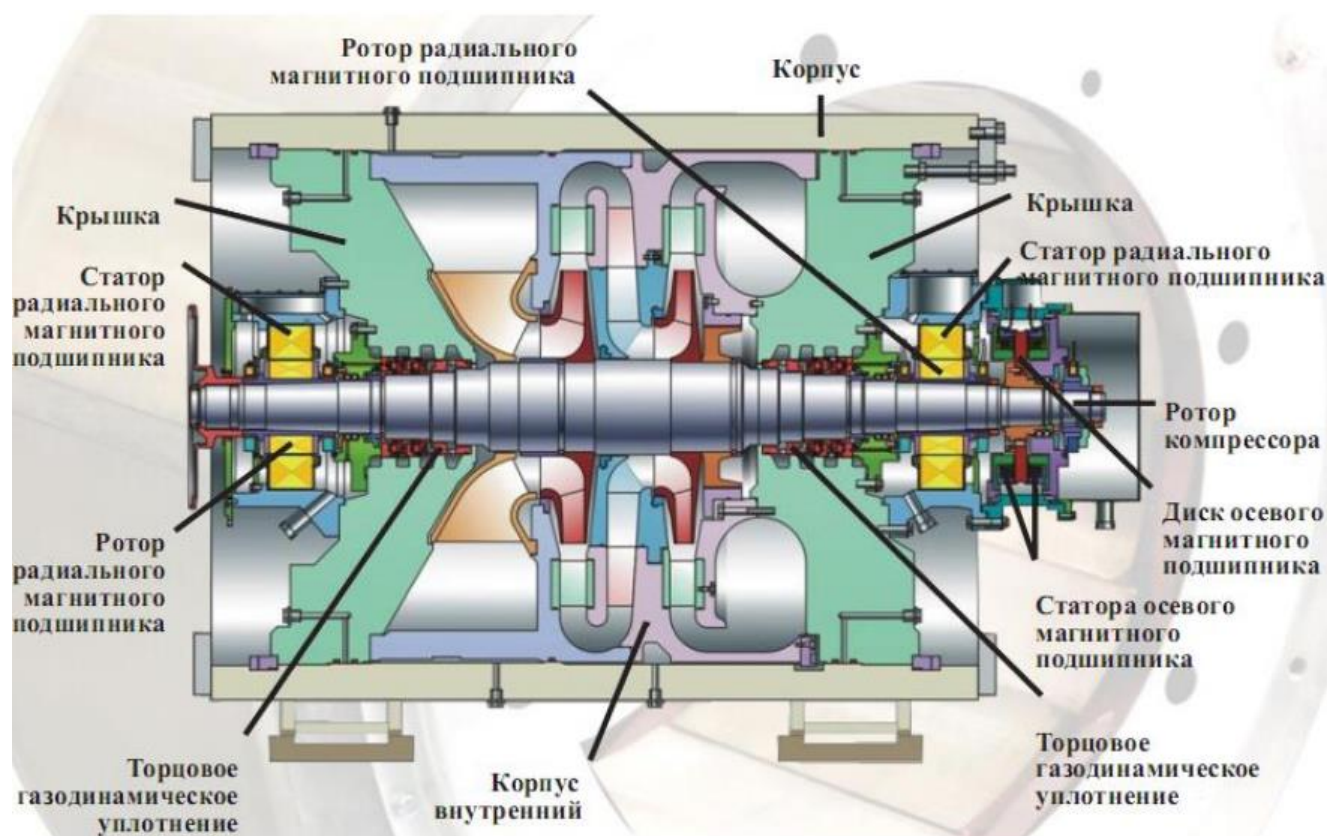


Рисунок 1.1 – Устройство центробежного компрессора ГПА с ЭМП

Каждый электромагнитный подшипник состоит из статора и ротора. Статоры осевого и радиальных подшипников представляет собой набор электромагнитов, которые закрепляются на статоре компрессора. Роторы радиальных электромагнитных подшипников и опорный диск осевого подшипника выполняют роль пассивных магнитов и закрепляются на роторе компрессора. Каждый радиальный электромагнитный подшипник имеет две оси x и y , на которых располагаются комплекты противоположных магнитов. Принцип работы магнитных подшипников основан на притяжении противоположными электромагнитами статора пассивных магнитов.

Основная особенность электромагнитного подшипника заключается в том, что он не может работать без системы управления, замкнутой по датчику положения ротора или иной системы позиционирования. Создание такой системы невозможно без знания линеаризованной математической модели ЭМП. Также следует отметить, что наиболее перспективным подходом при разработке регуляторов системы управления ЭМП, является метод, в основу которого положен математический аппарат передаточных функций [13].

1.2 Обзор линеаризованных математических моделей и передаточных функций электромагнитного подшипника как объекта управления

Полный обзор известных линеаризованных математических моделей сделан в целом ряде работ [14, 58, 62]. Поэтому остановимся на тех, которые наиболее близки к тому, что планируется сделать в диссертации, и являются основой для настоящей работы.

Наибольшее распространение получили две линеаризованные математические модели ЭМП как объекта управления, различаемые параметром, регулируемым системой управления. Первая модель (1.1), представленная линейным дифференциальным уравнением, приближенно описывает динамику объекта управления

и предполагает, что система управления в качестве регулируемого параметра, непосредственно задаёт токи электромагнитов [13]:

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} - c_y y = h_i I, \quad (1.1)$$

где $c_y = \frac{LI_c^2}{\delta^2}$ и $h_i = \frac{LI_c}{\delta}$ – конструктивные параметры подвеса; I_c – ток смещения;

δ – воздушный зазор между ротором и статором при центральном положении ротора; L – индуктивность обмотки электромагнита в положении равновесия; I – приращение тока при дифференциальном законе регулирования токов противоположных электромагнитов, когда увеличение тока в одном электромагните приводит к соответствующему уменьшению тока в другом; y – отклонение ротора от центрального положения по соответствующей оси.

Следует отметить, что математическая модель в виде выражения (1.1), не учитывает значительную инерционность электрических цепей обмоток электромагнитов, вызванную индуктивностью, а также имеет существенное допущение, предполагающее отсутствие насыщения магнитной системы электромагнитного подшипника.

Вторая модель, представленная системой уравнений (1.2), предполагает, что управляющее устройство осуществляет регулирование напряжений на обмотках противоположных электромагнитов, описывает динамику ЭМП как объекта управления следующим образом [13]:

$$\left. \begin{aligned} m \frac{d^2 y}{dt^2} - c_y y &= h_i I; \\ L \frac{dI}{dt} + \frac{h_i}{2} \frac{dy}{dt} + IR &= U, \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

где R – активное сопротивление обмотки электромагнита; U – приращение напряжения при дифференциальном законе регулирования.

Линеаризованные математические модели в виде (1.1) и (1.2) применяются, как правило, при синтезе регуляторов системы управления электромагнитных под-

шипников методом обратных задач динамики [13]. Однако существует линеаризованная математическая модель электромагнитного подшипника как объекты управления именно в виде передаточной функции [36, 58]:

$$W_{OY}(p) = \frac{y(p)}{N_{ШИМ}(p)} = \frac{k_{OY}(b_0 p + 1)}{a_0 p^4 + a_1 p^3 + a_2 p^2 + a_3 p - 1}, \quad (1.3)$$

$$\text{где } k_{OY} = \frac{k_{ШИМ} k_{ЭМ} U (I_{10} R_1 + I_{20} R_2)}{k_F R_1 R_2 (I_{10} + I_{20})^2}; \quad b_0 = \frac{I_{10} (R_1 T_1 + L_{21}) + I_{20} (R_2 T_2 + L_{12})}{I_{10} R_1 + I_{20} R_2};$$

$$a_0 = \frac{m}{k_F} \left(T_1 T_2 - \frac{L_{12} L_{21}}{R_1 R_2} \right); \quad a_1 = \frac{m (T_1 + T_2)}{k_F};$$

$$a_2 = \frac{m}{k_F} + \frac{k_{ЭМ} [I_{10} (k_{E2} R_1 T_1 + k_{E1} L_{21}) + I_{20} (k_{E1} R_2 T_2 + k_{E2} L_{12})]}{k_F R_1 R_2 (I_{10} + I_{20})^2} + \frac{L_{12} L_{21}}{R_1 R_2} - T_1 T_2;$$

$$a_3 = \frac{k_{ЭМ}}{k_F R_1 R_2} \frac{I_{10} k_{E2} R_1 + I_{20} k_{E1} R_2}{(I_{10} + I_{20})^2} - (T_1 + T_2);$$

I_{10} и I_{20} – начальные значения токов в рабочей точке; $T_1 = \frac{L_1}{R_1}$ и $T_2 = \frac{L_2}{R_2}$ – постоянные времени обмоток противоположных электромагнитов, вызванные собственными индуктивностями L_1 и L_2 ; R_1 и R_2 – активное сопротивление каждой из обмоток; L_{12} и L_{21} – коэффициенты взаимной индукции; $N_{ШИМ}$ – сигнал на входе широтно-импульсного модулятора, регулирующего выходное напряжение силового преобразователя; $k_{ШИМ}$ – коэффициент передачи широтно-импульсного модулятора; U – опорное напряжение широтно-импульсной модуляции; $k_{ЭМ}$ – коэффициент, связывающий силу, действующую на ротор, с соотношением токов в обмотках электромагнитов; k_F – коэффициент положительной обратной связи по перемещению; k_{E1} – коэффициент, связывающий наводимую э. д. с. в первом электромагните со скоростью перемещения ротора; k_{E2} – коэффициент, связывающий наводимую э. д. с. во втором электромагните со скоростью перемещения ротора; m – масса ротора, приходящаяся на один радиальный электромагнитный подшипник; p – комплексная переменная .

Математическая модель (1.3) справедлива для дифференциального закона регулирования напряжениями противоположных магнитов, любого соотношения начальных значений токов и пространственного положения ротора относительно центра магнитной системы. При центральном положении ротора и равенстве $I_{10} = I_{20}$ передаточная функция (1.3) упрощается [58]:

$$W_{Oy}(p) = \frac{x(p)}{N_{ШИМ}(p)} = \frac{k_{ШИМ}k_{ЭМ}}{k_F \left[\frac{mT_{\mathcal{E}}}{k_F} p^3 + \frac{m}{k_F} p^2 + \left(\frac{k_{ЭМ}k_E}{k_F U} - T_{\mathcal{E}} \right) p - 1 \right]}, \quad (1.4)$$

где $T_{\mathcal{E}} = \frac{L_1 - L_{12}}{R_1}$ – электромагнитная постоянная времени обмотки каждого магнита.

Именно передаточная функция (1.4) обычно используется при выборе типа и параметров настроек регуляторов электромагнитного подшипника методом структурно-параметрического синтеза систем управления неустойчивыми объектами [58]. Недостаток математической модели в виде передаточной функций (1.3) заключается в том, что она справедлива только для одного закона регулирования напряжений – дифференциального, а передаточная функция (1.4) довольно точно описывает процессы, протекающие в электромагнитном подшипнике, только при положении ротора в центре магнитной системы. Кроме того, при определении численных значений этих передаточных функций необходимо знание коэффициентов $k_{ШИМ}$, $k_{ЭМ}$ и k_F , величина которых не постоянна и зависит от положения ротора и величины токов управления. Значения этих коэффициентов рассчитываются по результатам моделирования магнитных полей ЭМП [29].

1.3 Основные принципы построения систем управления ЭМП

От выбора того или иного принципа построения систем управления электромагнитными подшипниками напрямую зависит быстрдействие ЭМП и, как след-

стве, величина его динамической и статической жесткости. Анализ трудов авторов [14, 58, 62], позволяет отметить ключевые подходы и принципы построения (реализации) систем управления ЭМП. Прежде всего следует выделить систему управления, разработанную АО «Корпорация «ВНИИЭМ» для нагнетателя газоперекачивающего агрегата ГПА Ц-16 [1] и его аналогов. Функциональная схема такой системы содержит индуктивный датчик положения ротора, фазочувствительный выпрямитель, пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) регулятор, компенсатор нелинейности, два усилителя мощности, регулирующие напряжения на противоположных электромагнитах ЭМ1 и ЭМ2 (рисунок 1.2).

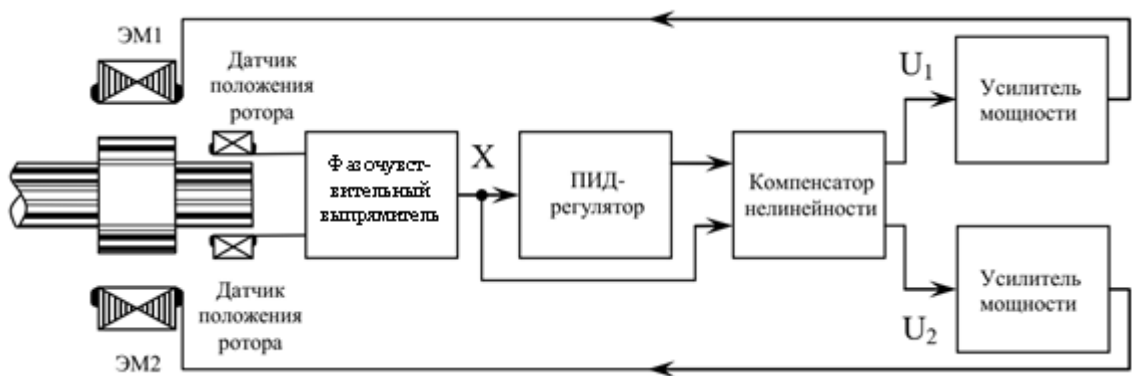


Рисунок 1.2 – Функциональная схема системы управления электромагнитным подшипником, разработанной АО «Корпорация «ВНИИЭМ»

Первоначально, такая система управления (СУ) была аналоговой, регуляторы реализовывались на операционных усилителях. В упрощенном варианте структурная схема такой СУ может быть представлена следующим образом (рисунок 1.3) [13].

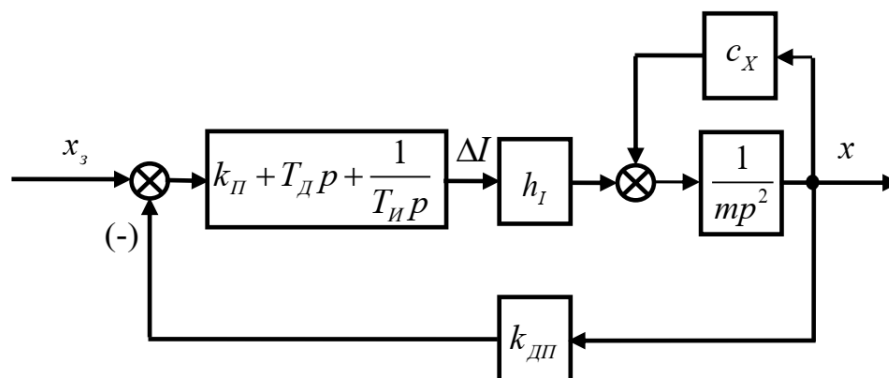


Рисунок 1.3 – Упрощенная структурная схема системы управления электромагнитным подшипником, представленной на рисунке 1.2

Данная схема (рисунок 1.3) содержит вновь введенные обозначения: k_{Π} и $k_{ДП}$ – коэффициенты передачи пропорциональной части ПИД регулятора и датчика положения, соответственно; T_{Π} и $T_{Д}$ – постоянные времени интегрирования и дифференцирования регулятора.

Дальнейшее совершенствование этой системы привело к появлению более сложной СУ, отличающейся от предыдущей наличием внутреннего контура тока с коэффициентом обратной связи $k_{ОСТ}$ и пропорционально-интегрально-дважды дифференциального (ПИДД) регулятора, что отражает приведенная структурная схема (рисунке 1.4) [1 – 13].

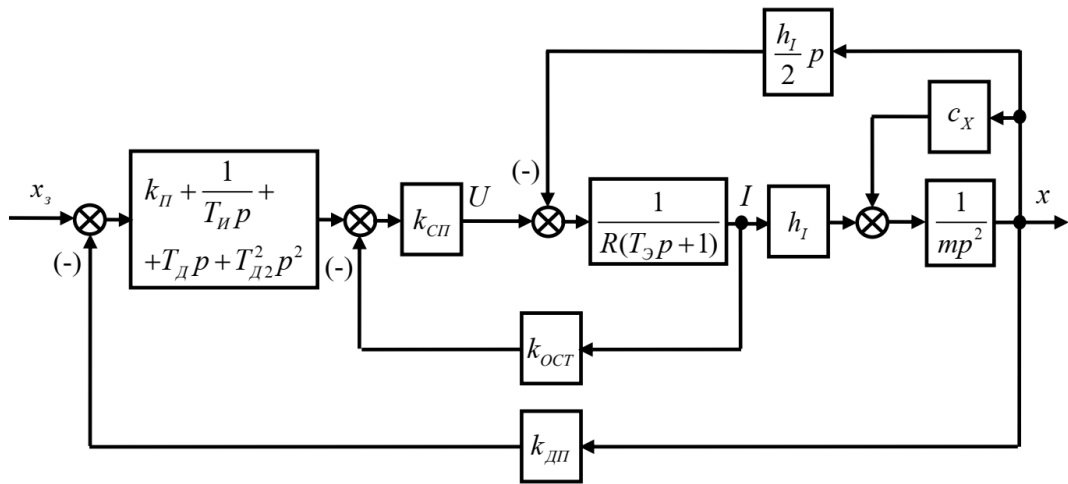


Рисунок 1.4 – Структурная схема системы управления электромагнитным подвешиванием с контуром тока и ПИДД регулятором

В системах, представленных на рисунках 1.3 и 1.4, параметры регуляторов выбираются с помощью применения метода обратных задач динамики.

Значительно отличается от рассмотренных выше цифровая система управления, разработанная для электромагнитного подвеса ротора электродвигателя 4А160S4У3 [58]. Функциональная схема такой системы содержит датчик положения ротора, интегральный регулятор, форсирующий регулятор второго порядка и силовой преобразователь, обеспечивающий реализацию дифференциального закона управления (рисунок 1.5) [49].

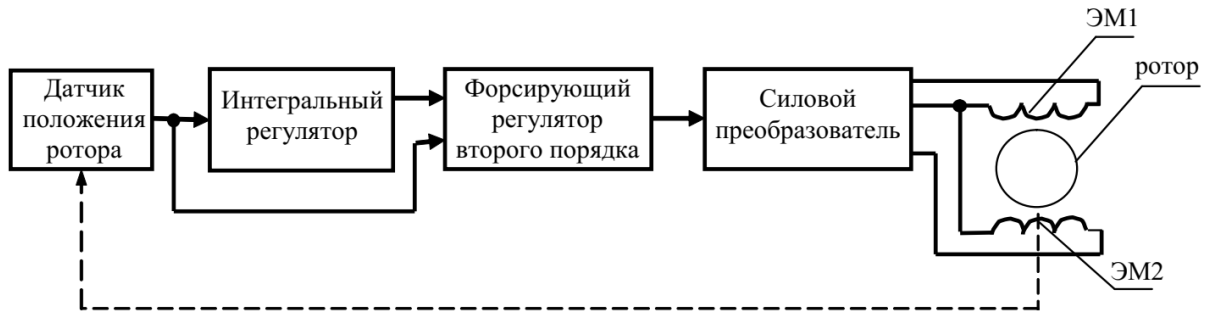


Рисунок 1.5 – Функциональная схема цифровой системы управления электромагнитным подшипником, разработанная для двигателя 4A160S4Y3

Структурная схема аналогового прототипа такой системы имеет вид (рисунок 1.6) [58].

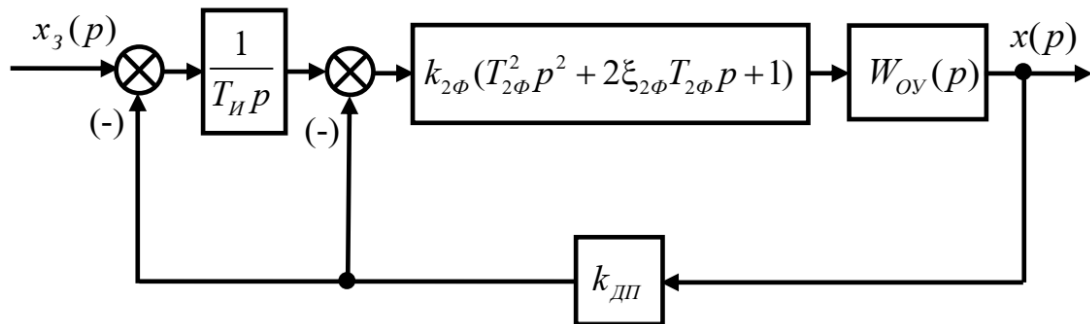


Рисунок 1.6 – Структурная схема аналогового прототипа цифровой системы управления электромагнитным подшипником, представленной на рисунке 1.5

Данная структурная схема содержит новые обозначения: $k_{2\phi}$ и $T_{2\phi}$ – коэффициент передачи форсирующего регулятора второго порядка и его постоянная времени. Методика выбора параметров регуляторов такой системы управления базируется на упрощенном представлении передаточной функции объекта управления $W_{ov}(p)$, а именно в пренебрежении коэффициентом обратной связи по перемещению. Такое упрощение приводит к погрешностям структурно-параметрического синтеза системы и регуляторов и снижению быстродействия.

Для повышения быстродействия и динамической жесткости электромагнитных подшипников в свое время была разработана трехконтурная система управления электромагнитными подшипниками (рисунок 1.7) [52].

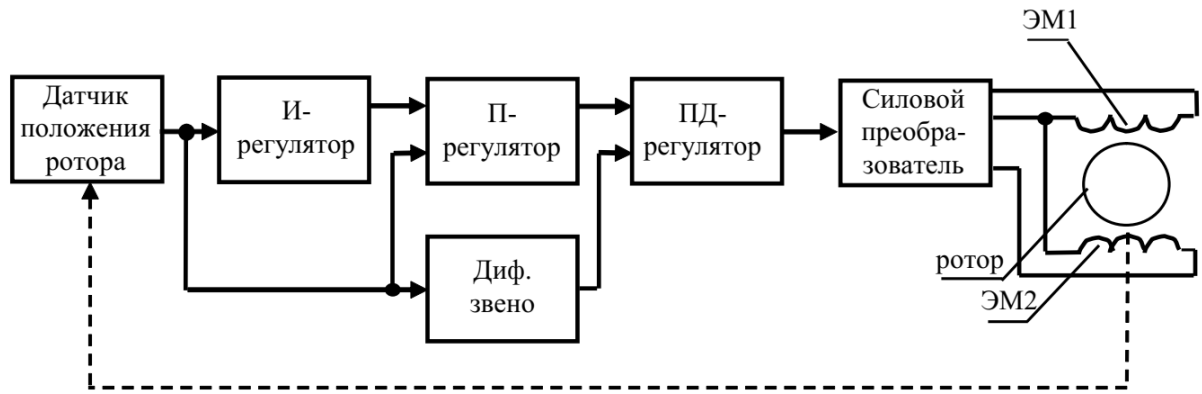


Рисунок 1.7 – Функциональная схема цифровой трехконтурной системы управления электромагнитным подшипником

Она кроме датчика положения ротора, интегрального (И) регулятора, силового преобразователя и электромагнитов ЭМ1 и ЭМ2 содержит дополнительно введенные пропорциональный (П) и пропорционально-дифференциальный (ПД) регуляторы, а также дифференцирующее звено, вычисляющее скорость перемещения ротора. Структурная схема аналогового прототипа цифровой трехконтурной системы управления электромагнитным подшипником приведена на рисунке 1.8 [58, 60, 62].

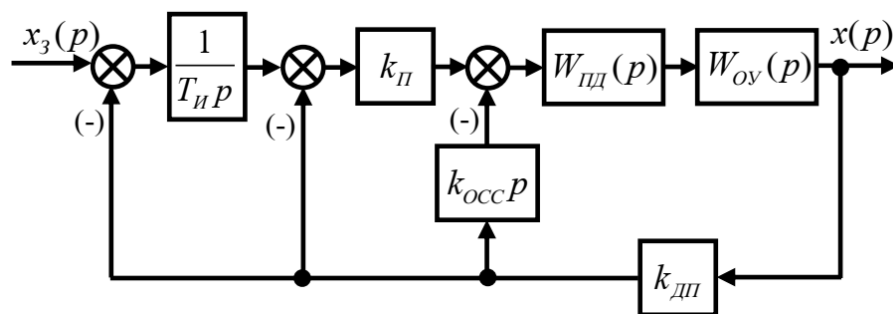


Рисунок 1.8 – Структурная схема аналогового прототипа цифровой трехконтурной системы управления электромагнитным подшипником

На структурной схеме введены дополнительно следующие обозначения: $k_{П}$ – коэффициент передачи пропорционального звена, $W_{ПД}(p)$ – передаточная функция ПД регулятора, $k_{ОСС}$ – коэффициент передачи обратной связи по скорости. Выбор параметров регуляторов трехконтурной системы управления электромагнитным

подшипником базируется на специально разработанной методике синтеза систем управления неустойчивыми объектами [58, 60, 62].

Основным недостатком всех перечисленных выше систем управления электромагнитными подшипниками является тот факт, что они предназначены для обеспечения работы в центре магнитной системы и, как правило, с дифференциальным законом регулирования напряжениями противоположных магнитов. Это приводит к недоиспользованию возможного эффекта перераспределения зазоров в верхнем и нижнем магнитах подшипника, производящего компенсацию веса ротора, и завышению потребления электрической энергии.

1.4 Дискретные математические модели ЭМП

Основу функционирования современных СУ ЭМП составляют цифровые технологии, причем для синтеза цифровых регуляторов, как правило, используется метод непрерывного прототипа [89], суть которого заключается в синтезе непрерывной системы с требуемыми параметрами и её последующей технической реализации на базе цифровой техники [58].

Для того, чтобы минимизировать затраты на техническую реализацию электромагнитных подшипников, необходимо на этапе проектирования цифровой системы управления определить требования к периоду замыкания программного цикла и вычислительной мощности выбираемого контроллера или микроконтроллера. Кроме того, также необходимо на этом этапе рассчитать достижимые показатели качества проектируемой цифровой системы управления электромагнитным подшипником. Это возможно сделать с помощью дискретных математических моделей электромагнитных подшипников, учитывающих способы регулирования напряжений и токов противоположных магнитов и принципы построения цифровой системы управления.

Дискретные модели можно получить благодаря использованию математического аппарата z -преобразований [89]. И прежде всего необходимо выделить дискретные математические модели электромагнитного подшипника как объекта

управления, которые входят в непрерывную часть цифровой системы управления и зависят от способа регулирования напряжений и токов противоположных магнитов.

В связи с этим, необходимо отметить известную дискретную математическую модель электромагнитного подшипника как объекта управления в виде дискретной передаточной функции [13]:

$$H(z) = \frac{x(z)}{I(z)} = \frac{(chT' - 1)(z + 1)}{z^2 - (2chT')z + 1}, \quad (1.5)$$

где $T' = \frac{T\sqrt{c_x}}{\sqrt{m}}$; T – период квантования по времени, $z = e^{pT}$ – комплексная переменная.

Дискретная математическая модель (1.5) справедлива для самого простого случая дифференциального регулирования токов противоположных магнитов и поэтому мало применяется на практике.

Достаточно точно описывает динамику ЭМП, как непрерывного объекта цифровой СУ, следующая известная дискретная передаточная функция [58, 61, 62]:

$$W_0(z) = \frac{a_1 z^2 + b_1 z + c_1}{z^3 - (d_1 + 2d_2 \cos \beta T)z^2 + (d_2^2 + 2d_1 d_2 \cos \beta T)z - d_1 d_2^2}, \quad (1.6)$$

где

$$a_1 = \frac{k_{OV} \left\{ (d_1 - 1)T_{HA}^2 - (1 - d_2 \cos \beta T)(2\xi_K T_K T_{HA} + T_K^2) + \frac{d_2 \sin \beta T}{\beta} [\xi_K T_K + (1 - \xi_K^2)T_{HA}] \right\}}{2\xi_K T_K T_{HA} + T_{HA}^2 + T_K^2};$$

$$b_1 = \frac{k_{OV} \left\{ 2d_2(1 - d_1)T_{HA}^2 \cos \beta T + (d_1 + d_2 \cos \beta T - d_2^2 - d_1 d_2 \cos \beta T) \times \right. \\ \left. \times (2\xi_K T_K T_{HA} + T_K^2) - \frac{(1 + d_1)d_2 \sin \beta T}{\beta} [\xi_K T_K + (1 - \xi_K^2)T_{HA}] \right\}}{2\xi_K T_K T_{HA} + T_{HA}^2 + T_K^2};$$

$$c_1 = \frac{k_{OV} \left\{ d_2^2 (d_1 - 1) T_{HA}^2 + d_1 d_2 (d_2 - \cos \beta T) (2 \xi_K T_K T_{HA} + T_K^2) + \frac{d_1 d_2 \sin \beta T}{\beta} \left[\xi_K T_K + (1 - \xi_K^2) T_{HA} \right] \right\}}{2 \xi_K T_K T_{HA} + T_{HA}^2 + T_K^2};$$

$$d_1 = e^{\frac{T}{T_{HA}}}; d_2 = e^{-\frac{\xi_K T}{T_K}}; \beta = \frac{\sqrt{1 - \xi_K^2}}{T_K}.$$

Следует отметить, что определение постоянных времени T_{HA} и T_K , а также коэффициента демпфирования колебательного звена ξ_K осуществляется путем разложения на элементарные динамические звенья непрерывной передаточной функции, представленной выражением (1.4).

Главный недостаток дискретной передаточной функции (1.6) заключается в том, что она справедлива только для центрального положения ротора, когда индуктивности и постоянные времени цепей противоположных магнитов равны между собой, и для дифференциального закона регулирования напряжений.

Дискретная математическая модель собственно цифровой системы управления электромагнитным подшипником также может быть представлена дискретной передаточной функцией, которая определяется по структурной схеме и включает в себя дискретные передаточные функции регуляторов и непрерывной части системы. Примером может служить структурная схема цифровой трехконтурной системы, рассмотренной выше (рисунок 1.9) [58, 62], с помощью которой, принимая во внимание формулу (1.6), была получена дискретная передаточная функция цифровой трехконтурной системы управления электромагнитным подшипником [58, 62]:

$$W_{312}(z) = \frac{x(z)}{x_3(z)} = \frac{b_{012}z^5 + b_{112}z^4 + b_{212}z^3 + b_{312}z^2}{z^6 + a_{112}z^5 + a_{212}z^4 + a_{312}z^3 + a_{412}z^2 + a_{512}z + a_{612}}, \quad (1.7)$$

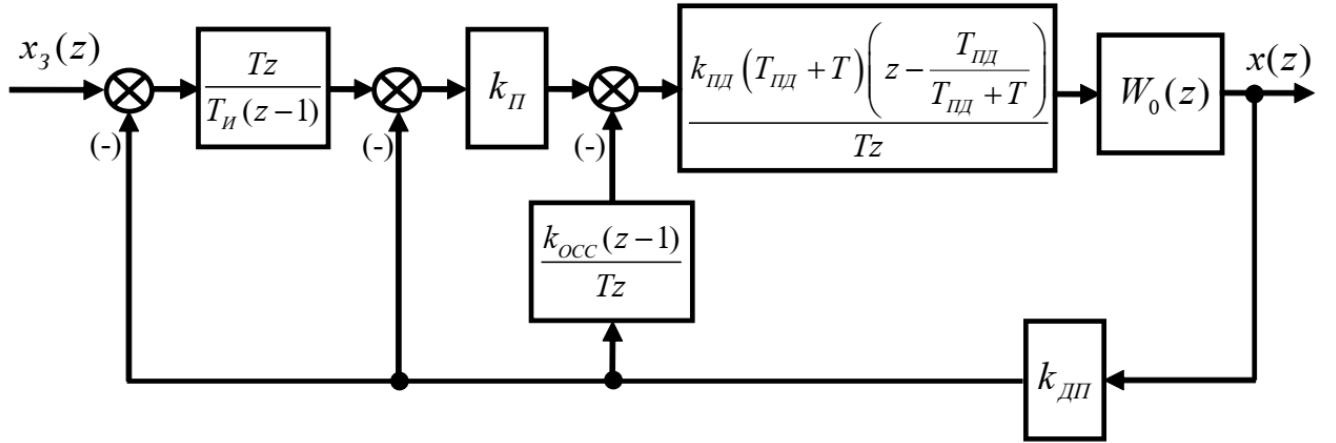


Рисунок 1.9 – Структурная схема цифровой трехконтурной системы управления электромагнитным подшипником при переходе к дискретным передаточным функциям

$$\text{где } b_{012} = \frac{k_{222} a_1 (T_{IID} + T)}{k_{ДИ} T_I}; \quad b_{112} = \frac{k_{222}}{k_{ДИ} T_I} [(b_1 - a_1) T_{IID} + b_1 T]; \quad k_{111} = k_{IID} k_{OCC} k_{ДИ};$$

$$b_{212} = -\frac{k_{222}}{k_{ДИ} T_I} [(b_1 - c_1) T_{IID} - c_1 T]; \quad b_{312} = -\frac{k_{222} c_1 T_{IID}}{k_{ДИ} T_I}; \quad k_{222} = k_{II} k_{IID} k_{ДИ};$$

$$a_{112} = -\left[1 + d_1 + 2d_2 \cos \beta T - \frac{(k_{111} + k_{222} T) a_1 (T_{IID} + T)}{T^2} - \frac{k_{222} a_1 (T_{IID} + T)}{T_I} \right];$$

$$a_{212} = d_1 + d_2^2 + 2(d_1 + 1)d_2 \cos \beta T + \frac{k_{111} [(b_1 - 3a_1) T_{IID} + (b_1 - 2a_1) T]}{T^2} +$$

$$+ \frac{k_{222} [(b_1 - 2a_1) T_{IID} + (b_1 - a_1) T]}{T} + \frac{k_{222} [(b_1 - a_1) T_{IID} + b_1 T]}{T_I};$$

$$a_{312} = -\left\{ \frac{(d_1 + 1)d_2^2 + 2d_1 d_2 \cos \beta T + \frac{k_{111} [(3b_1 - 3a_1 - c_1) T_{IID} + (2b_1 - a_1 - c_1) T]}{T^2}}{T^2} + \right.$$

$$\left. + \frac{k_{222} [(2b_1 - a_1 - c_1) T_{IID} + (b_1 - c_1) T]}{T} + \frac{k_{222} [(b_1 - c_1) T_{IID} - c_1 T]}{T_I} \right\};$$

$$\begin{aligned}
a_{412} &= d_1 d_2^2 + \frac{k_{111} [(3b_1 - a_1 - 3c_1)T_{\text{ПД}} + (b_1 - 2c_1)T]}{T^2} + \\
&+ \frac{k_{222} [(b_1 - 2c_1)T_{\text{ПД}} - c_1 T]}{T} - \frac{k_{222} c_1 T_{\text{ПД}}}{T_{\text{И}}} ; \\
a_{512} &= - \left\{ \frac{k_{111} [(b_1 - 3c_1)T_{\text{ПД}} - c_1 T]}{T^2} - \frac{k_{222} c_1 T_{\text{ПД}}}{T} \right\} ; a_{612} = - \frac{k_{111} c_1 T_{\text{ПД}}}{T^2} .
\end{aligned}$$

Дискретная математическая модель, представленная выражением (1.7), позволяет на этапе проектирования определить требования к периоду дискретизации по времени и достижимые показатели качества регулирования в цифровой системе управления электромагнитным подшипником. Однако недостаток дискретной математической модели в виде передаточной функции (1.7) заключается в том, что она также, как и формула (1.6), справедлива только для центрального положения ротора, и для дифференциального закона регулирования напряжений.

1.5 Цель и задачи диссертационной работы

Анализ проблем, существующих при создании электромагнитных подшипников, а также обзор известных математических моделей и систем управления магнитными опорами позволил сформулировать цель и задачи диссертационной работы.

Цель исследования – разработка электромагнитных подшипников с отдельным независимым регулированием напряжений противоположных магнитов, обеспечивающих повышение жесткости опор и снижение потребления электрической энергии.

Для достижения поставленной цели сформулирован следующий перечень задач:

1. Определение величины смещения центра магнитной системы радиального электромагнитного подшипника, компенсирующего в номинальном режиме вес ротора и обеспечивающего снижение потребляемой мощности.

2. Анализ устойчивости и работоспособности системы управления электромагнитным подшипником при смещении оси вращения и вариации напряжения питания.

3. Разработка линеаризованной математической модели электромагнитного подшипника при раздельном управлении напряжениями противоположных магнитов и смещении оси вращения ротора относительно центра магнитной системы.

4. Разработка цифровой системы управления магнитным подвесом ротора и его дискретной математической модели для раздельного регулирования напряжений противоположных магнитов и учитывающих смещение оси вращения относительно центра магнитной системы.

1.6 Выводы по первой главе

1. Известные линеаризованные математические модели электромагнитных подшипников как объектов управления разработаны для дифференциального закона регулирования напряжений или токов противоположных магнитов.

2. Существующие принципы построения систем управления электромагнитными подшипниками предназначены для обеспечения работы в центре магнитной системы и не позволяют использовать эффект перераспределения зазоров в верхнем и нижнем магнитах подшипника с целью экономии потребляемой электрической энергии.

3. Известные дискретные математические модели цифровых систем управления электромагнитными подшипниками справедливы только для центрального положения ротора и для дифференциального закона регулирования напряжений. Эти модели не предназначены для описания процессов при эксцентрическом положении оси ротора радиального подшипника.

4. Обзор известных математических моделей и систем управления электромагнитными подшипниками позволил сформулировать цели и задачи диссертации.

ГЛАВА 2 ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭМП

Многие механизмы, использующие электромагнитные подвесы, имеют горизонтальную ось вращения, которая не меняет свое положение в рабочем режиме. Часто в таких устройствах основную долю механической нагрузки на радиальные ЭМП составляет вес ротора механизма. Динамические нагрузки, вызванные внешними причинами (механический и аэродинамический дисбалансы и др.), например, в системе электромагнитного подвеса ротора компрессоров газонагнетателей магистральных газопроводов ГПА Ц-16 и Ц-32 не превышают 2 и 5 кН при весе роторов 10 и 16 кН, соответственно [107, 109]. Однако, как правило, электромагнитная система подшипников выполняется симметричной и настраивается на центральное положение оси ротора. Вследствие чего, верхние электромагниты в номинальном режиме постоянно нагружены большим током, чем нижние. Это приводит к дополнительным потерям электрической мощности в верхних электромагнитах. Кроме того, из-за несимметрии магнитного поля в зазоре, в роторе радиальных ЭМП появляются добавочные магнитные потери от вихревых токов, которые приводят к дополнительному нагреву активной части магнитов.

В настоящей диссертационной работе ставится задача снижения энергопотребления обмотками радиальных ЭМП за счет предварительного смещения ротора вверх по оси ординат по принципу, изложенному в патенте РФ № 2831082 [103], полученному в соавторстве с А.В. Стариковым и Ю.А. Макаричевым.

Техническая реализация данной идеи связана с рядом теоретических проблем, заключающихся в отсутствии адекватной математической модели радиального ЭМП и системы ее практической реализации. Кроме того, необходимо обосновать рациональную величину предварительного смещения оси ротора в функции параметров в общем виде и для конкретных механизмов. Решение этих задач предлагается в настоящей главе диссертационной работы.

2.1 Определение величины смещения центра магнитной системы электромагнитного подшипника относительно оси вращения ротора, обеспечивающей компенсацию веса ротора при равных токах электромагнитов

Допустим, что ротор какого-либо агрегата, например, газоперекачивающего, с электромагнитными опорами расположен горизонтально. Тогда вся сила веса ротора будет воздействовать на радиальные электромагнитные подшипники. В связи с этим рассмотрим расчетную схему радиального электромагнитного подшипника (рисунок 2.1).

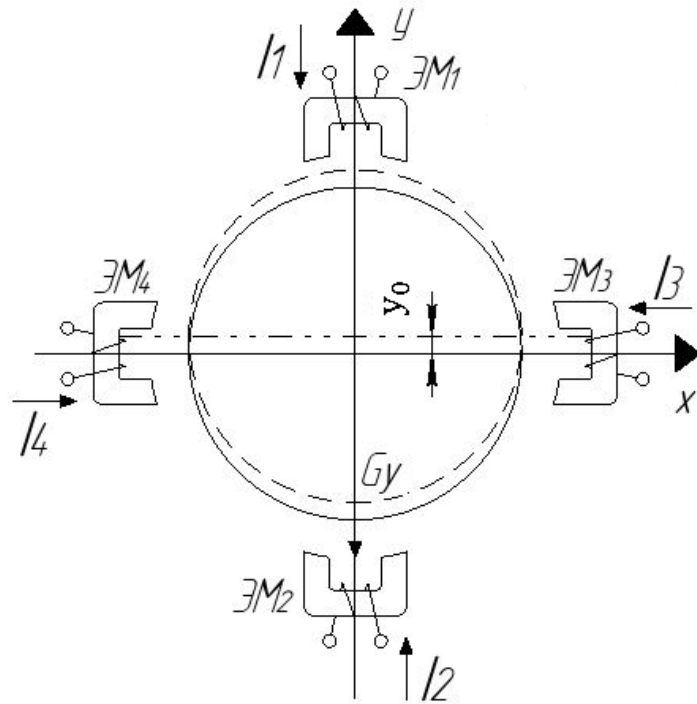


Рисунок 2.1 – Расчетная схема радиального электромагнитного подшипника с учетом смещения центра магнитной системы относительно оси вращения

Каждый радиальный электромагнитный подшипник имеет две пары электромагнитов: ЭМ1 и ЭМ2 по оси y и ЭМ3 и ЭМ4 по оси x . Катушки электромагнитов запитываются системой напряжений, обеспечивающей протекание в них токов I_1 , I_2 , I_3 и I_4 . При этом каждый электромагнит, расположенный на статоре агрегата,

работает на притяжение ротора электромагнитного подшипника, закрепленного на вращающемся валу.

На первом этапе предположим, что ось x расположена горизонтально, а ось y – вертикально. Тогда вся сила веса ротора будет прикладываться к электромагнитам ЭМ1 и ЭМ2. При этом движение ротора в поле электромагнитов по оси y будет описываться системой уравнений [13]:

$$\left. \begin{aligned} m \frac{d^2 y}{dt^2} &= k_{FI} \left[\frac{I_1^2}{(\delta - y)^2} - \frac{I_2^2}{(\delta + y)^2} \right] - G_y + F_{ey}; \\ U_1 &= R_1 I_1 + \frac{2k_{FI}}{\delta - y} \frac{dI_1}{dt} + \frac{2k_{FI} I_1}{(\delta - y)^2} \frac{dy}{dt}; \\ U_2 &= R_2 I_2 + \frac{2k_{FI}}{\delta + y} \frac{dI_2}{dt} - \frac{2k_{FI} I_2}{(\delta + y)^2} \frac{dy}{dt}, \end{aligned} \right\}, \quad (2.1)$$

где $k_{FI} = \frac{F_{эм0} \delta^2}{I_{100}^2 - I_{200}^2}$ – конструктивный коэффициент электромагнитного подшипника; I_1 и I_2 – токи в обмотках противоположных электромагнитов; δ – зазор между статором и ротором при расположении ротора в центре магнитной системы; I_{100} и I_{200} – значения токов первого и второго электромагнитов, при которых создается сила $F_{эм0}$, действующая на ротор в центральном положении; y – перемещение ротора относительно центра магнитной системы по соответствующей оси подшипника; G_y – сила веса, приходящаяся на одну ось подшипника; F_{ey} – возмущающая внешняя сила, действующая по оси y ; R_1 и R_2 – активное сопротивление каждой из обмоток; U_1 и U_2 – напряжения, подаваемые на обмотки электромагнитов ЭМ1 и ЭМ2; m – масса ротора, приходящаяся на одну ось; g – ускорение свободного падения; t – время.

Система уравнений (2.1) записана для допущения, что индукция в воздушном зазоре прямо пропорциональна квадратам токов в катушках. Нелинейность, вызванная насыщением магнитной цепи ЭМП учитывается переменным значением коэффициента k_{FI} .

При отсутствии внешней возмущающей силы F_{gy} , первое уравнение в системе (2.1) можно записать следующим образом [90]:

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = k_{FI} \left[\frac{I_1^2}{(\delta - y)^2} - \frac{I_2^2}{(\delta + y)^2} \right] - G_y \quad (2.2)$$

Анализ уравнения (2.2) показывает, что величина силы, действующей на ротор, зависит как от соотношения токов в противоположных электромагнитах, так и от смещения ротора от центра магнитной системы. Это позволяет предложить способ компенсации веса ротора за счет смещения центра магнитной системы относительно оси вращения. Причем за рациональное смещение примем величину y_0 , при которой ротор будет удерживаться в равновесии при равных значениях токов в противоположных электромагнитах $I_1 = I_2$, что, как будет показано ниже, соответствует минимуму потребляемой мощности при прочих равных условиях.

Уравнение (2.2) в статическом режиме при $\frac{d^2 y}{dt^2} = 0$, дифференциальном законе регулирования напряжений, равенстве сопротивлений $R_1 = R_2 = R$, равенстве токов в противоположных магнитах $I_1 = I_2 = \frac{U}{2R}$ и смещении ротора относительно центра на величину y_0 примет вид [90]:

$$k_{FI} \left[\frac{U^2}{4R^2 (\delta - y_0)^2} - \frac{U^2}{4R^2 (\delta + y_0)^2} \right] - mg = 0, \quad (2.3)$$

где U – опорное напряжение питания электромагнитов.

Решение уравнения (2.3) позволяет найти величину смещения центра магнитной системы, при которой сила веса, приходящаяся на одну ось подшипника, будет полностью скомпенсирована за счет перераспределения зазоров между ротором и противоположными магнитами. При этом будут наблюдаться равные токи в противоположных электромагнитах, управляемых по дифференциальному закону [13, 58].

Уравнение (2.3) преобразуем к виду [90]:

$$\frac{k_{FI}U^2}{4R^2mg} \left[\frac{(\delta + y_0)^2 - (\delta - y_0)^2}{(\delta - y_0)^2 (\delta + y_0)^2} \right] = 1. \quad (2.4)$$

Путём несложных алгебраических преобразований из уравнения (2.4) получим выражение, связывающее смещение y_0 центра магнитной системы с параметрами электромагнитов и частью массы ротора, приходящейся на одну ось [90]:

$$y_0^4 + d_1 y_0^2 + d_2 y_0 + d_3 = 0, \quad (2.5)$$

где $d_1 = -2\delta^2$; $d_2 = -\frac{k_{FI}U^2\delta}{R^2mg}$; $d_3 = \delta^4$.

Выражение (2.5) представляет собой неполное уравнение четвертого порядка, корни которого в соответствии с решением Декарта-Эйлера можно найти следующим образом [91]:

$$y_{0(1,2,3,4)} = \pm\sqrt{v_1} \pm \sqrt{v_2} \pm \sqrt{v_3}. \quad (2.6)$$

Здесь v_1 , v_2 и v_3 – корни кубического уравнения:

$$v^3 + av^2 + bv + c = 0, \quad (2.7)$$

где $a = \frac{d_1}{2}$; $b = \frac{d_1^2 - 4d_3}{16}$; $c = -\frac{d_2^2}{64}$.

Корни уравнения (2.7) определим с помощью решения Кардано [92]:

$$v_1 = A + B - \frac{a}{3}; v_{2,3} = -\frac{A+B}{2} - \frac{a}{3} \pm j\frac{\sqrt{3}}{2}(A-B), \quad (2.8)$$

где $A = \sqrt[3]{-\frac{1}{2}\left(\frac{2a^3}{9} - \frac{ab}{3} + c\right) + \sqrt{Q}}$; $B = \sqrt[3]{-\frac{1}{2}\left(\frac{2a^3}{9} - \frac{ab}{3} + c\right) - \sqrt{Q}}$;

$$Q = \frac{1}{27}\left(b - \frac{a^3}{3}\right)^3 + \frac{1}{4}\left(\frac{2a^3}{9} - \frac{ab}{3} + c\right)^2.$$

Осуществляя подстановку в переменные A , B и Q значений a , b и c , выраженных через коэффициенты d_1 , d_2 и d_3 , получим [90]:

$$A = \sqrt[3]{\frac{\delta^6}{27} + \frac{k_{FI}^2 U^4 \delta^2}{128R^4 m^2 g^2} + \sqrt{\frac{k_{FI}^4 U^8 \delta^4}{16384R^8 m^4 g^4} + \frac{k_{FI}^2 U^4 \delta^8}{1728R^4 m^2 g^2}}}; \quad (2.9)$$

$$B = \sqrt[3]{\frac{\delta^6}{27} + \frac{k_{FI}^2 U^4 \delta^2}{128 R^4 m^2 g^2}} - \sqrt{\frac{k_{FI}^4 U^8 \delta^4}{16384 R^8 m^4 g^4} + \frac{k_{FI}^2 U^4 \delta^8}{1728 R^4 m^2 g^2}}. \quad (2.10)$$

С учетом того, что $a = -\delta^2$, выражения (2.6) – (2.10) позволяют найти величину смещения центра магнитной системы электромагнитного подшипника относительно оси вращения, которая рассчитывается по формуле [90]:

$$y_0 = \sqrt{v_1} - \sqrt{v_2} - \sqrt{v_3}. \quad (2.11)$$

Выражение (2.11) получено из анализа корней (2.6) и физического смысла решаемой задачи. Именно такое сочетание знаков в (2.11) дает положительный действительный корень уравнения (2.5).

Необходимо отметить, что корни $v_{2,3}$ являются комплексно-сопряженными:

$$v_{2,3} = \alpha \pm j\beta,$$

где $\alpha = -\left(\frac{A+B}{2} + \frac{a}{3}\right)$; $\beta = \frac{\sqrt{3}}{2}(A-B)$.

Для расчёта в (2.11) $\sqrt{v_2}$ и $\sqrt{v_3}$ без применения специализированных программных продуктов, таких как MathCAD, можно воспользоваться следующими формулами [90]:

$$\sqrt{v_2} = \alpha_1 + j\beta_1; \quad \sqrt{v_3} = \alpha_1 - j\beta_1,$$

где $\alpha_1 = \sqrt{\frac{\alpha}{2} + \sqrt{\frac{\alpha^2 + \beta^2}{4}}}$; $\beta_1 = \frac{\beta}{2\alpha_1}$.

Иногда для расчета величины смещения центра магнитной системы электромагнитного подшипника относительно оси вращения более удобно пользоваться следующими формулами для определения коэффициентов A и B , выраженные через ток $I = I_1 = I_2$ [93]:

$$A = \sqrt[3]{\frac{\delta^6}{27} + \frac{k_{FI}^2 I^4 \delta^2}{8 m^2 g^2}} + \sqrt{\frac{k_{FI}^4 I^8 \delta^4}{64 m^4 g^4} + \frac{k_{FI}^2 I^4 \delta^8}{108 m^2 g^2}};$$

$$B = \sqrt[3]{\frac{\delta^6}{27} + \frac{k_{FI}^2 I^4 \delta^2}{8 m^2 g^2}} - \sqrt{\frac{k_{FI}^4 I^8 \delta^4}{64 m^4 g^4} + \frac{k_{FI}^2 I^4 \delta^8}{108 m^2 g^2}}.$$

Потребляемая электрическая мощность парой противоположных катушек радиального ЭМП пропорциональна сумме квадратов их токов. Очевидно, что минимум этих потерь соответствует, при дифференциальном законе управления, равенству токов в противоположных катушках. На рис. 2.2 это иллюстрируется кривой 1 графика зависимости потерь в функции коэффициента токов $k=I_1/I_2$. Все величины выражены в относительных значениях. Базовые величины соответствуют номинальному усилию при центральном положении ротора.

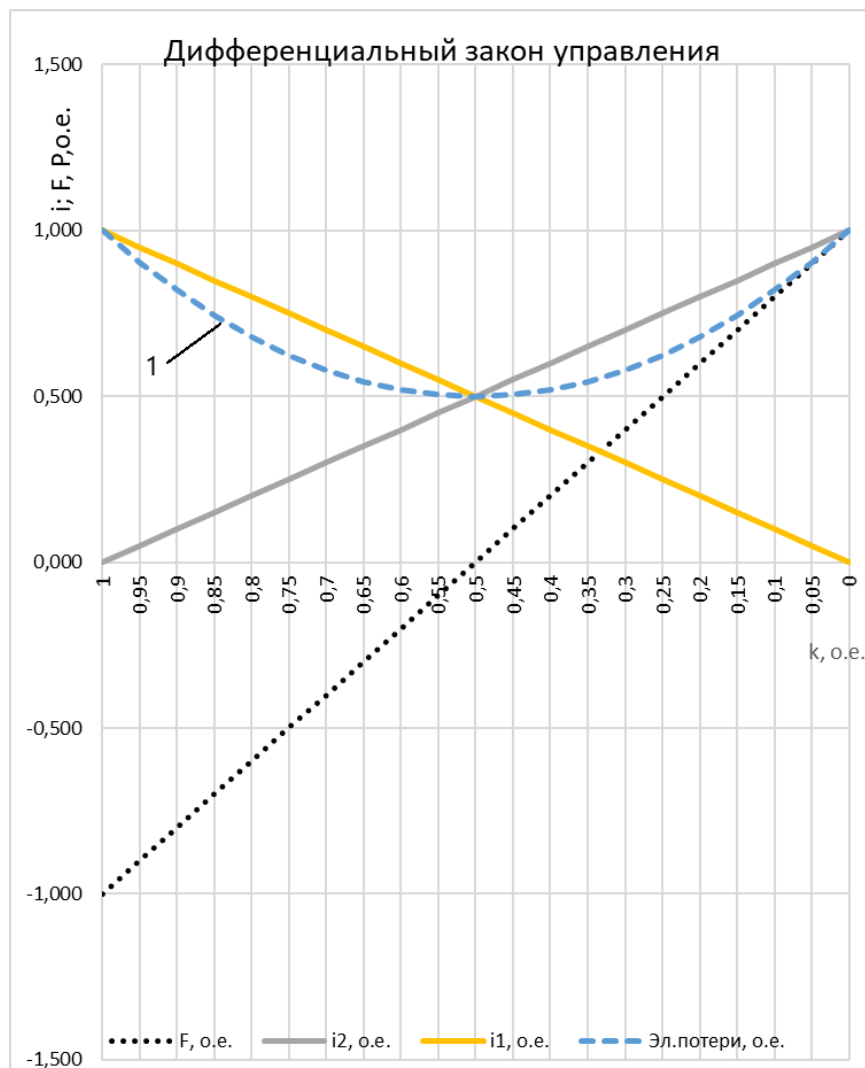


Рисунок 2.2 – Графики зависимости токов противоположных магнитов I_1 , I_2 , результирующего усилия F , электрических потерь P от коэффициента соотношения токов k . Все величины в о.е.

Для идеального варианта, равенство токов снижает мощность потребления катушками ровно в два раза, по сравнению с граничным соотношением, когда ток в верхней катушке максимальный, а в нижней равен нулю. Однако, на практике такого результата достичь не удастся из-за нелинейности магнитной системы радиального ЭМП и обеспечения обязательного при практической реализации коэффициента запаса по номинальному усилию. Как будет показано ниже, с учетом обеспечения устойчивости системы, при предварительном смещении оси ротора удастся снизить электрическую мощность потребления на величину не более 30%.

Другой подход к определению величины смещения центра магнитной системы для принятых условий, заключается в использовании математического описания процесса движения ротора в поле электромагнитов. При дифференциальном законе управления напряжениями на катушках противоположных электромагнитах справедливо следующее уравнение [36, 58]:

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = k_{эм} \left(\frac{I_1}{I_1 + I_2} - 0,5 \right) + k_F y - G_y, \quad (2.12)$$

$k_{эм}$ – коэффициент, связывающий силу, действующую на ротор, с токами I_1 и I_2 ;
 k_F – коэффициент положительной обратной связи по перемещению.

В статике при $I_1 = I_2$ из (2.12) вытекает простая зависимость величины смещения центра магнитной системы от силы веса, приходящейся на одну ось электромагнитного подшипника [90]:

$$y_0 = \frac{G_y}{k_F} = \frac{mg}{k_F}. \quad (2.13)$$

Решение (2.13) является более простым, но следует учитывать, что величина k_F изменяет свою величину в зависимости от перемещения. Получение достоверных значений коэффициентов $k_{эм}$ и k_F осуществляется методом математического моделирования магнитных полей электромагнитного подшипника в специализированных программных продуктах и средах.

2.2 Примеры расчёта величины смещения центра магнитной системы радиальных электромагнитных подшипников

Для проверки адекватности ранее полученных выражений произведем расчет величин смещения центра магнитной системы радиальных электромагнитных подшипников для двух различных агрегатов: опытного образца турбоагнетателя 6ТК-Э дизеля локомотива [29] и агнетателя газоперекачивающего агрегата ГПА Ц-16.

В опытном образце турбоагнетателя 6ТК-Э масса ротора, приходящаяся на один электромагнитный подшипник, составляет $m = 18$ кг, а опорное напряжение широтно-импульсного преобразователя равно $U = 60$ В. При центральном положении ротора электромагниты характеризуются следующими параметрами: $R = R_1 = R_2 = 96,6$ Ом, $k_{эм} = 1272$ Н, $k_F = 1424000$ Н/м, номинальный зазор между статором и ротором $\delta = 0,5$ мм.

Расчет по формуле (2.13) показывает, что рациональная величина смещения центра магнитной системы должна быть равна [90]:

$$y_0 = \frac{18 \cdot 9,81}{1424000} = 124 \cdot 10^{-6} \text{ м} = 124 \text{ мкм}. \quad (2.14)$$

Для расчета величины смещения по формулам (2.7) – (2.11) необходимо найти коэффициент k_{FI} , который определяется из результатов моделирования электромагнитного подшипника при вариации соотношений токов в противоположных электромагнитах [29]:

$$k_{FI} = \frac{F_{эм0} \delta^2}{I_{100}^2 - I_{200}^2}. \quad (2.15)$$

Результаты моделирования, приведенные в [29], показывают, что при $I_{100} = 0,373$ А и $I_{200} = 0,248$ А сила, действующая на ротор, равна $F_{эм0} = 127,2$ Н. Следовательно, в соответствии с формулой (2.15):

$$k_{FI} = \frac{127,2 \cdot (5 \cdot 10^{-6})^2}{(0,373)^2 - (0,248)^2} = 4,121 \cdot 10^{-4} \text{ Нм}^2/\text{А}^2. \quad (2.16)$$

С учётом найденного значения коэффициента k_{Fl} , определим требуемую величину смещения центра магнитной системы рассматриваемого радиального электромагнитного подшипника турбоагнетателя БТК-Э по формулам (2.7) – (2.11). При этом получаются следующие результаты:

$$Q = 4,3406 \cdot 10^{-42}, \quad A = 1,6193 \cdot 10^{-7}, \quad B = 4,2887 \cdot 10^{-8}, \quad a = -2,5 \cdot 10^{-7}.$$

Величина Q пренебрежимо мала.

$$v_1 = 2,8815 \cdot 10^{-7}, \quad v_2 = -1,9073 \cdot 10^{-8} + j1,0309 \cdot 10^{-7}, \quad v_2 = -1,9073 \cdot 10^{-8} - j1,0309 \cdot 10^{-7}.$$

Таким образом, смещение центра магнитной системы радиального электромагнитного подшипника, обеспечивающее компенсацию веса ротора при симметричных токах катушек, для турбоагнетателя БТК-Э в соответствии с формулой (2.11) должно составлять:

$$y_0 = \sqrt{2,8815 \cdot 10^{-7}} - \sqrt{-1,9073 \cdot 10^{-8} + j1,0309 \cdot 10^{-7}} - \sqrt{-1,9073 \cdot 10^{-8} - j1,0309 \cdot 10^{-7}} = 122,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}, \quad (2.17)$$

или 122,6 мкм.

Результаты, полученные по выражениям (2.13) и (2.16), различаются незначительно. Величина расхождения составила 1,4 мкм, что не превышает 1,2%. Необходимо отметить, что полученный результат полностью совпадает с результатами численного моделирования радиальных подшипников турбоагнетателя БТК-Э [29].

Однако, приведенный пример подразумевает, что ось y расположена вертикально. В то же время в радиальных электромагнитных подшипниках принято поворачивать систему координат на 45 угловых градусов для того, чтобы распределять силу веса на два электромагнита. Это приводит к снижению массы и, следовательно, силы веса, приходящейся на одну ось магнитов в $\sqrt{2}$ раз. Тогда для рассматриваемого варианта электромагнитного подвеса ротора турбоагнетателя в расчетах необходимо принять $m = 12,7$ кг. С учетом этого, величина смещения магнитной системы по оси y , в соответствии с формулами (2.7) – (2.11), равна 92

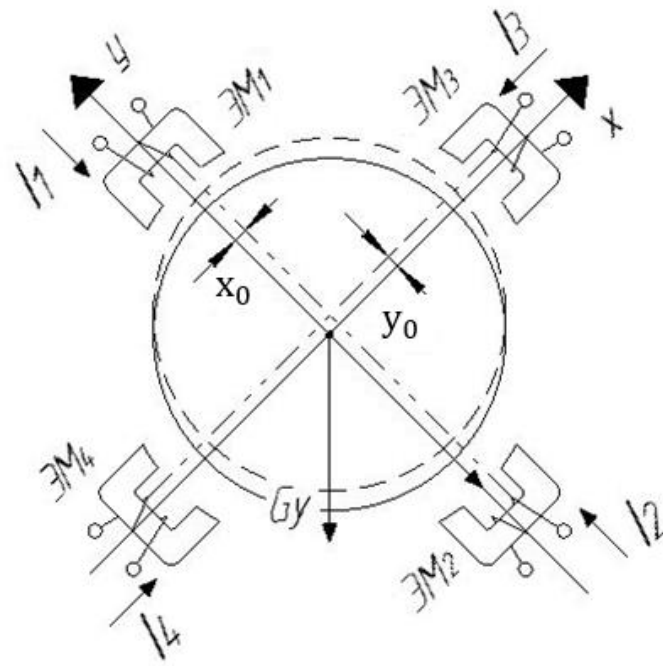
мкм. Расчет по формуле (2.13) дает результат $y = 88$ мкм, то есть расхождение увеличилось до 4,3%, что может быть связано с неучётом непостоянства коэффициента k_F , величина которого, как отмечалось, зависит от смещения ротора [29].

Суммарное необходимое смещение ротора по вертикальной оси составит, как следует из несложных геометрических построений (рисунок 2.3):

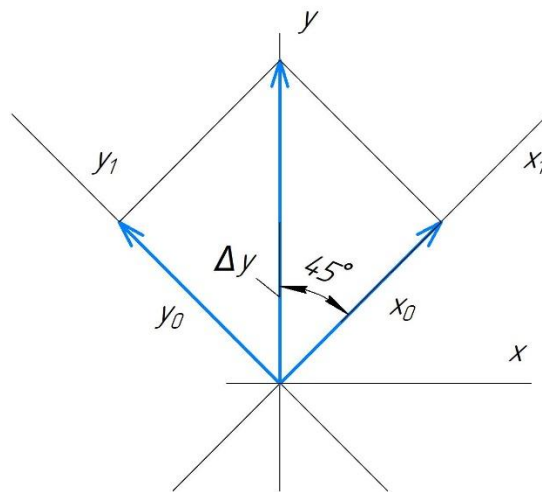
$$\Delta y = \sqrt{2} \cdot y_0 = 130 \text{ мкм.}$$

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что при смещении центра магнитной системы радиального электромагнитного подшипника по каждой оси на величину 92 мкм при равенстве токов $I_1 = I_2$ и $I_3 = I_4$ в противоположных магнитах будет происходить полная компенсация веса ротора G .

Воспользуемся формулами (2.7) – (2.11) для расчета необходимого для компенсации силы веса смещения центра магнитной системы радиальных электромагнитных подшипников другого более габаритного и мощного агрегата – нагнетателя газоперекачивающего агрегата ГПА Ц-16. Масса ротора этого агрегата равна 1090 кг. И опять при решении будем искать величину смещения, при котором сила веса ротора будет полностью скомпенсирована при равенстве токов в обмотках верхних и нижних магнитов. При расчете учтем, что фактически в нагнетателе оси x и y подшипника повернуты против часовой стрелке на 45 угловых градусов для распределения силы веса между электромагнитами ЭМ1 и ЭМ3. Поскольку в агрегате два радиальных подшипника, то масса ротора, приходящаяся на одну ось, составляет $m = 385$ кг. Односторонний зазор между статором и ротором при расположении ротора в центре магнитной системы равен $\delta = 0,00075$ м, а максимальный суммарный ток двух катушек противоположных электромагнитов составляет 15 А. При расчете, исходя из условия равенства токов в противоположных магнитах, примем ток одной катушки $I = 7,5$ А [93].



а)



б)

Рисунок 2.3 – а) Расчетная схема радиального электромагнитного подшипника при повороте осей на 45° и смещении центра магнитной системы относительно оси вращения на $x_0 = y_0$; б) смещение оси ротора.

В формулы для расчета y_0 также входит конструктивный коэффициент k_{FI} . Его величину можно определить по формуле (2.14), учитывая данные технической документации на электромагнитный подвес ротора нагнетателя ГПА Ц-16. В соответствии с этими данными в статике ротор удерживается в центральном положении

токами в верхних магнитах $I_{100} = 7,5$ А и нижних магнитах – $I_{200} = 1,2$ А. При этом часть силы веса ротора, приходящаяся на одну ось радиального подшипника, например, y составляет $G_y = 3781$ Н. В состоянии равновесия, сила, действующая на ротор по каждой оси также равна $F_{эм0} = 3781$ Н. С учетом этого конструктивный коэффициент радиальных электромагнитных подшипников нагнетателя ГПА Ц-16, рассчитанный по формуле (2.14) будет равен $k_{FI} = 3,88 \cdot 10^{-5}$ Нм²/А² [93].

Величина смещения центра магнитной системы относительно оси вращения ротора, в повернутых на 45° координатных осях, рассчитанная на основании выражений (2.7) – (2.11), составила $x_0 = y_0 = 165$ мкм, что обеспечивает компенсацию веса ротора при равных значениях токов в обмотках электромагнитов. Аналогично, приведенным выше расчетам для радиального ЭМП турбонагнетателя БТК-Э дизеля локомотива, необходимое смещение оси ротора по вертикальной оси составит:

$$\Delta y = \sqrt{2} \cdot y_0 = 233 \text{ мкм},$$

что составляет 31% от номинального зазора в радиальном ЭМП и 62% от номинального зазора в страховочном подшипнике.

2.3 Работа радиальных электромагнитных подшипников турбонагнетателя БТК-Э при смещении центра магнитной системы относительно оси вращения и вариации напряжения питания

Если использовать дифференциальный закон управления электромагнитами каждой оси, при котором увеличение напряжения на одном электромагните приводит к пропорциональному уменьшению напряжения на противоположном электромагните, то перемещение ротора, например, по оси y описывается следующей системой уравнений [94]:

$$\left. \begin{aligned} U(k_{ШИМ}N_{ШИМ} + 0,5) &= L_1 \frac{dI_1}{dt} + R_1 I_1 + k_{E1} \frac{dy}{dt} + L_{12} \frac{dI_2}{dt}; \\ U(0,5 - k_{ШИМ}N_{ШИМ}) &= L_2 \frac{dI_2}{dt} + R_2 I_2 - k_{E2} \frac{dy}{dt} + L_{21} \frac{dI_1}{dt}; \\ m \frac{d^2 y}{dt^2} &= k_{ЭМ} \left(\frac{I_1}{I_1 + I_2} - 0,5 \right) + k_F y - G_y \pm F_{\text{э}y}. \end{aligned} \right\} \quad (2.18)$$

где U , $k_{ШИМ}$ и $N_{ШИМ}$ – опорное напряжение, коэффициент передачи и величина сигнала на входе широтно-импульсного модулятора (ШИМ); L_1 и R_1 – индуктивность и активное сопротивление обмотки первого (верхнего) электромагнита ЭМ1; L_2 и R_2 – индуктивность и активное сопротивление обмотки электромагнита ЭМ2 (рис.2.1); L_{12} и L_{21} – коэффициенты взаимной индукции между электромагнитами; k_{E1} и k_{E2} – коэффициенты, связывающие наводимые в соответствующих обмотка электродвижущие силы со скоростью перемещения ротора; $k_{ЭМ}$ – коэффициент, связывающий силу, действующую на ротор, с токами I_1 и I_2 в первом и втором электромагнитах.

Системе уравнений (2.18) соответствует следующая передаточная функция радиального электромагнитного подшипника как объекта управления [36, 58]:

$$W_{OY}(p) = \frac{y(p)}{N_{ШИМ}(p)} = \frac{k_{OY}(b_0 p + 1)}{a_0 p^4 + a_1 p^3 + a_2 p^2 + a_3 p - 1}, \quad (2.19)$$

$$\text{где } k_{OY} = \frac{k_{ШИМ} k_{ЭМ} U (I_{10} R_1 + I_{20} R_2)}{k_F R_1 R_2 (I_{10} + I_{20})^2}; \quad b_0 = \frac{I_{10} (R_1 T_1 + L_{21}) + I_{20} (R_2 T_2 + L_{12})}{I_{10} R_1 + I_{20} R_2};$$

$$a_0 = \frac{m}{k_F} \left(T_1 T_2 - \frac{L_{12} L_{21}}{R_1 R_2} \right); \quad a_1 = \frac{m(T_1 + T_2)}{k_F};$$

$$a_2 = \frac{m}{k_F} + \frac{k_{ЭМ} [I_{10} (k_{E2} R_1 T_1 + k_{E1} L_{21}) + I_{20} (k_{E1} R_2 T_2 + k_{E2} L_{12})]}{k_F R_1 R_2 (I_{10} + I_{20})^2} + \frac{L_{12} L_{21}}{R_1 R_2} - T_1 T_2;$$

$$a_3 = \frac{k_{ЭМ}}{k_F R_1 R_2} \frac{I_{10} k_{E2} R_1 + I_{20} k_{E1} R_2}{(I_{10} + I_{20})^2} - (T_1 + T_2);$$

I_{10} и I_{20} – начальные значения токов в рабочей точке; $T_1 = \frac{L_1}{R_1}$ и $T_2 = \frac{L_2}{R_2}$ – постоянные времени обмоток электромагнитов, вызванные собственными индуктивностями L_1 и L_2 ; p – комплексная переменная.

Основные особенности электромагнитных подшипников, как объектов управления, заключаются в нестационарности и принципиальной неустойчивости [58]. Нестационарность проявляется в том, что такие параметры электромагнитного подшипника, как L_1 , L_2 , k_F , $k_{ЭМ}$, k_{E1} и k_{E2} изменяются в функции смещения ротора относительно центра магнитной системы. Неустойчивость связана с наличием положительной обратной связи по перемещению.

При исследовании влияния смещения центра магнитной системы электромагнитных подшипников относительно оси вращения на работу предположим, что управление электромагнитным подшипником по каждой оси осуществляет трехконтурная система управления (рисунок 2.4) [52, 58]. Она содержит во внутреннем контуре пропорционально-дифференциальный регулятор с передаточной функцией:

$$W_{\text{ПД}}(p) = k_{\text{ПД}}(T_{\text{ПД}}p + 1),$$

где $k_{\text{ПД}}$ – коэффициент передачи, а $T_{\text{ПД}}$ – постоянная времени регулятора, который обеспечивает компенсацию основной инерционности объекта.

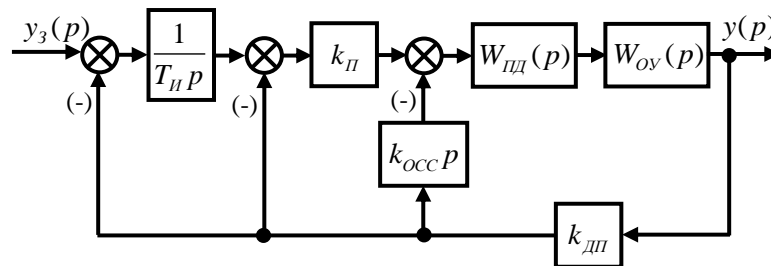


Рисунок 2.4 – Структурная схема непрерывного прототипа трехконтурной системы управления электромагнитным подшипником

Во втором и третьем контурах применены, соответственно, пропорциональный регулятор с коэффициентом передачи k_{II} и интегральный регулятор, имеющий постоянную времени T_{II} . Эти регуляторы предназначены для придания электромагнитному подшипнику требуемых динамических и статических свойств.

Параметры регуляторов системы управления электромагнитным подшипником рассчитываются для центрального положения ротора относительно магнитной системы подшипника по следующим аналитическим выражениям [58, 60, 62, 94]:

$$\left. \begin{aligned} T_{II} &= 3T_{\mathcal{E}}; \\ k_{II} &= k_{II}; \\ k_{OCC} &= 2\xi \sqrt{\frac{m}{3k_{ШИМ}k_{ЭМ}k_{ДП}}} - \frac{2m}{9k_{II}k_{ШИМ}k_{ЭМ}k_{ДП}T_{\mathcal{E}}}; \\ T_{II} &= \frac{2,19(-b + \sqrt{b^2 - 4ac})}{a}. \end{aligned} \right\} \quad (2.20)$$

где $T_{\mathcal{E}} = \frac{L_1 - L_2}{R_1}$; ξ – задаваемый параметр демпфирования колебаний;

$$a = (k_2 - k_F)(m + k_1 T_{II}) \left(\frac{k_{ЭМ} k_E}{U} + k_1 + k_2 T_{II} - k_F T_{\mathcal{E}} \right) - m(k_2 - k_F)^2 T_{\mathcal{E}};$$

$$b = k_2 T_{II} (m + k_1 T_{II}) \left(\frac{k_{ЭМ} k_E}{U} + k_1 + k_2 T_{II} - k_F T_{\mathcal{E}} \right) - 2mk_2(k_2 - k_F) T_{II} T_{\mathcal{E}} - k_2(m + k_1 T_{II})^2;$$

$$c = -mT_{\mathcal{E}}k_2^2 T_{II}^2; \quad k_1 = k_{II}k_{ШИМ}k_{ЭМ}k_{OCC}k_{ДП}; \quad k_2 = k_{II}k_{II}k_{ШИМ}k_{ЭМ}k_{ДП}.$$

Для оценки влияния смещения центра магнитной системы относительно оси вращения на качество работы и энергопотребление радиального электромагнитного подшипника, воспользуемся методом компьютерного моделирования в программе Matlab Simulink. При этом возьмем за основу характеристики электромагнитов, разработанных для электромагнитного подвеса ротора опытного образца турбонагнетателя БТК-Э дизеля локомотива [29].

В рассматриваемом агрегате масса ротора, приходящаяся на один электромагнитный подшипник, составляет $m=18$ кг, а опорное напряжение широтно-импульсного преобразователя – $U=60$ В. При центральном положении ротора электромагниты характеризуются следующими параметрами: $L_1 = L_2 = 2,54$ Гн

$R_1 = R_2 = 96,6 \text{ Ом}$; $L_{12} = L_{21} = 0,0033 \text{ Гн}$; $k_E = k_{E1} = k_{E2} = 1544 \text{ Вc/м}$; $k_{ЭМ} = 1272 \text{ Н}$; $k_F = 1424000 \text{ Н/м}$ [29]. Поэтому при выборе 12-ти разрядного ШИМ с коэффициентом передачи $k_{ШИМ} = 0,0001221$ и датчика положения ротора с $k_{ДП} = 10000000$ дискрет/м при $\xi = 0,216$, по формулам (2.20), найдем требуемые настройки регуляторов системы управления электромагнитным подшипником: $T_{ИД} = 0,079 \text{ с}$; $k_{ИД} = k_{И} = 2$; $k_{ОСС} = 0,0008 \text{ с}$; $T_{И} = 0,008 \text{ с}$.

Теперь проверим работоспособность радиального электромагнитного подшипника при смещении центра магнитной системы от оси вращения ротора на величину $y_0 = 0,000125 \text{ м}$. При этом учтем, что параметры электромагнитов изменятся и станут равными: $L_1 = 3,05 \text{ Гн}$; $L_2 = 2,15 \text{ Гн}$; $k_{E1} = 2174 \text{ Вc/м}$; $k_{E2} = 913 \text{ Вc/м}$; $k_{ЭМ} = 1361 \text{ Н}$; $k_F = 1360000 \text{ Н/м}$.

Расчетная модель цифровой системы управления электромагнитным подшипником при периоде дискретизации $T = 0,0002 \text{ с}$ приведена на рисунке 2.5 [94].

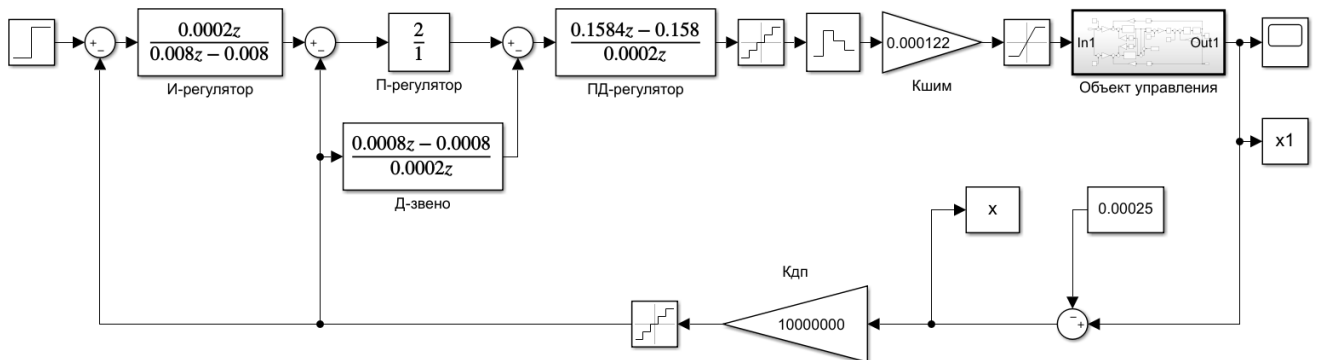


Рисунок 2.5 – Расчетная модель цифровой системы управления электромагнитным подшипником

Она содержит объект управления (рисунок 2.5), учитывающий приведенные выше параметры, а также ограничения силы электромагнитов на уровне 732 Н и перемещений в диапазоне $\pm 0,00025 \text{ м}$. Расчетная модель позволяет построить график перемещения ротора из нулевого, относительно центра магнитной системы, положения в координату: $x=0$; $y=0,000125 \text{ м}$ (рисунок 2.6). Он показывает, что при вы-

бранных настройках регуляторов, система управления электромагнитным подшипником работает устойчиво и при смещении центра магнитной системы относительно оси вращения ротора [94].

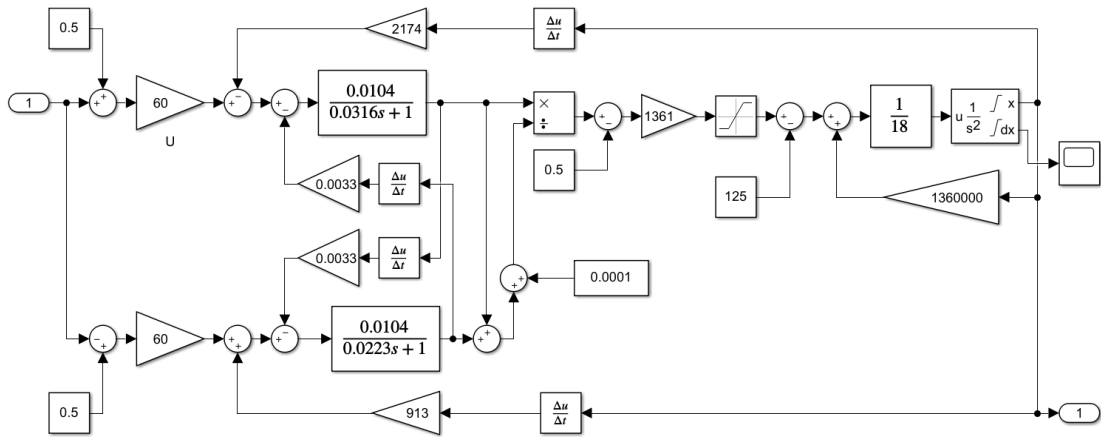


Рисунок 2.6 – Расчетная модель электромагнитного подшипника как объекта управления при напряжении питания $U = 60$ В и смещении оси вращения на $y_0 = 0,000125$ м относительно центра магнитной системы.

По расчетной модели был построен график по времени перемещения ротора из нулевого, относительно центра магнитной системы, положения в координату $y = 0,000125$ м (рисунок 2.7) [94].

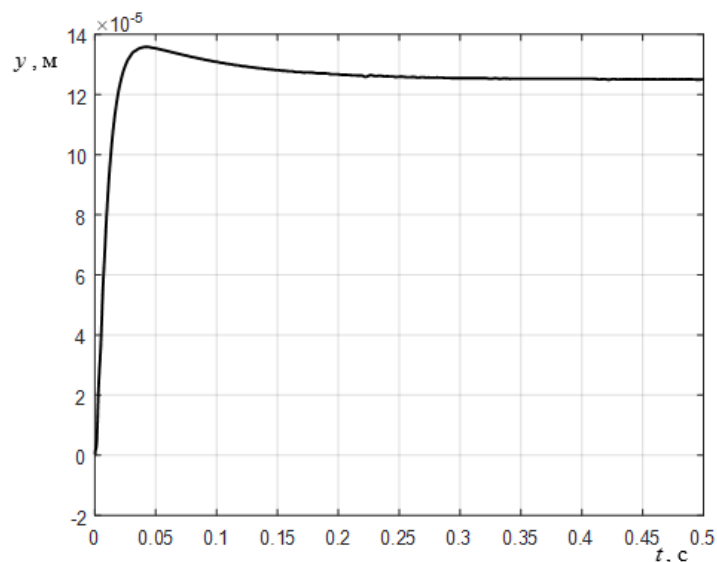


Рисунок 2.7 – Переходный процесс перемещения ротора из нулевого, относительно центра магнитной системы положения, в координату $y = 0,000125$ м при $U = 60$ В

Дальнейшие расчеты были проведены при уменьшении опорного напряжения ШИМ до $U = 50$ В. Компьютерное моделирование показывает, что при уменьшении напряжения питания обмоток электромагнитов, получается переходный процесс, аналогичный графику, приведенному на рисунке 2.7. Также ведет себя радиальный электромагнитный подшипник и при опорном напряжении ШИМ, равным 40 В и 30 В.

Однако, при включении системы управления электромагнитным подвесом, изначально, ротор находится на страховочных подшипниках. Зазор в страховочных подшипниках рассматриваемого агрегата составляет 0,00025 м. В момент включения электромагнитного подвеса ротор находится на страховочном подшипнике в координате $x=0$; $y = -0,00025$ м относительно центра магнитной системы. При этом параметры электромагнитов при $U = 50$ В имеют следующие значения [29]: $L_1 = 1,83$ Гн; $L_2 = 3,2$ Гн; $k_{E1} = 760$ Вc/м; $k_{E2} = 1026$ Вc/м; $k_{ЭМ} = 443$ Н; $k_F = 511100$ Н/м.

Моделирование показывает, что с такими параметрами и при $U = 50$ В ротор турбоагнетателя уверенно всплывает со страховочных подшипников (рисунок 2.8) [94]. При дальнейшем снижении питающего напряжения, стабильность функционирования снижается. Так при напряжении $U = 40$ В ротор турбоагнетателя не может подняться со страховочных подшипников, а при $U = 45$ В всплытие ротора существенно затягивается.

Тем не менее, проведенное исследование показывает, что при смещении центра магнитной системы на $y_0 = 0,000125$ м относительно оси вращения ротора агнетателя, напряжение питания электромагнитов можно снизить до 50 В, то есть уменьшить на 16,6%. Это приведет к повышению энергетической эффективности электромагнитного подшипника за счет снижения потребляемой мощности пропорционально квадрату отношения напряжений, то есть на 30 %. Кроме того, снижение токов обеспечивает уменьшение температуры нагрева обмоток электромагнитов, что облегчает требования к их охлаждению.

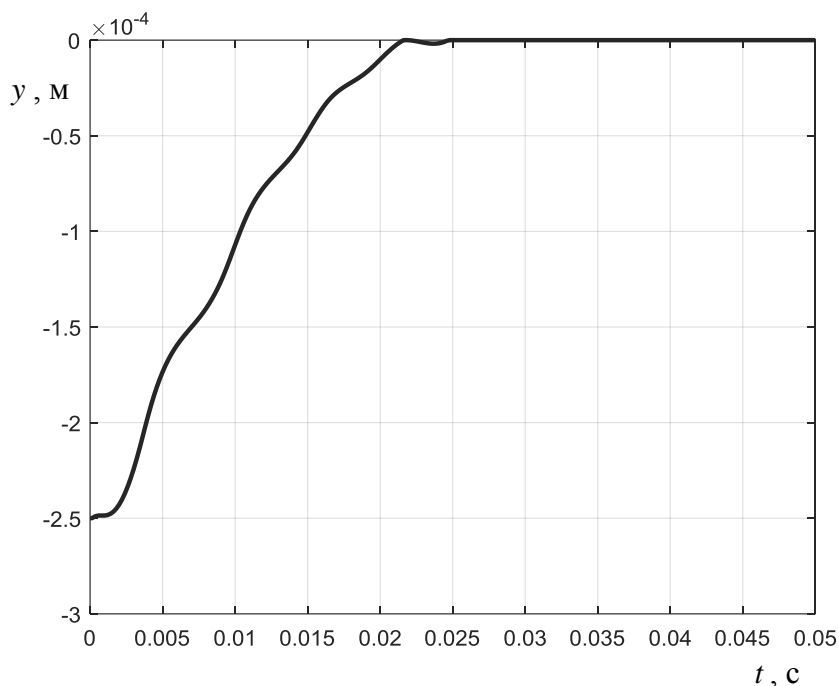


Рисунок 2.8 – Процесс всплытия ротора со страховочных подшипников при $U = 50 \text{ В}$

2.4 Анализ устойчивости системы управления радиальным электромагнитным подшипником турбоагнетателя БТК-Э во всем диапазоне перемещений ротора

Приведенные выше результаты моделирования показывают работоспособность рассматриваемой системы управления электромагнитным подшипником при перемещении ротора со страховочных подшипников до требуемой точки позиционирования при фиксированных параметрах, соответствующих либо конечному, либо начальному положению. Однако индуктивности электромагнитов и наводимые электродвижущие силы изменяются в функции перемещения. Также происходит вариация силовых параметров объекта управления при изменении соотношения токов в противоположных электромагнитах.

Поэтому проведем исследование устойчивости системы управления радиальным электромагнитным подшипником турбоагнетателя БТК-Э во всем возмож-

ном диапазоне перемещений ротора. Для достижения поставленной цели необходимо определить передаточную функцию непрерывного прототипа системы управления электромагнитным подшипником, учитывающую вариацию его электромагнитных параметров в функции смещения ротора относительно центрального положения, начальных значений токов, и рассчитать корни характеристического уравнения. Принимая во внимание выражение (2.19), передаточная функция внутреннего замкнутого контура примет следующий вид [95]:

$$W_1(p) = \frac{k_{\text{ИД}}k_{\text{ОУ}}(T_{\text{ИД}}p + 1)(b_0p + 1)}{a_0p^4 + (a_1 + k_1b_0T_{\text{ИД}})p^3 + [a_2 + k_1(b_0 + T_{\text{ИД}})]p^2 + (a_3 + k_1)p - 1}, \quad (2.21)$$

где $k_1 = k_{\text{ИД}}k_{\text{ОУ}}k_{\text{ОСС}}k_{\text{ДП}}$.

Далее находим передаточную функцию второго контура [95]:

$$\begin{aligned} W_2(p) &= \frac{k_{\text{П}}W_1(p)}{1 + k_{\text{ДП}}k_{\text{П}}W_1(p)} = \\ &= \frac{\frac{k_{\text{П}}k_{\text{ИД}}k_{\text{ОУ}}(T_{\text{ИД}}p + 1)(b_0p + 1)}{k_2 - 1}}{\frac{a_0}{k_2 - 1}p^4 + \frac{a_1 + k_1b_0T_{\text{ИД}}}{k_2 - 1}p^3 + \frac{a_2 + k_1(b_0 + T_{\text{ИД}}) + k_2b_0T_{\text{ИД}}}{k_2 - 1}p^2 + \frac{a_3 + k_1 + k_2(b_0 + T_{\text{ИД}})}{k_2 - 1}p + 1}, \quad (2.22) \end{aligned}$$

где $k_2 = k_{\text{П}}k_{\text{ИД}}k_{\text{ОУ}}k_{\text{ДП}}$.

В итоге получим передаточную функцию непрерывного прототипа замкнутой трехконтурной системы управления электромагнитным подшипником:

$$W_3(p) = \frac{\frac{1}{T_{\text{И}}p}W_2(p)}{1 + \frac{k_{\text{ДП}}W_2(p)}{T_{\text{И}}p}} = \frac{b_{001}p^2 + b_{11}p + 1}{k_{\text{ДП}}(a_{01}p^5 + a_{11}p^4 + a_{21}p^3 + a_{31}p^2 + a_{41}p + 1)}, \quad (2.23)$$

где $b_{001} = b_0T_{\text{ИД}}$; $b_{11} = b_0 + T_{\text{ИД}}$; $a_{01} = \frac{a_0T_{\text{И}}}{k_2}$; $a_{11} = \frac{(a_1 + k_1b_0T_{\text{ИД}})T_{\text{И}}}{k_2}$;

$a_{21} = \frac{[a_2 + k_1(b_0 + T_{\text{ИД}}) + k_2b_0T_{\text{ИД}}]T_{\text{И}}}{k_2}$; $a_{31} = \frac{[a_3 + k_1 + k_2(b_0 + T_{\text{ИД}})]T_{\text{И}}}{k_2} + b_0T_{\text{ИД}}$;

$$a_{41} = \frac{(k_2 - 1)T_H}{k_2} + b_0 + T_{ПД}.$$

Для радиального ЭМП турбоагнетателя 6ТК-Э значения параметров L_1 , L_2 , k_{E1} , k_{E2} , $k_{ЭМ}$ и k_F в функции перемещения ротора y при $I_{10} = I_{20} = 0,311$ А известны [29] и приведены в таблице 2.1. Подставляя данные таблицы 2.1 и параметры настроек регуляторов в формулу (2.23), решая характеристическое уравнение:

$$a_{01}p^5 + a_{11}p^4 + a_{21}p^3 + a_{31}p^2 + a_{41}p + 1 = 0 \quad (2.24)$$

находим его корни, сводя полученные значения в таблицу 2.2 [95].

Таблица 2.1 – Значения L_1 , L_2 , k_{E1} , k_{E2} , $k_{ЭМ}$ и k_F в функции y при $I_{10} = I_{20} = 0,311$ А

y , м	-0,00025	0	0,000125	0,00025
L_1 , Гн	1,87	2,54	3,05	3,57
L_2 , Гн	3,57	2,54	2,15	1,87
k_{E1} , Вc/м	1329	1544	2174	1759
k_{E2} , Вc/м	1759	1544	913	1329
$k_{ЭМ}$, Н	1450	1272	1099	760
k_F , Н/м	1488000	1360000	1424000	1488000

Таблица 2.2 – Корни характеристического уравнения (2.24) в функции перемещения y при $I_{10} = I_{20} = 0,311$ А

$y, \text{ м}$	-0,00025	0	0,000125	0,00025
$p_{1,2}$	-201,85 ∓ ∓ $j1101,21$	-162,5 ∓ ∓ $j1020,56$	-136,54 ∓ ∓ $j952,58$	-88,21 ∓ ∓ $j808,55$
p_3	-114,02	-112,75	-111,91	-106,37
p_4	-37,26	-40,08	-39,49	-39,3
p_5	-12,89	-12,91	-12,94	-13,01

Анализ данных таблицы 2.2 позволяет сделать вывод, что при выбранных настройках регуляторов, опорном напряжении широтно-импульсной модуляции $U = 60$ В и начальных значениях токов $I_{10} = I_{20} = 0,311$ А система управления электромагнитным подшипником устойчива при любом положении ротора, поскольку все корни характеристического уравнения имеют отрицательные вещественные части [96, 97].

Значения токов I_{10} и I_{20} для рассматриваемого варианта реализации радиального электромагнитного подшипника могут меняться от 0 до 0,622 А. Поэтому необходимо провести исследование устойчивости системы для двух предельных значений токов: $I_{10} = 0,622$ А, $I_{20} = 0$ А и $I_{10} = 0$ А, $I_{20} = 0,622$ А. Значения параметров электромагнитного подшипника и корней характеристического уравнения для этих токов в функции смещения ротора y от центрального положения приведены в таблицах 2.3 – 2.6 [95].

Таблица 2.3 – Значения L_1 , L_2 , k_{E1} , k_{E2} , $k_{ЭМ}$ и k_F в функции y при $I_{10} = 0,622$ А, $I_{20} = 0$ А

y , м	-0,00025	0	0,000125	0,00025
L_1 , Гн	1,72	1,95	2,11	2,33
L_2 , Гн	2,93	2,58	2,16	1,94
k_{E1} , Вc/м	649	1853	2609	3057
k_{E2} , Вc/м	3057	1853	1097	649
$k_{ЭМ}$, Н	870	459	599	781
k_F , Н/м	736000	1096000	1468000	1840000

Таблица 2.4 – Корни характеристического уравнения (2.24) в функции y при $I_{10} = 0,622$ А, $I_{20} = 0$ А

y , м	-0,00025	0	0,000125	0,00025
$p_{1,2}$	-80,02 ± ± j819,86	-34,34 ± ± j623,49	-76,11 ± ± j760,36	-128,16 ± ± j900,23
p_3	-100,47	-90,24	-101,71	-109,15
p_4	-61,65	-62,26	-53,12	-46,04
p_5	-12,98	-13,16	-13,17	-13,14

Таблица 2.5 – Значения L_1 , L_2 , k_{E1} , k_{E2} , $k_{ЭМ}$ и k_F в функции y при $I_{10} = 0$ А, $I_{20} = 0,622$ А

y , м	-0,00025	0	0,000125	0,00025
L_1 , Гн	1,94	2,58	2,76	2,93
L_2 , Гн	2,33	1,95	1,83	1,72
k_{E1} , Вc/м	649	1853	2609	3057
k_{E2} , Вc/м	3057	1853	1097	649
$k_{ЭМ}$, Н	781	459	465	870
k_F , Н/м	1840000	1096000	916000	736000

Таблица 2.6 – Корни характеристического уравнения (2.24) в функции y при $I_{10} = 0$ А, $I_{20} = 0,622$ А

y , м	-0,00025	0	0,000125	0,00025
$p_{1,2}$	-128,16 ± ± j900,23	-34,34 ± ± j623,49	-55,6 ± ± j701,59	-80,02 ± ± j819,86
p_3	-109,15	-90,24	-98,56	-100,47
p_4	-46,04	-62,26	-50,08	-61,65
p_5	-13,14	-13,16	-13,19	-12,98

И опять данные таблиц показывают, что рассматриваемая трехконтурная система управления электромагнитным подшипником остается устойчивой при любом положении ротора и соотношении токов в противоположных электромагнитах. Следует отметить, что диапазон перемещений ротора $y = \pm 0,00025$ м выбран с учетом зазора в страховочных подшипниках.

Точка $y = 0,000125$ м рассматривается с позиций применения перспективного с энергетической точки зрения подхода для компенсации веса горизонтально

расположенного ротора. Действительно, располагая в этой точке ротор, можно снизить напряжение питания ротора до 50 В [94]. При этом коэффициенты, характеризующие силу, действующую на ротор, станут равными $k_{ЭМ} = 763$ Н, $k_F = 989000$ Н/м, а коэффициенты, определяющие электродвижущие силы: $k_{E1} = 1811$ Вс/м, $k_{E2} = 761$ Вс/м. При равенстве токов в электромагнитах ЭМ1 и ЭМ2 $I_{10} = I_{20} = 0,259$ А (что будет наблюдаться при полной компенсации веса ротора за счет принудительного смещения на $y_0 = 0,000125$ м) корни характеристического уравнения замкнутой системы управления электромагнитного подшипника будут равны: $p_{1,2} = -81,71 \mp j799,74$, $p_3 = -111,41$, $p_4 = -39,49$, $p_5 = -12,94$ [95].

Следовательно, и при пониженном напряжении питания система управления электромагнитным подшипником будет обеспечивать его устойчивую работу. Также необходимо обратить внимание на то, что устойчивость обеспечивается при неизменных параметрах настроек регуляторов.

2.5 Анализ работы радиальных электромагнитных подшипников нагнетателя газоперекачивающего агрегата ГПА Ц-16 при смещении центра магнитной системы

Для анализа работы радиальных электромагнитных подшипников нагнетателя газоперекачивающего агрегата при смещении центра магнитной системы необходимо определить численные значения передаточной функции подшипника (2.19) как объекта управления, параметров настройки регуляторов (2.20) и передаточной функции (2.23) замкнутой трехконтурной системы.

Смещение центра магнитной системы относительно оси вращения приводит к перераспределению зазоров между верхним и нижним магнитами и ротором. При этом происходит изменение индуктивностей обмоток электромагнитов, а именно, индуктивность верхнего магнита L_1 увеличивается, а нижнего L_2 уменьшается по сравнению с индуктивностью при равных зазорах [13, 93]:

$$L_1 = \frac{2k_{FI}}{\delta - y_0}, L_2 = \frac{2k_{FI}}{\delta + y_0}. \quad (2.25)$$

При смещении оси ротора от центра магнитной системы изменяются и другие параметры электромагнитного подшипника. В частности, коэффициенты, характеризующие наводимую в обмотках электродвижущую силу от движения ротора, будут равны [13, 93]:

$$k_{E1} = \frac{2k_{FI}I_1}{(\delta - y_0)^2}, k_{E2} = \frac{2k_{FI}I_2}{(\delta + y_0)^2}. \quad (2.26)$$

Коэффициент, связывающий силу, действующую на ротор, с соотношением токов I_1 и I_2 в первом и втором электромагнитах, можно определить по формуле [93]:

$$k_{ЭМ} = \frac{k_{FI}(I_1 + I_2) \left[(I_{11}^2 - I_1^2)(\delta + y_0)^2 - (I_{21}^2 - I_2^2)(\delta - y_0)^2 \right]}{(I_{11} - I_1)(\delta - y_0)^2 (\delta + y_0)^2}, \quad (2.27)$$

где I_{11} и I_{21} – вторые значения токов электромагнитов ЭМ1 и ЭМ2, причем при дифференциальном законе регулирования всегда соблюдается равенство $I_{11} + I_{21} = I_1 + I_2$.

Коэффициент положительной обратной связи по перемещению определяется выражением [93]:

$$k_F = k_{FI} \left[\frac{I_1^2(2\delta - y_2 - y_1)}{(\delta - y_2)^2 (\delta - y_1)^2} + \frac{I_2^2(2\delta + y_2 + y_1)}{(\delta + y_2)^2 (\delta + y_1)^2} \right], \quad (2.28)$$

где y_1 и y_2 – два смещения ротора относительно центра магнитной системы, причем $y_1 < y_0$, а $y_2 > y_0$.

Изменение приведенных выше параметров влияют на динамические свойства электромагнитного подшипника. Поэтому целесообразно оценить их влияние на работу замкнутой системы управления, обеспечивающей устойчивость и требуемые характеристики электромагнитных подшипников, в частности, жесткость. Необходимость такого исследования определяется тем, что существующие методики выбора параметров регуляторов системы управления электромагнитным подшипником

оперируют с характеристиками электромагнитов, определенных для центрального положения.

Действительно, для рассматриваемого радиального подшипника при центральном положении, когда $y = 0$, электромагниты имеют следующие параметры: $L_1 = L_2 = 0,103$ Гн, $R_1 = R_2 = 1,7$ Ом, $k_{E1} = k_{E2} = 1035$ Вc/м, $k_{ЭМ} = 31040$ Н, $k_F = 20739000$ Н/м. При выборе настроек регуляторов трехконтурной системы управления [52] по известной методике [60] получается, что при коэффициенте широтно-импульсного модулятора $k_{ШИМ} = 3,05 \cdot 10^{-5}$ и опорном напряжении широтно-импульсного преобразователя $U = 48$ В, пропорционально-дифференциальный регулятор должен иметь коэффициент передачи $k_{ПД} = 8$ и постоянную времени $T_{ПД} = 0,183$ с. При этом коэффициент передачи пропорционального регулятора должен быть равен $k_{П} = 8$, а постоянные времени интегрального регулятора и обратной связи по скорости иметь величину $T_{И} = k_{occ} = 0,0128$ с [93].

При смещении ротора относительно центра магнитной системы на $y_0 = 0,000165$ м характеристики электромагнитов, в соответствии с формулами (2.24) – (2.28), изменятся и станут равными: $L_1 = 0,133$ Гн, $L_2 = 0,085$ Гн, $R_1 = R_2 = 1,7$ Ом, $k_{E2} = 1701$ Вc/м, $k_{E4} = 695$ Вc/м, $k_{ЭМ} = 36690$ Н, $k_F = 27588000$ Н/м [93].

Проверим методом моделирования работоспособность радиальных электромагнитных подшипников нагнетателя газоперекачивающего агрегата ГПА Ц-16 при смещении центра магнитной системы относительно оси вращения на $y_0 = 0,000165$ м и снижении напряжения питания до величины $U = 48$ В. Расчетная модель одного канала системы управления электромагнитного подшипника с учетом параметров электромагнитов и регуляторов представлена на рисунках 2.9 – 2.11. Она позволяет построить график всплытия ротора со страховочных подшипников, который показывает, что система управления радиальным электромагнитным подшипником устойчива, несмотря на смещение центра магнитной системы и

снижение напряжения питания (рисунок 2.12). При этом ось вращения ротора приходит в нулевое по сигналам датчика положение, совершая относительно установившегося значения колебания амплитудой ± 1 мкм (рисунок 2.13) [93, 98, 99].

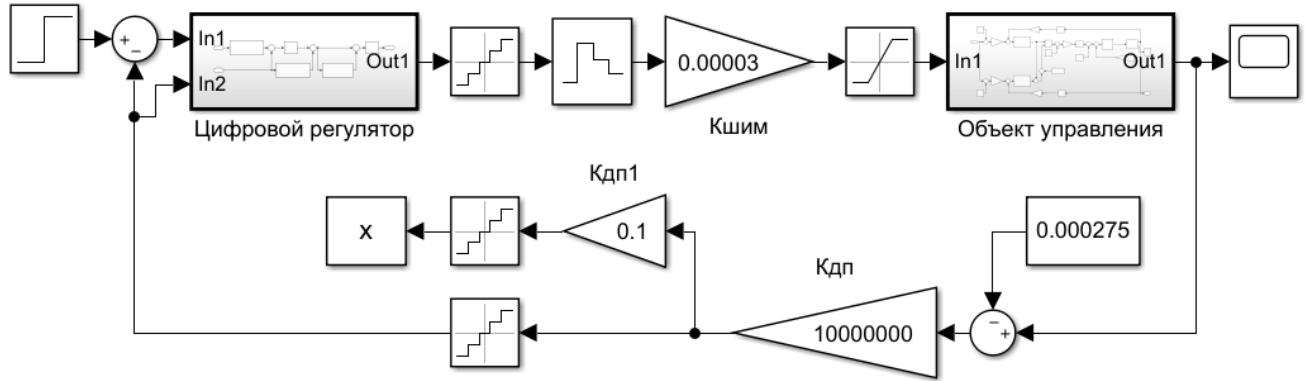


Рисунок 2.9 – Расчетная модель цифровой системы управления радиального электромагнитного подшипника нагнетателя газоперекачивающего агрегата

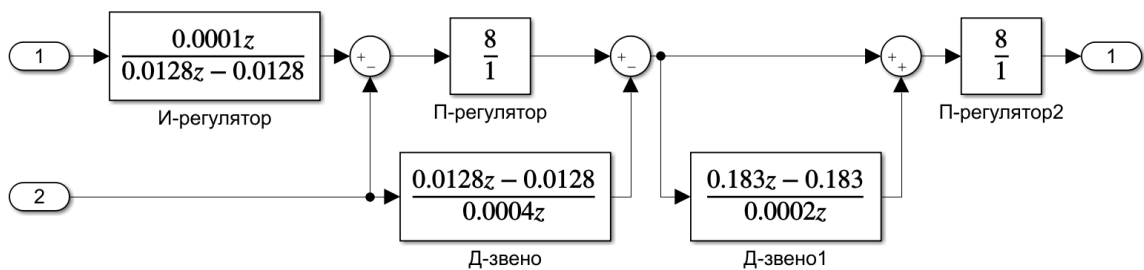


Рисунок 2.10 – Расчетная модель цифрового регулятора

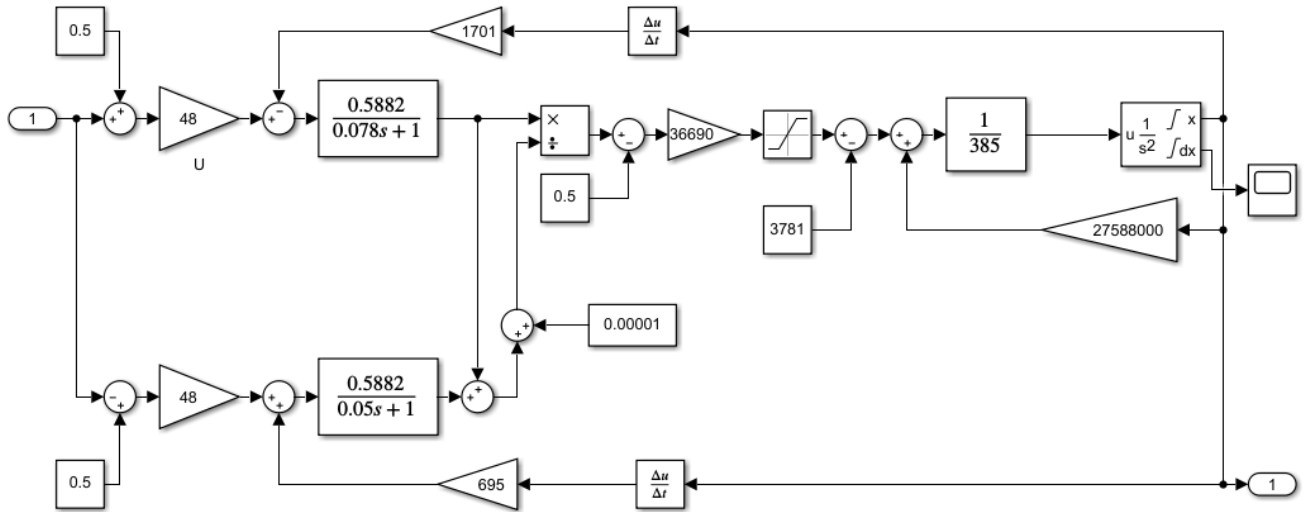


Рисунок 2.11 – Расчетная модель радиального электромагнитного подшипника как объекта управления при смещении центра магнитной системы относительно оси вращения и снижении напряжения питания

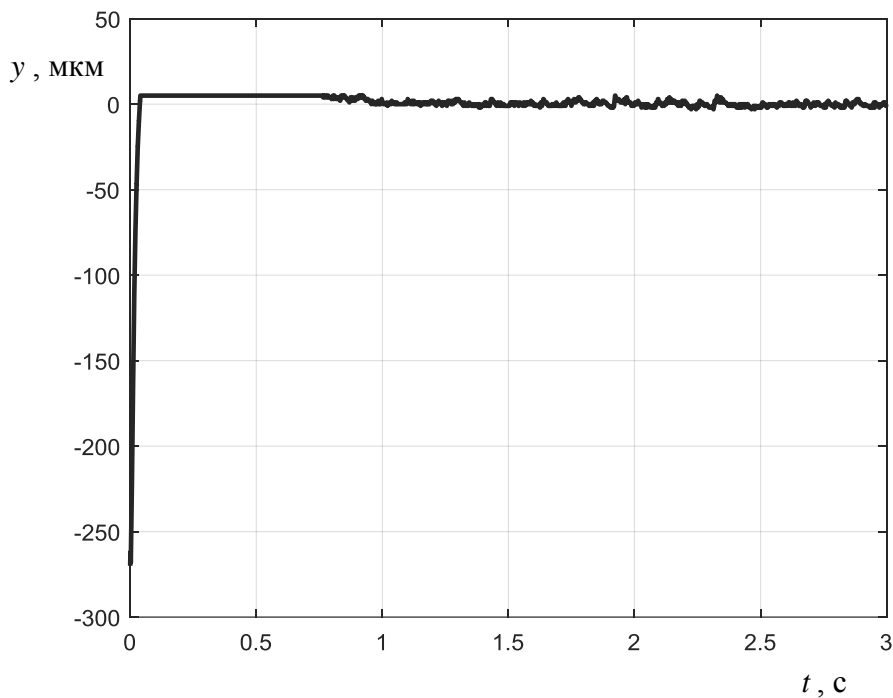


Рисунок 2.12 – График всплытия ротора со страховочных подшипников

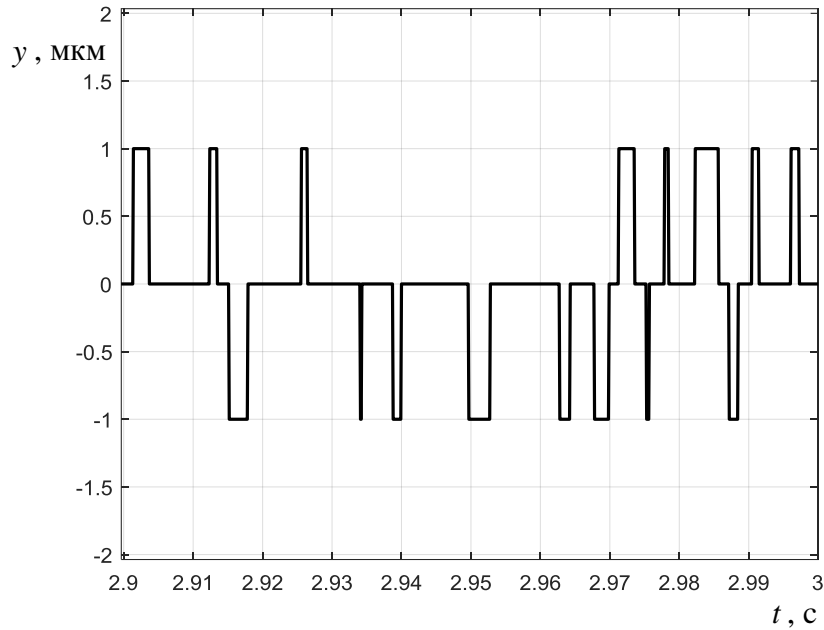


Рисунок 2.13 – График колебаний ротора относительно точки позиционирования (Моделирование. Сигнал с датчика)

Таким образом, приведенные результаты моделирования позволяют сделать вывод, что применение способа компенсации веса ротора за счет смещения центра магнитной системы относительно оси вращения ротора применимо для радиальных электромагнитных подшипников нагнетателя газоперекачивающего агрегата. При этом появляется возможность снижения опорного напряжения питания опор, что позволит уменьшить потери электрической энергии в обмотках электромагнитов и колебания ротора относительно точки позиционирования.

2.6 Устойчивость системы управления радиального ЭМП нагнетателя газоперекачивающего агрегата ГПА Ц-16 во всем возможном диапазоне перемещений ротора

Проведем также исследование устойчивости системы управления радиальным электромагнитным подшипником нагнетателя газоперекачивающего агрегата

ГПА Ц-16 во всем возможном диапазоне перемещений ротора. Для достижения поставленной цели по формулам (2.25) – (2.28) определим значения L_1 , L_2 , k_{E1} , k_{E2} , $k_{ЭМ}$ и k_F при вариации перемещения y в пределах ± 375 мкм при равенстве токов $I_{10} = I_{20} = 7,5$ А (таблица 2.7). Выбранный диапазон перемещений определяется зазором в страховочных подшипниках нагнетателя. Значение смещения 165 мкм задано для точки, в которой вес ротора полностью компенсируется при равных токах в противоположных магнитах и минимальной потребляемой электрической мощностью обмоток. Подставим данные таблицы 2.7 и параметры настроек регуляторов в формулу (2.23) и найдем решение характеристического уравнения (2.24). Значения корней (таблица 2.8) позволяют сделать вывод, что при выбранных настройках регуляторов, опорном напряжении широтно-импульсной модуляции $U = 48$ В и начальных значениях токов $I_{10} = I_{20} = 7,5$ А, система управления электромагнитным подшипником устойчива при любом положении ротора, поскольку все корни характеристического уравнения имеют отрицательные вещественные части.

Таблица 2.7 – Значения L_1 , L_2 , k_{E1} , k_{E2} , $k_{ЭМ}$ и k_F в функции y при $I_{10} = I_{20} = 7,5$ А

y , м	-0,000275	0	0,000165	0,000275
L_1 , Гн	0,076	0,103	0,133	0,163
L_2 , Гн	0,163	0,103	0,085	0,076
k_{E1} , Вc/м	554	1035	1701	2579
k_{E2} , Вc/м	2579	1035	695	554
$k_{ЭМ}$, Н	45480	31040	36690	48520
k_F , Н/м	45012000	20739000	27588000	45012000

Значения токов I_{10} и I_{20} для рассматриваемого варианта реализации радиального электромагнитного подшипника могут меняться от 0 до 15 А. Поэтому необходимо провести исследование устойчивости системы для двух предельных значений токов: $I_{10} = 15$ А, $I_{20} = 0$ А и $I_{10} = 0$ А, $I_{20} = 15$ А.

Таблица 2.8 – Корни характеристического уравнения (2.24) в функции перемещения y при $I_{10} = I_{20} = 7,5$ А

$y, \text{ м}$	-0,000275	0	0,000165	0,000275
p_1	-129479	-88042	-104255	-138195
p_2	-922	-925	-924	-922
p_3	-85,3	-85,32	-84,32	-85,31
p_4	-14,23	-16,44	-15,64	-14,23
p_5	-5,47	-5,47	-5,47	-5,47

Значения параметров электромагнитного подшипника и корней характеристического уравнения для этих токов, в функции смещения ротора y от центрального положения, приведены в таблицах 2.9 – 2.12. Данные таблиц показывают, что рассматриваемая трехконтурная система управления электромагнитным подшипником остается устойчивой при любом положении ротора и соотношении токов в противоположных электромагнитах радиальных подшипников нагнетателя газоперекачивающего агрегата.

Таблица 2.9 – Значения $L_1, L_2, k_{E1}, k_{E2}, k_{ЭМ}$ и k_F в функции y при $I_{10} = 15$ А, $I_{20} = 0$ А

$y, \text{ м}$	-0,000275	0	0,000165	0,000275
$L_1, \text{ Гн}$	1,72	0,103	0,133	0,163
$L_2, \text{ Гн}$	2,93	0,103	0,085	0,076
$k_{E1}, \text{ Вc/м}$	1108	2069	3401	5159
$k_{E2}, \text{ Вc/м}$	0	0	0	0
$k_{ЭМ}, \text{ Н}$	18140	31040	50260	75860
$k_F, \text{ Н/м}$	16232000	41477000	87528000	163820000

Таблица 2.10 – Корни характеристического уравнения (2.24) в функции y при $I_{10} = 15$ А, $I_{20} = 0$ А

$y, \text{ м}$	-0,000275	0	0,000165	0,000275
p_1	-31928	-88043	-174924	-296444
p_2	-944	-925	-920	-918
p_3	-85,33	-85,36	-84,36	-85,36
p_4	-22,47	-16,44	-12,82	-10,41
p_5	-5,46	-5,47	-5,47	-5,47

Таблица 2.11 – Значения $L_1, L_2, k_{E1}, k_{E2}, k_{ЭМ}$ и k_F в функции y при $I_{10} = 0$ А, $I_{20} = 15$ А

$y, \text{ м}$	-0,000275	0	0,000165	0,000275
$L_1, \text{ Гн}$	0,076	0,103	0,133	0,163
$L_2, \text{ Гн}$	0,163	0,103	0,085	0,076
$k_{E1}, \text{ Вc/м}$	0	0	0	0
$k_{E2}, \text{ Вc/м}$	5159	2069	1390	1108
$k_{ЭМ}, \text{ Н}$	75860	31040	21610	18140
$k_F, \text{ Н/м}$	163820000	41477000	22825000	16232000

Таблица 2.12 – Корни характеристического уравнения (2.24) в функции y при $I_{10} = 0$ А, $I_{20} = 15$ А

$y, \text{ м}$	-0,000275	0	0,000165	0,000275
p_1	-296444	-88043	-47338	-31928
p_2	-918	-925	-934	-944
p_3	-85,36	-85,36	-85,35	-85,33
p_4	-10,41	-16,44	-20,06	-22,47
p_5	-5,47	-5,47	-5,46	-5,46

Значения всех корней характеристического уравнения (2.24) отрицательные для всех случаев предварительного смещения оси ротора и соотношения токов в обмотках противостоящих магнитов, что доказывает устойчивость системы для рассматриваемых вариантов.

2.7 Выводы по второй главе

1. Найденные аналитические выражения позволяют определить величину смещения центра магнитной системы электромагнитного подшипника относительно оси вращения, при которой происходит компенсация силы веса ротора при равных токах в противоположных магнитах.

2. Смещение центра магнитной системы подшипника, компенсирующее вес ротора, при дифференциальном законе регулировании напряжениями позволяет снизить потребление электроэнергии катушками электромагнитов до 30%.

3. Доказано, что смещение центра магнитной системы электромагнитного подшипника относительно оси вращения ротора не влияет на устойчивость системы управления при настройках регуляторов, выбранных для центрального положения ротора.

4. Проведенные расчеты и результаты моделирования электромагнитных подшипников, двух различных по своим массогабаритным и мощностным характеристикам агрегатов, позволяют сделать вывод, что предложенное техническое решение по снижению потребления электроэнергии магнитными подшипниками может быть распространено на весь спектр подобных опор.

ГЛАВА 3 СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОДШИПНИКОМ С УЧЕТОМ СМЕЩЕНИЯ ЦЕНТРА МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ И РАЗДЕЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ ПРОТИВОПОЛОЖНЫХ МАГНИТОВ

3.1 Линеаризованная математическая модель электромагнитного подшипника при раздельном регулировании напряжений противоположных магнитов

Ключевыми особенностями электромагнитного подшипника, как объекта управления, является его принципиальная неустойчивость, вызванная наличием положительной обратной связи, и нестационарность, определяемая переменностью параметров как в функции перемещения ротора, так и в зависимости от величины управляющего сигнала. Поэтому работоспособность и показатели качества электромагнитного подшипника обеспечиваются структурным построением системы управления и методикой параметрического синтеза регуляторов. Выбор структурного построения системы управления и выбор типа и параметров регуляторов, как правило, осуществляется на базе линеаризованной математической модели объекта, которым, в данном случае, является электромагнитный подшипник.

Линеаризованная модель в виде передаточной функции (2.18) справедлива только для одного способа управления напряжениями противоположных электромагнитов, когда увеличение напряжения на одном электромагните на определенную величину, приводит к уменьшению на такую же величину напряжения на противоположном электромагните. Это так называемый дифференциальный закон управления, осуществляемый симметричным ШИМ, причем нулевому сигналу на входе $N_{ШИМ} = 0$ соответствует скважность $\gamma = 0,5$ и равные напряжения на обмотках противоположных электромагнитов $U_1 = U_2 = \frac{U}{2}$ [13, 58, 100].

В связи с этим первый недостаток модели (2.18) заключается в том, что она не может быть применена для других способов управления напряжениями электромагнитов, например, для отдельного управления по различным законам. Вторым недостатком вызван тем, что при смещении ротора относительно центра магнитной системы многие параметры электромагнитов изменяются, и при расчете коэффициентов передаточной функции (2.18) необходимо знать конкретные значения L_1 , L_2 , k_{E1} , k_{E2} , k_F и $k_{ЭМ}$, соответствующие смещению y . Для этого требуется производить дополнительные вычислительные процедуры по определению переменных параметров [100].

В то же время, исследования, проведенные во второй главе, показывают, что при смещении центра магнитной системы для компенсации силы веса такие параметры противоположных электромагнитов как L_1 и L_2 сильно различаются. В связи с этим напрашивается необходимость применения отдельного управления противоположными электромагнитами со своим набором регуляторов и различными настройками. Кроме того, формулы (2.7) – (2.11) для расчета рациональной величины смещения подразумевают, что токи и напряжения в противоположных равны при компенсации силы веса ротора. Однако, очевидно, что применение меньшей величины опорного напряжения на нижнем электромагните приведет к еще большей экономии потребляемой электромагнитным подвесом электроэнергии. Это также приводит к мысли отдельного управления противоположными электромагнитами.

Структурно-параметрический синтез системы управления электромагнитным подшипником с учетом смещения центра магнитной системы и отдельного управления противоположными электромагнитами требует создания новой линеаризованной модели электромагнитного подшипника как объекта управления.

Предлагаемая линеаризованная математическая модель электромагнитного подшипника, учитывающая изменение параметров электромагнитов в функции пе-

ремещения и пригодная для любого способа управления напряжениями на обмотках противоположных электромагнитов, построена на основе физических основ электромагнитных и электромеханических взаимодействий.

Для построения модели воспользуемся уравнениями (2.1) движения ротора в поле электромагнитов одного из каналов управления подшипника, например, по оси y [13, 100]:

$$\left. \begin{aligned} m \frac{d^2 y}{dt^2} &= k_{FI} \left[\frac{I_1^2}{(\delta - y)^2} - \frac{I_2^2}{(\delta + y)^2} \right] - G_y + F_{ey}; \\ U_1 &= R_1 I_1 + \frac{2k_{FI}}{\delta - y} \frac{dI_1}{dt} + \frac{2k_{FI} I_1}{(\delta - y)^2} \frac{dy}{dt}; \\ U_2 &= R_2 I_2 + \frac{2k_{FI}}{\delta + y} \frac{dI_2}{dt} - \frac{2k_{FI} I_2}{(\delta + y)^2} \frac{dy}{dt}, \end{aligned} \right\}, \quad (3.1)$$

Структурно-параметрический синтез системы управления электромагнитным подшипником, обеспечивающей требуемое качество работы, требует знания передаточных функций подшипника по отношению к управляющим и возмущающим воздействиям. Для нахождения этих передаточных функций необходимо произвести линеаризацию системы уравнений (3.1). С этой целью перейдем в (3.1) к малым отклонениям переменных ΔU_1 , ΔU_2 , ΔI_1 , ΔI_2 , Δy и ΔF_{ey} от рабочей точки с параметрами U_{10} , U_{20} , I_{10} , I_{20} , y_0 и F_{ey0} [97]. Тогда приращения нелинейных функций, входящих в состав рассматриваемой системы уравнений, от установившегося состояния можно представить их приближениями [100]:

$$\begin{aligned} \Delta \left\{ k_{FI} \left[\frac{I_1^2}{(\delta - y)^2} - \frac{I_2^2}{(\delta + y)^2} \right] \right\} &\approx \\ \approx k_{FI} \left\{ \frac{2I_{10}}{(\delta - y_0)^2} \Delta I_1 - \frac{2I_{20}}{(\delta + y_0)^2} \Delta I_2 + \left[\frac{2I_{10}^2}{(\delta - y_0)^3} + \frac{2I_{20}^2}{(\delta + y_0)^3} \right] \Delta y \right\}; \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$\Delta \left(\frac{2k_{FI}}{\delta - y} \frac{dI_1}{dt} \right) \approx \frac{2k_{FI}}{\delta - y_0} \frac{d\Delta I_1}{dt} + \frac{2k_{FI} I_{10}'}{(\delta - y_0)^2} \Delta y; \quad (3.3)$$

$$\Delta \left[\frac{2k_{FI}I_1}{(\delta - y)^2} \frac{dy}{dt} \right] \approx \frac{2k_{FI}V_0}{(\delta - y_0)^2} \Delta I_2 + \frac{4k_{FI}I_{10}V_0}{(\delta - y_0)^3} \Delta y + \frac{2k_{FI}I_{10}}{(\delta - y_0)^2} \frac{d\Delta y}{dt}; \quad (3.4)$$

$$\Delta \left(\frac{2k_{FI}}{\delta + y} \frac{dI_2}{dt} \right) \approx \frac{2k_{FI}}{\delta + y_0} \frac{d\Delta I_2}{dt} - \frac{2k_{FI}I'_{20}}{(\delta + y_0)^2} \Delta y; \quad (3.5)$$

$$\Delta \left[\frac{2k_{FI}I_2}{(\delta + y)^2} \frac{dy}{dt} \right] \approx \frac{2k_{FI}V_0}{(\delta + y_0)^2} \Delta I_2 - \frac{4k_{FI}I_{20}V_0}{(\delta + y_0)^3} \Delta y + \frac{2k_{FI}I_{20}}{(\delta + y_0)^2} \frac{d\Delta y}{dt}, \quad (3.6)$$

где I'_{10} , I'_{20} и V_0 – начальные значения скорости изменения токов в обмотках электромагнитов и скорости перемещения ротора.

Переходя в (3.1) к отклонениям от установившегося состояния и заменяя нелинейные функции их приближениями (3.2) – (3.6), получим следующую линеаризованную систему уравнений, описывающих динамику электромагнитного подшипника как объекта управления [100]:

$$\left. \begin{aligned} m \frac{d^2\Delta y}{dt^2} - k_{FI} \left[\frac{2I_{10}^2}{(\delta - y_0)^3} + \frac{2I_{20}^2}{(\delta + y_0)^3} \right] \Delta y &= k_{FI} \left[\frac{2I_{10}}{(\delta - y_0)^2} \Delta I_1 - \frac{2I_{20}}{(\delta + y_0)^2} \Delta I_2 \right] + \Delta F_{\text{эв}}; \\ \Delta U_1 &= \left[R_1 + \frac{2k_{FI}V_0}{(\delta - y_0)^2} \right] \Delta I_1 + \frac{2k_{FI}}{\delta - y_0} \frac{d\Delta I_1}{dt} + \left[\frac{2k_{FI}I'_{10}}{(\delta - y_0)^2} + \frac{4k_{FI}I_{10}V_0}{(\delta - y_0)^3} \right] \Delta y + \frac{2k_{FI}I_{10}}{(\delta - y_0)^2} \frac{d\Delta y}{dt}; \\ \Delta U_2 &= \left[R_2 - \frac{2k_{FI}V_0}{(\delta + y_0)^2} \right] \Delta I_2 + \frac{2k_{FI}}{\delta + y_0} \frac{d\Delta I_2}{dt} + \left[\frac{4k_{FI}I_{20}V_0}{(\delta + y_0)^3} - \frac{2k_{FI}I'_{20}}{(\delta + y_0)^2} \right] \Delta y - \frac{2k_{FI}I_{20}}{(\delta + y_0)^2} \frac{d\Delta y}{dt}. \end{aligned} \right\} (3.7)$$

Вводя обозначения: $k_{Fy} = k_{FI} \left[\frac{2I_{10}^2}{(\delta - y_0)^3} + \frac{2I_{20}^2}{(\delta + y_0)^3} \right]$, $T_1 = \frac{2k_{FI}(\delta - y_0)}{(\delta - y_0)^2 R_1 + 2k_{FI}V_0}$,

$$T_2 = \frac{2k_{FI}(\delta + y_0)}{(\delta + y_0)^2 R_2 - 2k_{FI}V_0}, \quad L\{\Delta y\} = y(p), \quad L\{\Delta U_1\} = U_1(p), \quad L\{\Delta U_2\} = U_2(p),$$

$L\{\Delta I_1\} = I_1(p)$, $L\{\Delta I_2\} = I_2(p)$ и $L\{\Delta F_{\text{эв}}\} = F_{\text{эв}}(p)$, перейдем в (3.7) к преобразованиям Лапласа:

$$\left. \begin{aligned}
mp^2 y(p) - k_{Fy} y(p) &= k_{FI} \left[\frac{2I_{10}}{(\delta - y_0)^2} I_1(p) - \frac{2I_{20}}{(\delta + y_0)^2} I_2(p) \right] + F_{\text{эв}}(p); \\
U_1(p) &= \left[R_1 + \frac{2k_{FI} V_0}{(\delta - y_0)^2} \right] (T_1 p + 1) I_1(p) + \left[\frac{2k_{FI} I'_{10}}{(\delta - y_0)^2} + \frac{4k_{FI} I_{10} V_0}{(\delta - y_0)^3} \right] y(p) + \frac{2k_{FI} I_{10}}{(\delta - y_0)^2} p y(p); \\
U_2(p) &= \left[R_2 - \frac{2k_{FI} V_0}{(\delta + y_0)^2} \right] (T_2 p + 1) I_2(p) + \left[\frac{4k_{FI} I_{20} V_0}{(\delta + y_0)^3} - \frac{2k_{FI} I'_{20}}{(\delta + y_0)^2} \right] y(p) - \frac{2k_{FI} I_{20}}{(\delta + y_0)^2} p y(p).
\end{aligned} \right\} (3.7)$$

Система уравнений (3.7) позволяет найти все необходимые передаточные функции электромагнитного подшипника как объекта управления. Выражая из второго уравнения системы (3.7) $I_1(p)$, из третьего уравнения $I_2(p)$ и подставляя их значения в первое уравнение, получим следующее выражение [100]:

$$\begin{aligned}
& \left[\frac{mT_1 T_2}{k_{Fy} - d_5 + d_6} p^4 + \frac{m(T_1 + T_2)}{k_{Fy} - d_5 + d_6} p^3 + \frac{m + d_1 T_2 + d_2 T_1 - k_{Fy} T_1 T_2}{k_{Fy} - d_5 + d_6} p^2 + \right. \\
& \left. + \frac{d_1 + d_2 + (d_5 - k_{Fy}) T_2 - (d_6 + k_{Fy}) T_1}{k_{Fy} - d_5 + d_6} p - 1 \right] y(p) = \\
& = \frac{d_3 (T_2 p + 1)}{k_{Fy} - d_5 + d_6} U_1(p) - \frac{d_4 (T_1 p + 1)}{k_{Fy} - d_5 + d_6} U_2(p) + \frac{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}{k_{Fy} - d_5 + d_6} F_{\text{эв}}(p)
\end{aligned} \quad (3.8)$$

$$\text{где } d_1 = \frac{4k_{FI}^2 I_{10}^2}{(\delta - y_0)^4 R_1 + 2k_{FI} V_0 (\delta - y_0)^2}; \quad d_2 = \frac{4k_{FI}^2 I_{20}^2}{(\delta + y_0)^4 R_2 - 2k_{FI} V_0 (\delta + y_0)^2};$$

$$d_3 = \frac{2k_{FI} I_{10}}{(\delta - y_0)^2 R_1 + 2k_{FI} V_0}; \quad d_4 = \frac{2k_{FI} I_{20}}{(\delta + y_0)^2 R_2 - 2k_{FI} V_0};$$

$$d_5 = \frac{4k_{FI}^2 I_{10} [2I_{10} V_0 + (\delta - y_0) I'_{10}]}{(\delta - y_0)^3 [R_1 (\delta - y_0)^2 + 2k_{FI} V_0]}; \quad d_6 = \frac{4k_{FI}^2 I_{20} [2I_{20} V_0 - (\delta + y_0) I'_{20}]}{(\delta + y_0)^3 [R_2 (\delta + y_0)^2 - 2k_{FI} V_0]}.$$

Используя принцип суперпозиции и принимая в (3.8) $U_2(p) = 0$, $F_{\text{эв}}(p) = 0$, найдем передаточную функцию электромагнитного подшипника по отношению к изменению управляющего воздействия $U_1(p)$ [100]:

$$W_{U_1}(p) = \frac{y(p)}{U_1(p)} = \frac{k_{U_1} (b_{01} p + 1)}{a_0 p^4 + a_1 p^3 + a_2 p^2 + a_3 p - 1}, \quad (3.9)$$

$$\text{где } k_{U_1} = \frac{d_3}{k_{Fy} - d_5 + d_6}; b_{01} = T_2; a_0 = \frac{mT_1T_2}{k_{Fy} - d_5 + d_6}; a_1 = \frac{m(T_1 + T_2)}{k_{Fy} - d_5 + d_6};$$

$$a_2 = \frac{m + d_1T_2 + d_2T_1 - k_{Fy}T_1T_2}{k_{Fy} - d_5 + d_6}; a_3 = \frac{d_1 + d_2 + (d_5 - k_{Fy})T_2 - (d_6 + k_{Fy})T_1}{k_{Fy} - d_5 + d_6}.$$

Теперь полагая, что $U_1(p) = 0$ и $F_{ey}(p) = 0$, определим передаточную функцию подшипника по отношению к изменению управляющего воздействия $U_2(p)$ [100]:

$$W_{U_2}(p) = \frac{y(p)}{U_2(p)} = -\frac{k_{U_2}(b_{02}p + 1)}{a_0p^4 + a_1p^3 + a_2p^2 + a_3p - 1}, \quad (3.10)$$

$$\text{где } k_{U_2} = \frac{d_4}{k_{Fy} - d_5 + d_6}; b_{02} = T_1.$$

Передаточная функция по отношению к изменению возмущающего воздействия $F_{ey}(p)$ находится при $U_1(p) = 0$ и $U_2(p) = 0$ [100]:

$$W_{F_{ey}}(p) = \frac{y(p)}{F_{ey}(p)} = \frac{(T_1p + 1)(T_2p + 1)}{(k_{Fy} - d_5 + d_6)(a_0p^4 + a_1p^3 + a_2p^2 + a_3p - 1)}. \quad (3.11)$$

Выражения (3.9) – (3.11) показывают, что действительно электромагнитный подшипник представляет собой неустойчивый объект управления, описываемый динамическими звеньями четвертого порядка. Кроме того, передаточные функции (3.9) – (3.11) позволяют представить электромагнитный подшипник как объект управления в виде упрощенной (рисунок 3.1) и детализованной (рисунок 3.2) структурных схем.

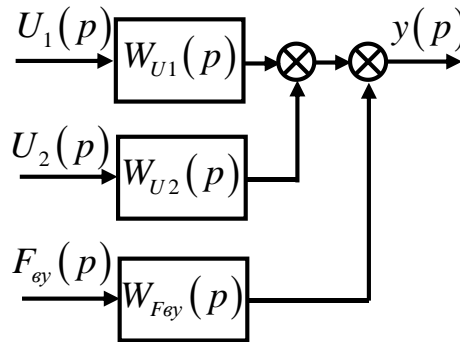


Рисунок 3.1 – Линеаризованная структурная схема электромагнитного подшипника как объекта управления по одной оси

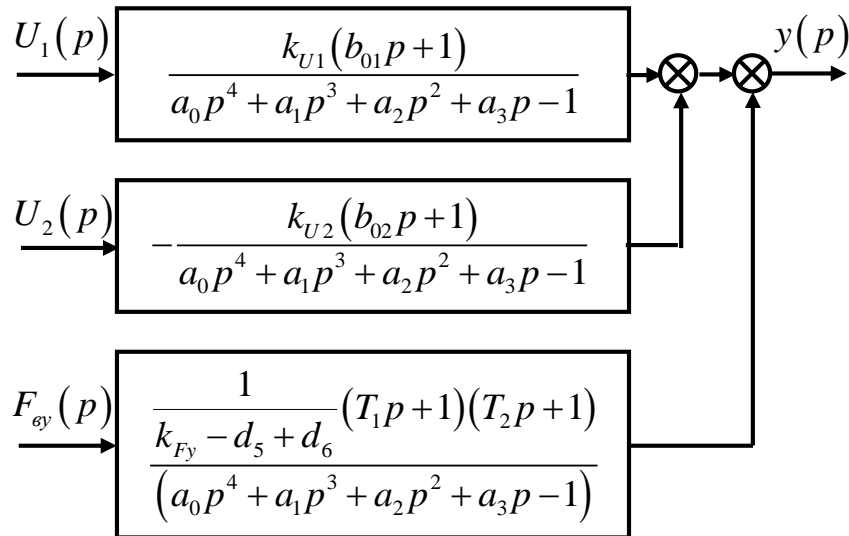


Рисунок 3.2 – Линеаризованная структурная схема электромагнитного подшипника как объекта управления в детализованном виде

3.2 Оценка адекватности предлагаемой линеаризованной математической модели электромагнитного подшипника

Совокупность передаточных функций (3.9) – (3.11) и структурных схем, приведенных на рисунках 3.1 и 3.2, представляют линеаризованную математическую модель электромагнитного подшипника при любом законе управления напряжениями противоположных магнитов: отдельном, независимом и дифференциальном [100]. Действительно, полученная модель будет справедлива и для дифференциального закона регулирования, как частного случая.

Поэтому сравним известную передаточную функцию (2.19), справедливую только дифференциального закона регулирования с предлагаемой, например, (3.9). Из сравнения можно сделать вывод, что они совпадают по виду и порядку знаменателя. Однако, очевидно, что есть и различия, прежде всего, в коэффициенте передачи, поскольку в качестве входных используются разные переменные. При выводе передаточной функции (2.19) авторами за входную величину принимался

цифровой код $N_{ШИМ}$ на входе широтно-импульсного модулятора [100]. При нахождении передаточной функции (3.9) за входную величину было взято напряжение U_1 на первом (верхнем) электромагните.

Для оценки адекватности новых передаточных функций найдем численное значение передаточной функции (3.9) для радиального электромагнитного подшипника нагнетателя газоперекачивающего агрегата ГПА Ц-16, когда ротор находится в центре магнитной системы, то есть $y_0 = 0$, начальные значения токов $I_{10} = I_{20} = 7,5$ А, их производных $I'_{10} = I'_{20} = 0$, начальная скорость перемещения ротора $V_0 = 0$, а электромагниты характеризуются следующими параметрами: $k_{FI} = 3,87 \cdot 10^{-5}$ Нм²/А², $R_1 = R_2 = 1,7$ Ом. С учетом этих данных передаточная функция (3.9) будет равна [100]:

$$W_{U_1}(p) = \frac{2,94 \cdot 10^{-5} (0,0609p + 1)}{6,898 \cdot 10^{-8} p^4 + 2,267 \cdot 10^{-6} p^3 + 3,723 \cdot 10^{-3} p^2 - 0,0609p - 1}. \quad (3.12)$$

Передаточная функция (2.19) для этого же агрегата с учетом того, что при центральном положении ротора $L_1 = L_2 = 0,103$ Гн, $k_{ЭМ} = 31309$ Н, $k_F = 2,0878 \cdot 10^7$ Н/м, $k_{E1} = k_{E2} = 1035$ Вc/м принимает следующее численное значение:

$$W_{oy}(p) = \frac{4,537 \cdot 10^{-8} (0,0609p + 1)}{6,837 \cdot 10^{-8} p^4 + 2,247 \cdot 10^{-6} p^3 + 3,69 \cdot 10^{-3} p^2 - 0,0614p - 1}. \quad (3.13)$$

Сравнение коэффициентов характеристических полиномов передаточных функций (3.12) и (3.13) показывает, что расхождение их величин не превышает 0,9%. Это косвенно подтверждает адекватность полученной новой линеаризованной математической модели электромагнитного подшипника, представленной передаточными функциями (3.9) – (3.11), так как достоверность известной передаточной функции (2.19) определена в ходе проведения реальных экспериментов и исследований, а также подтверждена положительным опытом промышленной эксплуатации ЭМП на газоперекачивающих станциях магистрального газопровода Уренгой-Помары-Ужгород [58].

Отличительная особенность новой линеаризованной математической модели заключается в том, что она позволяет производить структурный и параметрический синтез системы управления электромагнитным подшипником для любого способа управления напряжениями противоположных магнитов. Кроме того, передаточные функции (3.9) – (3.11) позволяют определять динамические свойства электромагнитного подшипника для любого положения ротора с учетом начальных значений производных токов I'_{10} и I'_{20} и скорости перемещения ротора V_0 . В отличие от этого передаточная функция (2.19) не позволяет учитывать I'_{10} , I'_{20} и V_0 .

Очевидно, что величины I'_{10} , I'_{20} и V_0 должны влиять на работоспособность системы управления электромагнитным подшипником. Следует отметить, что исследования влияния начальных значений токов I_{10} и I_{20} и перемещения y_0 на устойчивость трехконтурной системы управления электромагнитным подшипником проводились [58, 95], но вопросам работоспособности магнитной опоры с учетом начальных значений производных токов I'_{10} , I'_{20} и скорости перемещения ротора V_0 в этих работах внимания не уделялось.

Рассмотренная выше трехконтурная система управления, которая находит применение в электромагнитных подшипниках, в случае применения новой математической модели и дифференциального закона регулирования напряжений при центральном положении ротора, имеет характеристическое уравнение аналогичное (2.24) [95]:

$$a_{01}p^5 + a_{11}p^4 + a_{21}p^3 + a_{31}p^2 + a_{41}p + 1 = 0, \quad (3.14)$$

$$\text{где } a_{01} = \frac{a_0 T_{II}}{k_2}; \quad a_{11} = \frac{(a_1 + k_1 b_0 T_{III}) T_{II}}{k_2}; \quad a_{21} = \frac{[a_2 + k_1 (b_0 + T_{III}) + k_2 b_0 T_{III}] T_{II}}{k_2};$$

$$a_{31} = \frac{[a_3 + k_1 + k_2 (b_0 + T_{III})] T_{II}}{k_2} + b_0 T_{III}; \quad a_{41} = \frac{(k_2 - 1) T_{II}}{k_2} + b_0 + T_{III}; \quad k_1 = k_{III} k_{Oy} k_{OCC} k_{ДП};$$

$$k_2 = k_{II} k_{III} k_{Oy} k_{ДП}; \quad k_{Oy} = \frac{k_{ШИМ} U (d_3 + d_4)}{k_{Fy} - d_5 + d_6}; \quad b_0 = b_{01} = b_{02}.$$

Анализ формул (3.14) показывает, что на все коэффициенты характеристического уравнения влияют начальные условия: I'_{20} , I'_{40} и V_0 . Причем при $I'_{10} = I'_{20} = 0$ и $V_0 = 0$ мы получим результат, показывающий, что при корректном выборе параметров регуляторов система управления электромагнитным подшипником будет устойчива при любых перемещениях ротора в пределах страховочных подшипников и при любых начальных значениях токов I_{10} и I_{20} [5]. Поэтому определимся прежде всего с возможным диапазоном изменения начальных условий I'_{10} и I'_{20} . Закон изменения, например, тока I_1 во времени при неподвижном роторе определяется уравнением [101]:

$$U_1(t) = I_1(t)R_1 + L_1 \frac{dI_1(t)}{dt}, \quad (3.15)$$

где $L_1 = \frac{2k_{FI}}{\delta - y}$ – индуктивность обмотки первого магнита.

Очевидно, что максимальное значение производной тока будет наблюдаться при переключении транзисторов силового преобразователя. Из решения уравнения (3.15) следует, что изображение тока $I_1(p)$ при подаче на обмотку опорного напряжения U будет иметь вид [102]:

$$I_1(p) = \frac{L_1 I_{10} p + U}{R_1 (T_1 p + 1) p}, \quad (3.16)$$

где $T_1 = \frac{L_1}{R_1}$, p – комплексная переменная.

По таблицам обратных преобразований Лапласа [7], найдем оригинал от изображения (3.16):

$$I_1(t) = \frac{U}{R_1} \left[1 + \left(\frac{L_1 I_{10}}{U} - 1 \right) e^{-\frac{t}{T_1}} \right]. \quad (3.17)$$

Из выражения (3.17) следует зависимость изменения производной тока при переключении силовых транзисторов:

$$\frac{dI_1(t)}{dt} = \frac{U}{T_1 R_1} \left(1 - \frac{L_1 I_{10}}{U} \right) e^{-\frac{t}{T_1}}. \quad (3.18)$$

Анализ формулы (3.18) показывает, что максимум производной тока будет наблюдаться при $t = 0$ и $I_{10} = 0$:

$$I'_{10.\max} = \frac{U}{T_1 R_1}. \quad (3.19)$$

Радиальный электромагнитный подшипник нагнетателя газоперекачивающего агрегата ГПА Ц-16 имеет следующие параметры [8] при центральном положении ротора, то есть при $y_0 = 0$: $m = 385$ кг, $k_{FI} = 3,8798 \cdot 10^{-5}$ Нм²/А², $\delta = 0,00075$ м, $R_2 = R_4 = 1,7$ Ом, $L_1 = L_2 = 0,103$ Гн, $T_1 = T_2 = 0,0609$ с. Следовательно, в соответствии с формулой (3.19), при опорном напряжении силового преобразователя $U = 220$ В максимальное значение производной тока будет равно $I'_{10.\max} = 2125$ А/с, при $U = 110$ В – $I'_{20.\max} = 1062$ А/с, при $U = 48$ В – $I'_{20.\max} = 464$ А/с. Причем, при дифференциальном законе регулирования токами I_1 и I_2 , максимальные значения $I'_{20.\max}$ будут иметь те же численные значения, но с отрицательным знаком.

Решая характеристическое уравнение (3.14) при параметрах настройки регуляторов: $k_{\Pi\Pi} = k_{\Pi} = 8$, $T_{\Pi\Pi} = 0,183$ с, $T_{\Pi} = k_{occ} = 0,0128$ с [93], разных уровнях опорного напряжения U и производных тока $I'_{10.\max}$ и $I'_{20.\max}$, найдем зависимость граничного значения начальной скорости $V_{0.\text{ep}}$, от величины опорного напряжения силового преобразователя U (таблица 3.1) [101].

Таблица 3.1 – Зависимость $V_{0.\text{ep}}$ от величины опорного напряжения силового преобразователя U

U , В	48	110	220
$V_{0.\text{ep}}$, м/с	0,116	0,162	0,207

Здесь под $V_{0.эп}$ понимается значение скорости перемещения ротора, при котором система управления находится на границе устойчивости. Анализ данных таблицы 3.1 позволяет сказать, что минимальное граничное значение начальной скорости перемещения ротора равно $V_{0.эп} = 0,116$ м/с при опорном напряжении силового преобразователя $U = 48$ В.

Произведем моделирование системы управления радиальным электромагнитным подшипником нагнетателя газоперекачивающего агрегата ГПА Ц-16 при $U = 48$ В и выбранных параметрах регуляторов (рисунок 3.3) [101].

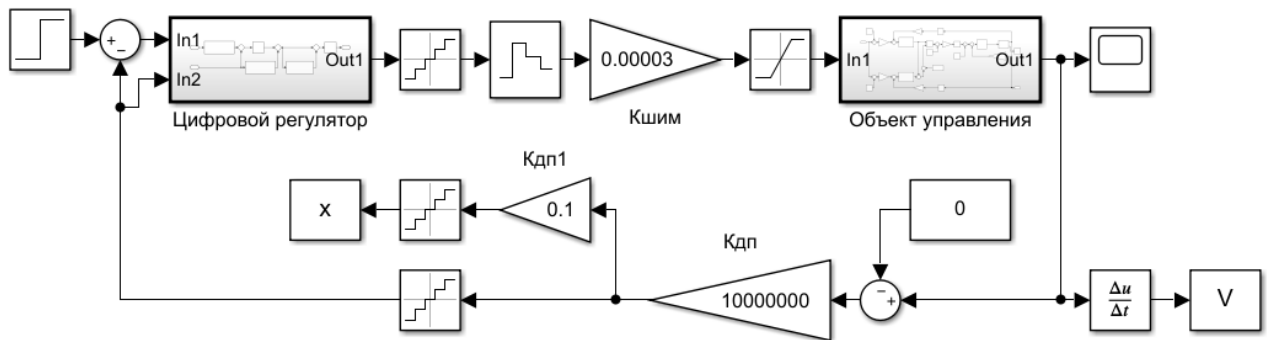


Рисунок 3.3 – Расчетная модель системы управления электромагнитным подшипником

Приведенная расчетная модель позволяет построить графики перемещения ротора (рисунок 3.4) и скорости (рисунок 3.5) при ступенчатом изменении задающего воздействия на 100 мкм. Анализ графиков показывает, что максимальное значение скорости не превышает $V = 0,018$ м/с. Следовательно, при выбранных параметрах регуляторов система управления радиальным электромагнитным подшипником будет устойчиво работать во всем диапазоне начальных условий. График переходного процесса при набросе возмущающей силы в $\Delta F_{эп} = 1000$ Н (рисунок 3.6) показывает, что динамический провал положения оси ротора составляет $\Delta y_{\max} = 19$

микрон. Это позволяет сделать вывод, что динамическая жесткость опоры равна:

$$C_y^{дин} = \frac{\Delta F_{ey}}{\Delta y_{max}} = 52 \cdot 10^6 \text{ Н/м [101]}.$$

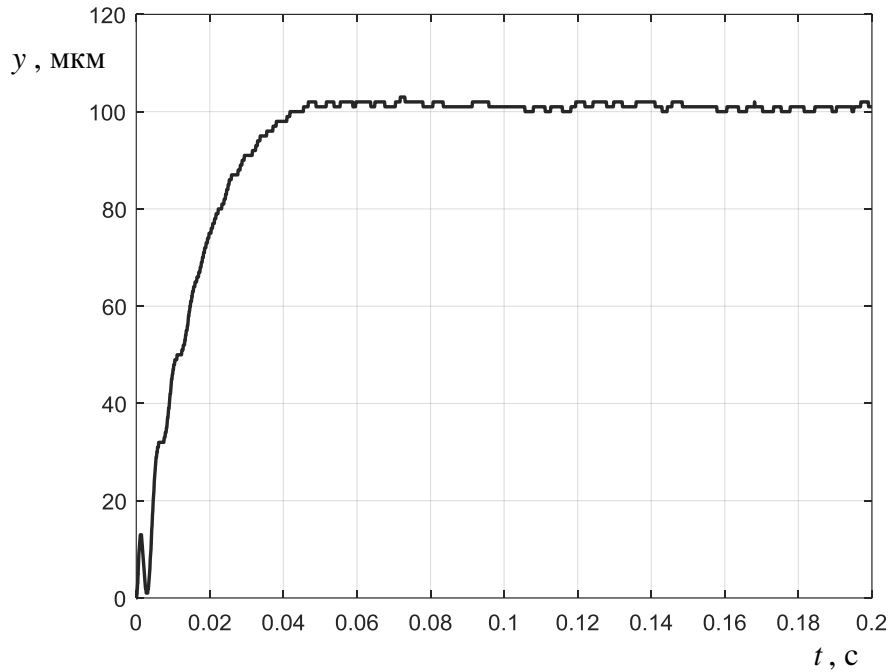


Рисунок 3.4 – График переходного процесса при перемещении ротора на 100 мкм

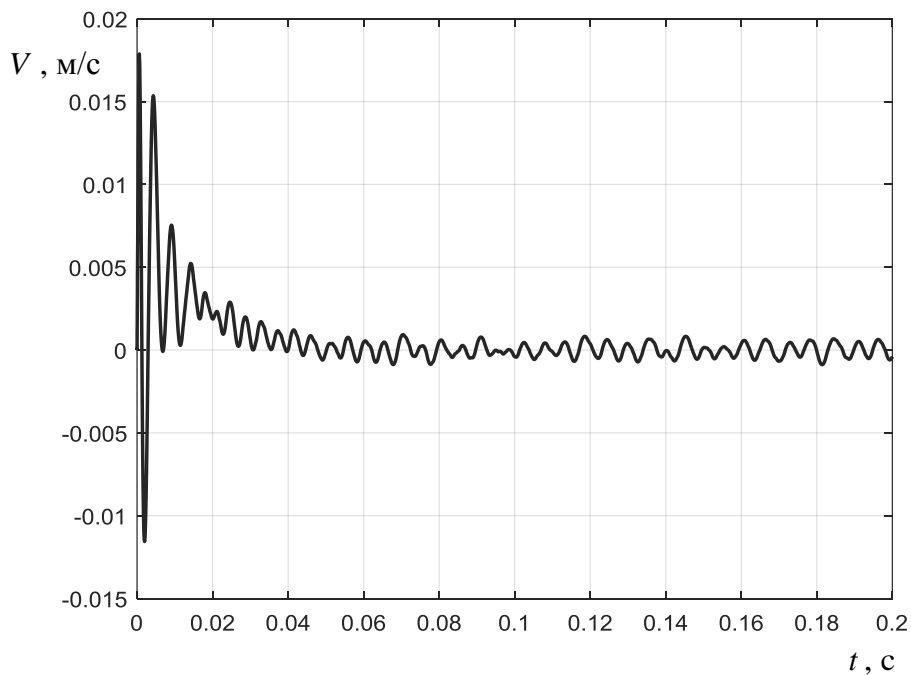


Рисунок 3.5 – График скорости перемещения ротора

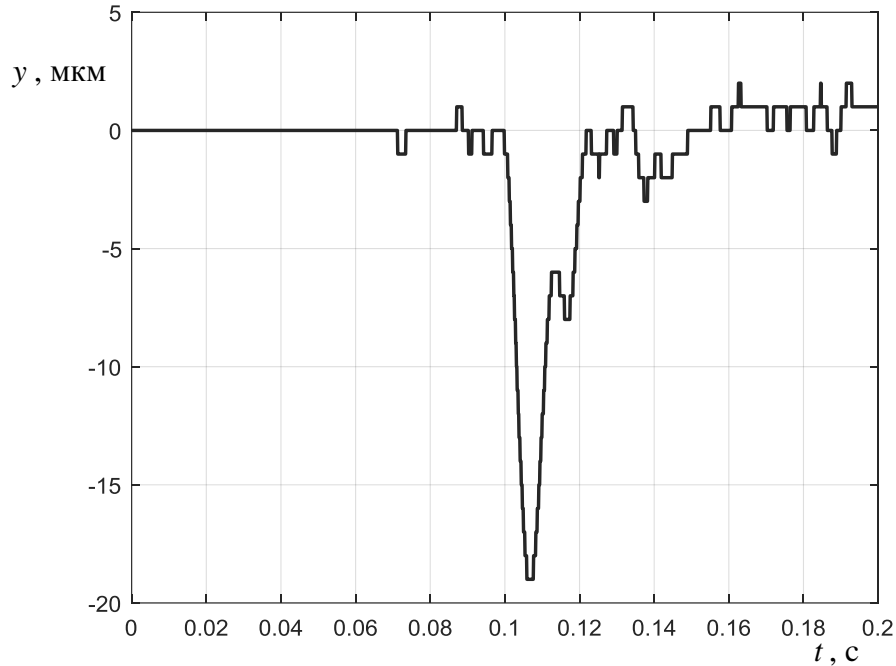


Рисунок 3.6 – График переходного процесса при набросе возмущающей силы

$$F_{ey} = 1000 \text{ Н}$$

Поскольку масса ротора, приходящаяся на один радиальный подшипник нагнетателя газоперекачивающего агрегата ГПА Ц-16, составляет $m_1 = 545$ кг, то первая резонансная частота ротора будет равна [101]:

$$\omega_{1p} = \sqrt{\frac{2C_y^{\text{дин}}}{m_1}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 52 \cdot 10^6}{545}} = 439 \text{ рад/с.}$$

Эта частота находится внутри диапазона скоростей вращения ротора, и при разгонах и торможениях нагнетателя, на его работу могут оказывать влияние резонансные явления.

Однако, проведенное исследование показывает, что возможен поиск путей для дальнейшего увеличения быстродействия системы управления радиальным электромагнитным подшипником и, следовательно, повышения динамической жесткости опоры. При этом, с позиции ограничений по скорости перемещения ротора, имеется приблизительно пятикратный резерв [101].

3.3 Структурный синтез системы управления

Известные системы управления электромагнитными подшипниками и методики синтеза их регуляторов, как правило, подразумевают наличие одного комплекта регуляторов, работающего на пару противоположных электромагнитов [1 – 13, 35, 58]. При этом параметры настройки регуляторов выбираются для центрального положения ротора относительно магнитной системы, когда индуктивности и, следовательно, инерционности противоположных электромагнитов одинаковы [35, 58, 60]. Поэтому смещение ротора относительно центра магнитной системы приводит к снижению быстродействия и жесткости электромагнитных подшипников. С другой стороны, смещение ротора от центрального положения позволяет скомпенсировать действие силы веса ротора и уменьшить токи в электромагнитах, осуществляющих эту компенсацию (см. раздел 2 настоящей работы). Таким образом, в традиционных системах управления электромагнитным подвесом ротора одновременное достижение большой динамической жесткости электромагнитных подшипников и снижение токов в электромагнитах, компенсирующих силу веса, проблематично.

В связи с этим, целью данного исследования является разработка системы управления электромагнитным подшипником, обеспечивающей большое быстродействие и динамическую жесткость, снижение токов в электромагнитах, компенсирующих силу веса, и снижение потребляемой мощности.

Анализ ранее найденных передаточных функций (3.9) и (3.10) свидетельствует о возможности значительного варьирования их численных значений в зависимости от смещения центра магнитной системы относительно оси вращения ротора. В подтверждение сказанному, найдем численные значения передаточных функций (3.9) и (3.10) для радиальных электромагнитных подшипников нагнетателя газоперекачивающего агрегата ГПА Ц-16 при смещении ротора на величину $y_0 = 165$ мкм, когда $k_{FI} = 3,8798 \cdot 10^{-5}$ Нм²/А², $L_1 = 0,133$ Гн, $L_2 = 0,085$ Гн, $R_1 = R_2 = 1,7$ Ом, $T_1 = 0,078$ с, $T_2 = 0,0499$ с, $k_{Fy} = 2,75 \cdot 10^7$ Н/м:

$$W_{U1}(p) = \frac{3,637 \cdot 10^{-5}(0,0499p + 1)}{5,454 \cdot 10^{-8}p^4 + 1,792 \cdot 10^{-6}p^3 + 1,401 \cdot 10^{-3}p^2 - 0,055716p - 1}, \quad (3.20)$$

$$W_{U2}(p) = \frac{1,486 \cdot 10^{-5}(0,078p + 1)}{5,454 \cdot 10^{-8}p^4 + 1,792 \cdot 10^{-6}p^3 + 1,401 \cdot 10^{-3}p^2 - 0,055716p - 1}. \quad (3.21)$$

Сравнение формул (3.12) и (3.20) показывает существенное изменение динамических свойств электромагнитного подшипника при смещении центра магнитной системы относительно оси вращения ротора, что сказывается на работу системы управления электромагнитным подшипником с параметрами регуляторов, выбранными для центрального положения [103]. Это объясняется тем, что при смещении центра магнитной системы относительно оси вращения происходит перераспределение зазоров между электромагнитами и ротором, и, как следствие, изменяются постоянные времени обмоток электромагнитов и силы, действующие на ротор со стороны противоположных электромагнитов.

Еще один важный вывод можно сделать при сравнении (3.20) и (3.21) – числители этих передаточных функций существенно отличаются. Это наталкивает на мысль применения отдельного управления напряжениями и, следовательно, токами противоположных электромагнитов. При этом предлагается применить следующую функциональную схему для каждого канала системы управления электромагнитным подвесом ротора (рисунок 3.7) [103, 104]. Это техническое решение запатентовано автором (в соавторстве) как изобретение [103].

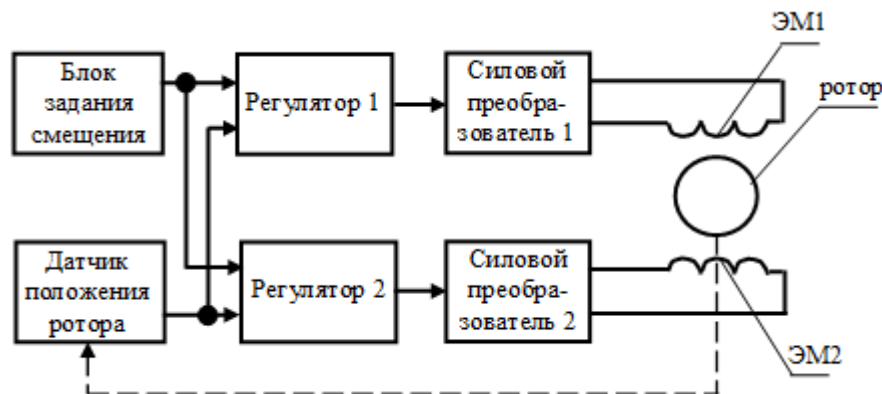


Рисунок 3.7 – Функциональная схема системы управления электромагнитным подвесом ротора по одной оси

Каждый канал системы управления содержит датчик положения ротора, два регулятора, два силовых преобразователя, первый и второй электромагниты ЭМ1 и ЭМ2 и блок задания смещения ротора. В качестве датчика положения ротора в системе электромагнитного подвеса ротора, например, нагнетателя газоперекачивающего агрегата применяется индуктивный токовихревой датчик дифференциального типа, выходной сигнал которого оцифровывается с помощью специального блока. Каждый из регуляторов 1 и 2 может быть представлен совокупностью интегрального (И), пропорционального (П) и пропорционально-дифференциального (ПД) регуляторов и дифференцирующего звена с соответствующими связями (рисунок 3.8) [104].

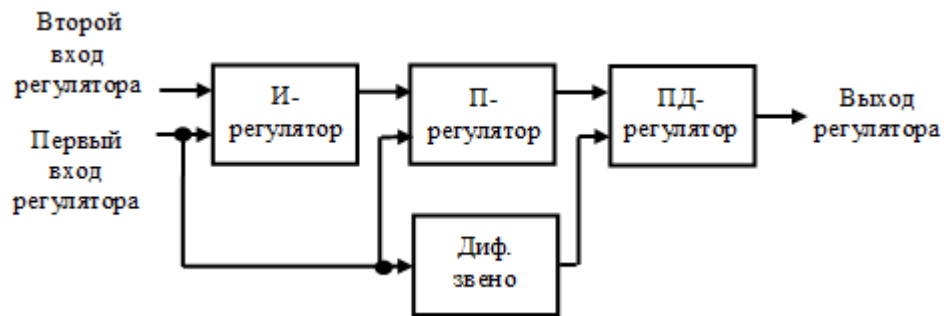


Рисунок 3.8 – Функциональная схема регулятора

Каждый из силовых преобразователей может быть выполнен по принципиальной схеме, приведенной на рисунке 3.9 [104]. Транзисторы VT1 и VT2 управляются с помощью широтно-импульсного модулятора, подключенного к выходу одного из регуляторов. Обмотка каждого электромагнита подключаются к силовому преобразователю, например, как показано на рис. 3.9. Блок задания смещения и оба регулятора реализуются программно на контроллере или микроконтроллере, на котором выполнена система управления электромагнитным подвесом ротора.

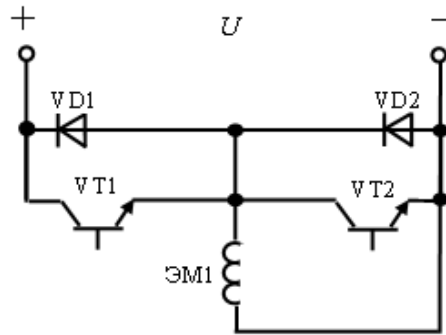


Рисунок 3.9 – Принципиальная схема силового преобразователя

Предлагаемая система управления электромагнитным подвесом ротора работает следующим образом. В каждом канале управления датчик положения ротора измеряет отклонение ротора от центрального положения. Сигнал об измеренном отклонении подается на инверсные входы первого и второго регуляторов. Одновременно на прямые входы этих регуляторов подается сигнал с блока задания смещения. Каждый регулятор находит разность сигналов, поступающих с блока задания смещения и датчика положения ротора, и в соответствии с передаточными функциями, реализованными в этих регуляторах, подают сигналы на входы силовых преобразователей. Первый силовой преобразователь регулирует напряжение и ток в электромагните ЭМ1, а второй силовой преобразователь регулирует напряжение и ток в электромагните ЭМ2. В результате в обмотках электромагнитов формируются такие токи, которые создают силу, выводящую ротор в положение, определяемое блоком задания смещения ротора.

Структурная схема предлагаемой системы управления электромагнитным подшипником имеет следующий вид (рисунок 3.10) [105]. На структурной схеме приняты следующие обозначения: T_{u1} и T_{u2} – постоянные времени интегральных регуляторов; k_{n1} и k_{n2} – коэффициенты передачи П-регуляторов; k_{nd1} , T_{nd1} , k_{nd2} и T_{nd2} – коэффициенты передачи и постоянные времени ПД-регуляторов; k_{cn1} и k_{cn2} – коэффициенты передачи силовых преобразователей; k_{occ1} и k_{occ2} – коэффициенты передачи обратных связей по скорости.

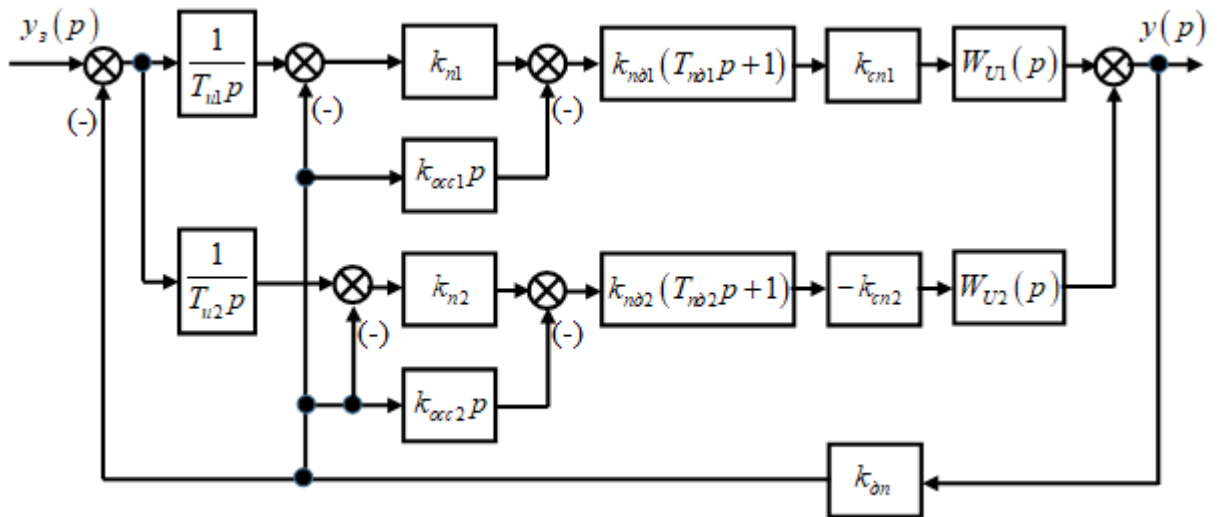


Рисунок 3.10 – Структурная схема рассматриваемой системы управления электромагнитным подшипником

Для достижения поставленной цели, фактически предлагается применить трехконтурную систему управления каждым электромагнитом.

3.4 Методика выбора параметров регуляторов

Определение параметров регуляторов непрерывного прототипа известной трехконтурной системы управления электромагнитным подшипником с дифференциальным законом регулирования напряжений противоположными магнитами [39, 58, 60] базируется на методе синтеза систем управления неустойчивыми объектами [58, 106]. Применим этот метод для выбора параметров регуляторов предлагаемой системы управления с отдельным управлением напряжениями противоположных электромагнитов.

В соответствии с этим методом, необходимо найти передаточные функции всех контуров для каждой системы управления электромагнитами, как верхнего, так и нижнего. Производя структурные преобразования системы управления, представленной на рисунке 3.10, и используя промежуточные формулы, аналогичные (2.21) и (2.22), в конечном итоге получим передаточные функции замкнутых систем управления для каждого электромагнита [105]:

$$W_{31}(p) = \frac{y(p)}{y_3(p)} = \frac{b_{03}p^2 + b_{13}p + 1}{k_{\partial n}(a_{05}p^5 + a_{15}p^4 + a_{25}p^3 + a_{35}p^2 + a_{45}p + 1)}, \quad (3.22)$$

$$W_{32}(p) = \frac{y(p)}{y_3(p)} = \frac{b_{04}p^2 + b_{14}p + 1}{k_{\partial n}(a_{08}p^5 + a_{18}p^4 + a_{28}p^3 + a_{38}p^2 + a_{48}p + 1)}, \quad (3.23)$$

где $b_{03} = T_{n\partial 1}b_{01}$; $b_{13} = T_{n\partial 1} + b_{01}$; $b_{04} = T_{n\partial 2}b_{02}$; $b_{14} = T_{n\partial 2} + b_{02}$; $a_{05} = \frac{a_{04}T_{u1}}{k_{211}k_{\partial n}}$; $a_{15} = \frac{a_{14}T_{u1}}{k_{211}k_{\partial n}}$;

$$a_{25} = \frac{a_{24}T_{u1}}{k_{211}k_{\partial n}}; a_{35} = \frac{a_{34}T_{u1}}{k_{211}k_{\partial n}} + b_{03}; a_{45} = \frac{T_{u1}}{k_{211}k_{\partial n}} + b_{13}; k_{211} = \frac{k_{n1}k_{111}}{k_{21} - 1}; k_{21} = k_{n1}k_{n\partial 1}k_{cn1}k_{U1}k_{\partial n}$$

$$k_{111} = k_{n\partial 1}k_{cn1}k_{U1}; a_{04} = \frac{a_{03}}{k_{21} - 1}; a_{14} = \frac{a_{13}}{k_{21} - 1}; a_{24} = \frac{a_{23} + k_{21}b_{03}}{k_{21} - 1}; a_{34} = \frac{a_{33} + k_{21}b_{13}}{k_{21} - 1};$$

$$a_{03} = a_0; a_{13} = a_1 + k_{11}T_{n\partial 1}b_{01}; a_{23} = a_2 + k_{11}(T_{n\partial 1} + b_{01}); a_{33} = a_3 + k_{11};$$

$$k_{11} = k_{n\partial 1}k_{cn1}k_{U1}k_{occ1}k_{\partial n}; a_{08} = \frac{a_{07}T_{u2}}{k_{222}k_{\partial n}}; a_{18} = \frac{a_{17}T_{u2}}{k_{222}k_{\partial n}}; a_{28} = \frac{a_{27}T_{u1}}{k_{222}k_{\partial n}}; a_{38} = \frac{a_{37}T_{u2}}{k_{222}k_{\partial n}} + b_{04};$$

$$a_{48} = \frac{T_{u2}}{k_{222}k_{\partial n}} + b_{14}; k_{222} = \frac{k_{n1}k_{122}}{k_{22} - 1}; k_{22} = k_{n2}k_{n\partial 2}k_{cn2}k_{U2}k_{\partial n}; k_{122} = k_{n\partial 2}k_{cn2}k_{U2};$$

$$a_{07} = \frac{a_{06}}{k_{22} - 1}; a_{17} = \frac{a_{16}}{k_{22} - 1}; a_{27} = \frac{a_{26} + k_{22}b_{04}}{k_{22} - 1}; a_{37} = \frac{a_{36} + k_{22}b_{14}}{k_{22} - 1}; a_{06} = a_0;$$

$$a_{16} = a_1 + k_{12}T_{n\partial 2}b_{02}; a_{26} = a_2 + k_{12}(T_{n\partial 2} + b_{02}); a_{36} = a_3 + k_{12}; k_{12} = k_{n\partial 2}k_{cn2}k_{U2}k_{occ2}k_{\partial n}.$$

В соответствии с известной методикой синтеза параметров регуляторов электромагнитного подшипника, постоянные времени ПД регуляторов должны равняться утроенной величине постоянных времени электромагнитов [58, 60]. Поскольку, в соответствии с формулами, приведенными выше, при смещении центра магнитной системы относительно оси вращения $T_1 \neq T_2$, то настройки ПД регуляторов в рассматриваемой системе раздельного управления противоположными электромагнитами должны выбираться следующим образом [105]:

$$T_{n\partial 1} = 3T_1; T_{n\partial 2} = 3T_2. \quad (3.24)$$

При этом, если выбрать коэффициенты обратных связей по скорости равными [106]

$$k_{occ1} = k_{occ2} = \frac{2\xi(k_{21} - 1)b_{03}\sqrt{a_{04}b_{03}} + (k_{21} - 1)a_{04}b_{13} - a_1b_{03}}{k_{n\partial 1}k_{cn1}k_{U1}k_{\partial n}T_{n\partial 1}b_{01}b_{03}}, \quad (3.25)$$

то величины коэффициентов передачи П и ПД регуляторов могут быть выбраны равными [60]:

$$k_{n1} = k_{n2} = k_{nd1} = k_{nd2}. \quad (3.26)$$

Следует также отметить, что при рассмотрении непрерывной системы управления электромагнитным подшипником, имеется ограничение лишь на минимальную величину этих коэффициентов с целью обеспечения неравенств:

$$k_{21} > 1, k_{22} > 1. \quad (3.27)$$

Это позволяет выбрать величины k_{n1} , k_{n2} , k_{nd1} и k_{nd2} равными единице или кратные двум, что значительно упрощает техническую реализацию на базе цифровой техники.

Для обоснованного выбора величин постоянных времени интегральных регуляторов T_{u1} и T_{u2} , рассмотрим условия устойчивости систем управления каждым электромагнитом. Из передаточных функций (3.22) и (3.23) вытекают следующие условия устойчивости [105]:

$$\left. \begin{aligned} a_{15}a_{25} - a_{05}a_{35} &> 0; \\ (a_{15}a_{25} - a_{05}a_{35})(a_{35}a_{45} - a_{25}) - (a_{15}a_{45} - a_{05})^2 &> 0; \\ a_{18}a_{28} - a_{08}a_{38} &> 0; \\ (a_{18}a_{28} - a_{08}a_{38})(a_{38}a_{48} - a_{28}) - (a_{18}a_{48} - a_{08})^2 &> 0. \end{aligned} \right\} \quad (3.28)$$

Подставляя в (3.28) значения коэффициентов $a_{05} - a_{45}$, $a_{08} - a_{48}$ и переходя к равенствам, получим систему четырех уравнений относительно граничных, с точки зрения устойчивости, значений постоянных времени $T_{u1.ep}$ и $T_{u2.ep}$ [105]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{a_{14}a_{24} - a_{04}a_{34}}{k_{211}k_{\partial n}} T_{u1.ep} - a_{04}b_{03} &= 0; \\ d_{21}T_{u1.ep}^3 + d_{22}T_{u1.ep}^2 + d_{23}T_{u1.ep} + d_{24} &= 0; \\ \frac{a_{17}a_{27} - a_{07}a_{37}}{k_{222}k_{\partial n}} T_{u2.ep} - a_{07}b_{04} &= 0; \\ d_{31}T_{u2.ep}^3 + d_{32}T_{u2.ep}^2 + d_{33}T_{u2.ep} + d_{34} &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (3.29)$$

$$\text{где } d_{21} = \frac{(a_{14}a_{24} - a_{04}a_{34})a_{34} - a_{14}^2}{(k_{211}k_{0n})^3};$$

$$d_{22} = \frac{(a_{34}b_{13} + b_{03})(a_{14}a_{24} - a_{04}a_{34}) - a_{04}a_{34}b_{13} - 2a_{14}(a_{14}b_{13} - a_{04})}{(k_{211}k_{0n})^2};$$

$$d_{32} = \frac{b_{03}b_{13}(a_{14}a_{24} - a_{04}a_{34}) - a_{04}b_{03}(a_{34}b_{13} + b_{03}) - (a_{14}b_{13} - a_{04})^2}{k_{211}k_{0n}}; \quad d_{24} = -a_{04}b_{03}^2b_{13};$$

$$d_{31} = \frac{(a_{17}a_{27} - a_{07}a_{37})a_{37} - a_{17}^2}{(k_{222}k_{0n})^3};$$

$$d_{32} = \frac{(a_{37}b_{17} + b_{04})(a_{17}a_{27} - a_{07}a_{37}) - a_{07}a_{37}b_{14} - 2a_{17}(a_{17}b_{14} - a_{07})}{(k_{222}k_{0n})^2};$$

$$d_{33} = \frac{b_{04}b_{14}(a_{17}a_{27} - a_{07}a_{37}) - a_{07}b_{04}(a_{37}b_{14} + b_{04}) - (a_{17}b_{14} - a_{07})^2}{k_{222}k_{0n}}; \quad d_{34} = -a_{07}b_{04}^2b_{14}.$$

Зная величину граничных значений $T_{u1.эп}$ и $T_{u2.эп}$, из решения системы уравнений (3.29), расчет параметров интегральных регуляторов, обеспечивающих требуемые показатели качества регулирования, можно произвести по формулам [105]:

$$T_{u1} = 3,5T_{u1.эп}, \quad T_{u2} = 3,5T_{u2.эп}. \quad (3.30)$$

Таким образом, представленный перечень аналитических выражений (3.24) – (3.30), отражает методику параметрического синтеза регуляторов предлагаемой системы управления электромагнитным подшипником. Они позволяют произвести научно обоснованный выбор параметров регуляторов электромагнитного подшипника при смещении центра магнитной системы относительно оси вращения ротора и раздельном управлении и токами противоположных магнитов. Следует также отметить, что эти же формулы можно использовать при расчете параметров регуляторов и при центральном положении ротора.

3.5 Пример расчета и результаты компьютерного моделирования системы управления электромагнитным подшипником с отдельным регулированием напряжений и токов противоположных магнитов

Для оценки адекватности полученных формул, произведем расчет параметров регуляторов системы управления радиальным электромагнитным подшипником нагнетателя газоперекачивающего агрегата ГПА Ц-16 [105]. При этом учтем, что для компенсации силы веса ротора центр магнитной системы смещен относительно оси вращения на $y_0 = 165$ мкм, а электромагниты характеризуются следующими параметрами: $k_{FI} = 3,8798 \cdot 10^{-5}$ Нм²/А², $T_1 = 0,078$ с, $T_2 = 0,0499$ с, $R_1 = R_2 = 1,7$ Ом, $k_{Fy} = 2,75 \cdot 10^7$ Н/м. При расчете примем следующие начальные условия $I_{10} = I_{20} = 7,5$ А, $I'_{10} = I'_{20} = 0$, $V_0 = 0$. С учетом того, что система управления электромагнитным подшипником оснащена датчиком положения ротора и силовыми преобразователями с коэффициентами передачи $k_{on} = 10000000$ дискрет/м $k_{cn1} = k_{cn2} = 0,0015$ В/дискрету, а коэффициенты передачи П и ПД регуляторов выбраны равными $k_{n1} = k_{n2} = k_{no1} = k_{no2} = 2$, расчет по формулам (3.24), (3.25), (3.29) и (3.30) дает следующие требуемые настройки: $T_{no1} = 0,234$ с, $T_{no2} = 0,15$ с, $k_{occ1} = k_{occ2} = 0,0032$ с, $T_{u1} = 0,0046$ с, $T_{u2} = 0,0048$ с [105].

Для построения переходных процессов в системе управления электромагнитным подшипником при смещении центра магнитной системы относительно оси вращения разработана расчетная модель, учитывающая выбранные параметры регуляторов (рисунок 3.11). Аналогичная расчетная схема с детализацией электромагнитного подшипника как объекта управления в виде набора блоков приведена на рисунке (3.12). Для сравнения разработана расчетная модель системы управления электромагнитным подшипником, которая также работает при смещении центра магнитной системы, но при параметрах регуляторов, выбранных для центрального положения ротора (рисунок 3.13). В отличие от предыдущей расчетной схемы в ней приняты следующие настройки регуляторов: $T_{u1} = T_{u2} = 0,0077$ с,

$T_{nod1} = T_{nod2} = 0,183$ с. Похожая расчетная модель, но с представлением объекта управления набором блоков представлена на рисунке 3.14.

Приведенные расчетные модели позволили построить графики переходных процессов по управляющему и возмущающему воздействиям (рисунки 3.15 и 3.16), соответственно. Кривые, обозначенные цифрой 1, соответствуют настройкам регуляторов, выбранных с учетом смещения центра магнитной системы относительно оси вращения, а цифрой 2 – параметрам регуляторов, рассчитанных для центрального положения ротора. Анализ графиков показывает, что время переходного процесса по управляющему воздействию для графика 1 равно 0,0108 с, а для графика 2 – 0,0249 с. Отсюда можно сделать вывод, что быстродействие системы управления электромагнитным подшипником увеличивается в 2,3 раза при настройках регуляторов, выбранных с учетом смещения центра магнитной системы. Анализ переходных процессов по возмущающему воздействию позволяет сказать, что при набросе внешней силы в 1000 Н, динамический провал кривой 1 составляет 3,52 мкм, а кривой 2 – 4,41 мкм. Следовательно, динамическая жесткость электромагнитного подшипника возрастает в 1,25 раза при настройках регуляторов, учитывающих смещение ротора. При этом необходимо отметить, что выбор параметров по формулам (3.24) – (3.30) обеспечивает устойчивую работу системы управления электромагнитным подшипником и монотонный характер переходных процессов.

Сравнение результатов моделирования, полученных с помощью расчетных моделей (рисунки 3.11 и 3.12), показывает их очень хорошее совпадение (рисунок 3.17), что также подтверждает адекватность новой математической модели ЭМП в виде передаточных функций (3.9) и (3.10).

Исходя из того, что постоянные времени интегральных регуляторов в приведенном примере различаются незначительно, возможно упрощение предложенной СУ ЭМП, в плане технической реализации, по принципу, представленному в патенте РФ № 2845412 [107], полученному в соавторстве с А.В. Стариковым и Г.А. Крыловым.

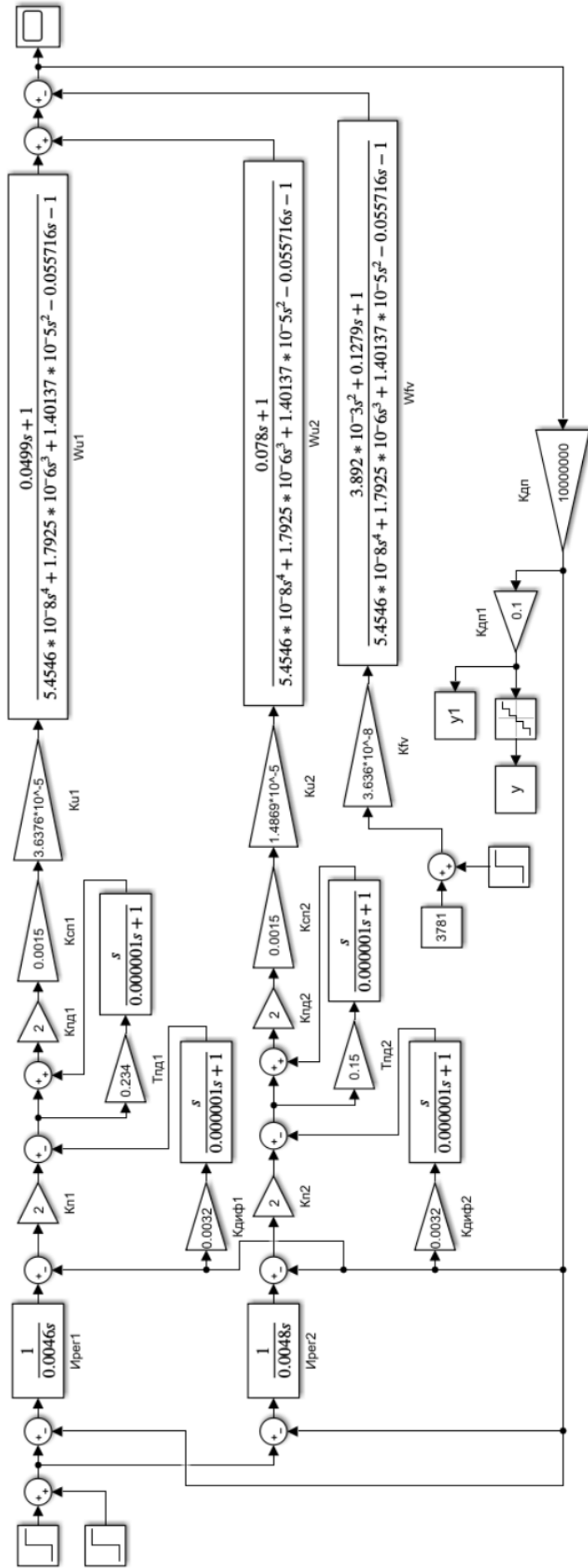


Рисунок 3.11 – Расчетная модель системы управления электромагнитным подшипником при параметрах регуляторов, выбранных для смещенного центра магнитной системы

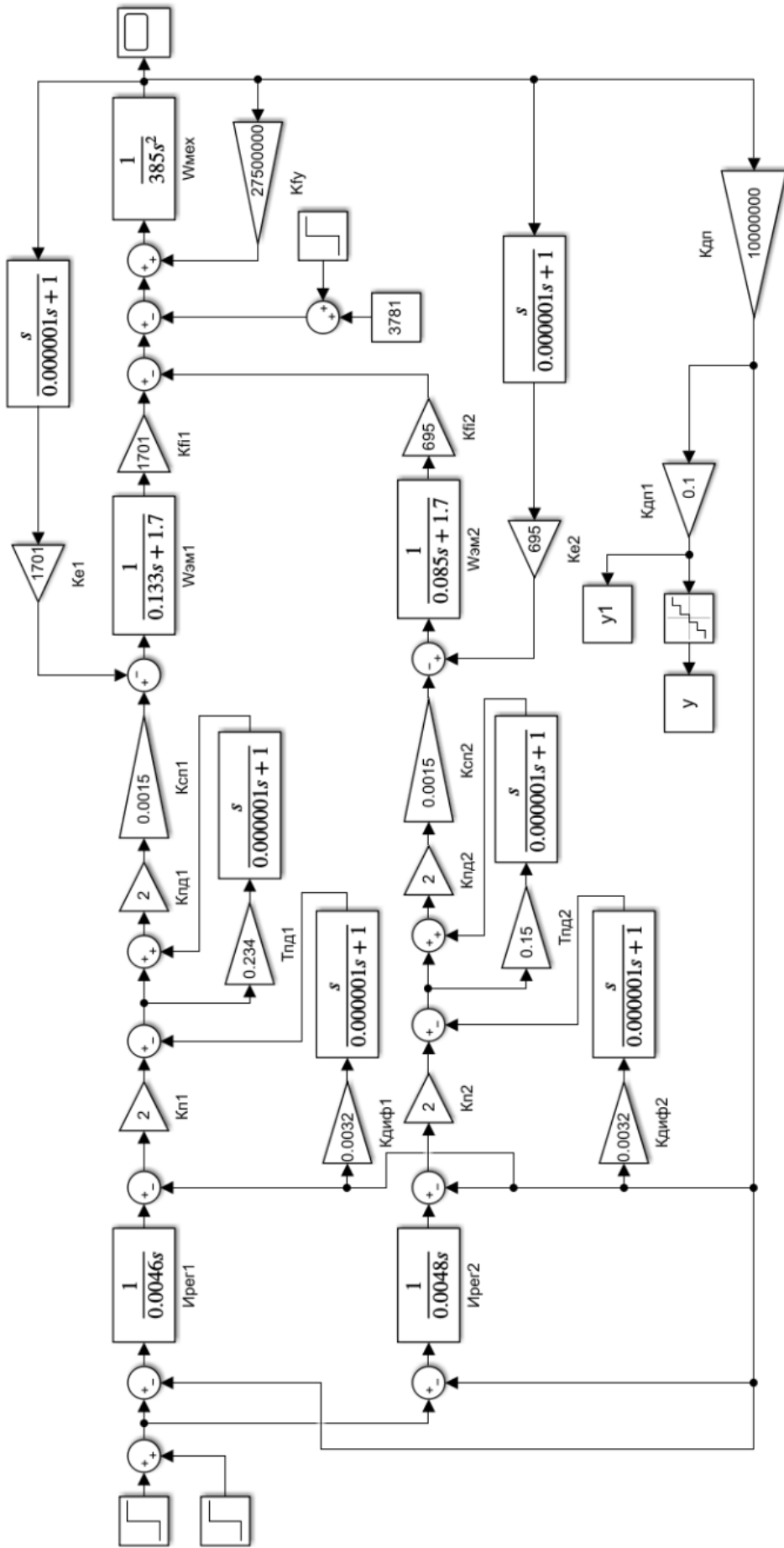


Рисунок 3.12 – Расчетная модель системы управления электромагнитным подшипником при параметрах регуляторов, выбранных для смещенного центра магнитной системы, с детализацией объекта управления

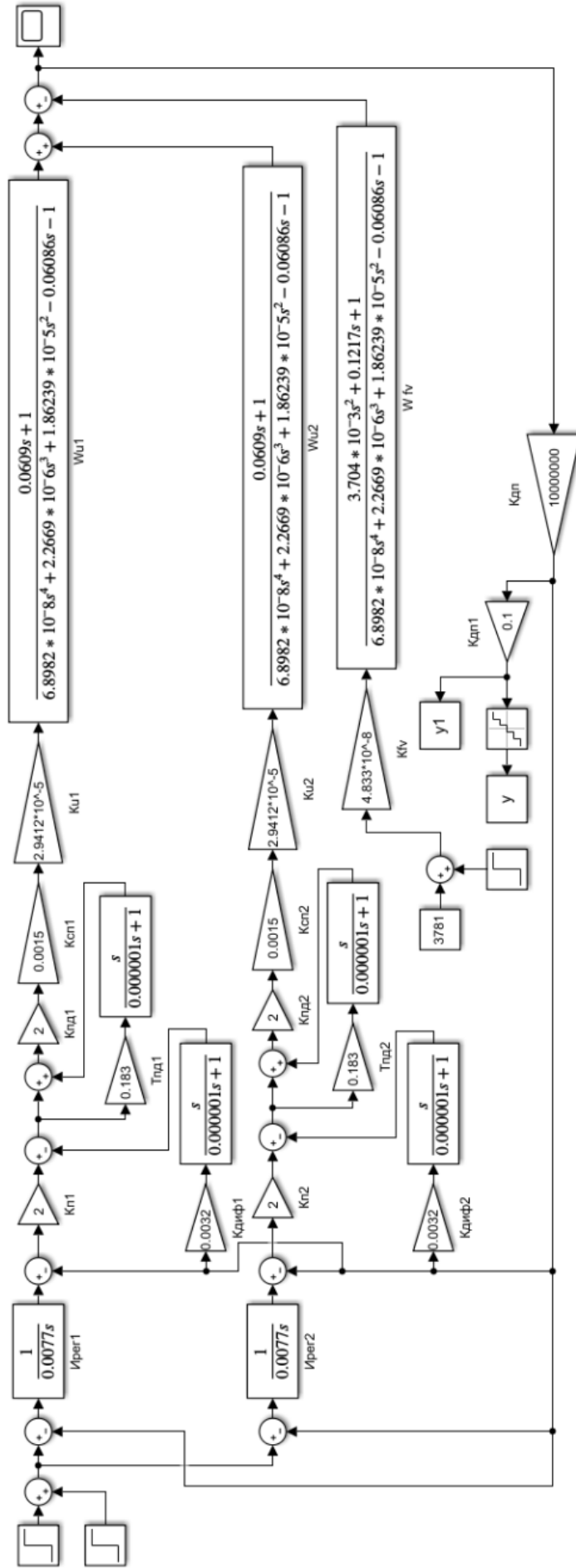


Рисунок 3.13 – Расчетная модель системы управления электромагнитным подшипником при параметрах регуляторов, выбранных для положения ротора в центре магнитной системы

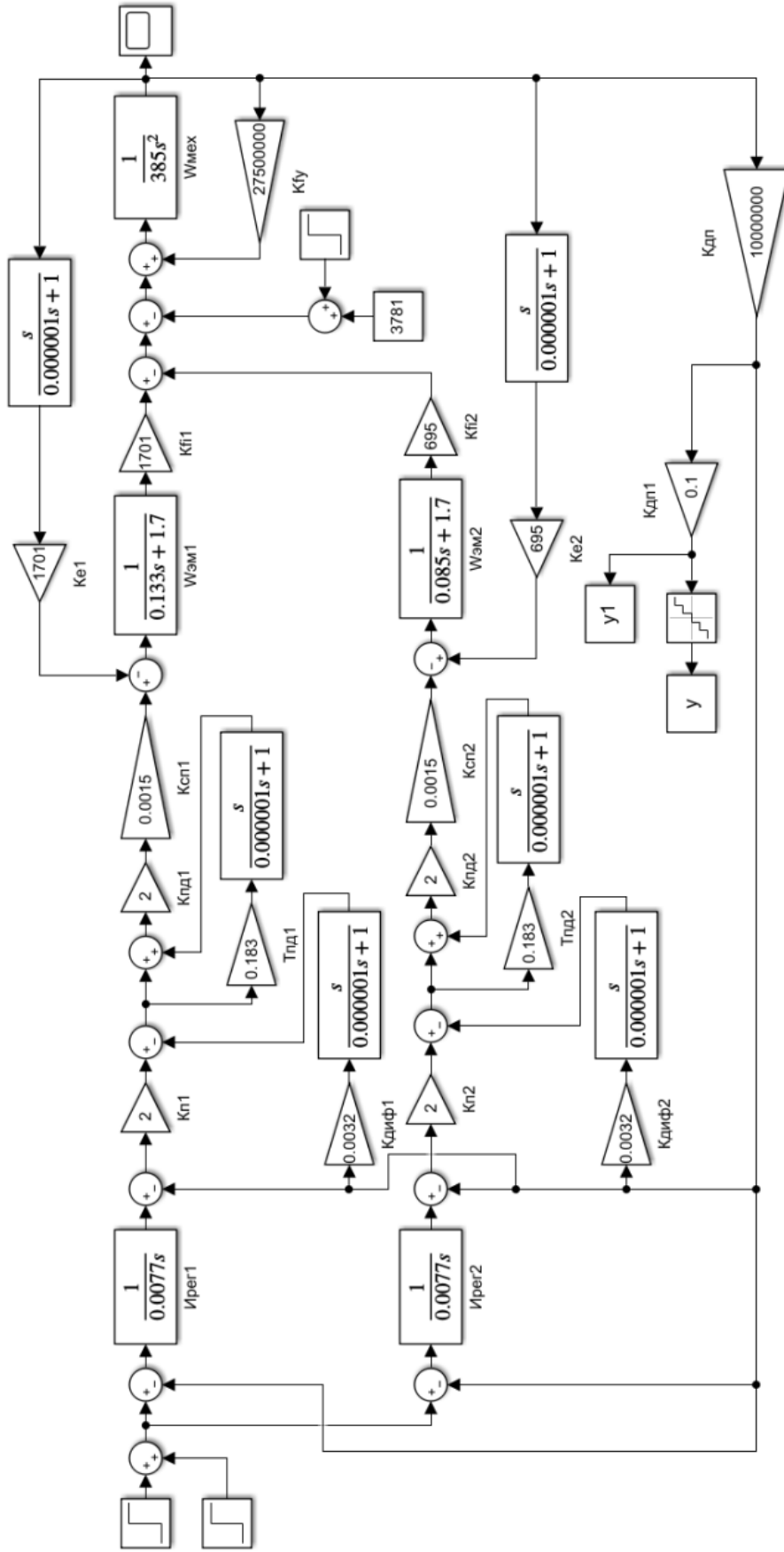


Рисунок 3.14 – Расчетная модель системы управления электромагнитным подшипником при параметрах регуляторов, выбранных для положения ротора в центре магнитной системы, с детализацией объекта управления

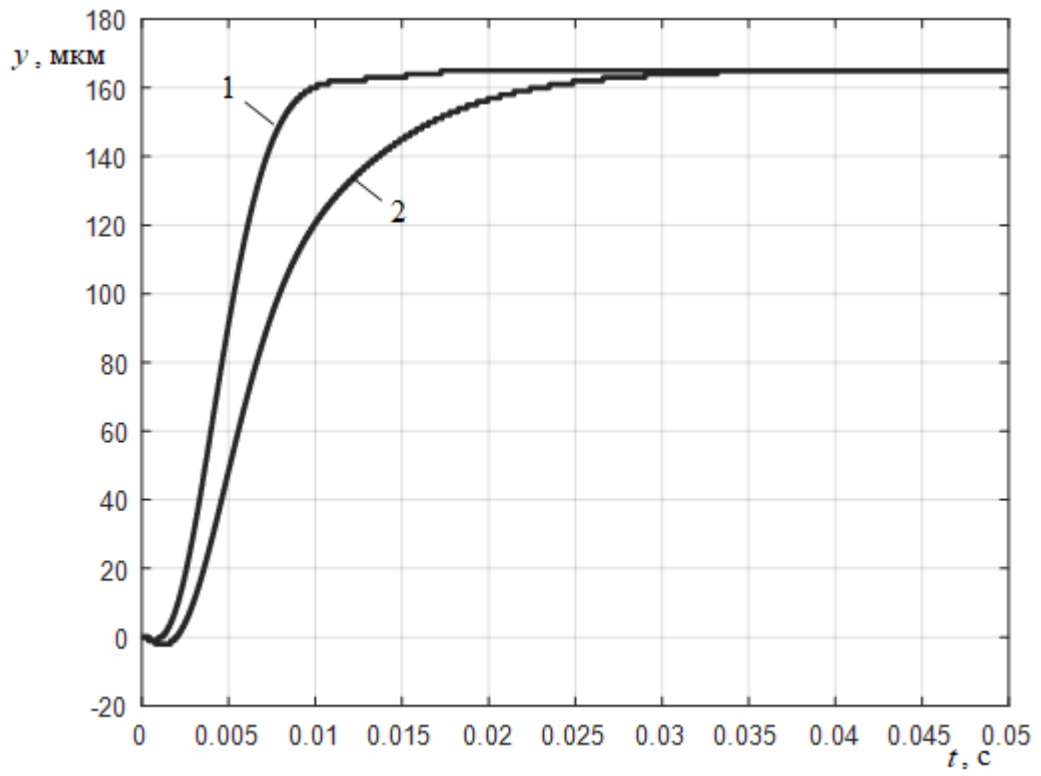


Рисунок 3.15 – Графики переходных процессов по управляющему воздействию

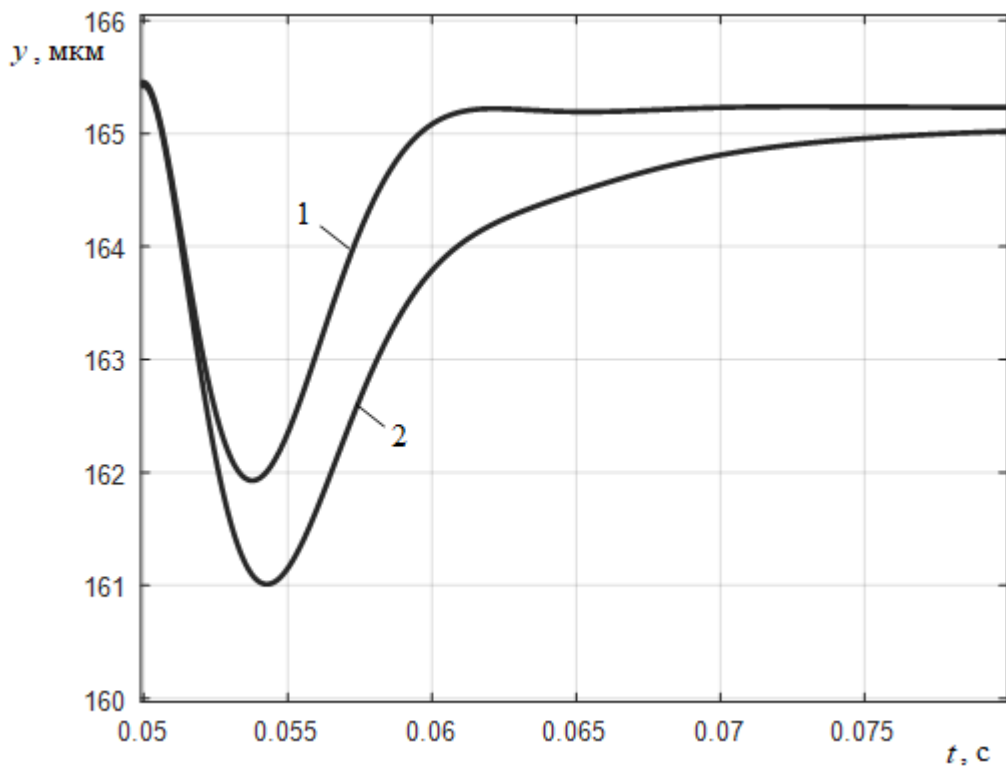


Рисунок 3.16 – Графики переходных процессов по возмущающему воздействию

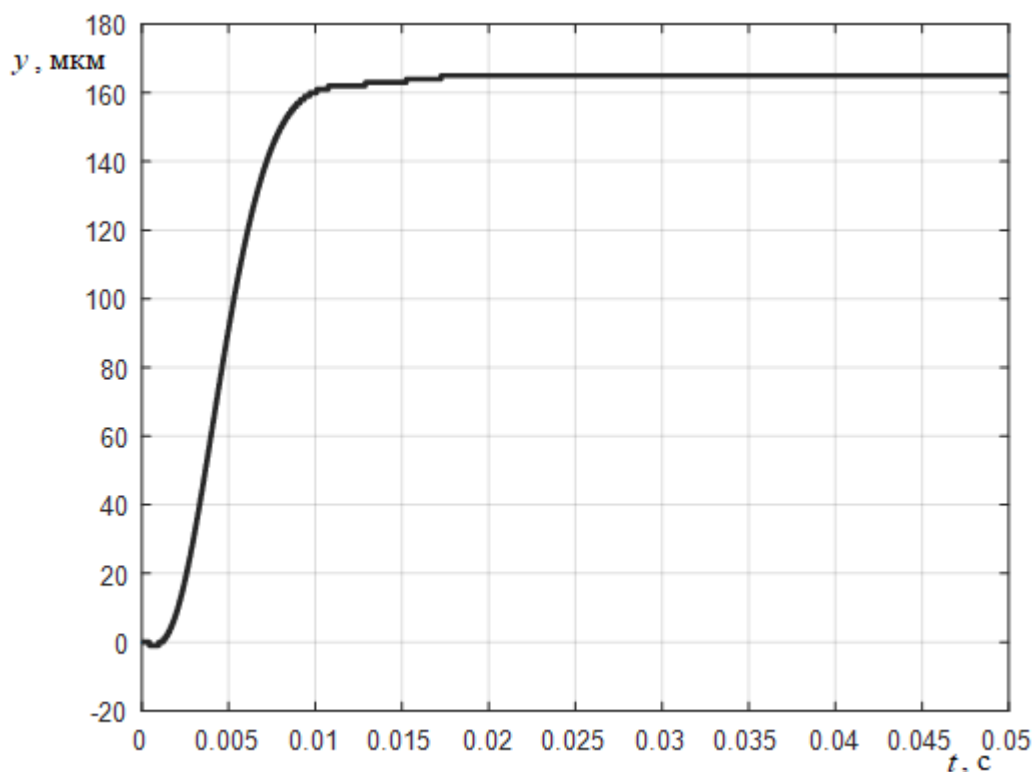


Рисунок 3.17 – График переходного процесса по управляющему воздействию, построенные с помощью представленных расчетных моделей

3.6 Выводы по третьей главе

1. Предложенная линеаризованная математическая модель ЭМП, как объекта управления, содержащая передаточные функции и поясняющие структурные схемы, может быть использована для любого положения ротора в пределах страховочных зазоров и различных способов регулирования напряжений противоположных электромагнитов, а также учитывает начальные значения скорости перемещения ротора и производных токов.

2. Адекватность полученных передаточных функций доказывается результатами компьютерного моделирования и совпадением численных значений с известной передаточной функцией, справедливой для дифференциального закона регулирования напряжений противоположных магнитов. При этом расхождение численных значений коэффициентов не превышает 0,9%.

3. Предложенная система управления радиальным электромагнитным подшипником с отдельным регулированием напряжений противоположных электромагнитов позволяет повысить быстродействие системы при обработке управляющих воздействий, как минимум в 2 раза, а динамическую жесткость подшипника – в 1,25 раза по сравнению с известной дифференциальной схемой управления.

4. Разработанная методика параметрического синтеза регуляторов предложенной системы управления представляет собой совокупность формул, позволяющих произвести обоснованный расчет настроек регуляторов с учетом величины смещения центра магнитной системы относительно оси вращения и обеспечить монотонный характер переходных процессов во всем возможном диапазоне перемещений ротора.

ГЛАВА 4 ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССОВ КВАНТОВАНИЯ СИГНАЛОВ ПО ВРЕМЕНИ И УРОВНЮ НА РАБОТУ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОДШИПНИКОМ С НЕЗАВИСИМЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ НАПРЯЖЕНИЙ ПРОТИВОПОЛОЖНЫХ МАГНИТОВ

4.1 Структурные схемы цифровой системы управления электромагнитным подшипником

Структурная схема предложенной системы управления электромагнитным подшипником (рисунок 3.10) представляет собой также структурную схему непрерывного прототипа этой системы, которая, как было показано выше, позволяет повысить быстродействие и жесткость подшипника. Однако, все современные СУ, в том числе и СУ ЭМП, основаны на применении цифровых технологий, в которых происходит квантование сигналов по времени и уровню. Поэтому необходимо оценить влияние квантования (дискретизации) по времени и уровню на работу и достижимые показатели качества предложенной системы управления электромагнитным подшипником.

Процесс квантования по времени может быть учтен с помощью z -преобразований и дискретных передаточных функций на их основе. Процесс дискретизации по уровню делает систему управления электромагнитным подшипником нелинейной, свойства которой можно определить методом компьютерного моделирования.

С учетом квантования по времени структурная схема разработанной системы с отдельным регулированием напряжений противоположных электромагнитов принимает вид, показанный на рисунке 4.1 [108]. Эффект квантования отражают импульсные элементы ИЭ1, которые превращают непрерывный сигнал задания и обратной связи по перемещению ротора в ретчатую функцию. В цифровую часть

(ЦЧ) системы входят два комплекта регуляторов, предназначенных для регулирования напряжений на каждом электромагните. Эти регуляторы представлены дискретными передаточными функциями: $W_{nd1}(z)$, $W_{nd2}(z)$, k_{n1} , k_{n2} , $W_{u1}(z)$ и $W_{u2}(z)$.

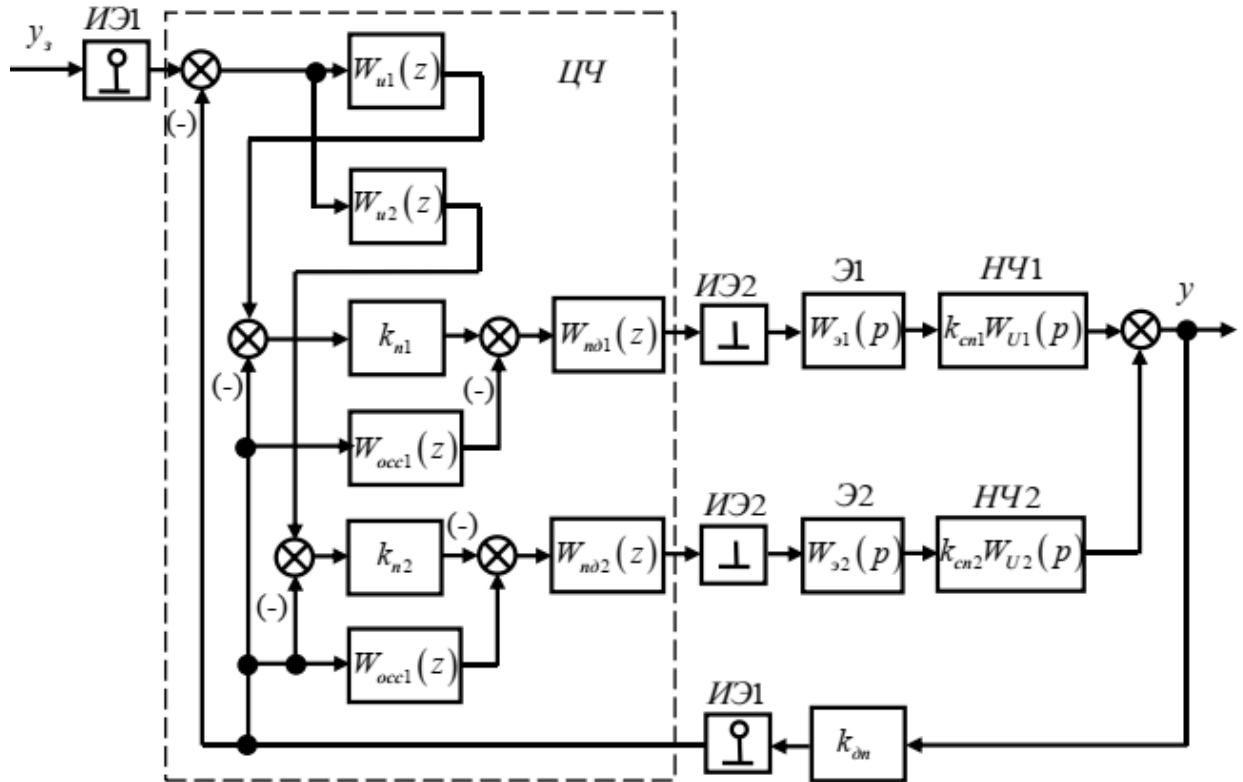


Рисунок 4.1 – Структурная схема цифровой системы управления электромагнитным подшипником с отдельным регулированием напряжений противоположных магнитов с учетом процесса квантования по времени

В непрерывную часть (НЧ) системы входят два силовых преобразователя и электромагниты; y – перемещение ротора под действием сил, развиваемых электромагнитами. Непрерывная часть разделена на две составляющие НЧ1 и НЧ2. В НЧ1 входит силовой преобразователь верхнего электромагнита с коэффициентом передачи k_{cn1} и соответствующая непрерывная передаточная функция $W_{U1}(p)$, связывающая перемещение ротора y с напряжением U_1 на первом магните. Во вторую составляющую непрерывной части НЧ2 входят второй силовой преобразователь с коэффициентом передачи k_{cn2} и нижний электромагнит с передаточной функцией $W_{U2}(p)$. Силовые преобразователи выполняют также функции экстраполяторов

нулевого порядка Э1 и Э2, которые сигналы с цифровой части системы запоминают такт периода дискретизации (периода квантования). Для представления экстраполяторов в виде передаточных функций $W_{s1}(p)$ и $W_{s2}(p)$ в систему формально введены импульсные элементы ИЭ2 [89, 108].

Дискретные передаточные функции $W_{01}(z)$ и $W_{02}(z)$, с учетом экстраполяторов нулевого порядка, находятся по общеизвестным правилам от непрерывных частей, ввиду чего при переходе к z -преобразованиям рассматриваемая структурная схема цифровой системы управления электромагнитным подшипником примет следующий вид (рисунок 4.2) [108].

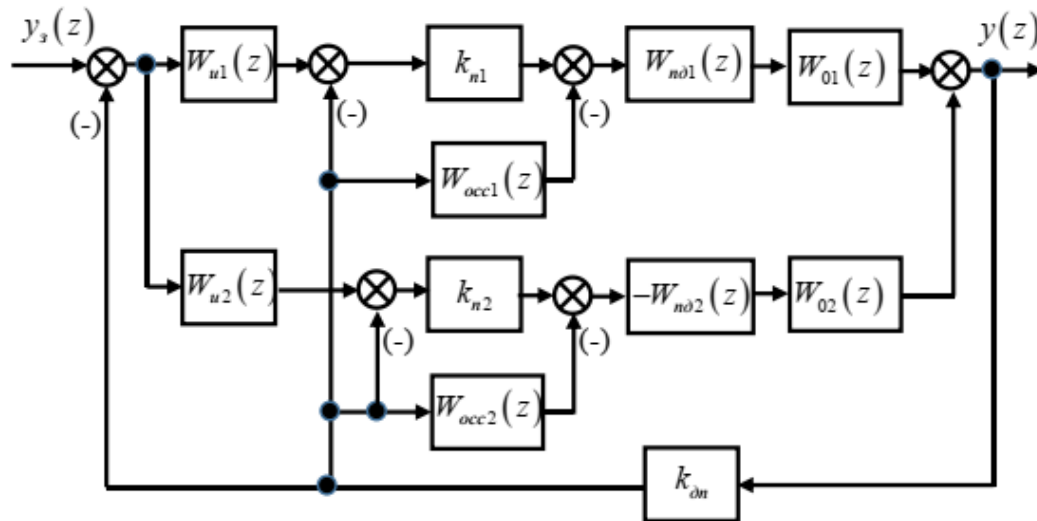


Рисунок 4.2 – Структурная схема цифровой системы управления электромагнитным подшипником с отдельным регулированием напряжений противоположных магнитов при переходе к z -преобразованиям

Она позволяет получить дискретную математическую модель цифровой системы управления электромагнитным с отдельным регулированием напряжений противоположных магнитов в виде дискретной передаточной функции. Но на первом этапе необходимо прежде всего определить дискретные передаточные функции $W_{01}(z)$ и $W_{02}(z)$.

4.2 Дискретная математическая модель непрерывной части цифровой системы управления электромагнитным подшипником

Для нахождения дискретных передаточных функций $W_{01}(z)$ и $W_{02}(z)$. структурную схему непрерывной части цифровой системы управления электромагнитным подшипником при раздельном управлении напряжениями противоположных магнитов представим следующим образом (рисунок 4.3) [109].

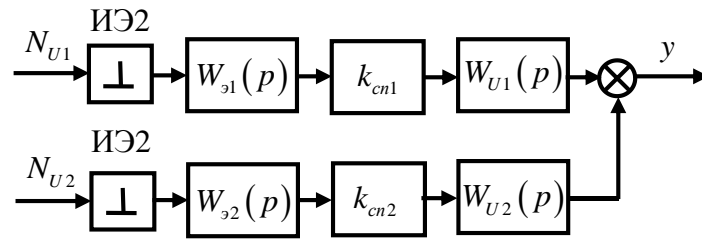


Рисунок 4.3 – Структурная схема электромагнитного подшипника как объекта цифровой системы при раздельном управлении напряжениями противоположных магнитов

На структурной схеме символами N_{U1} и N_{U2} обозначены цифровые сигналы с выхода пропорционально-дифференциальных регуляторов, задающие напряжения на противоположных электромагнитах U_1 и U_2 .

Непрерывная передаточная функция электромагнитного подшипника, связывающая перемещение ротора с напряжением U_1 определяется выражением (3.9):

$$W_{U1}(p) = \frac{y(p)}{U_1(p)} = \frac{k_{U1}(b_{01}p + 1)}{a_0p^4 + a_1p^3 + a_2p^2 + a_3p - 1}, \quad (4.1)$$

$$\text{где } k_{U1} = \frac{d_3}{k_{Fy} - d_5 + d_6}; \quad b_{01} = T_2; \quad a_0 = \frac{mT_1T_2}{k_{Fy} - d_5 + d_6}; \quad a_1 = \frac{m(T_1 + T_2)}{k_{Fy} - d_5 + d_6};$$

$$a_2 = \frac{m + d_1T_2 + d_2T_1 - k_{Fy}T_1T_2}{k_{Fy} - d_5 + d_6}; \quad a_3 = \frac{d_1 + d_2 + (d_5 - k_{Fy})T_2 - (d_6 + k_{Fy})T_1}{k_{Fy} - d_5 + d_6};$$

d_1, d_2, d_3, d_5 и d_6 – коэффициенты, зависящие от смещения ротора относительно центра магнитной системы и начальных значений токов и скорости; m – масса ротора, приходящаяся на одну ось подшипника; T_1 и T_2 – постоянные времени электромагнитов; k_{Fy} – коэффициент, связывающий изменение силы, действующей на ротор, со смещением; p – комплексная переменная.

Непрерывная передаточная функция электромагнитного подшипника по отношению к напряжению второго (противоположного) электромагнита имеет аналогичный вид (3.10):

$$W_{U_2}(p) = \frac{y(p)}{U_2(p)} = - \frac{k_{U_2}(b_{02}p + 1)}{a_0p^4 + a_1p^3 + a_2p^2 + a_3p - 1}, \quad (4.2)$$

где $k_{U_2} = \frac{d_4}{k_{Fy} - d_5 + d_6}$; $b_{02} = T_1$; d_4 – коэффициент, зависящий от начальных условий.

Следует обратить внимание на то, что коэффициенты знаменателей передаточных функций (4.1) и (4.2) совпадают, а числителей – различаются.

Для определения дискретных передаточных функций $W_{01}(z)$ и $W_{02}(z)$ необходимо прежде всего проанализировать корни знаменателей передаточных функций (4.1) и (4.2), то есть корни характеристического уравнения:

$$a_0p^4 + a_1p^3 + a_2p^2 + a_3p - 1 = 0 \quad (4.3)$$

во всем возможном диапазоне перемещения ротора и соотношения начальных значений токов I_{10} и I_{20} . Корни найдем для радиального подшипника нагнетателя газоперекачивающего агрегата ГПА Ц-16. При $I_{10} = I_{20} = 7,5$ А и вариации перемещения y в пределах от $-0,000275$ м до $0,000275$ м от центра магнитной системы. Они принимают следующие значения (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Корни характеристического уравнения (4.3) в функции перемещения y при $I_{10} = I_{20} = 7,5$ А

$y, \text{ м}$	-0,000275	0	0,000165	0,000275
$p_{1,2}$	$-59,35 \pm j95,17$	$-53,58 \pm j82,78$	$-55,46 \pm j86,96$	$-59,35 \pm j95,17$
p_3	-20,33	-16,43	-17,95	-20,33
p_4	106,16	90,73	96	106,16

При $I_{10} = 15$ А, $I_{20} = 0$ А корни характеристического уравнения (4.3) в функции перемещения будут изменяться следующим образом (таблица 4.2).

Таблица 4.2 – Корни характеристического уравнения (4.3) в функции перемещения y при $I_{10} = 15$ А, $I_{20} = 0$ А

$y, \text{ м}$	-0,000275	0	0,000165	0,000275
$p_{1,2}$	$-85,43 \pm j141,84$	$-66,02 \pm j104,43$	$-75,64 \pm j123,39$	$-85,43 \pm j141,84$
p_3	-22,46	-16,43	-20,05	-22,46
p_4	160,46	115,6	138,46	160,46

И, наконец, при $I_{10} = 0$ А, $I_{20} = 15$ А корни характеристического (4.3) будут равны (таблица 4.3).

Таблица 4.3 – Корни характеристического уравнения (4.3) в функции перемещения y при $I_{10} = 0$ А, $I_{20} = 15$ А

$y, \text{ м}$	-0,000275	0	0,000165	0,000275
$p_{1,2}$	$-85,43 \pm j141,84$	$-66,02 \pm j104,43$	$-59,8 \pm j91,28$	$-85,43 \pm j141,84$
p_3	-22,46	-16,43	-12,816	-22,46
p_4	160,46	115,6	99,56	160,46

Анализ численных значений корней знаменателей выражений (4.1) и (4.2), позволяет сделать вывод, что передаточную функцию (4.1) можно представить в виде [108]:

$$W_{U1}(p) = \frac{k_{U1}(b_{01}p + 1)}{(T_{на}p - 1)(T_a p + 1)(T_{\kappa}^2 p^2 + 2\xi T_{\kappa} p + 1)}, \quad (4.4)$$

где $T_{на}$ – постоянная времени неустойчивого (неминимально-фазового) аperiodического звена; T_a – постоянная времени традиционного аperiodического звена; T_{κ} и ξ – постоянная времени и коэффициент демпфирования колебательного звена.

С учетом (4.4) дискретная передаточная функция непрерывной части цифровой системы управления по каналу первого электромагнита будет определяться формулой [109]:

$$W_{01}(z) = k_{cn1} k_{U1} \frac{z-1}{z} Z \left\{ \frac{b_{01}p + 1}{(T_{на}p - 1)(T_a p + 1)(T_{\kappa}^2 p^2 + 2\xi T_{\kappa} p + 1)} \right\}, \quad (4.5)$$

где $z = e^{pT}$; T – период дискретизации по времени; Z – символ z -преобразования.

Для нахождения дискретной передаточной функции канала управления первого электромагнита необходимо выражение в фигурных скобках формулы (4.5) разложить на элементарные дроби [109]:

$$\frac{b_{01}p + 1}{(T_{на}p - 1)(T_a p + 1)(T_{\kappa}^2 p^2 + 2\xi T_{\kappa} p + 1)} = \frac{A_1}{p} + \frac{B_1}{T_{на}p - 1} + \frac{C_1}{T_a p + 1} + \frac{D_1 p + E_1}{T_{\kappa}^2 p^2 + 2\xi T_{\kappa} p + 1}, \quad (4.6)$$

где A_1 , B_1 , C_1 , D_1 и E_1 – неизвестные пока коэффициенты.

Для определения коэффициентов A_1 , B_1 , C_1 , D_1 и E_1 приведем правую часть выражения (4.6) к общему знаменателю, и числитель полученной дроби приравняем к числителю дроби, находящейся в левой части [109]:

$$\begin{aligned}
& A_1 \left\{ T_{на} T_a T_\kappa^2 p^4 + \left[T_{на} (T_\kappa^2 + 2\xi T_\kappa T_a) \right] p^3 + \left[T_{на} (T_a + 2\xi T_\kappa) - T_\kappa^2 - 2\xi T_\kappa T_a \right] p^2 + \right. \\
& \left. + (T_{на} - T_a - 2\xi T_\kappa) p - 1 \right\} + B_1 \left[T_a T_\kappa^2 p^4 + (T_\kappa^2 + 2\xi T_\kappa T_a) p^3 + (T_a + 2\xi T_\kappa) p^2 + p \right] + \\
& C_1 \left[T_{на} T_\kappa^2 p^4 + (2\xi T_\kappa T_{на} - T_\kappa^2) p^3 + (T_{на} - 2\xi T_\kappa) p^2 - p \right] + D_1 T_{на} T_a p^4 + \\
& + \left[T_{на} (D_1 + T_a E_1) - T_a D_1 \right] p^3 + \left[(T_{на} - T_a) E_1 - D_1 \right] p^2 - E_1 p = b_{01} p + 1
\end{aligned} \tag{4.7}$$

Для обеспечения равенства в уравнении (4.7) необходимо принять $A_1 = -1$ и обеспечить выполнение следующей условий [109]:

$$\left. \begin{aligned}
h_1 + h_2 B_1 + h_3 C_1 + h_4 D_1 &= 0; \\
h_5 + h_6 B_1 + h_7 C_1 + h_8 D_1 + h_9 E_1 &= 0; \\
h_{10} + h_{11} B_1 + h_{12} C_1 + h_{13} D_1 + h_{14} E_1 &= 0; \\
B_1 - C_1 - D_1 &= h_{15},
\end{aligned} \right\} \tag{4.8}$$

где $h_1 = -T_{на} T_a T_\kappa^2$; $h_2 = T_a T_\kappa^2$; $h_3 = T_{на} T_\kappa^2$; $h_4 = h_9 = T_{на} T_a$;

$h_5 = T_a T_\kappa^2 - \left[T_{на} (T_\kappa^2 + 2\xi T_\kappa T_a) \right]$; $h_6 = T_\kappa^2 + 2\xi T_\kappa T_a$; $h_7 = 2\xi T_\kappa T_{на} - T_\kappa^2$; $h_8 = h_{14} = T_{на} - T_a$;

$h_{10} = T_\kappa^2 + 2\xi T_\kappa T_a - T_{на} (T_a + 2\xi T_\kappa)$; $h_{11} = T_a + 2\xi T_\kappa$; $h_{12} = T_{на} - 2\xi T_\kappa$; $h_{13} = -1$;

$h_{15} = b_{01} + T_{на} - T_a - 2\xi T_\kappa$.

Из решения системы уравнений (4.8) получим искомые значения коэффициентов:

$$E_1 = - \frac{h_{18} + h_{16} h_{19}}{h_{17} h_{19} + h_{20}}, \tag{4.9}$$

$$D_1 = h_{16} + h_{17} E_1, \tag{4.10}$$

$$C_1 = - \frac{h_{10} + h_{11} h_{15} + h_{13} D_1 + (h_{11} + h_{14}) E_1}{h_{11} + h_{12}}, \tag{4.11}$$

$$B_1 = h_{15} + C_1 + E_1, \tag{4.12}$$

где $h_{16} = \frac{(h_5 + h_6 h_{15})(h_{11} + h_{12}) - (h_6 + h_7)(h_{10} + h_{11} h_{15})}{(h_6 + h_7) h_{13} - h_8 (h_{11} + h_{12})}$;

$h_{17} = \frac{(h_6 + h_9)(h_{11} + h_{12}) - (h_6 + h_7)(h_{11} + h_{14})}{(h_6 + h_7) h_{13} - h_8 (h_{11} + h_{12})}$;

$h_{18} = (h_1 + h_2 h_{15})(h_{11} + h_{12}) - (h_2 + h_3)(h_{10} + h_{11} h_{15})$; $h_{19} = h_4 (h_{11} + h_{12}) - (h_2 + h_3) h_{13}$;

$$h_{20} = h_2(h_{11} + h_{12}) - (h_2 + h_3)(h_{11} + h_{14}).$$

С учетом $A_1 = -1$ и рассчитанных по формулам (4.9) – (4.12) коэффициентов B_1 , C_1 , D_1 и E_1 найдем по таблицам z -преобразований [89] изображения элементарных дробей:

$$Z\left\{-\frac{1}{p}\right\} = -\frac{z}{z-1}; \quad (4.13)$$

$$Z\left\{\frac{B_1}{T_{na}p-1}\right\} = \frac{B_1}{T_{na}} \frac{z}{z-d_1}; \quad (4.14)$$

$$Z\left\{\frac{C_1}{T_a p+1}\right\} = \frac{C_1}{T_a} \frac{z}{z-d_2}; \quad (4.15)$$

$$Z\left\{\frac{D_1 p + E_1}{T_\kappa^2 + 2\xi T_\kappa p + 1}\right\} = \frac{D_1}{T_\kappa^2} \left[\frac{z^2 - zd \cos \beta T}{z^2 - 2zd \cos \beta T + d^2} + \frac{T_\kappa E_1 - \xi D_1}{D_1 \sqrt{1 - \xi^2}} \frac{zd \sin \beta T}{z^2 - 2zd \cos \beta T + d^2} \right]. \quad (4.16)$$

Подставляя последовательно (4.13), (4.14), (4.15) и (4.16) в выражения (4.6) и (4.5) после алгебраических преобразований, получим дискретную передаточную непрерывной части канала управления первым электромагнитом с учетом экстраполятора нулевого порядка [109]:

$$W_{01}(z) = \frac{b_{04}z^3 + b_{14}z^2 + b_{24}z + b_{34}}{z^4 + a_{14}z^3 + a_{24}z^2 + a_{34}z + a_{44}}, \quad (4.17)$$

где

$$b_{04} = k_{cn1} k_{U1} \left[d_1 + d_2 + 2d \cos \beta T - \frac{B_1}{T_{na}} (1 + d_2 + 2d \cos \beta T) - \frac{C_1}{T_a} (1 + d_1 + 2d \cos \beta T) - \frac{D_1}{T_\kappa^2} (1 + d_1 + d_2 + d_3) \right]$$

$$b_{14} = k_{cn1}k_{U1} \left[-\left(d^2 + 2dd_2 \cos \beta T + d_1 + d_2 + 2dd_1 \cos \beta T\right) + \right. \\ \left. + \frac{B_1}{T_{на}} \left(d^2 + 2dd_2 \cos \beta T + d_2 + 2d \cos \beta T\right) + \right. \\ \left. + \frac{C_1}{T_a} \left(d^2 + 2dd_1 \cos \beta T + d_1 + 2d \cos \beta T\right) + \right. \\ \left. + \frac{D_1}{T_\kappa^2} \left(d_1d_2 + d_1d_3 + d_2d_3 + d_1 + d_2 + d_3\right) \right] ;$$

$$b_{24} = k_{cn1}k_{U1} \left[d^2d_2 + d^2d_1 + 2dd_1d_2 \cos \beta T - \frac{B_1}{T_{на}} \left(d^2d_2 + d^2 + 2dd_2 \cos \beta T\right) \right. \\ \left. - \frac{C_1}{T_a} \left(d^2d_1 + d^2 + 2dd_1 \cos \beta T\right) - \frac{D_1}{T_\kappa^2} \left(d_1d_2d_3 + d_1d_2 + d_1d_3 + d_2d_3\right) \right] ;$$

$$b_{34} = k_{cn1}k_{U1} \left[-d^2d_1d_2 + \frac{B_1}{T_{на}} d^2d_2 + \frac{C_1}{T_a} d^2d_2 + \frac{D_1}{T_\kappa^2} d_1d_2d_3 \right] ;$$

$$d_3 = d \cos \beta T - \frac{(T_\kappa E_1 - \xi D_1) d \sin \beta T}{D_1 \sqrt{1 - \xi^2}} ;$$

$$a_{14} = -(d_1 + d_2 + 2d \cos \beta T) ; a_{24} = d^2 + 2d(d_1 + d_2) \cos \beta T ;$$

$$a_{34} = -\left[d^2(d_1 + d_2) + 2dd_1 \cos \beta T\right] ; a_{44} = d^2d_1d_2 .$$

Аналогично находится дискретная передаточная функция непрерывной части канала управления вторым электромагнитом с учетом экстраполятора нулевого порядка [109]:

$$W_{02}(z) = \frac{b_{05}z^3 + b_{15}z^2 + b_{25}z + b_{35}}{z^4 + a_{14}z^3 + a_{24}z^2 + a_{34}z + a_{44}} , \quad (4.18)$$

где

$$b_{05} = k_{cn2}k_{U2} \left[-(d_1 + d_2 + 2d \cos \beta T) + \frac{B_2}{T_{на}} (1 + d_2 + 2d \cos \beta T) - \right. \\ \left. + \frac{C_2}{T_a} (1 + d_1 + 2d \cos \beta T) + \frac{D_2}{T_\kappa^2} (1 + d_1 + d_2 + d_3) \right]$$

$$b_{15} = k_{cn2}k_{U2} \left[d^2 + 2dd_2 \cos \beta T + d_1 + d_2 + 2dd_1 \cos \beta T + \right. \\ \left. - \frac{B_2}{T_{na}} (d^2 + 2dd_2 \cos \beta T + d_2 + 2d \cos \beta T) + \right. \\ \left. - \frac{C_2}{T_a} (d^2 + 2dd_1 \cos \beta T + d_1 + 2d \cos \beta T) + \right. \\ \left. - \frac{D_2}{T_\kappa^2} (d_1d_2 + d_1d_3 + d_2d_3 + d_1 + d_2 + d_3) \right] ;$$

$$b_{25} = k_{cn2}k_{U2} \left[- (d^2d_2 + d^2d_1 + 2dd_1d_2 \cos \beta T) + \frac{B_2}{T_{na}} (d^2d_2 + d^2 + 2dd_2 \cos \beta T) \right. \\ \left. + \frac{C_2}{T_a} (d^2d_1 + d^2 + 2dd_1 \cos \beta T) + \frac{D_2}{T_\kappa^2} (d_1d_2d_3 + d_1d_2 + d_1d_3 + d_2d_3) \right] ;$$

$$b_{35} = k_{cn2}k_{U2} \left[d^2d_1d_2 - \frac{B_2}{T_{na}} d^2d_2 - \frac{C_2}{T_a} d^2d_2 - \frac{D_2}{T_\kappa^2} d_1d_2d_3 \right] ; E_2 = - \frac{h_{18} + h_{16}h_{19}}{h_{17}h_{19} + h_{20}} ;$$

$$D_2 = h_{116} + h_{17}E_2 ; C_2 = - \frac{h_{10} + h_{11}h_{115} + h_{13}D_2 + (h_{11} + h_{14})E_2}{h_{11} + h_{12}} ; B_2 = h_{115} + C_1 + E_1 ,$$

$$h_{115} = b_{02} + T_{na} - T_a - 2\xi T_\kappa ; h_{116} = \frac{(h_5 + h_6h_{115})(h_{11} + h_{12}) - (h_6 + h_7)(h_{10} + h_{11}h_{115})}{(h_6 + h_7)h_{13} - h_8(h_{11} + h_{12})} ;$$

$$h_{18} = (h_1 + h_2h_{115})(h_{11} + h_{12}) - (h_2 + h_3)(h_{10} + h_{11}h_{115}) .$$

Дискретные передаточные функции (4.17) и (4.18) являются дискретной математической моделью электромагнитного подшипника как объекта цифровой системы управления. Они позволяют исследовать динамические свойства цифровых систем управления электромагнитными подшипниками при любом структурном построении, различных законах регулирования напряжений противоположных магнитов и произвольном начальном положении ротора относительно центра магнитной системы, с учетом величины периода дискретизации T .

4.3 Оценка адекватности дискретной математической модели цифровой системы управления радиального электромагнитного подшипника

Оценку адекватности полученных дискретных передаточных функций проведем методом компьютерного моделирования. Для этого найдем численные значения дискретной и непрерывной передаточной функций радиального электромагнитного подшипника нагнетателя газоперекачивающего агрегата ГПА Ц-16 при смещении ротора относительно оси вращения на $y_0 = 165$ мкм и параметрах электромагнитов: $k_{Fl} = 3,8798 \cdot 10^{-5}$ Нм²/А², $T_1 = 0,078$ с, $T_2 = 0,0499$ с, $R_1 = R_2 = 1,7$ Ом, $k_{Fy} = 2,75 \cdot 10^7$ Н/м. При расчете примем следующие начальные условия: $I_{10} = I_{20} = 7,5$ А, $I'_{10} = I'_{20} = 0$, $V_0 = 0$. При этих параметрах непрерывная передаточная функция (4.1) для верхнего электромагнита принимает следующие численные значения [109]:

$$W_{U1}(p) = \frac{1,8146 \cdot 10^{-6} p + 3,6376 \cdot 10^{-5}}{5,4546 \cdot 10^{-8} p^4 + 1,7925 \cdot 10^{-6} p^3 + 1,40137 \cdot 10^{-3} p^2 - 0,055716 p - 1}. \quad (4.19)$$

Анализ корней знаменателя (4.19) (см. таблицу 4.1) позволяет сделать вывод, что $T_{на} = 0,0104$ с, $T_a = 0,0557$ с, $T_k = 0,0097$ с, $\xi = 0,5357$. С учетом этих данных, а также при коэффициенте передачи силового преобразователя $k_{cn1} = 0,001465$ В/дискрета и периоде дискретизации по времени $T = 0,0001$ с дискретная передаточная функция (4.17) примет вид [108]:

$$W_{01}(z) = \frac{8,12 \cdot 10^{-15} z^3 + 2,437 \cdot 10^{-14} z^2 - 2,429 \cdot 10^{-14} z - 8,099 \cdot 10^{-15}}{z^4 - 3,9967171 z^3 + 5,9901524 z^2 - 3,9901545 z + 0,9967192}. \quad (4.20)$$

Одновременное моделирование передаточных функций (4.19) и (4.20) (рисунок 4.4) позволяет построить в одних осях графики переходных процессов по дискретной и непрерывной передаточным функциям (рисунок 4.5). Кривая 1 соответствует непрерывной передаточной функции (4.19), а кривая 2 – дискретной (4.20). Анализ графиков показывает их хорошее совпадение. Действительно, в моменты

времени, кратные 0,0001 с расхождение кривых не превышает 0,05%. Следовательно, можно утверждать, что дискретная передаточная функция (4.17) адекватна реальным процессам, протекающим в электромагнитном подшипнике [109].

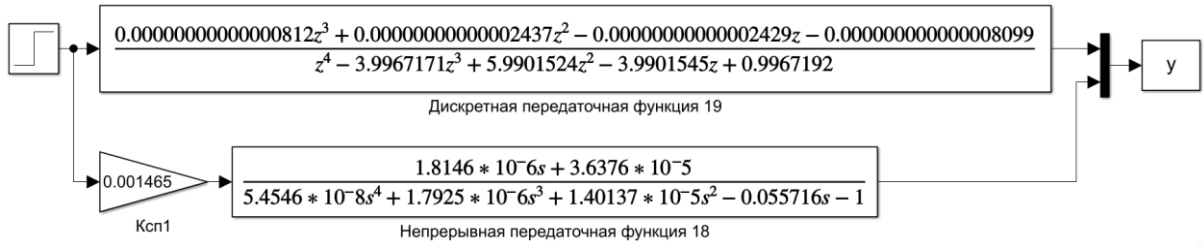


Рисунок 4.4 – Расчетная модель электромагнитного подшипника для оценки адекватности дискретной передаточной функции (4.17)

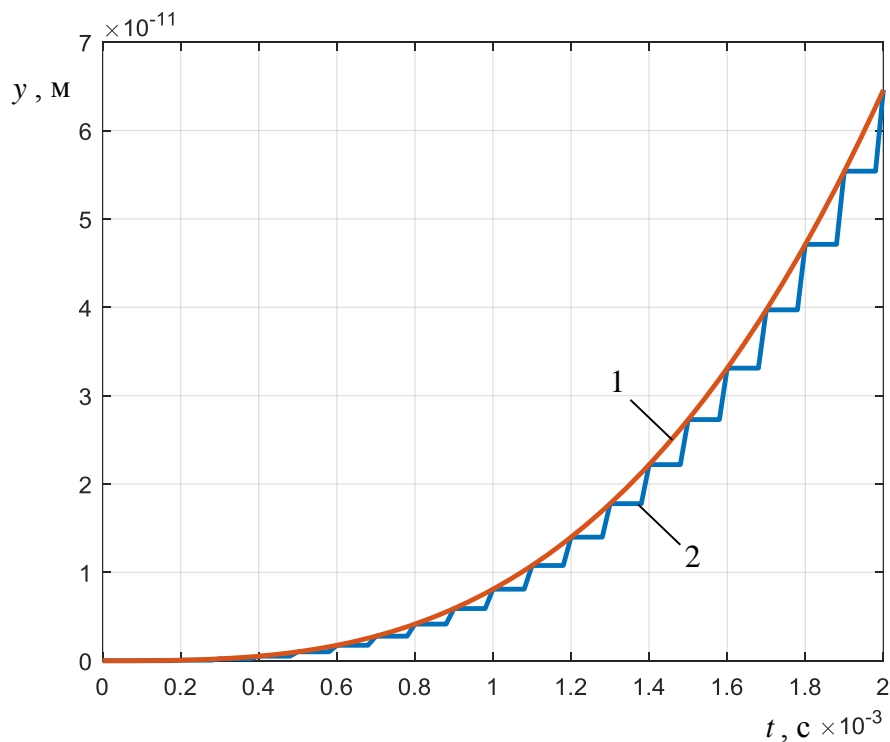


Рисунок 4.5 – Графики переходных процессов в электромагнитном подшипнике при подаче напряжения на верхний магнит, построенные по непрерывной (4.19) и дискретной (4.20) передаточным функциям

Аналогичным образом проверим адекватность дискретной передаточной функции (4.18). Для рассматриваемого примера ее численные значения будут:

$$W_{02}(z) = \frac{-5,191 \cdot 10^{-15} z^3 - 1,557 \cdot 10^{-14} z^2 + 1,554 \cdot 10^{-14} z + 5,179 \cdot 10^{-15}}{z^4 - 3,9967171z^3 + 5,9901524z^2 - 3,9901545z + 0,9967192}. \quad (4.21)$$

При этом передаточная функция (4.2) принимает следующий вид:

$$W_{U2}(p) = \frac{-1,1602 \cdot 10^{-6} p - 1,4869 \cdot 10^{-5}}{5,4546 \cdot 10^{-8} p^4 + 1,7925 \cdot 10^{-6} p^3 + 1,40137 \cdot 10^{-3} p^2 - 0,055716p - 1}. \quad (4.22)$$

Одновременное моделирование передаточных функций (4.21) и (4.22) (рисунок 4.6) показывает, что графики переходных процессов, построенные по непрерывной и дискретной модели в точках времени, кратных 0,0001 с практически совпадают (рисунок 4.7). Следовательно, и дискретная передаточная функция (4.18) адекватна реальным процессам, протекающим в электромагнитном подшипнике.

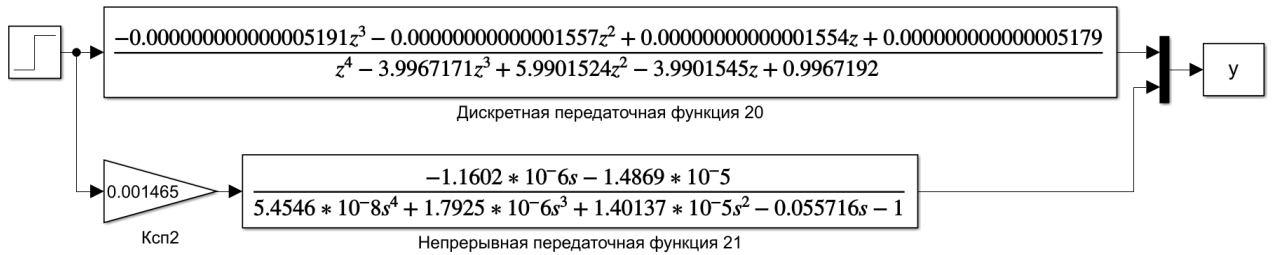


Рисунок 4.6 – Расчетная модель электромагнитного подшипника для оценки адекватности дискретной передаточной функции (4.18)

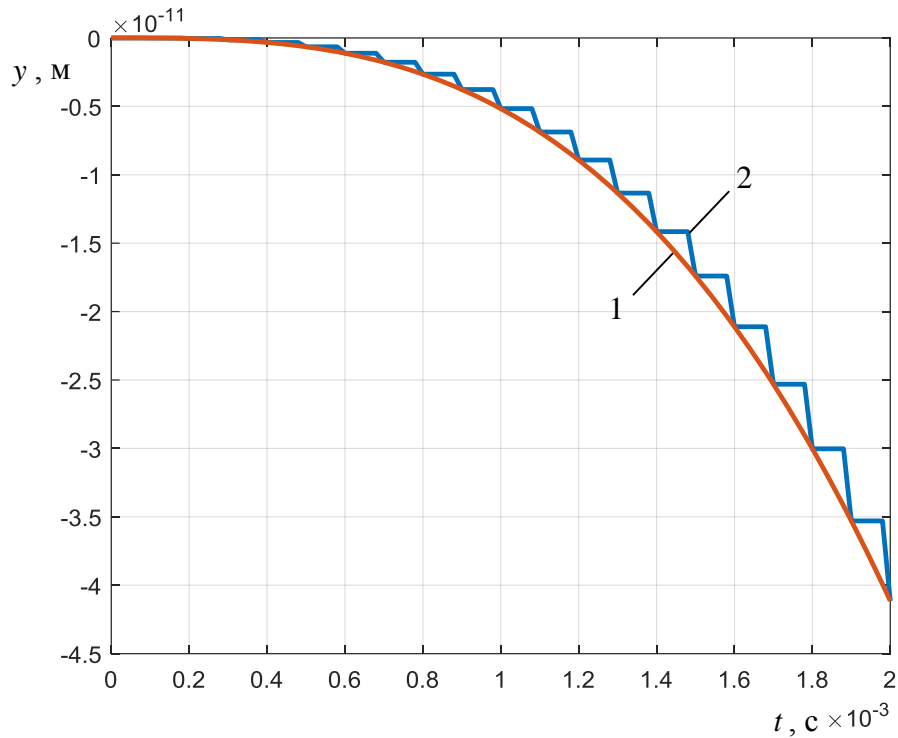


Рисунок 4.7 – Графики переходных процессов в электромагнитном подшипнике при подаче напряжения на нижний магнит, построенные по непрерывной (4.22) и дискретной (4.21) передаточным функциям

4.4 Дискретная математическая модель цифровой системы управления электромагнитным подшипником с отдельным регулированием напряжений противоположных магнитов

Определение передаточных функций замкнутых систем управления, обычно осуществляется методом структурных преобразований. Однако, структурная схема цифровой СУ ЭМП (рисунок 4.2), является сложной и применение этого метода является затруднительным. Поэтому поступим следующим образом – составим уравнение движения рассматриваемой системы по ее структурной схеме [108]:

$$\left. \begin{aligned}
\varepsilon(z) &= y_3(z) - k_{\partial n} y(z); \\
N_{u1}(z) &= W_{u1}(z) \varepsilon(z); \\
\varepsilon_3(z) &= N_{u1}(z) - k_{\partial n} y(z); \\
N_{n1}(z) &= k_{n1} \varepsilon_3(z); \\
\varepsilon_1(z) &= N_{n1}(z) - k_{\partial n} W_{occ1}(z) y(z); \\
N_{nd1}(z) &= W_{nd1}(z) \varepsilon_1(z); \\
y_1(z) &= W_{01}(z) N_{nd1}(z); \\
N_{u2}(z) &= W_{u2}(z) \varepsilon(z); \\
\varepsilon_4(z) &= N_{u2}(z) - k_{\partial n} y(z); \\
N_{n2}(z) &= k_{n2} \varepsilon_4(z); \\
\varepsilon_2(z) &= N_{n2}(z) - k_{\partial n} W_{occ2}(z) y(z); \\
N_{nd2}(z) &= W_{nd2}(z) \varepsilon_2(z); \\
y_2(z) &= -W_{02}(z) N_{nd2}(z); \\
y(z) &= y_1(z) + y_2(z),
\end{aligned} \right\} \quad (4.23)$$

где $N_{u1}(z)$ и $N_{u2}(z)$ – изображения выходных сигналов первого и второго интегральных регуляторов; $N_{n1}(z)$ и $N_{n2}(z)$ – изображения выходных сигналов первого и второго пропорциональных регуляторов; $N_{nd1}(z)$ и $N_{nd2}(z)$ – изображения выходных сигналов первого и второго пропорционально-дифференциальных регуляторов; $\varepsilon(z)$, $\varepsilon_1(z)$, $\varepsilon_2(z)$, $\varepsilon_3(z)$ и $\varepsilon_4(z)$ – изображения сигналов рассогласования на входе регуляторов.

Из системы уравнений (4.23) нам необходимо получить зависимость изображения выходной величины $y(z)$ системы управления электромагнитным подшипником от изображения сигнала задания $y_3(z)$ [108]. Для этого сначала избавимся от промежуточных переменных $N_{nd1}(z)$ и $N_{nd2}(z)$. Тогда систему уравнений (4.23) можно записать следующим образом:

$$\left. \begin{aligned}
\varepsilon_1(z) &= N_{n1}(z) - k_{\partial n} W_{occ1}(z) y(z); \\
y_1(z) &= W_{n\partial 1}(z) W_{01}(z) \varepsilon_1(z); \\
\varepsilon_3(z) &= N_{u1}(z) - k_{\partial n} y(z); \\
N_{n1}(z) &= k_{n1} \varepsilon_3(z); \\
\varepsilon(z) &= y_3(z) - k_{\partial n} y(z); \\
N_{u1}(z) &= W_{u1}(z) \varepsilon(z); \\
\varepsilon_2(z) &= N_{n2}(z) - k_{\partial n} W_{occ2}(z) y(z); \\
y_2(z) &= -W_{n\partial 2}(z) W_{02}(z) \varepsilon_2(z); \\
\varepsilon_4(z) &= N_{u2}(z) - k_{\partial n} y(z); \\
N_{n2}(z) &= k_{n2} \varepsilon_4(z); \\
N_{u2}(z) &= W_{u2}(z) \varepsilon(z); \\
y(z) &= y_1(z) + y_2(z).
\end{aligned} \right\} \quad (4.24)$$

Теперь избавимся от переменных: $\varepsilon(z)$, $\varepsilon_1(z)$, $\varepsilon_2(z)$, $\varepsilon_3(z)$ и $\varepsilon_4(z)$. После соответствующих подстановок из (4.24), получится следующая система уравнений:

$$\left. \begin{aligned}
y_1(z) &= W_{n\partial 1}(z) W_{01}(z) N_{n1}(z) - k_{\partial n} W_{occ1}(z) W_{n\partial 1}(z) W_{01}(z) y(z); \\
N_{n1}(z) &= k_{n1} N_{u1}(z) - k_{\partial n} k_{n1} y(z); \\
N_{u1}(z) &= W_{u1}(z) y_3(z) - k_{\partial n} W_{u1}(z) y(z); \\
y_2(z) &= -W_{n\partial 2}(z) W_{02}(z) N_{n2}(z) + k_{\partial n} W_{occ2}(z) W_{n\partial 2}(z) W_{02}(z) y(z); \\
N_{n2}(z) &= k_{n2} N_{u2}(z) - k_{\partial n} k_{n2} y(z); \\
N_{u2}(z) &= W_{u2}(z) y_3(z) - k_{\partial n} W_{u2}(z) y(z); \\
y(z) &= y_1(z) + y_2(z).
\end{aligned} \right\} \quad (4.25)$$

На следующем шаге избавимся в (4.25) от $N_{n1}(z)$, $N_{n2}(z)$, $N_{u1}(z)$ и $N_{u2}(z)$. Тогда (4.25) запишется следующим образом:

$$\left. \begin{aligned}
y_1(z) &= k_{n1}W_{n\delta 1}(z)W_{01}(z)N_{u1}(z) - k_{\delta n}k_{n1}W_{n\delta 1}(z)W_{01}(z)y(z) - \\
&- k_{\delta n}W_{occ1}(z)W_{n\delta 1}(z)W_{01}(z)y(z); \\
N_{u1}(z) &= W_{u1}(z)y_3(z) - k_{\delta n}W_{u1}(z)y(z); \\
y_2(z) &= -k_{n2}W_{n\delta 2}(z)W_{02}(z)N_{u2}(z) + k_{\delta n}k_{n2}W_{n\delta 2}(z)W_{02}(z)y(z) + \\
&+ k_{\delta n}W_{occ2}(z)W_{n\delta 2}(z)W_{02}(z)y(z); \\
N_{u2}(z) &= W_{u2}(z)y_3(z) - k_{\delta n}W_{u2}(z)y(z); \\
y(z) &= y_1(z) + y_2(z).
\end{aligned} \right\} \quad (4.26)$$

Теперь сделаем подстановку $N_{u1}(z)$ и $N_{u2}(z)$ в соответствующие уравнения (4.26):

$$\left. \begin{aligned}
y_1(z) &= k_{n1}W_{u1}(z)W_{n\delta 1}(z)W_{01}(z)y_3(z) - k_{\delta n}k_{n1}W_{u1}(z)W_{n\delta 1}(z)W_{01}(z)y(z) - \\
&- k_{\delta n}k_{n1}W_{n\delta 1}(z)W_{01}(z)y(z) - k_{\delta n}W_{occ1}(z)W_{n\delta 1}(z)W_{01}(z)y(z); \\
y_2(z) &= -k_{n2}W_{u2}(z)W_{n\delta 2}(z)W_{02}(z)y_3(z) + k_{\delta n}k_{n2}W_{u2}(z)W_{n\delta 2}(z)W_{02}(z)y(z) + \\
&+ k_{\delta n}k_{n2}W_{n\delta 2}(z)W_{02}(z)y(z) + k_{\delta n}W_{occ2}(z)W_{n\delta 2}(z)W_{02}(z)y(z); \\
y(z) &= y_1(z) + y_2(z).
\end{aligned} \right\} \quad (4.27)$$

Подставляя первое и второе уравнения системы (4.27) в третье получим уравнение, связывающее изображение $y(z)$ с $y_3(z)$ [108]:

$$\begin{aligned}
& \left[1 + k_{\delta n}k_{n1}W_{u1}(z)W_{n\delta 1}(z)W_{01}(z) + k_{\delta n}k_{n1}W_{n\delta 1}(z)W_{01}(z) + \right. \\
& + k_{\delta n}W_{occ1}(z)W_{n\delta 1}(z)W_{01}(z) - k_{\delta n}k_{n2}W_{u2}(z)W_{n\delta 2}(z)W_{02}(z) - \\
& \left. - k_{\delta n}k_{n2}W_{n\delta 2}(z)W_{02}(z) - k_{\delta n}W_{occ2}(z)W_{n\delta 2}(z)W_{02}(z) \right] y(z) = \quad (4.28) \\
& = \left[k_{n1}W_{u1}(z)W_{n\delta 1}(z)W_{01}(z) - k_{n2}W_{u2}(z)W_{n\delta 2}(z)W_{02}(z) \right] y_3(z)
\end{aligned}$$

Из (4.28) следует, дискретная передаточная функция цифровой системы управления электромагнитным подшипником с отдельным управлением будет иметь вид [108]:

$$\begin{aligned}
W_{эм}(z) &= \frac{y(z)}{y_3(z)} = \\
&= \frac{k_{n1}W_{u1}(z)W_{n\delta 1}(z)W_{01}(z) - k_{n2}W_{u2}(z)W_{n\delta 2}(z)W_{02}(z)}{1 + k_{\delta n}k_{n1}W_{u1}(z)W_{n\delta 1}(z)W_{01}(z) + k_{\delta n}k_{n1}W_{n\delta 1}(z)W_{01}(z) + \\
& + k_{\delta n}W_{occ1}(z)W_{n\delta 1}(z)W_{01}(z) - k_{\delta n}k_{n2}W_{u2}(z)W_{n\delta 2}(z)W_{02}(z) - \\
& - k_{\delta n}k_{n2}W_{n\delta 2}(z)W_{02}(z) - k_{\delta n}W_{occ2}(z)W_{n\delta 2}(z)W_{02}(z)} \quad (4.29)
\end{aligned}$$

В формулу (4.29) входят дискретные передаточные функции интегральных $W_{u1}(z)$, $W_{u2}(z)$ и пропорционально-дифференциальных $W_{nd1}(z)$, $W_{nd2}(z)$ регуляторов и обратных связей по скорости $W_{occ1}(z)$, $W_{occ2}(z)$, которые зависят от алгоритмов вычисления интегралов и производных. Если в программном обеспечении цифровой системы управления интегралы вычисляются как полная сумма, а производные как первая обратная разность, то эти передаточные функции будут иметь вид [108]:

$$W_{nd1}(z) = \frac{b_{06}z + b_{16}}{z}, \quad (4.30)$$

$$W_{occ1}(z) = \frac{b_{07}z + b_{17}}{z}, \quad (4.31)$$

$$W_{u1}(z) = \frac{b_{08}z}{z-1}, \quad (4.32)$$

$$W_{nd2}(z) = \frac{b_{09}z + b_{19}}{z}, \quad (4.33)$$

$$W_{occ2}(z) = \frac{b_{010}z + b_{110}}{z}, \quad (4.34)$$

$$W_{u2}(z) = \frac{b_{011}z}{z-1}, \quad (4.35)$$

где $b_{06} = \frac{k_{nd1}(T_{nd1} + T)}{T}$; $b_{16} = -\frac{k_{nd1}T_{nd1}}{T}$; $b_{07} = \frac{k_{occ1}}{T}$; $b_{17} = -\frac{k_{occ1}}{T}$; $b_{08} = \frac{T}{T_{u1}}$;

$b_{09} = \frac{k_{nd2}(T_{nd2} + T)}{T}$; $b_{19} = -\frac{k_{nd2}T_{nd2}}{T}$; $b_{010} = \frac{k_{occ2}}{T}$; $b_{110} = -\frac{k_{occ2}}{T}$; $b_{011} = \frac{T}{T_{u2}}$.

Подставляя промежуточные выражения (4.30) – (4.35) в формулу (4.29) и производя соответствующие алгебраические преобразования, получим искомую дискретную передаточную функцию цифровой системы управления электромагнитным подшипником с отдельным регулированием напряжений противоположных магнитов [108]:

$$W_{эм}(z) = \frac{y(z)}{y_3(z)} = \frac{b_{012}z^6 + b_{112}z^5 + b_{212}z^4 + b_{312}z^3 + b_{412}z^2}{z^7 + a_{112}z^6 + a_{212}z^5 + a_{312}z^4 + a_{412}z^3 + a_{512}z^2 + a_{612}z + a_{712}}, \quad (4.36)$$

$$\begin{aligned}
&\text{где } b_{012} = k_{n1}b_{08}b_{06}b_{04} - k_{n2}b_{011}b_{09}b_{05}; \quad b_{112} = k_{n1}b_{08}(b_{06}b_{14} + b_{16}b_{04}) - k_{n2}b_{011}(b_{09}b_{15} + b_{19}b_{05}); \\
&b_{212} = k_{n1}b_{08}(b_{06}b_{24} + b_{16}b_{14}) - k_{n2}b_{011}(b_{09}b_{25} + b_{19}b_{15}); \\
&b_{312} = k_{n1}b_{08}(b_{06}b_{34} + b_{16}b_{24}) - k_{n2}b_{011}(b_{09}b_{35} + b_{19}b_{25}); \quad b_{412} = k_{n1}b_{08}b_{16}b_{34} - k_{n2}b_{011}b_{19}b_{35}; \\
&a_{112} = a_{14} - 1 + k_{\partial n} \left[b_{06}b_{04}(k_{n1}b_{08} + k_{n1} + b_{07}) - b_{09}b_{05}(k_{n2}b_{011} + k_{n2} + b_{010}) \right]; \\
&a_{212} = a_{24} - a_{14} + k_{\partial n} \left[b_{06}b_{04}(b_{17} - b_{07} - k_{n1}) + (b_{06}b_{14} + b_{16}b_{04})(k_{n1}b_{08} + k_{n1} + b_{07}) - \right. \\
&\quad \left. - b_{09}b_{05}(b_{110} - b_{010} - k_{n2}) - (b_{09}b_{15} + b_{19}b_{05})(k_{n2}b_{011} + k_{n2} + b_{010}) \right]; \\
&a_{312} = a_{34} - a_{24} + k_{\partial n} \left[-b_{06}b_{04}b_{17} + (b_{06}b_{14} + b_{16}b_{04})(b_{17} - b_{07} - k_{n1}) + \right. \\
&\quad \left. + (b_{06}b_{24} + b_{16}b_{14})(k_{n1}b_{08} + k_{n1} + b_{07}) + b_{09}b_{05}b_{110} - (b_{09}b_{15} + b_{19}b_{05})(b_{110} - b_{010} - k_{n2}) - \right. \\
&\quad \left. - (b_{09}b_{15} + b_{19}b_{05})(b_{110} - b_{010} - k_{n2}) - (b_{09}b_{25} + b_{19}b_{15})(k_{n2}b_{011} + k_{n2} + b_{010}) \right]; \\
&a_{412} = a_{44} - a_{34} + k_{\partial n} \left[-b_{17}(b_{06}b_{14} + b_{16}b_{04}) + (b_{06}b_{24} + b_{16}b_{14})(b_{17} - b_{07} - k_{n1}) + \right. \\
&\quad \left. + (b_{06}b_{34} + b_{16}b_{24})(k_{n1}b_{08} + k_{n1} + b_{07}) + b_{110}(b_{09}b_{15} + b_{19}b_{05}) - (b_{09}b_{25} + b_{19}b_{15}) \times \right. \\
&\quad \left. \times (b_{110} - b_{010} - k_{n2}) - (b_{09}b_{35} + b_{19}b_{25})(k_{n2}b_{011} + k_{n2} + b_{010}) \right]; \\
&a_{512} = -a_{44} + k_{\partial n} \left[-b_{17}(b_{06}b_{24} + b_{16}b_{14}) + (b_{06}b_{34} + b_{16}b_{24})(b_{17} - b_{07} - k_{n1}) + \right. \\
&\quad \left. + b_{16}b_{34}(k_{n1}b_{08} + k_{n1} + b_{07}) + b_{110}(b_{09}b_{25} + b_{19}b_{15}) - \right. \\
&\quad \left. - (b_{09}b_{35} + b_{19}b_{25})(b_{110} - b_{010} - k_{n2}) - b_{19}b_{25}(k_{n2}b_{011} + k_{n2} + b_{010}) \right]; \\
&a_{612} = k_{\partial n} \left[-b_{17}(b_{06}b_{34} + b_{16}b_{24}) + b_{16}b_{34}(b_{17} - b_{07} - k_{n1}) + \right. \\
&\quad \left. + b_{110}(b_{09}b_{35} + b_{19}b_{25}) - b_{19}b_{35}(b_{110} - b_{010} - k_{n2}) \right]; \\
&a_{712} = k_{\partial n} \left[-b_{17}b_{16}b_{34} + b_{110}b_{19}b_{35} \right].
\end{aligned}$$

Передаточная функция (4.36) позволяет на этапе проектирования определить требования к времени выполнения алгоритма программы, фактически являющегося периодом дискретизации по времени T , и к характеристикам производительности контроллера или микроконтроллера, планируемого в дальнейшем для технической реализации системы управления электромагнитного подшипника и электромагнитного подвеса ротора в целом [105].

Например, для радиального электромагнитного подшипника нагнетателя газоперекачивающего агрегата ГПА Ц-16 при $y_0 = 165$ мкм, $k_{FI} = 3,8798 \cdot 10^{-5}$ Нм²/А²,

$T_1 = 0,078$ с, $T_2 = 0,0499$ с, $R_1 = R_2 = 1,7$ Ом, $k_{Fy} = 2,75 \cdot 10^7$ Н/м, $k_{\delta n} = 10000000$ дискрет/м $k_{cn1} = k_{cn2} = 0,0015$ В/дискрета, и выбранных в третьей главе параметрах регуляторов $k_{n1} = k_{n2} = k_{nd1} = k_{nd2} = 2$, $T_{nd1} = 0,234$ с, $T_{nd2} = 0,15$ с, $k_{occ1} = k_{occ2} = 0,0032$ с, $T_{u1} = 0,0046$ с, $T_{u2} = 0,0048$ с и периоде дискретизации по времени $T = 0,0004$ с, дискретная передаточная функция (4.36) принимает следующие численные значения [108]:

$$W_{эм}(z) = \frac{1,474 \cdot 10^{-10} z^6 + 2,9526 \cdot 10^{-10} z^5 - 8,7902 \cdot 10^{-10} z^4 + 2,9076 \cdot 10^{-10} z^3 + 1,4562 \cdot 10^{-10} z^2}{z^7 - 4,8996673z^6 + 9,968058z^5 - 10,6826251z^4 + 6,1782675z^3 - 1,6146685z^2 - 0,0171691z + 0,0678047}. \quad (4.37)$$

Расчет корней знаменателя передаточной функции (4.37) в программе MathCAD показывает, что они равны:

$$\text{polyroots (v12)} = \begin{pmatrix} -0.156 \\ 0.725 - 0.386i \\ 0.725 + 0.386i \\ 0.749 \\ 0.865 \\ 0.993 + 1.016i \times 10^{-5} \\ 0.998 - 1.009i \times 10^{-5} \end{pmatrix}.$$

Анализ этих корней показывает, что все они имеют модуль меньше 1. Следовательно, при выбранных параметрах регуляторов и периоде замыкания программного цикла $T = 0,0004$ с, цифровая система управления электромагнитным подшипником с отдельным регулированием напряжений противоположных магнитов будет устойчива [108].

В то же время при $T = 0,001$ с передаточная функция (4.36) примет вид:

$$W_{эм}(z) = \frac{2,3048 \cdot 10^{-9} z^6 + 4,6278 \cdot 10^{-9} z^5 - 1,362 \cdot 10^{-8} z^4 + 4,4533 \cdot 10^{-9} z^3 + 2,2358 \cdot 10^{-9} z^2}{z^7 - 4,6658488z^6 + 10,0262099z^5 - 12,3232658z^4 + 8,4621749z^3 - 2,5603782z^2 - 0,1054542z + 0,1665739}. \quad (4.38)$$

Корни знаменателя (4.38) равны:

$$\text{polyroots}(v12) = \begin{pmatrix} -0.198 \\ 0.705 + 0.068i \\ 0.705 - 0.068i \\ 0.738 + 1.084i \\ 0.738 - 1.084i \\ 0.982 + 5.914i \times 10^{-6} \\ 0.995 - 5.377i \times 10^{-6} \end{pmatrix} .$$

Отсюда видно, что пара комплексно-сопряженных корней имеет модуль больше 1, следовательно, при $T = 0,001$ с рассматриваемая цифровая система будет неустойчива.

4.5 Оценка адекватности дискретной математической модели цифровой системы управления электромагнитным подшипником с учетом квантования по уровню

Для проверки точности и достоверности полученной дискретной математической модели цифровой СУ ЭМП с отдельным регулированием напряжений противоположных магнитов, разработана расчетная модель, в которой одновременно моделируется дискретная передаточная функция (4.37) и система управления, представленная набором блоков (рисунок 4.8). Она позволяет построить в одних осях два графика переходных процессов по управляющему воздействию (рисунок 4.9). На рисунке цифровой 1 обозначен график, построенный с помощью модели цифровой системы, представленной отдельными блоками регуляторов и непрерывной части системы с экстраполятором, а цифрой 2 – график, полученный с помощью дискретной передаточной функции (4.37). Графики имеют хорошее совпадение, причем время переходного процесса графика 1 равно 0,0119 с, а графика 2 – 0,0123 с. Сравнивая полученные графики, принимая за эталон график 1, наблюдается расхождение по времени переходного процесса составляющее менее 3,4%, что

свидетельствует об адекватности новой дискретной передаточной функции (4.36) и достаточной точности отражения процессов, протекающих в рассматриваемой цифровой СУ ЭМП.

Следует отметить, что время переходного процесса, полученное в третьей главе в аналоговом прототипе этой системы, равно 0,0108 с, следовательно, в цифровой системе при тех же настройках регуляторов, длительность переходного процесса увеличилась, как минимум, на 10%. Но это вполне ожидаемо, поскольку процесс квантования по времени вносит дополнительную инерционность.

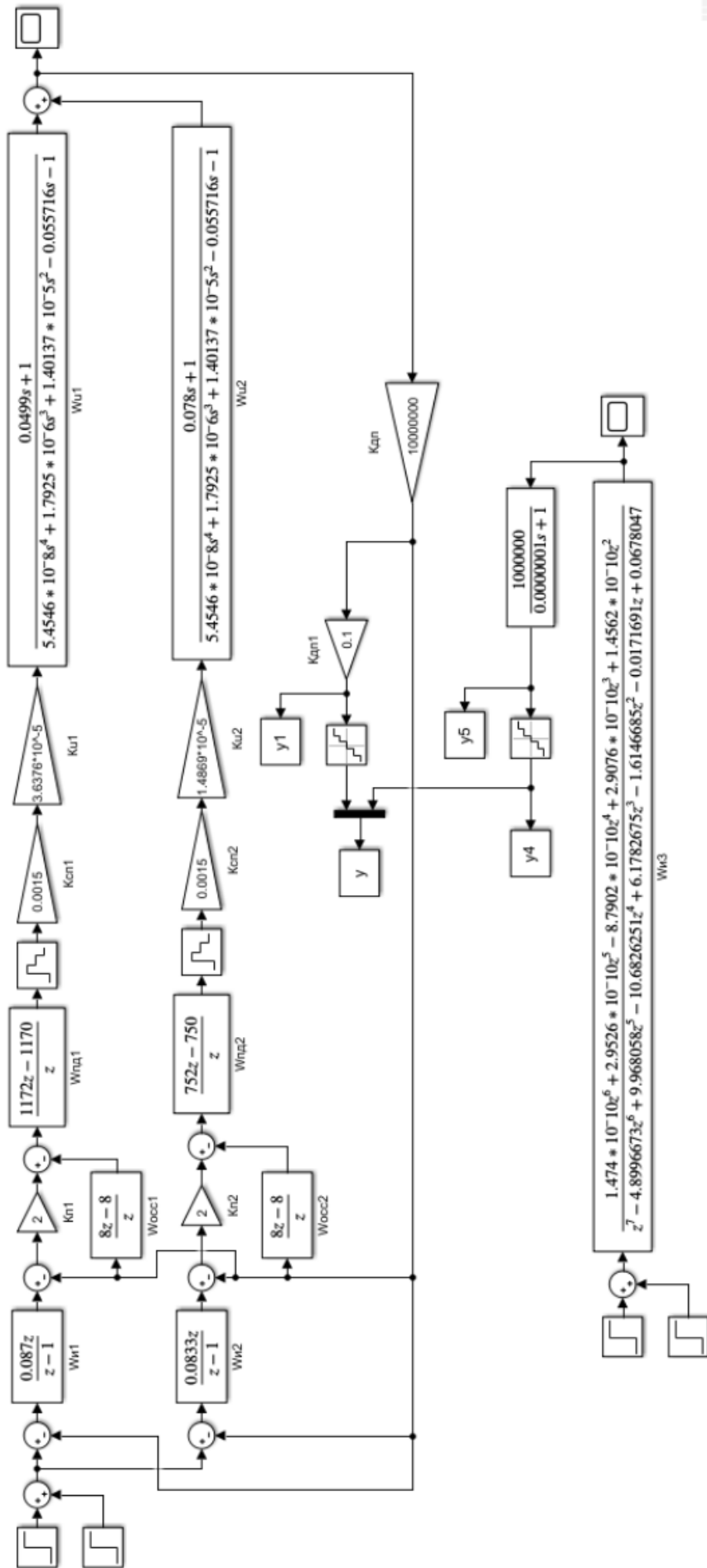


Рисунок 4.8 – Расчетная модель цифровой системы управления электромагнитным подшипником в виде дискретной передаточной функции (4.37) и при представлении системы в виде набора блоков

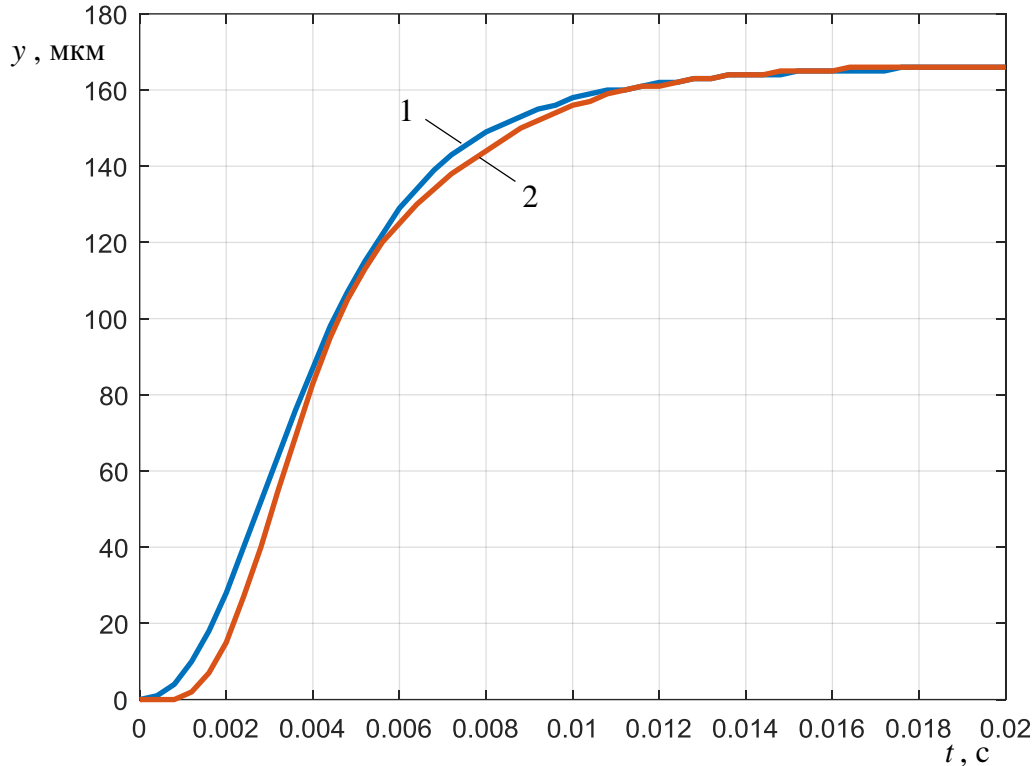


Рисунок 4.9 – Графики переходных процессов по управляющему воздействию, построенные с помощью представленной выше расчетной модели

Все ранее представленные исследования основаны на линеаризованном представлении цифровой СУ ЭМП, но следует учесть, что дискретизация сигналов по уровню делает цифровую систему нелинейной. Кроме того, в системе управления электромагнитным подшипником имеются естественные нелинейности типа ограничения сигналов по уровню, например, ограничение выходного напряжения силовых преобразователей. Поэтому необходимо оценить влияние этих нелинейностей на работу рассматриваемой системы управления электромагнитным подшипником. Актуальность этого исследования определяется еще и тем, что в системе используются цифровые дифференцирующие звенья, которые изменение рассогласования сигналов на входе соответствующих регуляторов умножают на большой коэффициент. Например, при выборе постоянной времени первого пропорционально-дифференциального регулятора $T_{nd1} = 0,234$ с и периоде квантования по времени $T = 0,0004$ с изменение в каком-то такте рассогласования на 1 дискрету приводит

к умножению этого рассогласования на коэффициент: $\frac{T_{nd1}}{T} = \frac{0,234}{0,0004} = 585$. Учитывая еще выбранный коэффициент передачи этого регулятора, равный $k_{nd1} = 2$ фактическое умножение происходит на коэффициент 1170, что сказывается на бросках напряжения на выходе силового преобразователя.

Для оценки влияния дискретизации по уровню с учетом ограничения сигналов по уровню, разработана следующая нелинейная расчетная модель цифровой системы управления электромагнитным подшипником (рисунок 4.9), с помощью которой были получены графики переходных процессов при перемещении на 10 мкм (рисунок 4.11), 40 мкм (рисунок 4.12) и 80 мкм (рисунок 4.13). При перемещении на 10 мкм наблюдается монотонный переходный процесс, причем время входа в зону ± 1 мкм составляет 0,0076 с. Переходный процесс на 40 мкм также монотонный, но время входа в зону ± 1 мкм равно 0,0096 с. При перемещении 80 мкм появляется перерегулирование в 20%, а время переходного процесса увеличивается до 0,0176 с.

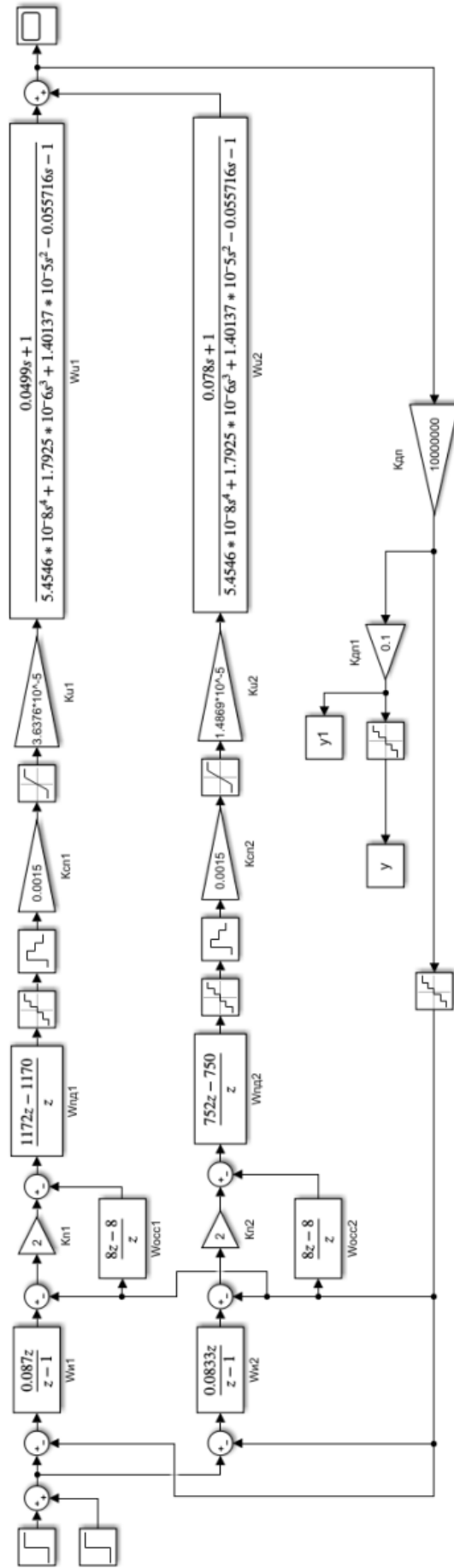


Рисунок 4.10 – Нелинейная расчетная модель цифровой системы управления электромагнитным подшипником с учетом дискретизации по уровню и ограничения сигнала

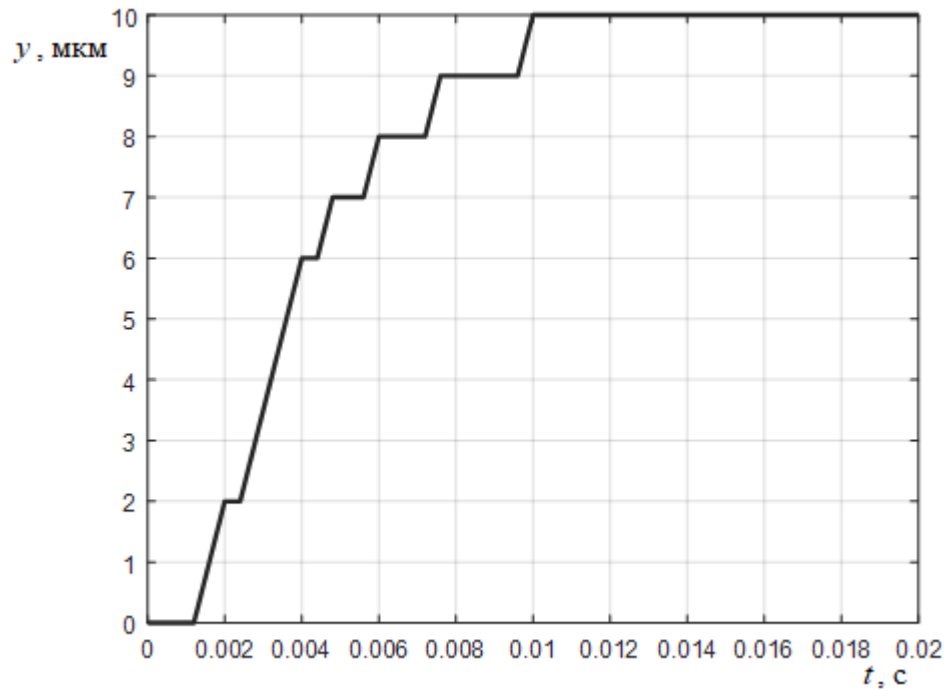


Рисунок 4.11 – График переходного процесса по управляющему воздействию на 10 мкм с учетом дискретизации по уровню и ограничения сигналов

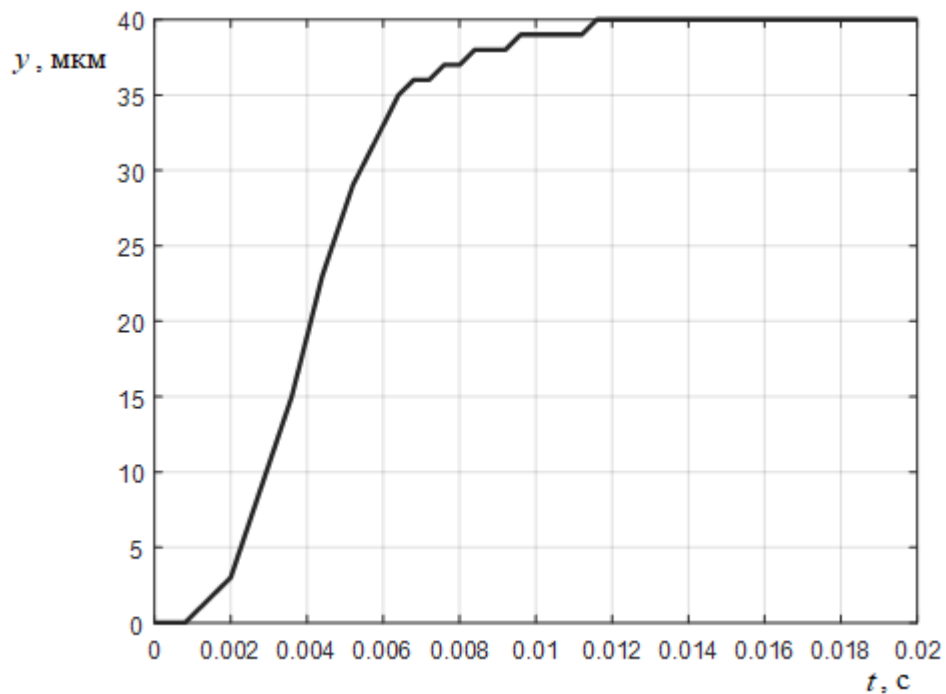


Рисунок 4.12 – График переходного процесса по управляющему воздействию на 40 мкм с учетом дискретизации по уровню и ограничения сигналов

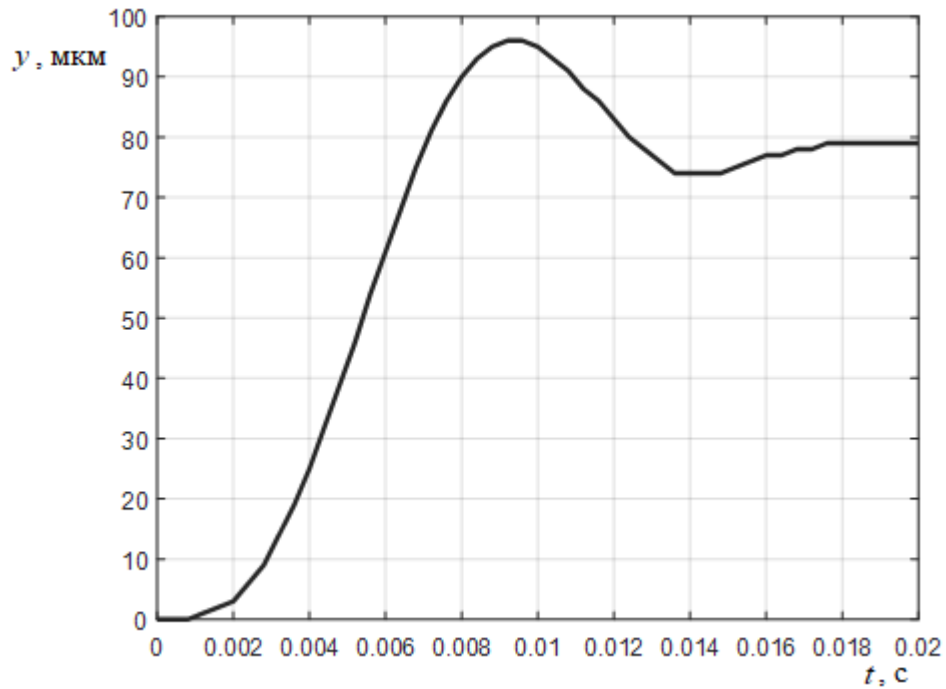


Рисунок 4.13 – График переходного процесса по управляющему воздействию на 80 мкм с учетом дискретизации по уровню и ограничения сигналов

Анализ процессов, протекающих в рассматриваемой нелинейной цифровой системе, позволяет сделать вывод, что увеличение времени переходного процесса при перемещении на 40 мкм объясняется вхождением силового преобразователя в насыщение. А при перемещении на 80 мкм время нахождения силового преобразователя на предельном значении напряжения значительно увеличивается, что вызывает также появление перерегулирования.

4.6 Верификация математической модели электромагнитного подшипника как объекта управления на основе данных натуральных экспериментов

Адекватность передаточных функций электромагнитного подшипника как объекта управления, полученных в третьей главе, доказывалась результатами компьютерного моделирования и сравнением численных значений с известной передаточной функцией, справедливой для дифференциального закона регулирования

напряжений противоположных магнитов. Проведем также сравнение результатов моделирования с данными физического эксперимента, проведенного для радиальных электромагнитных подшипников нагнетателя ГПА Ц-16, входящего в состав газоперекачивающих станций магистрального газопровода «Уренгой - Помары - Ужгород». Работа электромагнитных подшипников обеспечивалась СУ ЭМП «Неман-100», производства ООО «КГПА». Внешний вид нагнетателя ГПА Ц-16 представлен на рисунке 4.14.



Рисунок 4.14 – Нагнетатель газоперекачивающего агрегата ГПА Ц-16
с электромагнитными подшипниками

Для управления ЭМП этого агрегата использовалась трехконтурная система управления (см. рисунок 2.3) и дифференциальный закон регулирования напряжений противоположных магнитов. Но следует отметить, что передаточные функции (3.9) и (3.10), которые являются отражением предложенной автором математической модели электромагнитного подшипника как объекта управления, справедливы для любого способа регулирования напряжений противоположных магнитов,

в том числе и дифференциального. Поэтому сравним результаты натуральных экспериментов, полученных при запуске радиальных электромагнитных подшипников нагнетателя газоперекачивающего агрегата ГПА Ц-16 (рисунок 4.15) с результатами моделирования, полученными автором.

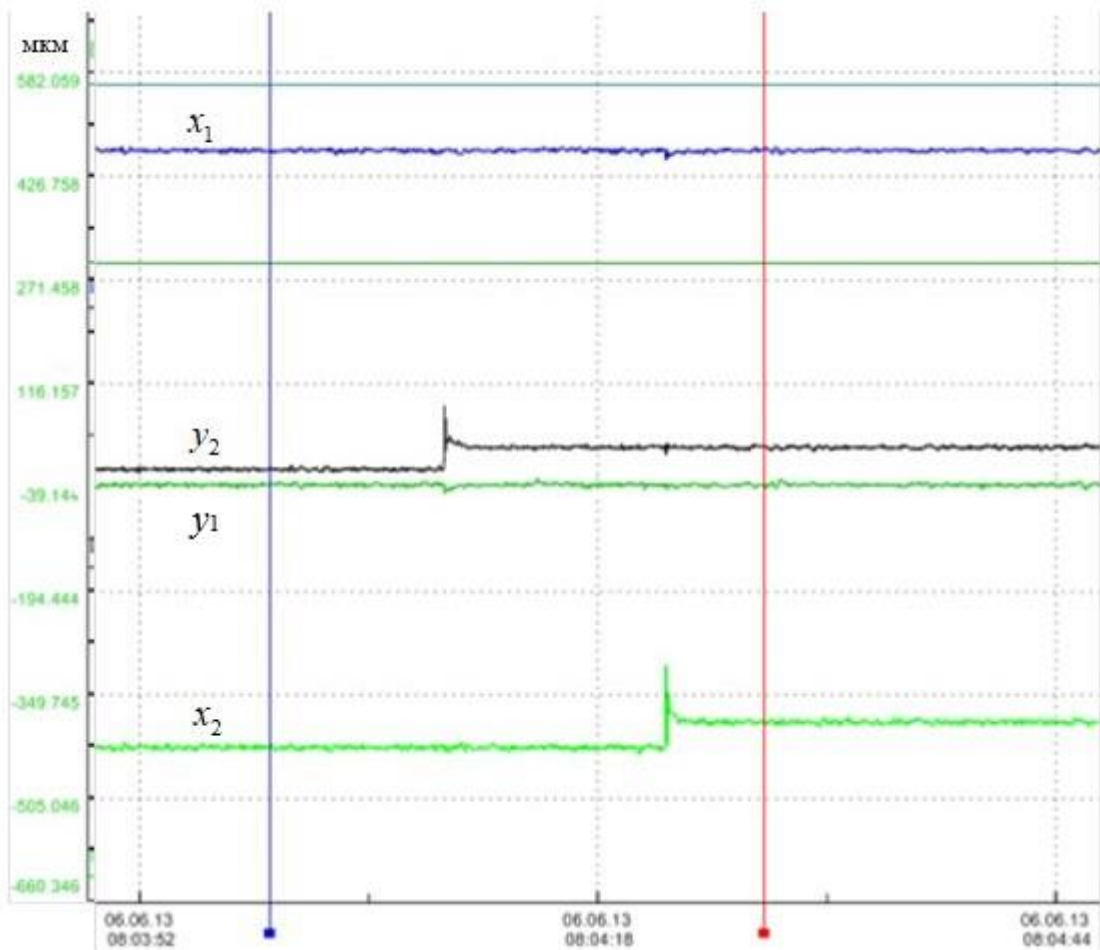


Рисунок 4.15 – Графики изменения положения ротора по четырем координатам двух радиальных электромагнитных подшипников. (Эксперимент)

На этом рисунке представлены осциллограммы изменения положения ротора по четырем координатам двух радиальных электромагнитных подшипников: переднего y_1 , x_1 и заднего y_2 , x_2 . Оси координат повернуты на 45° против часовой стрелки, если смотреть со стороны привода компрессора. Графики получены с помощью отладочных средств инструментальной графической среды разработки при-

кладных программ ISaGRAF, используемой при написании программного алгоритма (проекта) и непосредственной загрузки полученного кода в контроллер CP 3002 F-2,53 D-4, выбранный в качестве основы для технической реализации системы управления электромагнитным подвесом ротора нагнетателя газоперекачивающего агрегата ГПА Ц-16.

В ходе проведения эксперимента, после запуска электромагнитного подвеса и выхода ротора в нулевое (центральное), по показаниям датчиков, положение, специально задавалось смещение ротора на 30 мкм сначала по координате y_2 , а затем по координате x_2 . График изменения координаты y_2 при перемещении ротора из нулевого положения в смещенное, относительно центра на 30 мкм, в более приемлемом для расшифровки масштабе, представлен на рисунке 4.16.

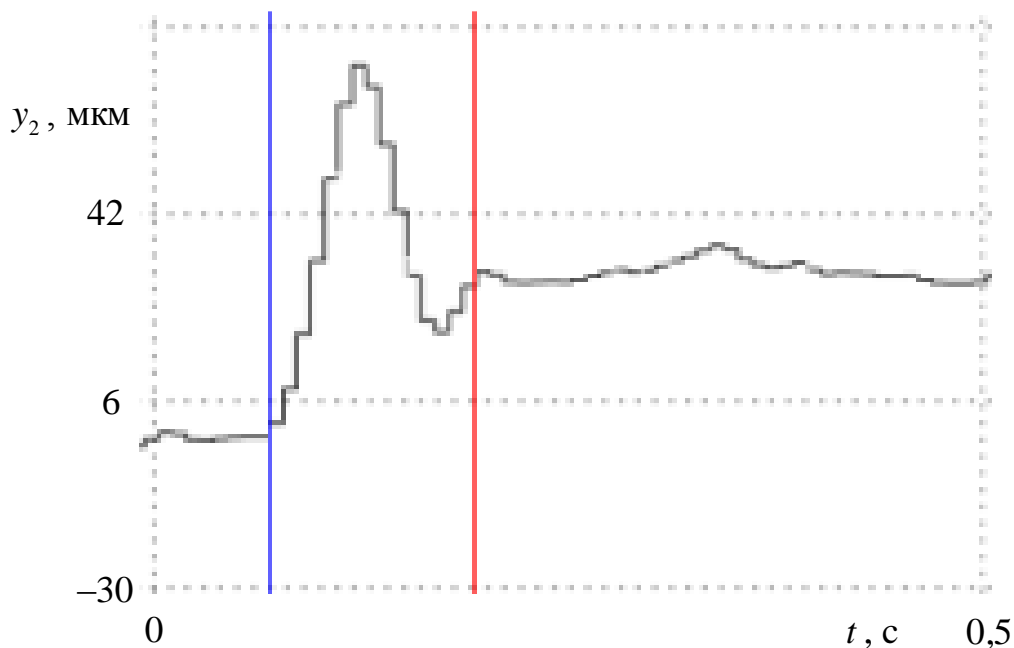


Рисунок 4.16 – График изменения координаты y_2 (задний подшипник) при перемещении ротора из нулевого положения в смещенное относительно центра на 30 мкм (Эксперимент)

Анализ графика, полученного в ходе эксперимента, показывает, что из нулевого положения (синий визир) до координаты 29 мкм (красный визир) ротор перемещается за 0,125 с.

Теперь проведем моделирование цифровой трехконтурной системы управления радиального электромагнитного подшипника по одной координате, причем при моделировании объект управления представим в виде совокупности передаточных функций (3.9) и (3.10). Для центрального положения ротора относительно магнитной системы численные значения этих передаточных функций равны между собой и имеют вид:

$$W_{U_1}(p) = -W_{U_2}(p) = \frac{2,9412 \cdot 10^{-5} (0,0609p + 1)}{6,8982 \cdot 10^{-8} p^4 + 2,2669 \cdot 10^{-6} p^3 + 1,86239 \cdot 10^{-3} p^2 - 0,06086p - 1}. \quad (4.39)$$

С учетом (4.39) и того, что в ходе эксперимента были выбраны следующие настройки регуляторов: $T_{ИД} = 0,24$ с, $k_{И} = k_{ИД} = 2$, $k_{осс} = 0,05$ с, $T_{И} = 0,013$ с, – расчетная модель цифровой системы управления радиальным электромагнитным подшипником представлена на рисунке 4.17. При моделировании цифровых регуляторов учтено, что период замыкания программного цикла контроллера равен $T = 0,0002$ с. С помощью расчетной модели (рисунок 4.17) был получен график переходного процесса по управляющему воздействию, представленный на рисунке 4.18 [108], на основании которого определено время достижения координаты 29 мкм (соответствует красному визиру на графике (рисунок 4.16), полученному по экспериментальным данным), которое составило 0,13 с [109].

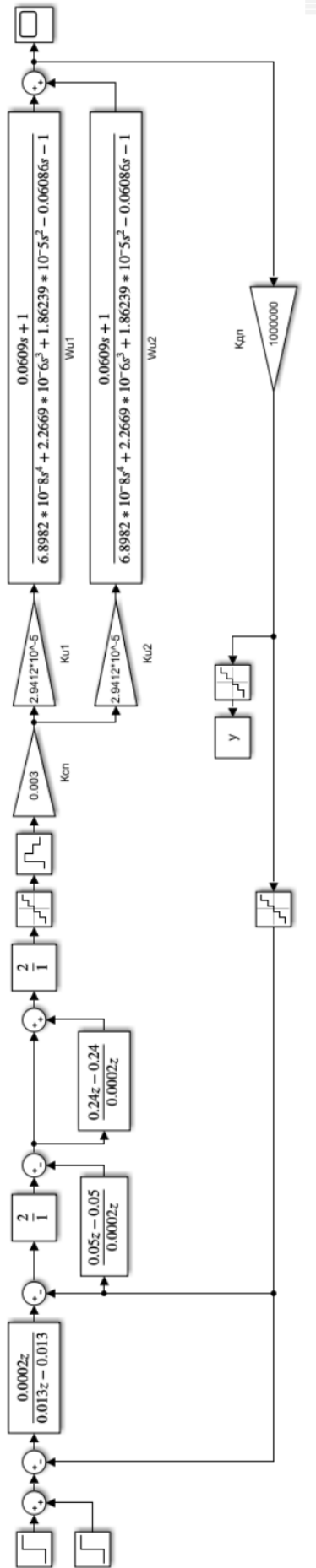


Рисунок 4.17 – Расчетная модель цифровой системы управления радиальным электромагнитным подшипником нагнетателя газоперекачивающего агрегата ГПА Ц-16 с настройками регуляторов, соответствующим условиям эксперимента

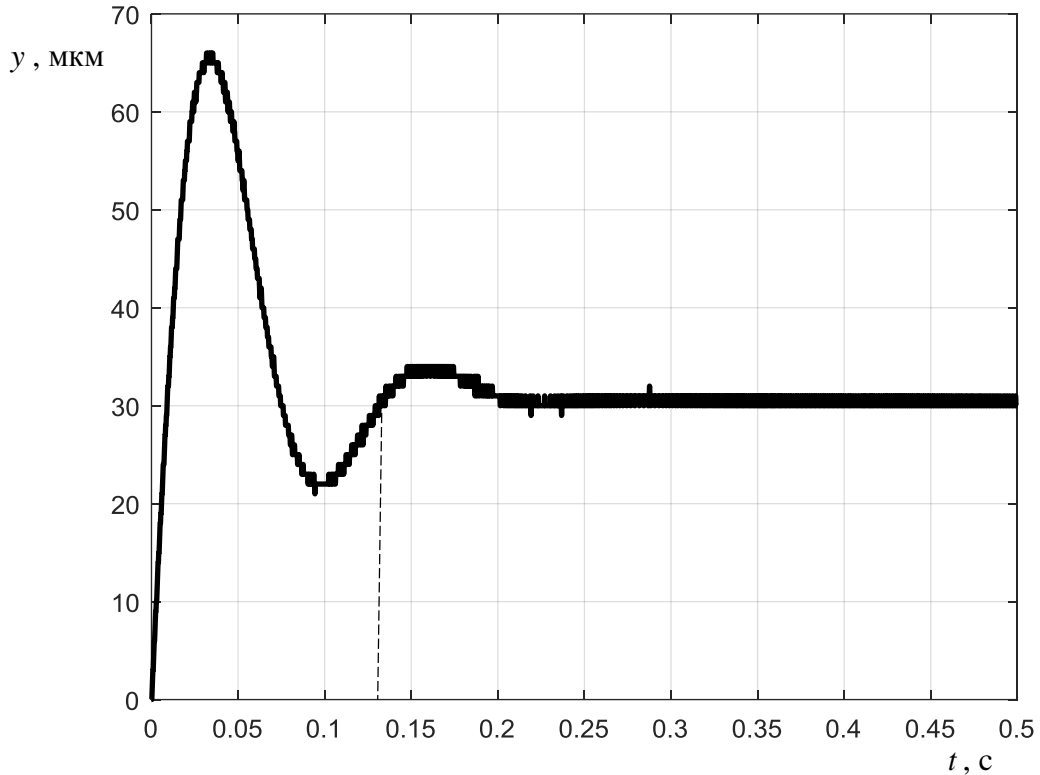


Рисунок 4.18 – График переходного процесса по управляющему воздействию на 30 мкм, построенный по расчетной модели, приведенной на рисунке 4.17

Произведено также компьютерное моделирование системы управления и с учетом изменения параметров объекта управления при смещении ротора на 30 мкм (рисунок 4.19). В этой модели приняты следующие численные значения передаточных функций (3.9) и (3.10):

$$W_{U1}(p) = \frac{3,161 \cdot 10^{-5} (0,0585p + 1)}{6,84 \cdot 10^{-8} p^4 + 2,249 \cdot 10^{-6} p^3 + 1,845 \cdot 10^{-3} p^2 - 0,0607p - 1}, \quad (4.40)$$

$$W_{U2}(p) = \frac{-2,693 \cdot 10^{-5} (0,0634p + 1)}{6,84 \cdot 10^{-8} p^4 + 2,249 \cdot 10^{-6} p^3 + 1,845 \cdot 10^{-3} p^2 - 0,0607p - 1}. \quad (4.41)$$

Результаты моделирования приведены на рисунке 4.20. И опять время достижения координаты 29 мкм, соответствующей красному визиру в натурном эксперименте, равно 0,13. Расхождение результатов компьютерного моделирования с результатами эксперимента составляет менее 5%.

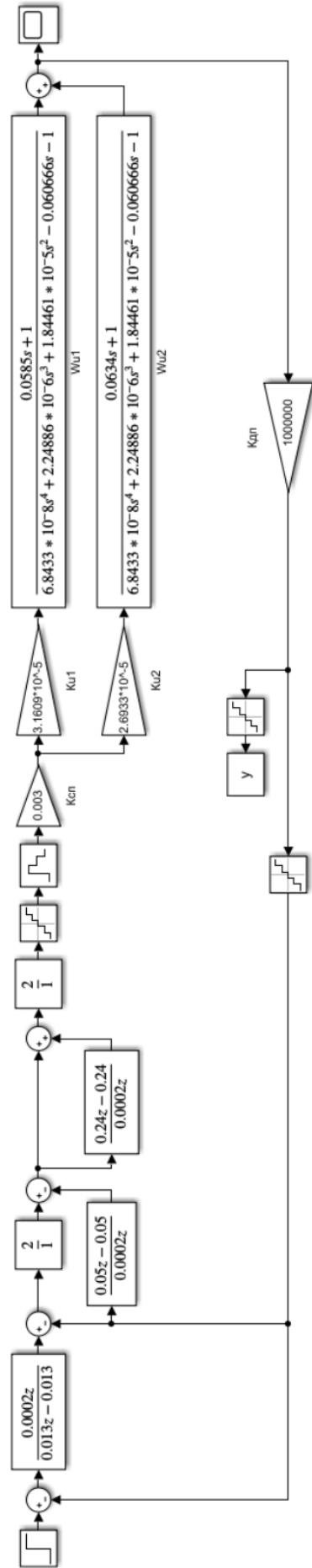


Рисунок 4.19 – Расчетная модель цифровой системы управления радиальным электромагнитным подшипником нагнетателя газоперекачивающего агрегата ГПА Ц-16 с параметрами электромагнитными смещению ротора на 30 мкм

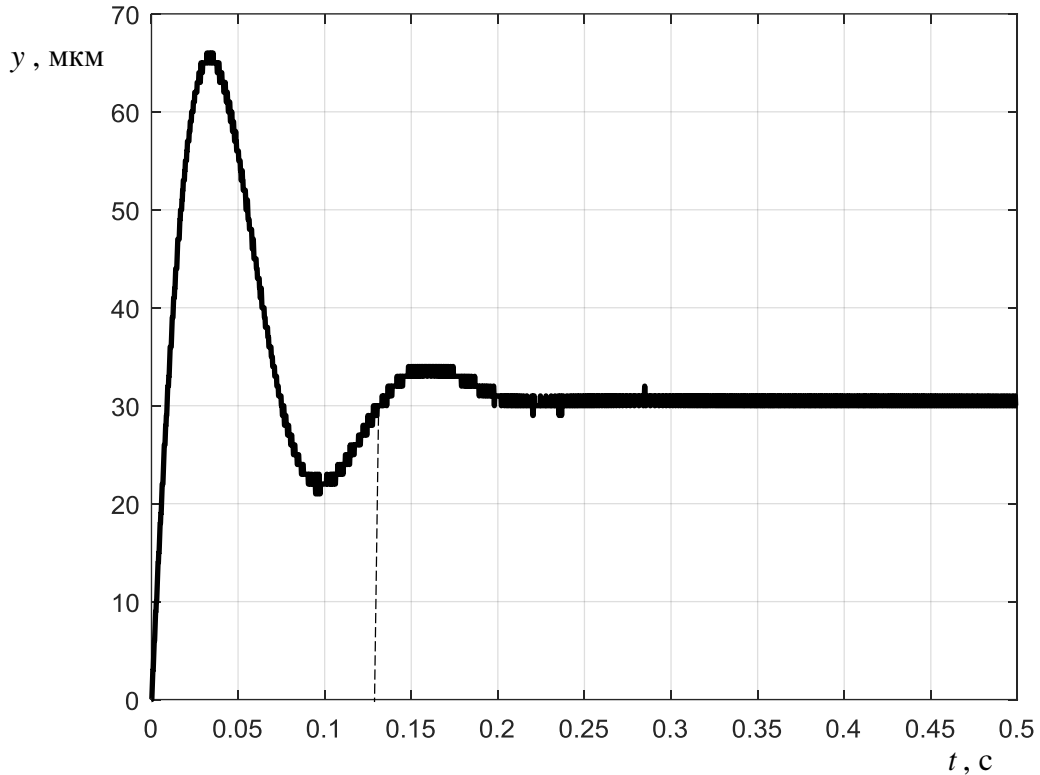


Рисунок 4.20 – График переходного процесса по управляющему воздействию на 30 мкм, построенный по расчетной модели, приведенной на рисунке 4.19

Следовательно, можно утверждать, что предложенная математическая модель электромагнитного подшипника адекватна реальным процессам, протекающим в электромагнитном подвесе ротора. При этом необходимо отметить, что новая модель имеет более широкое применение и снижает погрешность более чем в 2 раза, по сравнению с известной моделью [29], справедливой только для дифференциального закона регулирования напряжений.

4.7 Выводы по четвертой главе

1. Полученные дискретные передаточные функции радиального электромагнитного подшипника как объекта управления, позволяют исследовать динамические свойства цифровых систем управления магнитными опорами при различных законах регулирования напряжений противоположных магнитов и произвольном

начальном положения ротора с учетом величины периода дискретизации T . Погрешность, которая возникает при использовании этих передаточных функций в процессе моделирования не превышает 0,5%.

2. Дискретная передаточная функции цифровой системы управления электромагнитным подшипником с отдельным регулированием напряжений противоположных электромагнитов, полученная в ходе исследования, позволяет на шаге проектирования определить требования к времени выполнения алгоритма программы и характеристикам производительности контроллера или микроконтроллера, планируемого в дальнейшем для технической реализации СУ ЭМП и электромагнитного подвеса ротора в целом. Погрешность, с которой найденная дискретная передаточная функция описывает процессы, протекающие в предложенной цифровой системе управления электромагнитным подшипником, не превышает 3,4%.

3. Проведенное исследование показывает, что квантование по времени оказывает влияние как на показатели качества регулирования, так и на устойчивость цифровой СУ ЭМП.

4. Дискретизация сигналов по уровню может привести к появлению перерегулирования, величина которого зависит от диапазона перемещения ротора в поле электромагнитов.

5. Сравнение результатов компьютерного моделирования с результатами натуральных экспериментов доказывает адекватность новой математической модели электромагнитного подшипника как объекта управления, поскольку расхождение по времени достижения одной координаты не превышает 5%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена задача разработки и параметрического синтеза электротехнического комплекса электромагнитных подшипников с отдельным независимым регулированием напряжений противоположных полюсов, обеспечивающих повышение жесткости опор и снижение потребления электрической энергии.

В процессе выполнения диссертационной работы получены следующие основные результаты.

1. Анализ технической литературы по теме исследования показал, что известные принципы построения СУ ЭМП с горизонтальной осью вращения, а также их математические модели, предназначены для обеспечения работы ЭМП в центральном положении ротора и не позволяют использовать эффект перераспределения зазоров в верхнем и нижнем электромагнитах подшипника с целью экономии потребляемой электрической энергии.
2. Найденные аналитические выражения, позволяют определить рациональную величину смещения центра магнитной системы электромагнитного подшипника относительно оси вращения, обеспечивающую компенсацию силы веса ротора при равных токах в противоположных магнитах.
3. Доказано, что смещение центра магнитной системы подшипника, компенсирующего вес ротора, при дифференциальном законе регулировании напряжениями, позволяет снизить потребление электромагнитами электроэнергии до 30% и не влияет на устойчивость системы управления при настройках регуляторов, выбранных для центрального положения ротора.
4. Разработанная новая линеаризованная математическая модель ЭМП как объекта управления, содержащая передаточные функции и структурные схемы, справедлива для любого положения ротора, различных способов регулирования напряжений противоположных электромагнитов с учетом начальных значений скорости перемещения ротора и производных токов.

5. Доказана адекватность полученных передаточных функций ЭМП как объекта управления, причем расхождение численных значений коэффициентов знаменателей этих функций с коэффициентами знаменателя известной передаточной функции, справедливой только для дифференциального закона регулирования напряжений противоположных магнитов, не превышает 0,9%.

6. Разработана система управления электромагнитным подшипником с отдельным регулированием напряжений противоположных электромагнитов, позволяющая повысить быстродействие системы при обработке управляющих воздействий, как минимум в 2 раза, а динамическую жесткость подшипника – в 1,25 раза.

7. Разработана методика параметрического синтеза регуляторов предложенной системы управления, которая представляет собой совокупность формул, позволяющих произвести обоснованный расчет настроек регуляторов с учетом величины смещения центра магнитной системы относительно оси вращения и обеспечить монотонный характер переходных процессов во всем возможном диапазоне перемещений ротора.

8. Получены дискретные передаточные функции электромагнитного подшипника как объекта управления, которые позволяют исследовать динамические свойства цифровых систем управления магнитными опорами при заданном структурном построении, различных законах регулирования напряжений противоположных магнитов и произвольном начальном положении ротора с учетом величины периода дискретизации T .

9. Предложенная дискретная передаточная функция цифровой СУ, позволяет в процессе проектирования определить требования к времени исполнения алгоритма программы и характеристикам производительности контроллера или микроконтроллера, планируемого в дальнейшем для технической реализации системы управления электромагнитного подвеса ротора. Погрешность, возникающая при описании процессов, протекающих в предложенной цифровой СУ ЭМП, не превышает 3,4%.

10. Проведено сравнение результатов компьютерного моделирования с результатами натуральных экспериментов, которое доказывает адекватность новой математической модели электромагнитного подшипника как объекта управления. Расхождение по времени переходного процесса достижения заданного перемещения ротора по результатам моделирования и эксперимента составляет менее 5%.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Дальнейшая работа по данной теме может быть ориентирована на следующие направления:

1. Синтез цифровой системы управления электромагнитным подшипником с отдельным регулированием напряжений и минимумом регуляторов.
2. Поиск соотношения опорных напряжений силовых преобразователей противоположных магнитов, обеспечивающего дальнейшее снижение потребляемой мощности.
3. Разработка методов косвенного форсирования напряжений на обмотках электромагнитов для компенсации их инерционности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Руковицын И. Г., Сарычев А. П. Применение электромагнитных подшипников в газовой промышленности // Компрессорная техника и пневматика, – № 1. – М., 2008. – С. 12 – 14.
2. Сарычев А.П. Исследование и разработка ряда электромагнитных подшипников для серии компрессоров газоперекачивающих агрегатов: автореф. дис. ... докт. техн. наук / А.П. Сарычев. – М.: ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2010. – 40 с.
3. Сарычев А.П. Разработка электромагнитных подшипников для серии компрессоров газоперекачивающих агрегатов // Труды НПП ВНИИЭМ. – М., 2009. – т. 110. – С. 3 – 10.
4. Сарычев А.П. Особенности и опыт создания электромагнитных подшипников для серии компрессоров газоперекачивающих агрегатов // Труды НПП ВНИИЭМ. – М., 2009. – т. 112. – С. 3 – 10.
5. Сарычев А.П., Абдурагимов А.С., Носков А.В. Опыт применения магнитных подшипников в компрессорах ГПА // Труды 15-го Международного симпозиума «Потребители-производители компрессоров и компрессорного оборудования». – СПб., 2010. – С. 122 – 128.
6. Сарычев А.П., Вейнберг Д.М. Опыт разработки электромагнитных подшипников для газовых компрессоров // Труды НПП ВНИИЭМ. – М., 2001. – т. 100. – С. 275 – 282.
7. Сарычев А.П., Верещагин В.П. Электромагнитные подшипники для Газпрома // Электротехника. – М., 1996. – № 5. – С. 29 – 31.
8. Сарычев А.П., Ермолаев А.В., Спиринов А. В. и др. Опыт создания нагнетателя для ГПА-12М «Урал» // Компрессорная техника и пневматика, № 8. – М., 2001. – С. 15 – 17.
9. Сарычев А.П., Носков А.В. Применение электромагнитных подшипников в машиностроении и газовой промышленности. Труды 13-го Международного симпозиума «Потребители-производители компрессоров и компрессорного оборудования». – СПб., 2007. – С. 215 – 229.

10. Сарычев А.П., Руковицын И.Г. Особенности управления активными электромагнитными подшипниками газоперекачивающих агрегатов с гибкими роторами // Труды НПП ВНИИЭМ. – М., 2009. – т. 113. – С. 13 – 18.
11. Сарычев А. П., Руковицын И. Г. Математическая модель ротора для анализа управления магнитными подшипниками // Труды НПП ВНИИЭМ. – М.: 2008. – т. 107. – С. 11 – 15.
12. Сарычев А.П., Хабибуллин М.Г., Верещагин В.П., Спирин А.В. и др. Разработка и испытания нагнетателя с магнитными подшипниками для ГПА-16 «Волга» // Компрессорная техника и пневматика, № 5. – М., 2001. – С. 16 – 18.
13. Журавлев Ю. Н. Активные магнитные подшипники: Теория, расчет, применение. – СПб.: Политехника, 2003. – 206 с.
14. Беляева И.С. Параметрический синтез регуляторов осевого электромагнитного подшипника с учётом вихревых токов: автореферат на соискание учёной степени к.т.н.: 05.09.03 / И.С. Беляева. – Самара, 2016. – 22 с.
15. Вейнберг Д.М., Верещагин В.П., Данилов-Нитусов Н.Н. Системы магнитного подвеса в исполнительных органах управления ориентацией космических аппаратов // Изв. АН СССР. МТТ. – 1981, № 3. – С. 152 – 157.
16. Вейнберг Д.М., Верещагин В.П., Сарычев А.П., Сизов М.В. Фильтрация колебаний гибкого ротора в активных магнитных подшипниках // Турбины и компрессоры, № 5. – СПб, 1998. – С. 6 – 8.
17. Верещагин В. П., Клабуков В. А. Математическая модель магнитного подшипника // Труды НПП ВНИИЭМ. – М., 2009. – т. 112. – С. 17 – 22.
18. Верещагин В. П., Клабуков В. А. Математическая модель магнитного подшипника с учетом вихревых токов// Труды НПП ВНИИЭМ. – М., 2011. – Т. 123.
19. Верещагин В. П., Клабуков В. А. Учёт вихревых токов в осевом магнитном подшипнике // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – М.: ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2010. – Т. 119. – № 6. – С. 3 – 8.
20. Журавлев Ю.Н. Динамика механических систем с активными магнитными опорами // Машиноведение, № 5. – М., 1988. – С. 70 – 76.

21. Журавлев Ю.Н. Синтез линейной оптимальной системы управления магнитным подвесом жесткого ротора // *Машиноведение*, – № 4. – М., 1987. – С. 49 – 56.
22. Журавлев Ю.Н. Синтез системы управления активной магнитной опорой с позиций обратных задач динамики // *Изв. вузов. Приборостроение*. – 1987. – № 5. – С. 47 – 52.
23. Иванников Ю.Н. Постановка задачи численного моделирования газодинамических процессов охлаждения электромагнитных подшипников ГПА / Ю.Н. Иванников, Ю.А. Макаричев // *Вестник СамГТУ. Серия «Технические науки»* №4 (60) – 2018. – с. 102 – 112.
24. Иванников Ю.Н. Повышение энергетической эффективности активного электромагнитного подшипника: автореферат на соискание учёной степени к.т.н.: 05.09.01 / Ю.Н. Иванников. – Самара, 2019. – 20 с.
25. Иванников Ю.Н. Динамические потери радиального электромагнитного подшипника газоперекачивающего агрегата / Ю.Н. Иванников, В.Н. Овсянников, А.Р. Игамов [и др.] // *Ашировские чтения, СамГТУ* №1 (10) – 2018. – с. 377 – 380.
26. Кувыкин В.И. Влияние магнитного трения на динамику твердого тела в неконтактном подвесе: дис. ... докт. физ.-мат. наук / В.И. Кувыкин. – Нижний Новгород: Нижегородский филиал института машиноведения РАН, 2004. – 300 с.
27. Кузменков А.Н., Титов В.Г., Шахов А.В. Разработка и моделирование трехконтурной системы управления электромагнитным подшипником // *Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер. управление, вычисл. техн. информ.* – 2015. - № 4. – С. 14–23.
28. Кузменков А.Н. Расчёт контуров регулирования электромагнитного подшипника / А.Н. Кузменков, Г.М. Мирясов, В.Г. Титов [и др.] // *Интеллектуальная электротехника* №3 – 2018. – с. 114 – 122.
29. Макаричев Ю.А. Методы анализа и синтеза активных электромагнитных подшипников: дис. докт. техн. наук / Ю.А. Макаричев. – Самара: СамГТУ, 2013. – 350 с.

30. Макаричев Ю.А. Метод моделирования процессов, вызванных вихревыми токами, в нестационарных режимах осевых электромагнитных подшипников. Вестник СамГТУ. Серия «Технические науки» № 2 (38) – 2013. – Самара: СамГТУ, 2013. – С. 164 – 170.
31. Макаричев Ю.А. Метод расчета коэффициентов передачи системы электромагнитных подшипников турбонагнетателя дизельного двигателя локомотива // Вестник транспорта Поволжья. №1 (37) – 2013. Самара: СамГУПС, 2013. – С. 43 – 49.
32. Макаричев Ю.А., Стариков А.В. Расчет электромагнитных сил в радиальных магнитных подшипниках с распределенной зубцово-пазовой структурой статора // Доклады Всероссийского науч.-техн. Семинара «Проблемы транспортировки газа». – Тольятти: РИО РАО Газпром, 1999. – С. 78.
33. Макаричев Ю. А., Стариков А. В. Статические и динамические характеристики электромагнитного подвеса / Ежемесячный научно-технический журнал «Электротехника» № 8 – 2008. – М.: ЗАО «Знак», 2008. – С. 25 – 30.
34. Макаричев Ю.А., Стариков А.В. Статический изгибающий момент осевого электромагнитного подшипника при одностороннем смещении ротора в радиальной опоре // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки», № 4 (32) – 2011. – Самара: СамГТУ, 2011. – С. 134 – 140.
35. Макаричев Ю. А., Стариков А. В. Теоретические основы расчета и проектирования радиальных электромагнитных подшипников. – М.: Энергоатомиздат, 2009. – 150 с.
36. Макаричев Ю.А., Стариков А.В., Стариков С.А. Математическая модель электромагнитного подшипника как объекта управления с учетом непостоянства его параметров // Известия высших учебных заведений «Электромеханика», № 4 – 2012. – Новочеркасск: «Изв. вузов. Электромеханика», 2012. – С. 31 – 34.
37. Макаричев Ю.А., Стариков А.В., Овсянников В.Н. Влияние радиального смещения ротора электромагнитного подшипника на осевую опору // Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии: Сборник трудов IV

- Международной науч.-техн. конф. – Тольятти: Издательство ТГУ, 2012. – С. 69 – 74.
38. Макаричев Ю.А., Стариков А.В., Стариков С.А. Многомерная и многосвязная математическая модель процесса перемещения ротора в электромагнитном подвесе // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки», № 2 (34) – 2012. – Самара: СамГТУ, 2012. – С. 136 – 142.
39. Макаричев Ю.А., Стариков А.В., Стариков С.А. Особенности применения астатических регуляторов в системах управления электромагнитных подшипников // Актуальные проблемы энергетики АПК: Материалы III Международной научно-практической конференции. – Саратов: Издательство «Кубик», 2012. – С. 162 – 166.
40. Макаричев Ю.А., Стариков А.В., Ткаченко И.С. Анализ устойчивости системы подчиненного регулирования электромагнитного подвеса ротора // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки», № 1 (19)– 2007. – Самара: СамГТУ, 2007. – С. 135 – 140.
41. Макаричев Ю.А., Стариков А.В., Ткаченко И.С. Дискретная математическая модель цифровой системы управления электромагнитным подвесом ротора // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Физико-математические науки», № 2 (15) – 2007. – Самара: СамГТУ, 2007. – С. 186 – 188.
42. Макаричев Ю.А., Стариков А.В., Ткаченко И.С. Синтез системы подчиненного регулирования электромагнитным подвесом ротора // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Физико-математические науки», № 1 (14) – 2007. – Самара: СамГТУ, 2007. – С. 143 – 148.
43. Макаричев Ю.А., Стариков А.В., Ткаченко И.С. Сравнение эффективности конструкции радиального электромагнитного подшипника // Вестник Самарского государственного технического университета. Выпуск 41. Серия «Технические науки». – Самара: СамГТУ, 2001. – С. 158 – 161.

44. Макаричев Ю.А., Стариков А.В., Беляева И.С. Математическая модель осевого электромагнитного подшипника с учетом вихревых токов // Известия высших учебных заведений «Электромеханика», № 5 – 2014. – С. 52 – 56.
45. Никаноров В.В., Таганов Р.С., Сальников С.В., Москалев А.В., Витковский Д.В., Веремеев В.Е., Макаричев Ю.А., Стариков А.В. Цифровая система управления электромагнитными подшипниками центробежных компрессоров // Газовая промышленность, № 10, 2014. – С. 57 – 62.
46. Никитина Л.Г. Исследование электромагнитных опор для высокоскоростных шпиндельных узлов // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности. – 2011. – № 3. – С. 65 – 68.
47. Поляков Р.Н. Теоретические исследования активных комбинированных опор роторов: отчёт о прикладных научных исследованиях. – Орёл: ФГБОУ ВПО «Госуниверситет - УНПК», 2014. – 272 с.
48. Патент России № 2181903. Цифровой регулятор для системы управления электромагнитным подвесом ротора / А.В. Стариков, А.В. Стариков (Россия) // Оpubл. 27.04.2002, Бюл. № 12.
49. Патент России № 2181922. Система управления электромагнитным подвесом ротора / Ю.А. Макаричев, А.В. Стариков, А.В. Стариков (Россия) // Оpubл. 27.04.2002, Бюл. № 12.
50. Патент России № 2345464. Система управления электромагнитным подвесом ротора / Ю.А. Макаричев, А.В. Стариков (Россия) // Оpubл. 27.01.2009, Бюл. № 3.
51. Патент России № 2375736. Система управления электромагнитным подвесом ротора / Ю. А. Макаричев, А. В. Стариков, С. А. Стариков (Россия) // Оpubл. 10.12.2009, Бюл. № 34.
52. Патент России № 2395150. Система управления электромагнитным подвесом ротора / А.В. Стариков, С.А. Стариков (Россия) // Оpubл. 20.07.2010, Бюл. № 20.

53. Патент России № 2417390. Цифровой регулятор для системы управления электромагнитным подвесом ротора / А.В. Стариков, С.А. Стариков, А.В. Пудовкин (Россия) // Оpubл. 27.04.2011, Бюл. № 12.
54. Патент России № 2433443. Цифровой регулятор для системы управления электромагнитным подвесом ротора / А. В. Стариков, С. А. Стариков (Россия) // Оpubл. 10.11.2011, Бюл. № 31.
55. Патент России № 2460909. Система управления электромагнитным подвесом ротора / А.В. Стариков, С.А. Стариков (Россия) // Оpubл. 10.09.2012, Бюл. № 25.
56. Патент России № 2572386. Цифровой регулятор для системы управления электромагнитным подшипником / А.В. Стариков, И.С. Беляева, Д.Ю. Рокало (Россия) // Оpubл. 10.01.2016, Бюл. № 1.
57. Патент России № 2597513. Цифровой модулятор для силового преобразователя электромагнитного подшипника / А.В. Стариков, И.С. Беляева, Д.Ю. Рокало (Россия) // Оpubл. 10.09.2016, Бюл. № 25.
58. Стариков А.В. Методология синтеза многосвязной системы электромагнитных подшипников с повышенными жесткостными характеристиками энергетических объектов: дис. докт. техн. наук / А.В. Стариков. – Самара: СамГТУ, 2013. – 354 с.
59. Стариков А.В. Синтез финитного регулятора для системы управления электромагнитным подшипником // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки», № 3 (35) – 2012. – Самара: СамГТУ, 2012. – С. 240 – 243.
60. Стариков А.В., Стариков С.А. Параметрический синтез регуляторов многоконтурной системы управления электромагнитным подвесом ротора // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки», № 1 (29) – 2011. – Самара: СамГТУ, 2011. – С. 192 – 200.

61. Стариков С.А. Влияние квантования по времени на свойства цифровой системы управления электромагнитным подвесом ротора // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки», № 1 (33) – 2012. – Самара: СамГТУ, 2012. – С. 162 – 169.
62. Стариков С.А. Структурно-параметрический синтез системы управления электромагнитными подшипниками энергетических машин: дис. ... канд. техн. наук / С.А. Стариков. – Самара: СамГТУ, 2013. – 182 с.
63. Стариков А.В., Кузнецов П.К., Беляева И.С. Дискретная математическая модель электромагнитного подшипника // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016, № 2. – СПб: СПбГЭТУ, 2016. – С. 59 – 63.
64. Braunbek W. Frieschwebende Korper im elektrischen und magnetischen Feld / Z. Physik., vol. 112, 1939. – pp. 753-763.
65. Brenkacz L. Research and applications of active bearings: A state-of-the-art review / L. Brenkacz, L. Witanowski, M. Drosinska-Komor [et all] // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2020. – pp. 1-39. DOI:10.1016/j.ymssp.2020.107423.
66. Carrere F., Font S., Duc G. H_∞ control design of flexible rotor magnetic bearing system // Proceedings of the Fourth International Symposium on Magnetic Bearings. – Zurich, 1994. – P. 65 – 70.
67. Chen, H.M., Walton, J., Heshmat, H. Test of zero clearance auxiliary bearing // Proceedings of MAG'97 Industrial Conference and Exhibition on Magnetic Bearings. – Alexandria, 1997. P.111 – 119.
68. Chrisinger J.E. Magnetic suspension and balance system for wind tunnel application / J.E. Chrisinger // Journ. Of Roy. Aeronaut. Soc. – 67, 1963. – pp. 717-724.
69. Ecker, H. Steady-state orbits of an AMB-supported rigid rotor contacting the backup bearings // Proceedings of MAG'97 Industrial Conference and Exhibition on Magnetic Bearings, Alexandria, 1997. – P. 129 – 138.
70. Feeny, B.F. Stability of cylindrical and conical motions of a rigid rotor in retainer bearings // Proceedings of the Fourth International Symposium on Magnetic Bearings. – Zurich, 1994. – P. 219 – 224.

71. Fleming D.P. Magnetic Bearings – State of the Art / D.P. Fleming // Lewis Research Center Cleveland – Ohio, 1991. – 30 p. NASA-TM-104465 19910016099.
72. Foiles, W.C., Allaire, P.E. Nonlinear transient modelling of active magnetic bearing rotors during rotor drop on auxiliary bearings // Proceedings of MAG'97 Industrial Conference and Exhibition on Magnetic Bearings. – Alexandria, 1997. – P. 239 – 244.
73. Gelin, A., Pugnet, J.M., and Der Hagopian, J. 1990. Dynamic behaviour of flexible rotors with active magnetic bearings on safety auxiliary bearings // Proceedings of Third International Conference on Rotordynamics. – Lyon, 1990. – P. 503 – 508.
74. Hamood N.Q., Ahmad A.H. Simulation of Active Magnetic Bearing Response based NNC // Eng. & Tech. Journal, Vol.27, No.6, 2009. – P. 1047 – 1063.
75. Husain A.R., Ahmad M.N. Deterministic Models of an Active Magnetic Bearing System // Journal of Computers, Vol. 2, No. 8, 2007. – P. 9 – 17.
76. Inayat- Husain J. I. Nonlinear dynamics of a statically misaligned flexible rotor in active magnetic bearings // Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, Vol. 15, Issue 3, March 2010. – P. 764 – 777.
77. Ji, J.C., and Leung, A.Y.T. Non-linear behavior of a magnetically supported rotor // Proceedings of the Seventh International Symposium on Magnetic Bearings. – Zurich, 2000. – P. 23 – 28.
78. Laier, D., and Markert, R. Simulation of nonlinear effects on magnetically suspended rotors // Proceedings of the First Conference on Engineering Computation and Computer Simulation ECCS-1, vol.I. – Changsha, 1995. P. 473 – 482.
79. Loesch, F. Two remarks on the modeling of active magnetic bearing system // Proceedings of the Sixth International Symposium on Magnetic Suspension Technology. – Turin, 2001. – P. 422 – 427.
80. Nonami K., Ito T. μ -synthesis of flexible rotor active magnetic bearing system // Proc. of 4-th Int. Symp. On Magnetic Bearings. – Zurich, 1994. – P. 135 – 142.
81. Schweitzer G., Ulbrich Y. Magnetic bearings – novel type of suspension // Vibr. Rotating Mach. 2-nd Int. Conf. – London: Cambridge, 1980. – P. 151 – 156.

82. Schweitzer G., Bleuler H., Traxler A. Active magnetic bearings, basics, properties and applications of active magnetic bearings. – Zurich, 1994. – 244 p.
83. Siva Srinivas R. Application of active magnetic bearings in flexible rotordynamic systems – A state-of-the-art review / R. Siva Srinivas, R. Tiwari, Ch. Kannababu // Mechanical Systems and Signal Processing 106, 2018. – pp. 537-572. DOI:10.1016/j.ymssp.2018.01.010.
84. Steinschaden, N., and Springer, H. (1999b). Nonlinear stability analysis of active magnetic bearings // Proceedings of the Fifth International Symposium on Magnetic Suspension Technology, Santa Barbara, 1999. – P.411 – 427.
85. Tammi K. Active control of radial rotor vibrations: Identification, feedback, feedforward, and repetitive control methods // Dissertation for the degree of Doctor of Science in Technology. – Helsinki University of Technology, 2007. – 165 p.
86. Vischer, D., and Bleuler, H. A new approach to sensorless and voltage controlled AMBs based on network theory concepts // Proceedings of the Second International Symposium on Magnetic Bearings. – Tokyo, 1990. – P. 301 – 306.
87. Willams R. D., Wayner P. M., Ebert J. A. Reliable, high-speed digital control for magnetic bearings // Proceedings of the Fourth International Symposium on Magnetic Bearings. – Zurich, 1994. – P. 1 – 6.
88. Zhang W. Radial magnetic bearings: An overview / W. Zhang, H. Zhu // Results in Physics 7, 2017. – pp. 3756 – 3766. DOI:10.1016/j.rinp.2017.08.043.
89. Микропроцессорные системы автоматического управления / В. А. Бесекерский, Н. Б. Ефимов, С. И. Зиатдинов и др.; Под общ. Ред. В. А. Бесекерского. – Л.: Машиностроение, 1988. – 365 С.
90. Стариков А.В. Определение рациональной величины смещения центра магнитной системы электромагнитного подшипника / А.В. Стариков, В.Д. Костюков // Вестник Самарского государственного технического университета, серия «Технические науки» Т.31, №3 – 2023. – Самара: СамГТУ, 2023. – С. 115 – 124.
91. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1984. – 835 с.

92. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике. – М.: Наука, 1965. – 608 с.
93. Стариков А.В. Анализ работы радиальных электромагнитных подшипников нагнетателя газоперекачивающего агрегата при смещении центра магнитной системы / А.В. Стариков, В.Д. Костюков, М.Д. Мочалов // Ашировские чтения: сб. трудов Всероссийской Науч.-практ. конференции том 2 – 2023. – Самара: СамГТУ, 2023. – С. 213 – 221.
94. Стариков А.В. Анализ работы электромагнитных подшипников при смещении центра магнитной системы относительно оси вращения и вариации напряжения питания / А.В. Стариков, В.Д. Костюков // Вестник Самарского государственного технического университета, серия «Технические науки» Т.31, №1 – 2023. – Самара: СамГТУ, 2023. – С. 103 – 113.
95. Стариков А.В. Анализ устойчивости системы управления электромагнитным подшипником с учётом вариации его параметров / А.В. Стариков, Д.Ю. Рокало, В.Д. Костюков // Научно-технический журнал «Вопросы электротехнологии» №2 (39) – 2023. – Саратов: Саратовский гос. тех. Ун-т. им. Гагарина Ю.А., 2023. – С. 66 – 73.
96. Воронов А.А., Воронова А.А., Бабаков Н.А. и др. Теория автоматического управления: Учеб. для вузов по спец. «Автоматика и телемеханика». В 2-х ч. Ч 1. Теория линейных систем автоматического управления. – М.: Высш. шк., 1986. – 367 с.
97. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. – М.: Наука, 1975. – 768 с.
98. Стариков А.В. Анализ работоспособности электромагнитного подшипника при снижении напряжения питания и рациональном смещении центра магнитной системы / А.В. Стариков, В.Д. Костюков // Фёдоровские чтения – 2023: ЛП Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием (с элементами научной школы для молодёжи) «Фёдоровские чтения 2023». – Москва: МЭИ, 2023. – С. 202 – 208.

99. Костюков В.Д. Оценка работоспособности радиальных электромагнитных подшипников нагнетателя газоперекачивающего агрегата при смещении центра магнитной системы и снижении напряжения питания / В.Д. Костюков // Сборник материалов Международной научно-практической конференции молодых учёных «Энергия молодёжи для нефтегазовой индустрии» – 2023. – Альметьевск: Альметьевский гос. нефтяной институт (АГНИ), 2023. – 6 с.
100. Костюков В.Д. Линеаризованная математическая модель электромагнитного подшипника при независимом управлении напряжениями противоположных магнитов / В.Д. Костюков, А.В. Стариков, В.Н. Козловский, О.В. Пантюхин // Известия Тульского государственного университета, серия «Технические науки» выпуск 9 – 2023. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2023. – с. 388 – 392.
101. Костюков В.Д. Определение ограничений на быстродействие и жесткость радиальных электромагнитных подшипников нагнетателя газоперекачивающего агрегата / В.Д. Костюков, А.В. Стариков // Научно-технический журнал «Вопросы электротехнологии» №2 (39) – 2023. – Саратов: Саратовский гос. тех. Ун-т. им. Гагарина Ю.А., 2023. – С. 96 – 102.
102. Стариков А.В., Беляева О.С., Козловский В.Н. Анализ влияния ЭДС самоиндукции на работу полупроводниковых силовых преобразователей / Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Выпуск 8, 2023. – С. 559 – 567.
103. Патент на изобретение № 2831082 Система управления электромагнитным подвесом ротора / А.В. Стариков, Ю.А. Макаричев, В.Д. Костюков // опублик.: 02.12.2024, Бюл. №34.
104. Костюков В.Д. Разработка системы управления магнитным подвесом ротора нагнетателя газоперекачивающего агрегата с независимым регулированием токов электромагнитов / В.Д. Костюков, Ю.А. Макаричев, А.В. Стариков // Ашировские чтения: сб. трудов Всероссийской Науч.-практ. конференции – Самара: СамГТУ, 2024. – С. 320 – 329.

105. Костюков В.Д. Выбор параметров регуляторов электромагнитного подшипника при смещении центра магнитной системы относительно оси вращения ротора / В.Д. Костюков, Г.А. Крылов, А.В. Стариков, Ю.А. Макаричев // Научно-технический журнал Вопросы электротехнологии, № 4 (45) – 2024. – Саратов: Саратовский гос. тех. Ун-т. им. Гагарина Ю.А., 2024. – С. 62 – 70.
106. Стариков А.В., Лисин С.Л. Структурно-параметрический синтез систем управления неустойчивыми объектами // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки», № 4 (40) – 2013. – Самара: СамГТУ, 2013. – С. 53 – 58.
107. Патент России № 2845412. Система управления электромагнитным подвесом ротора / А.В. Стариков, В.Д. Костюков, Г.А. Крылов (Россия) // Оpubл. 18.08.2025, Бюл. № 23.
108. Костюков В.Д. Дискретная математическая модель цифровой системы управления электромагнитным подшипником с отдельным регулированием напряжений противоположных магнитов двигателем / В.Д. Костюков, Г.А. Крылов, А.В. Стариков // Вопросы электротехнологии, № 4 (49), 2025. – С. 71 – 78.
109. Костюков В.Д. Дискретная математическая модель электромагнитного подшипника при независимом управлении напряжениями противоположных магнитов / В.Д. Костюков, Г.А. Крылов, А.В. Стариков, В.Н. Козловский / Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Выпуск 92, 2025. – С. 186 – 195.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

Акт об использовании результатов кандидатской диссертационной работы
Костюкова В.Д. в ООО НПО «Шторм»

Приложение Б

Акт о внедрении результатов диссертационной работы Костюкова В.Д. «Повышение энергоэффективности и жесткости электромагнитных подшипников за счет применения несимметричных режимов управления» в СамГТУ



443086, Россия, г. Самара,
 Московское шоссе 34А, корп.3Б, офис 22
 Тел./факс: (846) 973-60-34
www.storm-samara.ru
 e-mail: mailbox@storm-samara.ru

Общество с ограниченной ответственностью
 Научно-производственное объединение

«Шторм»

ИНН 6315641584 / КПП 631601001

Исх. № 098 «Ш» от 18.05.2026г.

УТВЕРЖДАЮ
 Генеральный директор
 ООО НПО «Шторм»
 С.Л. Буряшкин
 « 20 » 2026г.

АКТ

об использовании результатов
 кандидатской диссертационной работы
 Костюкова Владислава Дмитриевича

Комиссия в составе: председатель – генеральный конструктор ГК «Шторм»-генеральный директор ООО НПО «Шторм» Буряшкин С.Л., члены комиссии главный конструктор по СЭЗ Ротонос Д.С., главный конструктор по агрегатам ГПА, Сосновский М.В., главный специалист по САУ и ПЧ Кабаков В.А., составили настоящий Акт о том, что результаты диссертационной работы Костюкова В.Д., представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, использовались в проектно-конструкторской деятельности ООО НПО «Шторм» при разработке перспективных starter-генераторов с электромагнитным подвесом ротора для газотурбинных установок.

На основании теоретических положений диссертационной работы В.Д. Костюкова были проведены опытно-конструкторские работы по внедрению системы электромагнитных подшипников starter-генераторов серии «Шторм ЭСТ-500» (изделие 705) и «Шторм ЭСТ-550» (изделие 709) наземных газотурбинных двигателей «Ладога-32» и ГТУ АТС-10СТМ.

Использование указанных результатов работы позволило за счет увеличения динамической жесткости подвеса повысить ресурс подшипникового узла, снизить вибрации и исключить резонансные явления.

Оборудование starter-генераторов ЭМП позволило отказаться от масляной системы смазки и охлаждения подшипников, кардинально повысить ресурс изделия в целом, а ПАО «Газпром», как конечному потребителю, получить энергонезависимый газоперекачивающий агрегат.

При разработке электромагнитных подшипников ООО НПО «Шторм» использовались математические модели, методика параметрического синтеза и рекомендации по выбору конструктивных схем, изложенные в диссертации.

Особую ценность представляет то, что впервые в России благодаря работам Костюкова В.Д. реализован полностью российский ЭМП в классе роторов от 50 до 150 кг., что открывает громадные возможности по разработке и внедрению энергетических высокоскоростных электрических машин.

Члены комиссии:

Главный конструктор по СЭЗ

Д.С.Ротонос

Главный конструктор по агрегатам ГПА

М.В.Сосновский

Главный специалист по САУ и ПЧ

В.А.Кабаков



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

« 09 » 06 2026 г.

№ 5/Н

УТВЕРЖДАЮ



Первый проректор -

проректор по учебной работе

д.э.н., профессор

Д.Е. Овчинников

« 09 » 06 2026 г.

Акт

Использования результатов диссертационной работы Костюкова Владислава Дмитриевича
в учебном процессе.

Мы, нижеподписавшиеся, заместитель декана электротехнического факультета Л.Г. Мигунова, заведующий кафедрой ЭПП Ю.В. Зубков составили настоящий акт о том, что:

методика расчета и математическая модель системы электромагнитных подшипников, разработанная В.Д Костюковым в его диссертационной работе, используется в учебном процессе электротехнического факультета ФГБОУ ВО «СамГТУ» в курсах «Электропривод и промышленная автоматика» и «Теория автоматического управления», а также в курсовом и дипломном проектировании студентов направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника».

Названные программы и математические модели, способствуют более полному усвоению передовых технологий в области электротехнических комплексов и систем студентами и магистрантами старших курсов электротехнического факультета.

Зам. декана ЭТФ
К.т.н., доцент
Заведующий кафедрой ЭПП
Д.т.н., профессор

Л.Г. Мигунова

Ю.В. Зубков