ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

На правах рукописи

Горюнов Роман Владимирович

Обеспечение требуемой кинематической точности механических передач многодвигательных электроприводов при длительном воздействии атмосферной коррозии

Специальность
05.02.02 «Машиноведение, системы приводов и детали машин»

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
Доктор технических наук, профессор
Самсонович Семён Львович

Москва 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 5
В.1 Введение 5
В.2 Проблемы воздействия коррозии на опорно-поворотное устройство 6
В.3 Особенности приводных систем исследуемого ОПУ 9
В.4 Постановка задачи исследования 13
Глава 1 Влияние на кинематическую точность механических передач электроприводов атмосферной коррозии 18
1.1 Определение коэффициента коррозионной потери металла при продолжительном воздействии атмосферы 18
1.2 Учёт атмосферной коррозии при расчёте кинематической точности механических передач 21
1.3 Расчёт и моделирование кинематической точности механических передач с учётом воздействия коррозионной среды 27
1.4 Анализ результатов расчёта кинематической точности механических передач ОПУ 32
Выводы по главе 1 35
Глава 2 Результаты экспериментальных исследований 36
2.1 Цель экспериментальных исследований 36
2.2 Обзор методов измерения кинематической точности механических передач 36
2.3 Описание проведения и результаты измерений 37
Выводы по главе 2 43
Глава 3 Пути восстановления кинематической точности приводов ОПУ 44
3.1 Анализ распределения кинематической ошибки по ступеням редуктора 44
3.2 Восстановление геометрии повреждённых деталей путём наращивания слоя материала 46
3.3 Технико-экономическая оценка восстановления наращиванием слоя

материала..... 49
3.4 Пути повышения точности электропривода 51
3.5 Способы компенсации зазора в механических передачах с несколькими взаимосвязанными электродвигателями..... 53
3.6 Устройство компенсации зазора на основе введения сигнала смещения 55
3.7 Разработка электронного устройства компенсации зазора с перекрёстными связями..... 59
3.8 Анализ путей восстановления кинематической точности ОПУ 61
Выводы по главе 3..... 62
Глава 4 Устройство компенсации зазора с перекрёстными связями..... 63
4.1 Принцип работы устройства компенсации зазора с перекрёстными связями 63
4.2 Построение математической модели электропривода в программной среде Simulink..... 68
4.3 Анализ параметров работы электропривода с устройством компенсации зазора с перекрёстными связями 73
4.4 Зависимость параметров устройства компенсации зазора с перекрёстными связями от величины люфта..... 78
4.5 Результаты работы устройства компенсации зазора с перекрёстными связями и дальнейшие пути исследования..... 82
Выводы по главе 4..... 83
Глава 5 Моделирование работы электропривода с различными устройствами компенсации зазора..... 84
5.1 Моделирование работы электропривода с люфтом без специализированных устройств компенсации зазора..... 84
5.2 Моделирование работы идеализированного электропривода без люфта 88
5.3 Моделирование работы электропривода с устройством компенсации зазора на основе введения сигнала смещения..... 91
5.4 Моделирование работы электропривода с устройством компенсации

зазора с перекрёстными связями 96
5.5 Результаты сравнения работы электропривода с различными устройствами компенсации зазора 100
Выводы по главе 5 102
Глава 6 Исследование работы устройств компенсации зазора в электроприводе, содержащем несколько исполнительных механизмов 103
6.1 Предпосылки исследования работы устройств компенсации зазора в многодвигательном электроприводе 103
6.2 Особенности работы устройств компенсации зазора в электромеханическом приводе, состоящем из трёх исполнительных механизмов 104
6.3 Особенности работы устройств компенсации зазора в электромеханическом приводе, состоящем из четырёх исполнительных механизмов 115
6.4 Исследование особенностей работы четырёхканального электропривода при не идентичности величин зазора механических передач 122
6.5 Исследование особенностей работы четырёхканального электропривода при не идентичности значений сопротивления якорной цепи 129
6.6 Разработка рекомендаций по восстановлению параметров точности крупногабаритного ОПУ после продолжительного атмосферного воздействия 136
6.7 Методика расчёта параметров устройства компенсации зазора с перекрёстными связями 138
Выводы по главе 6 140
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 142
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 144

ВВЕДЕНИЕ

В.1 Введение

Одной из важных проблем обеспечения требований кинематической точности, а также других эксплуатационных характеристик механических передач приводных систем различных объектов машиностроения, является потеря материала, вызываемая эксплуатационным износом и воздействием атмосферной коррозии. Стремление сохранить работоспособность объектов машиностроения с требуемыми эксплуатационными характеристиками обуславливает поиск мер по компенсации потери металла.

На сегодняшний день, деятельность человека в отношении коррозионной проблемы определяется тремя основными аспектами:

1) применение конструктивных решений, направленных на исключение взаимодействия объекта машиностроения с атмосферной средой;
2) использование коррозионно-устойчивых материалов в конструкциях, в том числе неметаллов;
3) экологическими – связанными с сохранностью окружающей среды в части переработки и утилизации металлов, подвергшихся коррозии.

В настоящее время остаются актуальными исследования по обеспечению работоспособности объектов машиностроения при длительном воздействии атмосферы, обусловленные экономическими факторами, поскольку затраты на возмещение коррозионных потерь в военной технике, сельскохозяйственной технике, коммунальном хозяйстве исчисляются миллиардами рублей в год.

Тема исследования связана с опорно-поворотным устройством (ОПУ), построенным, но не введённым в эксплуатацию, и подвергшимся долговременному воздействию атмосферной коррозии. Отправной точкой исследования явилась задача по оценке возможности обеспечения длительной работоспособности построенного ОПУ во вновь создаваемой радиолокационной станции (РЛС). Полученные научные и практические результаты по компенсации действия

коррозии могут быть использованы не только в исследуемом ОПУ, но и в других многодвигательных приводных системах существующих объектов, а также в новых объектах с длительным сроком службы.

Объектом исследования является составная часть радиолокационной станции – крупногабаритное ОПУ, построенное в 1987 году. Из-за сокращения финансирования объект не был введён в эксплуатацию и фактически оказался брошенным. Спустя 25 лет возник вопрос о возможности использования существующего задела при строительстве новой радиолокационной станции.

Известно: 1) построенное оборудование никогда не функционировало, техническое обслуживание, регламентные работы не проводились, поэтому начальное техническое состояние ОПУ неизвестно; 2) ОПУ подверглось разрушительному действию атмосферы, что привело к обширной коррозии элементов системы; 3) исследуемое ОПУ планируется использовать в составе системы наведения, и к нему предъявляются повышенные требования по кинематической точности.

Учитывая, что основная часть средств на постройку ОПУ, несущей металлоконструкции, а также обеспечивающей технологической инфраструктуры и коммуникаций уже затрачена, использование существующего задела позволит значительно снизить стоимость строительства новой радиолокационной станции, поэтому работа имеет важное практическое значение.

В.2 Проблемы воздействия коррозии на опорно-поворотное устройство

Длительное нахождение ОПУ в условиях открытой атмосферы, без надлежащего технического обслуживания и ремонта привело к обширной коррозии элементов системы. Задействование конструкций существующего ОПУ подразумевает определение вида технического состояния и проведения технической диагностики.

Приспособленность изделия к технической диагностике согласно [1] закладывается на этапе проектирования. Определяется периодичность и параметры

контроля изделия, основанные на расчётах и предполагаемой интенсивности эксплуатации. Параметры диагностирования, порядок проведения регламентных работ, а также методики проведения указаны в эксплуатационных документах изделия, но эти данные относятся к штатным и непрерывным условиям эксплуатации. В случаях продолжительного нахождения в условиях атмосферы и воздействия коррозии, эксплуатационные документы не содержат необходимых рекомендаций и не обеспечивают требуемый объём диагностической информации. Поэтому требуется разработка программы технического диагностирования ОПУ после продолжительного нахождения в условиях атмосферы и воздействия коррозии.

Известны работы авторов В. В. Клюева, Ф. Р. Соснина, И. А. Биргера, Г. Ф. Верзакова, П. П. Пархоменко, В. Е. Абрамчука, П. И. Кузнецова, Л. А. Пчелинцева, В. С. Гайденко, В. В. Карибского, Е. С. Согомоняна посвящённые технической диагностике, анализу причин возникновения неисправностей [2-8]. В известных работах рассматриваются следующие способы технического диагностирования объектов машиностроения:

1) диагностирование изделия на месте установки;

2) диагностирование изделия на стендах завода-изготовителя;

3) диагностирование демонтированных блоков и агрегатов.

Однако в этих известных работах авторы рассматривают либо диагностирование серийно выпускаемых изделий, изготовленных крупными партиями, либо изделий, имеющих малые и средние габариты. Публикации, посвящённые вопросам диагностирования крупногабаритных несерийных единичных изделий, не найдены.

Отсутствие готовых решений в вопросе диагностирования крупногабаритных несерийных изделий после воздействия коррозии потребовало проведения специального исследования и создания алгоритма технического диагностирования. Результаты исследования по созданию алгоритма технического диагностирования крупногабаритного несерийного ОПУ на основе технико-экономической оценки возможных путей реализации приведены в работе [9].

Техническое задание на создаваемую РЛС предъявляет к конструкции ОПУ требование по кинематической точности наведения: кинематическая точность отработки заданных углов не более 12 угловых минут. Наряду с вопросами исправности и работоспособности, возникает вопрос обеспечения кинематической точности ОПУ после воздействия коррозии. На вопросы исправности и работоспособности ОПУ после воздействия коррозии ответит техническая диагностика. Вопрос обеспечения точности работы ОПУ после воздействия коррозии во многом связан с кинематической точностью механических передач его приводов, сильно интегрированных в структуру устройства, замена которых не представляется возможной.

Проблемам коррозии посвящено большое количество работ. Авторы А. А. Герасименко, Г. Г. Улиг, Р. У. Реви, М. И. Емелин, И. В. Семёнова, Г. М. Флоранович, А. В. Хорошилов, А. И. Малахов, А. П. Жуков рассматривают коррозию, механизмы коррозии, пути защиты металла от коррозии [10-14]. Другая группа работ авторов Ю. Н. Михайловского, Г. К. Берукштис, Г. Б. Кларка, И. Л. Розенфельда посвящена прогнозированию действия коррозии, скорости воздействия коррозии и величине коррозионной потери металла [15-17]. Существует стандарт ускоренного определения скорости коррозии [19]. Однако работ по исследованию воздействия коррозии на кинематическую точность механических передач в технической литературе не обнаружено. Определение закономерности и прогнозирование изменения кинематической точности механических передач под воздействием коррозии, в зависимости от времени воздействия факторов атмосферы, имеет научное и практическое значение.

Работы, посвящённые исследованию влияния коррозии на точность механических передач электроприводов, проблеме обеспечения длительной работоспособности, а также разработке устройства, обеспечивающего требуемую кинематическую точность механических передач электропривода ОПУ при длительном воздействии атмосферной коррозии, являются актуальными.

В.3 Особенности приводных систем исследуемого ОПУ

Исследуемое опорно-поворотное устройство выполнено с двумя степенями подвижности, и состоит из азимутального поворотного устройства и угломестного поворотного устройства (рисунок В.1).

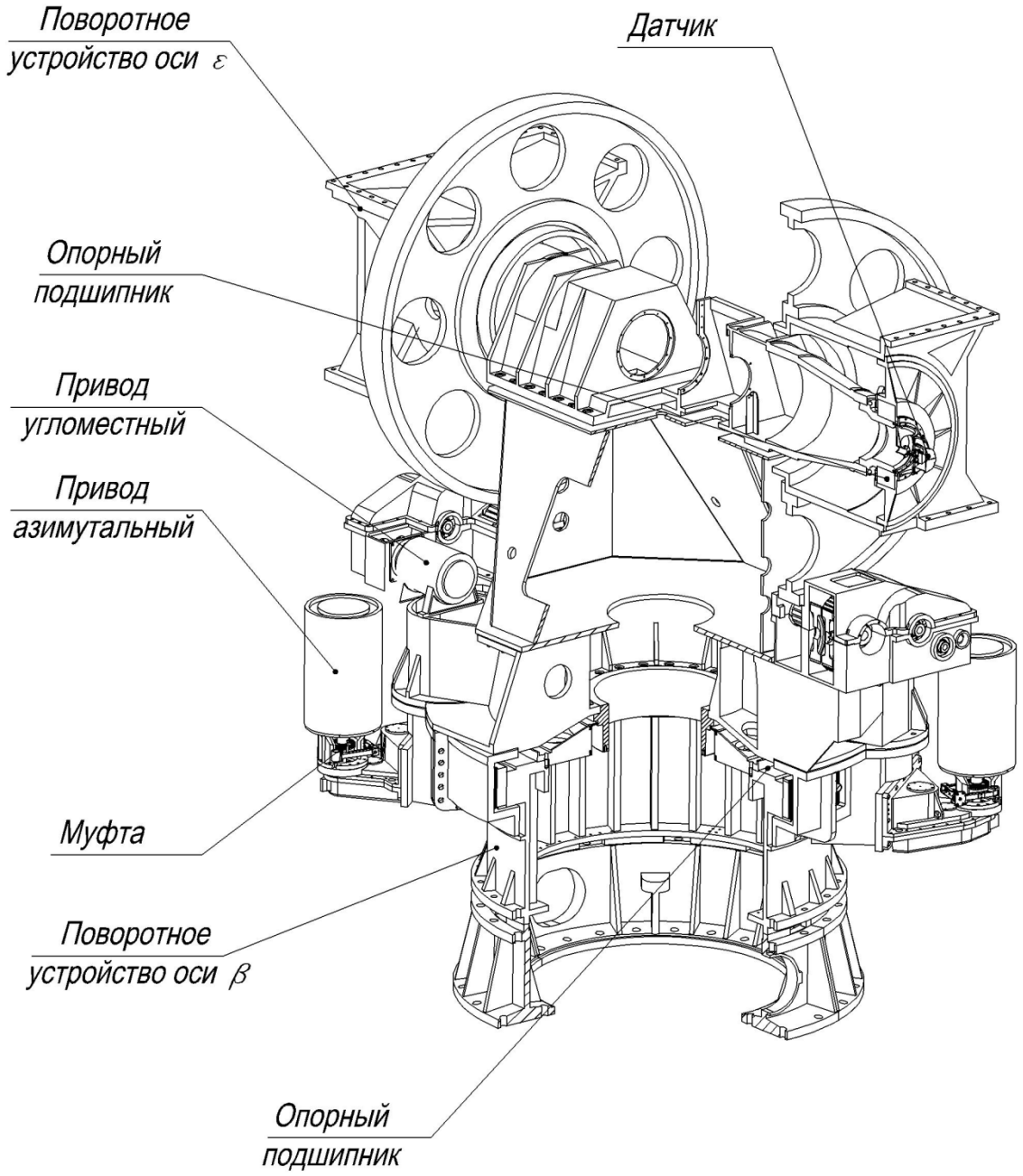

Рисунок В.1 – Общий вид опорно-поворотного устройства

Привод устройства по азимуту, кинематическая схема которого представлена на рисунке В.2, состоит из четырёх идентичных ветвей, каждая из которых

включает в себя последовательно соединённые электродвигатель с усилителем (5-8), и редуктор (1-4), соединённый с общим выходным колесом (9), жёстко соединённым с объектом управления (10). Азимутальный редуктор представляет собой четырёхступенчатую цилиндрическую передачу, параметры которой представлены в таблице В.1.

Кинематическая схема угломестного привода, представленная на рисунке В.3, аналогична азимутальному приводу, и также состоит из четырёх идентичных ветвей, включающих в себя электродвигатель с усилителем (5-8), и редуктор (1-4), отличается тем, что вместо общего выходного колеса используется общий вал (9) с объектом управления (10), и двумя жёстко закреплёнными зубчатыми секторами (11, 12). Параметры угломестного редуктора представлены в таблице В.2.

Таблица В.1 – Параметры азимутального редуктора

№ ступени передачи	Число зубьев шестерни	Число зубьев колеса	Модуль	Передаточное число ступени	Степень точности по ГОСТ 1643-81
1	$z_1 = 19$	$z_2 = 66$	m=6	$q_1 = 3{,}473$	7 - C
2	$z_3 = 27$	$z_4 = 40$	m=8	$q_2 = 1{,}4848$	7 - D
3	$z_5 = 15$	$z_6 = 75$	m=10	$q_3 = 5$	7
4	$z_7 = 16$	$z_8 = 249$	m=14	$q_4 = 15{,}5625$	7
$q_{\text{привода}} = 400{,}43$					

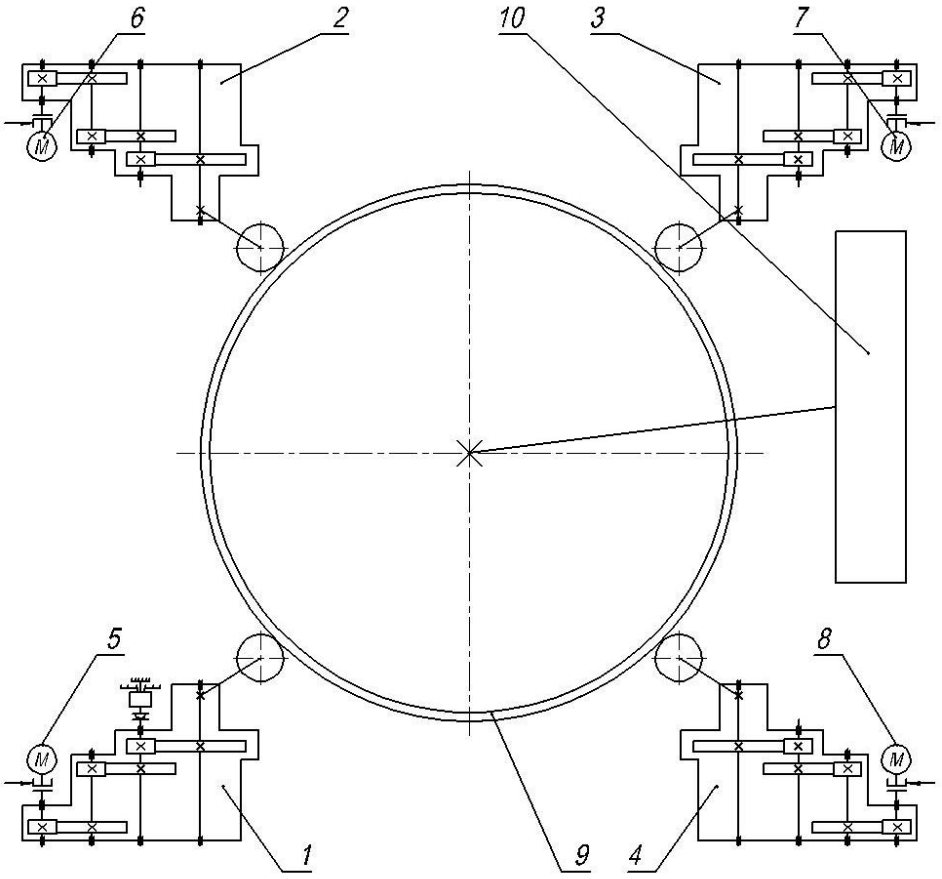

Рисунок В.2 – Кинематическая схема азимутального привода

Таблица В.2 – Параметры угломестного редуктора

№ ступени передачи	Число зубьев шестерни	Число зубьев колеса	Модуль	Передаточное число ступени	Степень точности по ГОСТ 1643-81
1	$z_1 = 16$	$z_2 = 48$	m=6	$q_1 = 3$	7 - C
2	$z_3 = 16$	$z_4 = 64$	m=8	$q_2 = 4$	7 - D
3	$z_5 = 15$	$z_6 = 60$	m=12	$q_3 = 4$	7
4	$z_7 = 16$	$z_8 = 250$	m=14	$q_4 = 15{,}625$	7
$q_{\text{привода}} = 750$					

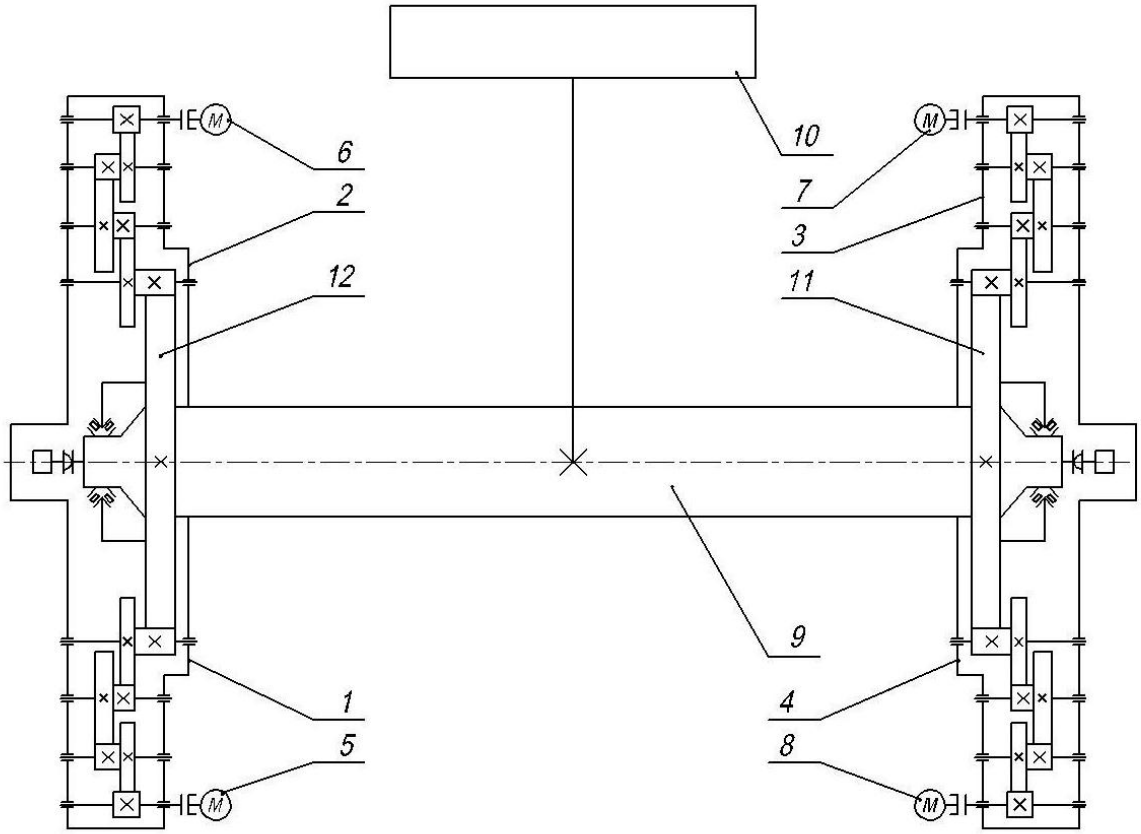

Рисунок В.3 – Кинематическая схема угломестного привода

К механическим передачам приводных систем предъявляются противоречивые требования: с одной стороны, для обеспечения точности работы зазоров (люфтов) быть не должно, с другой – зазоры необходимы для обеспечения работоспособности в широком температурном диапазоне.

Коррозионное воздействие приводит к потере слоя металла и дополнительному увеличению зазоров. Зазоры в механических передачах редукторов (люфты) приводят к снижению точности работы приводных систем. В настоящее время известны методы расчёта кинематической точности механических передач, однако методы определения точности, учитывающие воздействие коррозии отсутствуют. Определение зависимости изменения кинематической точности механических передач в зависимости от времени воздействия атмосферных факторов, а также способы возможной компенсации данного изменения точности имеют научно-практическое значение.

В.4 Постановка задачи исследования

Актуальность исследования связана с разработанной математической зависимостью, которая позволяет прогнозировать изменения кинематической точности зубчатых механических передач во времени, в условиях воздействия атмосферных факторов, а также с разработкой способа компенсации люфта по принципу электромеханической пружины в многодвигательном электроприводе с зазором, позволяющего обеспечить длительную работоспособность приводов опорно-поворотного устройства при воздействии атмосферной коррозии.

Цели и задачи. Основной целью данной работы является разработка и реализация в многодвигательном электроприводе способа компенсации возникающих зазоров (выборки люфтов) в механических передачах, вызванных естественными производственными и эксплуатационными факторами, в том числе воздействием атмосферной коррозии, который позволит обеспечить длительную работоспособность конкретного ОПУ с требуемой кинематической точностью.

Для достижения поставленной цели требуется решение следующих задач:

1) провести анализ временной зависимости воздействия коррозии на потерю металла в механических передачах исполнительных механизмов электропривода;
2) определить возможные пути восстановления кинематической точности исполнительных механизмов приводов опорно-поворотного устройства, подвергшихся атмосферной коррозии;
3) провести анализ существующих способов компенсации зазора в электроприводе, содержащем несколько исполнительных электродвигателей, предложить способ компенсации зазора и разработать устройство его реализации;
4) разработать методику расчёта параметров устройства компенсации зазора в зависимости от количества электродвигателей.

Научная новизна работы:

1) Получена математическая зависимость, позволяющая рассчитывать кинематическую точность зубчатых механических передач, с учётом воздействия

факторов атмосферной коррозии, в зависимости от времени.

2) Предложен способ компенсации зазоров (выборки люфтов) механических передач многодвигательных электроприводов, отличающийся от известных, введением временной задержки в сигнал динамической ошибки.

3) Разработана методика расчёта параметров устройства компенсации зазора с перекрёстными связями в приводных системах, содержащих два и более исполнительных механизмов.

Теоретическая и практическая значимость:

1) Полученная математическая зависимость кинематической точности зубчатых механических передач от времени воздействия атмосферных факторов позволяет рассчитать интервалы проведения регламентных работ.

2) Предложенный способ и логическое устройство компенсации зазоров позволяют обеспечить точность работы электроприводов опорно-поворотного устройства после продолжительного воздействия атмосферной коррозии, и поддерживать характеристики при последующей эксплуатации. Способ компенсации зазоров может быть использован в любом многодвигательном электроприводе с люфтами в механических передачах.

3) Разработанная методика позволяет рассчитать параметры логического устройства компенсации зазоров в зависимости от параметров электродвигателей и механических передач, сократить время ввода электропривода в эксплуатацию.

Достоверность полученной математической зависимости кинематической точности зубчатых механических передач от времени воздействия атмосферной коррозии подтверждены результатами моделирования и натурным экспериментом. Полученное после 30 лет воздействия коррозии экспериментальное значение кинематической точности 0,99 угл. мин. находится в интервале расчётных значений от 0,69 угл. мин. до 3,24 угл. мин. Работоспособность способа компенсации зазора подтверждается результатами моделирования. Произведено сравнение эталонной безлюфтовой модели электропривода с моделью, имеющей люфты в механических передачах и устройство компенсации зазоров. Различие результатов не превысило 8,5%.

Методология и методы исследования. Математическая зависимость кинематической точности, учитывающая воздействие коррозии, получена в результате рассмотрения существующих методик расчёта кинематической точности механических передач и характера изменения коррозионных потерь металла. Зависимость кинематической точности от времени воздействия факторов атмосферы определена в результате анализа статистических данных по действию коррозии на металлы и расчётов по предложенной формуле, учитывающей воздействие коррозии.

При разработке устройства компенсации зазора применены методы математического моделирования работы электропривода опорно-поворотного устройства с использованием программного комплекса Matlab Simulink и методы теории автоматического управления.

Реализация результатов. Диссертационная работа выполнена в рамках исполнения Государственного контракта на СЧ ОКР по тематике ПАО «Радиофизика». Результаты диссертационной работы позволили считать возможным использование механических передач существующих приводов в опорно-поворотном устройстве вновь создаваемой радиолокационной станции.

Предложенная математическая зависимость кинематической точности механических передач определяет интервалы проведения регламентных работ.

Предложенный способ и логическое устройство компенсации возникших зазоров позволяют простыми и эффективными средствами обеспечить и поддерживать кинематическую точность приводных систем.

Использование результатов диссертационной работы подтверждено актами внедрения ПАО «Радиофизика» и Московского авиационного института.

Материалы диссертационной работы использованы в курсовом и дипломном проектировании на кафедре 702 «Системы приводов авиационно-космической техники» Московского авиационного института.

На защиту выносится:

1) Способ компенсации зазоров механических передач многодвигательных электроприводов, возникших в результате воздействия атмосферной коррозии,

который обеспечит требуемую кинематическую точность опорно-поворотного устройства.

2) Схема устройства компенсации зазоров механических передач многодвигательных электроприводов, реализующая предложенный способ, на основе введения апериодического звена и перекрёстных связей.

3) Математическая зависимость кинематической точности механических передач от времени воздействия атмосферных факторов.

4) Методика расчёта параметров устройства компенсации зазоров в многодвигательном электроприводе с люфтами в механических передачах, которая на основе предложенного способа и математической зависимости позволяет поддерживать кинематическую точность в течение всего срока эксплуатации.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались:

1) на заседаниях кафедры №702 Московского авиационного института;

2) на XXII, XXIII Ежегодных научных симпозиумах «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» имени А. Г. Горшкова, г. Москва, 2016, 2017 гг.;

3) на XVI, XVIII Международных научно-технических конференциях «Авиация и космонавтика» МАИ, г. Москва, 2017, 2019 гг.

Публикации

Статьи в рецензируемых изданиях из списка ВАК РФ:

1) Самсонович С. Л., Федотов Б. К., Горюнов Р. В. О восстановлении кинематической точности привода крупногабаритного опорно-поворотного устройства после длительного неиспользования. // Справочник. Инженерный журнал. – М.: 2019, №12 – с. 19-31.

2) Самсонович С. Л., Горюнов Р. В. Исследование влияния атмосферной коррозии на кинематическую точность привода крупногабаритного опорно-поворотного устройства. // Справочник. Инженерный журнал. – М.: 2019. №2 – с. 16-22.

3) Самсонович С. Л., Горюнов Р. В. О методике исследования технического состояния крупногабаритного опорно-поворотного устройства после длительного неиспользования. // Контроль. Диагностика. – М.: 2018. №4 – с. 38-45.

Другие научные труды по теме диссертации:

4) Самсонович С. Л., Федотов Б. К., Горюнов Р. В. Способ и устройство выборки люфта в кинематической передаче опорно-поворотного устройства с двумя взаимосвязанными электроприводами. Патент на изобретение № 2726951, опубликовано 17.07.2020, бюллетень №20.

5) Горюнов Р. В., Самсонович С. Л. Анализ методов и средств оценки технического состояния автоматизированных устройств после длительного неиспользования. // Материалы XXII ежегодного научного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» имени А. Г. Горшкова, ООО «ТРП», 2016. – с. 87-89.

6) Горюнов Р.В., Самсонович С.Л. Разработка методики диагностирования крупногабаритного опорно-поворотного устройства после длительного неиспользования. // Материалы XXIII ежегодного научного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» имени А. Г. Горшкова, -М.: ООО «ТРП», 2017. – с. 64-65.

7) Горюнов Р.В., Самсонович С.Л. О методике исследование технического состояния крупногабаритного антенного устройства после длительного неиспользования. // Тезисы 16-й Международной конференции «Авиация и космонавтика», г. Москва, типография «Люксор», 2017. – с. 446-447.

8)) Горюнов Р.В., Самсонович С.Л. Определение зависимости увеличения зазоров кинематической цепи редуктора опорно-поворотного устройства от времени воздействия атмосферных факторов. // Тезисы 18-й Международной конференции «Авиация и космонавтика», г. Москва, типография «Люксор», 2019. – с. 161.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения. Работа изложена на 152 страницах машинописного текста, содержит 79 рисунков, 5 таблиц и список литературы из 99 наименований.

Глава 1 Влияние на кинематическую точность механических передач электроприводов атмосферной коррозии

1.1 Определение коэффициента коррозионной потери металла при продолжительном воздействии атмосферы

Расчёт атмосферной коррозии и прогнозирование коррозионных потерь металла является комплексной научной задачей. Авторы Ю. Н. Михайловский, Г. К. Берукштис, Г. Б. Кларк, И. Л. Розенфельд занимались вопросами прогнозирования коррозионной активности. Разработаны модели, в которых скорость коррозии металла рассматривается как функция продолжительности смачивания поверхности капельножидкими плёнками влаги, температуры и концентрации загрязнений [15-18].

Существует государственный стандарт ГОСТ 9.040-74 ускоренного определения коэффициента скорости коррозии в атмосферных условиях [19]. Стандарт устанавливает порядок определения скорости коррозии в климатических камерах и устанавливает коэффициенты, учитывающие влияние продуктов коррозии на скорость коррозионного процесса. Согласно ГОСТ 9.040-74 ожидаемые коррозионные потери металла за первый год эксплуатации – М (г/м^2) рассчитывают по формуле:

$$M = \left(K^0_{\text{адс}} + a[c]\right)\tau_{\text{адс}} + K^0_{\text{фаз}}\tau_{\text{фаз}}, \qquad (1.1)$$

где $K^0_{\text{адс}}$ и $K^0_{\text{фаз}}$ – скорости коррозии под адсорбционной и фазовой плёнками влаги в условно чистой атмосфере, г/(м^{2}ч); a – ускорение коррозии под адсорбционной плёнкой влаги при наличии в атмосфере коррозионно-активных агентов; $[c]$ – концентрация коррозионно-активного агента в воздухе; $\tau_{\text{адс}}$ и $\tau_{\text{фаз}}$ – продолжительность увлажнения поверхности адсорбционной и фазовой плёнками влаги, ч/г. $K^0_{\text{адс}}$, $K^0_{\text{фаз}}$, a – параметры, определяемые по результатам испытаний в климатических камерах.

Коррозионные потери металла за длительное время эксплуатации – M_t, согласно формуле (1) из Приложения 1 ГОСТ 9.040-74 определяются:

$$M_t = M\tau^n, \quad (1.2)$$

где M – коррозионная потеря металла за первый год эксплуатации, рассчитанная по формуле (1.1); τ – время в годах; n – коэффициент, учитывающий влияние продуктов коррозии на скорость коррозионного процесса.

Значение коэффициента n приведены в таблице Приложения 1 ГОСТ 9.040-74. Для углеродистой стали, расположенной под навесом (исключающим прямое попадание осадков) для сельского и промышленного районов (любого не морского района) значение коэффициента n = 1,0. Таким образом, коррозионная потеря металла за длительное время эксплуатации для рассматриваемого случая атмосферной коррозии механических передач ОПУ определяется формулой:

$$M_t = M\tau^1, \quad (1.3)$$

и является линейной.

Представляют интерес универсальные формулы для расчёта коэффициента скорости коррозии металла, описанные в международном стандарте ISO [20-21], и аналогичном ему российском стандарте [22], предназначенные для прогноза годовых и многолетних массопотерь сталей с учётом температурной границы, принятой равной 10^0C, учитывающие защитные свойства плёнки продуктов коррозии.

Недостаток перечисленных методов определения скорости коррозии в том, что их использование требует проведения коррозионных испытаний исследуемого металла в исследуемой атмосфере, что не всегда возможно, и ограничивает их применение. Последнее обуславливает проведения длительных коррозионных испытаний на специально организованных для этой цели станциях [16].

Созданные при активном участии Института физической химии академии наук коррозионные станции располагались в различных регионах страны. Испытания проводились на образцах углеродистой стали, цинка, меди, алюминия,

магниевых сплавах, как в условиях открытой атмосферы, так и под навесами, а также в помещениях исключающих попадание прямых осадков. Результаты многолетних наблюдений собраны в ГСССД 152-90 [23].

Для оценки коэффициента скорости коррозии металла использовался этот документ. Регион размещения ОПУ – умеренно влажная, приморская атмосфера. Для данного региона, в зависимости от условий расположения образцов, значения коэффициента скорости коррозии варьируются от 4,4 мкм/год (для образцов, расположенных в жалюзийных помещениях с навесом) и до 43,2 мкм/год (для образцов, расположенных в условиях открытой атмосферы) (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Стандартные справочные значения коэффициента скорости атмосферной коррозии по ГСССД 152-90.

Влажностная характеристика атмосферы	Скорость коррозии (мкм/год)				
	Тип атмосферы				
	Сельская	Городская	Промышленная	Приморская	Морская
Сухая	3…8	3…31	9…48	1,3…15,8	-
Умеренно влажная	8…20	9…83	31…126	4,4…43,2	-
Влажная	21…34	21…123	83…216	7,6…69,8	До 1017

За 30 лет, прошедших с момента строительства ОПУ, минимально возможные коррозионные потери металла в механических передачах составили 132 мкм. Максимально возможные коррозионные потери металла составили 1296 мкм.

Приняв коэффициент скорости коррозии при линейном характере изменения коррозионных потерь, проведено исследование влияния на кинематическую

точность механических передач электромеханических приводов атмосферной коррозии.

1.2 Учёт атмосферной коррозии при расчёте кинематической точности механических передач

Кинематическая точность механических передач зависит от конструктивных параметров составляющих звеньев, которые, в свою очередь, определяются их геометрическими размерами. Вопрос кинематической точности механизмов исследовал ряд отечественных авторов, среди которых значительный вклад внесли: Тайц Б. А., Куцоконь В. А., Шевченко-Грабский И. В., Первицкий Ю. Д., Слюдиков М. Н., Тимофеев Б. П., Штриплинг Л. О., Вулгаков Э. Б., Попов П. К., Марков Н. Н. и др.

Несмотря на значительные достижения в области проектирования и создания кинематически точных механических передач, расчётов кинематической точности и мёртвых ходов в зацеплении, вопрос влияния атмосферной коррозии на кинематическую точность механических передач на сегодняшний день не исследован.

Помимо работ названных авторов [24-31], известны государственные и отраслевые стандарты, регламентирующие расчёт кинематической точности механических передач [32-37]. Для рассматриваемого случая атмосферной коррозии механических передач, представляет интерес формула расчёта точности автора Куцоконя В. А. [25], основанная на использовании вероятностных методов теории точности, в которой точность представлена как сумма независимых друг от друга погрешностей:

$$\Delta = \Delta_{З\Sigma} + \Delta_{О\Sigma} + \Delta_{Пр\Sigma} + \Delta_{Упр\Sigma} + \Delta_{Т\Sigma}, \quad (1.4)$$

где Δ – суммарная погрешность механизма; $\Delta_{З\Sigma}$ – суммарная погрешность в зазорах; $\Delta_{О\Sigma}$ – суммарная погрешности в опорах; $\Delta_{Пр\Sigma}$ – суммарная производственная погрешность; $\Delta_{Упр\Sigma}$ – суммарная погрешность, вызванная

упругими деформациями; $\Delta_{T\Sigma}$ – суммарная погрешность, вызванная температурными деформациями в зубчатых зацеплениях.

Поскольку кинематическая точность есть сумма значений, и коррозионное воздействие оказывает значительное влияние только на параметры связанные с изменением геометрических размеров передачи, погрешности связанные с упругими деформациями валов и температурными деформациями в зацеплениях не исследовались в данной работе. Коррозионное воздействие оказывает влияние на погрешности в зазорах, производственные погрешности и погрешности в опорах. Рассмотрим эти погрешности.

Погрешность в зазорах зацеплений рассчитывается исходя из выбранной конструктором величины бокового зазора:

$$\Delta_З = \frac{J_t}{r_2}, \tag{1.5}$$

где J_t – тангенциальная составляющая бокового зазора; r_2 – радиус ведомого колеса по линии делительной окружности.

Приведение тангенциальной составляющей к нормальной даёт следующее:

$$\Delta_З = \frac{J_t}{r_2} = \frac{J_n}{\cos\alpha\cos\beta r_2} = \frac{J_n}{\cos 20^0 \cos\beta\frac{d_2}{2}} = \frac{2.12J_n}{\cos\beta d_2}, \tag{1.6}$$

здесь J_n – нормальная составляющая бокового зазора (единица измерения – мкм); α – угол зацепления (для эвольвентой передачи $\alpha=20^0$); β – угол наклона линии зуба колеса (для цилиндрических зубчатых колёс β=0); d_2 – диаметр делительной окружности ведомого колеса.

В формуле (1.6) величина бокового зазора – J_n указана в микрометрах в соответствии с ГОСТ. Коррозионное воздействие приводит к линейной потере слоя металла, также измеряемого в микрометрах, поэтому вызываемые коррозией потери слоя металла можно представить как линейное увеличение зазора и добавить его к уже существующим погрешностям составляющих звеньев. Учёт коррозионной потери в зависимости от времени воздействия атмосферной среды проведём через коэффициент скорости коррозии металла за год – K (мкм/год) и

продолжительности воздействия коррозии – *t*, выраженной в годах. Суммарная величина коррозионной потери металла будет равна *Kt*. Для пары колёс, участвующих в зацеплении – 2*Kt*. Тогда, с учётом коррозионного воздействия, погрешность в зазорах можно записать:

$$\Delta_З = \frac{2.12(J_n+2Kt)}{\cos\beta d_2} = \frac{2.12(J_n+2Kt)}{\cos\beta m z_2}, \quad (1.7)$$

где z_2 – число зубьев ведомого колеса; m – модуль зубьев колеса.

Погрешности в опорах относятся к производственным погрешностям. Производственные погрешности подчиняются нормальному закону распределения, поэтому погрешности в опорах, являющиеся линейной функцией этих погрешностей, также подчиняются нормальному закону распределения. Нормальному закону распределения соответствует распределение вида:

$$\Delta = \overline{\Delta} + \varepsilon(\Delta_В), \quad (1.8)$$

где Δ – максимальная погрешность, $\overline{\Delta}$ – среднее значение погрешности, $\varepsilon(\Delta_В)$ – предельное отклонение от среднего значения.

Формула для расчёта среднего значения погрешностей в опорах имеет вид:

$$\overline{\Delta_0} = \frac{A(\rho_{РН}+\rho_{РВ})}{2000\pi d_2}\left(\frac{l_1}{L}+\frac{l_2}{L}\right), \quad (1.9)$$

где A – коэффициент, учитывающий единицу измерения погрешности; $\rho_{РН}$ – нижнее значение радиального люфта в опорах (единица измерения – мкм); $\rho_{РВ}$ – верхнее значение радиального люфта в опорах (единица измерения – мкм); l_1, l_2, L – геометрические параметры, характеризующие взаимное расположение опор и колёс.

Предельное отклонение от среднего значения:

$$\varepsilon(\Delta_{0В}) = \frac{A(\rho_{РН}-\rho_{РВ})}{2000\pi d_2}\sqrt{\left(\frac{l_1}{L}\right)^2+\left(\frac{l_2}{L}\right)^2}. \quad (1.10)$$

Аналогично формуле (1.6) величина радиального зазора выражена в мкм. Коррозионное воздействие приводит к потере слоя металла и увеличению радиальных зазоров на величину *Kt*, которую можно добавить к существующим

зазорам. Тогда формулу для расчёта погрешностей в опорах с учётом воздействия коррозии можно записать:

$$\Delta_0 = \overline{\Delta_0} + \varepsilon(\Delta_{0B}) = \tag{1.11}$$

$$= \frac{A((\rho_{РН}+Kt)+(\rho_{РВ}+Kt))}{2000\pi d_2}\left(\frac{l_1}{L}+\frac{l_2}{L}\right) + \frac{A((\rho_{РН}+Kt)-(\rho_{РВ}+Kt))}{2000\pi d_2}\sqrt{\left(\frac{l_1}{L}\right)^2+\left(\frac{l_2}{L}\right)^2}.$$

При рассмотрении производственных погрешностей изготовления зубчатых колёс, учитываются параметры, которые оказывают доминирующее влияние на кинематическую точность:

1) отклонение межцентрового расстояния – ΔA;

2) смещение исходного контура в станочном зацеплении – $\Delta h_{ст}$, приближенно равное половине отклонения размера по роликам ΔM;

3) эксцентриситет зубчатого венца – e относительно оси вращения колеса в передаче, приближенно равный половине радиального биения зубчатого венца колеса – E.

Формула для расчёта производственных погрешностей цилиндрической зубчатой передачи соответствует виду (1.8), где среднее значение:

$$\overline{\Delta_{Пр}} = \frac{A\tan 20^0}{1000\pi d_2}\left[(\Delta_Н A + \Delta_В A) + \left(\Delta_М M_1 + \frac{\delta M_1}{2}\right) + \left(\Delta_М M_2 + \frac{\delta M_2}{2}\right) + \right. \tag{1.12}$$

$$\left. + 0{,}36E_{В1} + 0{,}36E_{В2}\right],$$

а предельное отклонение производственных погрешностей равно:

$$\varepsilon\left(\Delta_{Пр}\right) = \tag{1.13}$$

$$= \frac{A\tan 20^0}{1000\pi d_2}\sqrt{(\Delta_Н A + \Delta_В A)^2 + \left(\frac{\delta M_1}{2}\right)^2 + \left(\frac{\delta M_2}{2}\right)^2 + 0{,}32E_{В1}^2 + 0{,}32E_{В2}^2},$$

где $\Delta_Н A$ и $\Delta_В A$ – нижнее и верхнее отклонение межцентрового расстояния в мкм; $\Delta_М M$ – наименьшее отклонение размера исходного контура (в тело колеса) в мкм; δM – допуск на размер исходного контура в мкм; $E_В$ – предельное значение радиального биения зубчатого венца колеса в передаче в мкм.

Коррозионное воздействие не оказывает влияния на отклонение межцентрового расстояния – ΔA, а также на эксцентриситет зубчатого венца – e,

однако, коррозионное воздействие приводит к потере слоя металла на зубьях колеса, аналогичных тому, что происходит на производстве при смещениях исходного контура на величину *Kt*. Тогда формулу для расчёта производственных погрешностей с учётом воздействия коррозии можно записать:

$$\Delta_{\text{Пр}} = \overline{\Delta_{\text{Пр}}} + \varepsilon(\Delta_{\text{Пр}}) = \frac{A\tan 20^0}{1000\pi d_2}\left[\left[(\Delta_{\text{Н}}A + \Delta_{\text{В}}A) + \left(\Delta_{\text{М}}M_1 + Kt + \frac{\delta M_1}{2}\right) + \right.\right.$$
$$+ \left(\Delta_{\text{М}}M_2 + Kt + \frac{\delta M_2}{2}\right) + 0{,}36E_{\text{В1}} + 0{,}36E_{\text{В2}}\Big] +$$
$$\left. + \left[\sqrt{(\Delta_{\text{Н}}A + \Delta_{\text{В}}A)^2 + \left(\frac{\delta M_1}{2}\right)^2 + \left(\frac{\delta M_2}{2}\right)^2 + 0{,}32E_{\text{В1}}^2 + 0{,}32E_{\text{В2}}^2}\right]\right]. \quad (1.14)$$

Подставляя формулы 1.7, 1.11, 1.14 в 1.4 без учёта погрешностей, вызванных упругими и температурными деформациями, получим:

$$\Delta = \Delta_{3\Sigma} + \Delta_{0\Sigma} + \Delta_{\text{Пр}\Sigma} = \sum_{j=1}^{q}\Delta_{3j} + \sum_{n=1}^{u}\Delta_{0n} + \sum_{n=1}^{u}\Delta_{\text{Пр}n} =$$
$$= \sum_{j=1}^{q}\frac{2.12(J_{nj}+2Kt)}{\cos\beta m z_{2j}} + \sum_{n=1}^{u}(\overline{\Delta}_{0n} + \varepsilon(\Delta_{0\text{В}})_n) + \sum_{n=1}^{u}\left(\overline{\Delta}_{\text{Пр}n} + \varepsilon(\Delta_{\text{ПрВ}})_n\right) = \quad (1.15)$$
$$= \sum_{j=1}^{q}\frac{2.12(J_{nj}+2Kt)}{\cos\beta m z_{2j}} + \sum_{n=1}^{u}\left(\frac{A((\rho_{\text{РН}}+Kt)_n+(\rho_{\text{РВ}}+Kt)_n)}{2000\pi d_{2n}}\left(\frac{l_1}{L}+\frac{l_2}{L}\right)_n + \right.$$
$$\left. + \frac{A((\rho_{\text{РН}}+Kt)_n-(\rho_{\text{РВ}}+Kt)_n)}{2000\pi d_{2n}}\sqrt{\left(\frac{l_1}{L}\right)_n^2 + \left(\frac{l_2}{L}\right)_n^2}\right) +$$
$$+ \sum_{n=1}^{u}\left(\frac{A\tan 20^0}{1000\pi d_{2n}}\left[\left[(\Delta_{\text{Н}}A + \Delta_{\text{В}}A)_n + \left(\Delta_{\text{М}}M_1 + Kt + \frac{\delta M_1}{2}\right)_n + \right.\right.\right.$$
$$+ \left(\Delta_{\text{М}}M_2 + Kt + \frac{\delta M_2}{2}\right)_n + 0{,}36E_{\text{В1}n} + 0{,}36E_{\text{В2}n}\Big] +$$
$$\left.\left.\left. + \sqrt{(\Delta_{\text{Н}}A + \Delta_{\text{В}}A)_n^2 + \left(\frac{\delta M_1}{2}\right)_n^2 + \left(\frac{\delta M_2}{2}\right)_n^2 + 0{,}32E_{\text{В1}n}^2 + 0{,}32E_{\text{В2}n}^2}\right]\right)\right),$$

где j – номер передачи; q – число передач в кинематической цепи; Δ_{3j} – погрешность j-й передачи, вызванная боковым зазором; n – номер вала передачи; u – число валов передачи.

Формула (1.15) позволяет рассчитать кинематическую точность механических передач, учитывая погрешности изготовления составляющих

звеньев и продолжительность воздействия атмосферной коррозии. Формула основана на расчётном методе «максимума-минимума» и учитывает предельные отклонения параметров звеньев кинематической цепи и самые неблагоприятные их сочетания. Однако для решения прикладных инженерных задач использование формулы (1.15) наполненной большим количеством расчётных параметров может быть затруднительно. Поэтому ГОСТ 21098-75 допускает использование другого – «вероятностного» метода расчёта кинематической точности, учитывающего разброс реальных параметров погрешности и вероятность различных сочетаний отклонений составляющих звеньев. Вероятностный метод не рассчитывает отдельные параметры $\overline{\Delta}_0$, $\varepsilon(\Delta_{0В})$, $\overline{\Delta}_{Пр}$ и $\varepsilon(\Delta_{ПрВ})$, а позволяет учитывать их введением коэффициентов компенсации – K_A, K'_n, и соответствующих им значений – F_{ir}, f_{ai}, вычисленных для зубчатых передач, имеющих допуски на геометрические размеры по ГОСТ 1643 и ГОСТ 9178.

Формула расчёта кинематической точности механических передач на основе вероятностного метода имеет вид:

$$\Delta = \Delta_{3\Sigma} + \Delta_{0\Sigma} + \Delta_{Пр\Sigma} = \tag{1.16}$$

$$= \sum_{j=1}^{q} \frac{2{,}12 J_{nj}}{\cos\beta d_{2j}} + \sum_{n=1}^{u} \left(\frac{(6{,}88 F_{ir1} + 2{,}5 f_{a1})_n}{d_{1n}} + \frac{(6{,}88 F_{ir2} + 2{,}5 f_{a2})_n}{d_{2n}} \right) +$$

$$+ \sum_{n=1}^{u} \left(\frac{6{,}88 q}{d_2} \right)_n ,$$

где J_n – нормальная составляющая бокового зазора; F_{ir1} – кинематическая точность ведущего колеса; F_{ir2} – кинематическая точность ведомого колеса (установлена стандартом, единица измерения – мкм); f_{a1} – максимальное отклонения оси вращения ведущего колеса от его номинальной величины; f_{a2} – максимальное отклонения оси вращения ведомого колеса от его номинальной величины (единица измерения – мкм); q – максимальный радиальный зазор в опорах, определяемый по документации.

Коррозионное воздействие оказывает влияние на величину бокового зазора, кинематической точности отдельного колеса, а также радиальный зазор в опорах.

Тогда, с учётом сказанного ранее, можно представить формулу (1.16) в следующем виде:

$$\Delta = \sum_{j=1}^{q} \frac{2{,}12(J_n+2Kt)_j}{\cos\beta m z_{2j}} + \tag{1.17}$$

$$+ \sum_{n=1}^{u} \left(\frac{(6{,}88(F_{ir1}+Kt)+2{,}5f_a)_n}{m z_{1n}} + \frac{(6{,}88(F_{ir2}+Kt)+2{,}5f_a)_n}{m z_{2n}} \right) + \sum_{n=1}^{u} \frac{(6{,}88(q+2Kt))_n}{m z_{2n}}.$$

Математическая зависимость (1.17) является формулой расчёта кинематической точности механической передачи с учётом воздействия коррозии, основанная на «вероятностном» методе.

Получив значение коэффициента скорости коррозии металла – *K*, математическую зависимость кинематической точности механических передач, учитывающую воздействие атмосферной коррозии, появляется возможность перейти к расчётам.

1.3 Расчёт и моделирование кинематической точности механических передач с учётом воздействия коррозионной среды

Ранее, были получены формулы (1.15, 1.17) расчёта точности механических передач, с учётом воздействия коррозионной среды. Рассмотрены известные методы определения коэффициента скорости коррозии и выбран метод, основанный на использовании таблиц стандартных справочных значений коэффициента скорости коррозии.

Механические передачи исследуемого опорно-поворотного устройства изготовлены в 1987 году. Данные о первоначальном значении кинематической точности механических передач на момент изготовления обнаружить не удалось, поэтому первоначальное значение на момент изготовления рассчитано по формуле (1.16) на основании данных конструкторской документации составных частей и составило 0,254 угл. мин. без учёта погрешностей, вызванных упругими и температурными деформациями.

Анализ литературы, а также рынка систем автоматизированного проектирования позволил установить, что существуют CAE-системы предназначенные для автоматизированного динамического анализа механических систем, моделирования поведения систем во времени, позволяющие рассчитать развиваемые ускорения, силы и т.д., включает дополнительные сложные динамические элементы, такие как пружины, трение, гибкие тела, контакт между телами. Одной из таких CAE-систем является программный комплекс MSC Adams. Важной особенностью программного комплекса является возможность моделирования механических передач с учётом геометрических размеров и контактов между зубчатыми колёсами.

На основе конструкторской документации построена геометрическая модель исследуемых механических передач ОПУ (рисунок 1.1). Особенностью моделирования передач в MSC Adams является использование модуля упрощённого проектирования зубчатых передач Machinery Gear, позволяющего создавать не только зубчатые цилиндрические, но и конические, винтовые, червячные, реечные и гипоидные передачи. Модуль Machinery Gear позволяет создавать стандартные, а также модифицированные профили зубчатых передач, в том числе корригированные. Эта особенность программного комплекса использована при моделировании точности механической передачи до и после воздействия коррозии.

Известно, что коррозионная потеря металла приводит к смещениям исходного контура зубчатых колёс на величину потерянного металла с каждой стороны зуба (рисунок 1.2). Модификация профиля зуба производится в окне ввода геометрических параметров зубчатой передачи (рисунок 1.3). Для этого в окне Profile необходимо изменить опцию Standard на Modified, после чего в окне ниже появится опция выбора ширины зуба, рассчитанной по делительной окружности.

Учёт коррозионной потери металла в подшипниковых узлах при моделировании производится за счёт смещения осей вращения зубчатых передач. Для этого в окне геометрических параметров требуется ввести откорректированное

значение межосевого расстояния передачи с учётом коррозионной потери металла в окне Center location (рисунок 1.4).

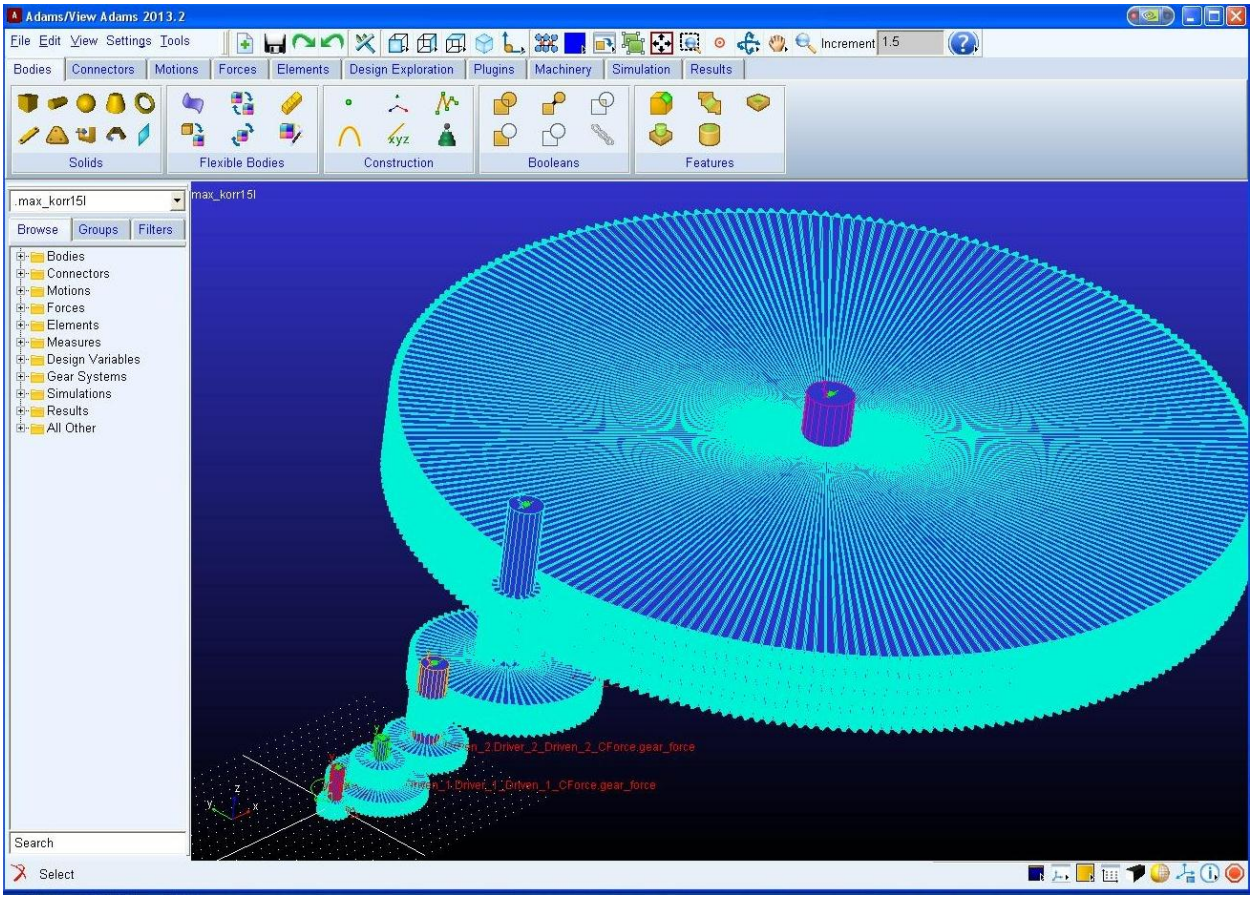

Рисунок 1.1 – Геометрическая модель исследуемых механических передач опорно-поворотного устройства

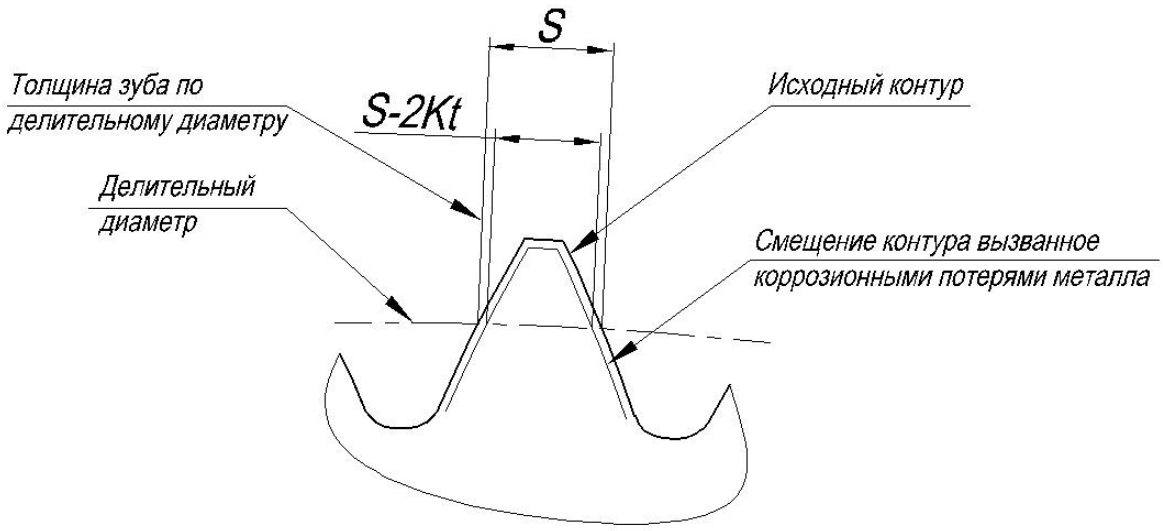

Рисунок 1.2 – Исходный и модифицированный профили зуба

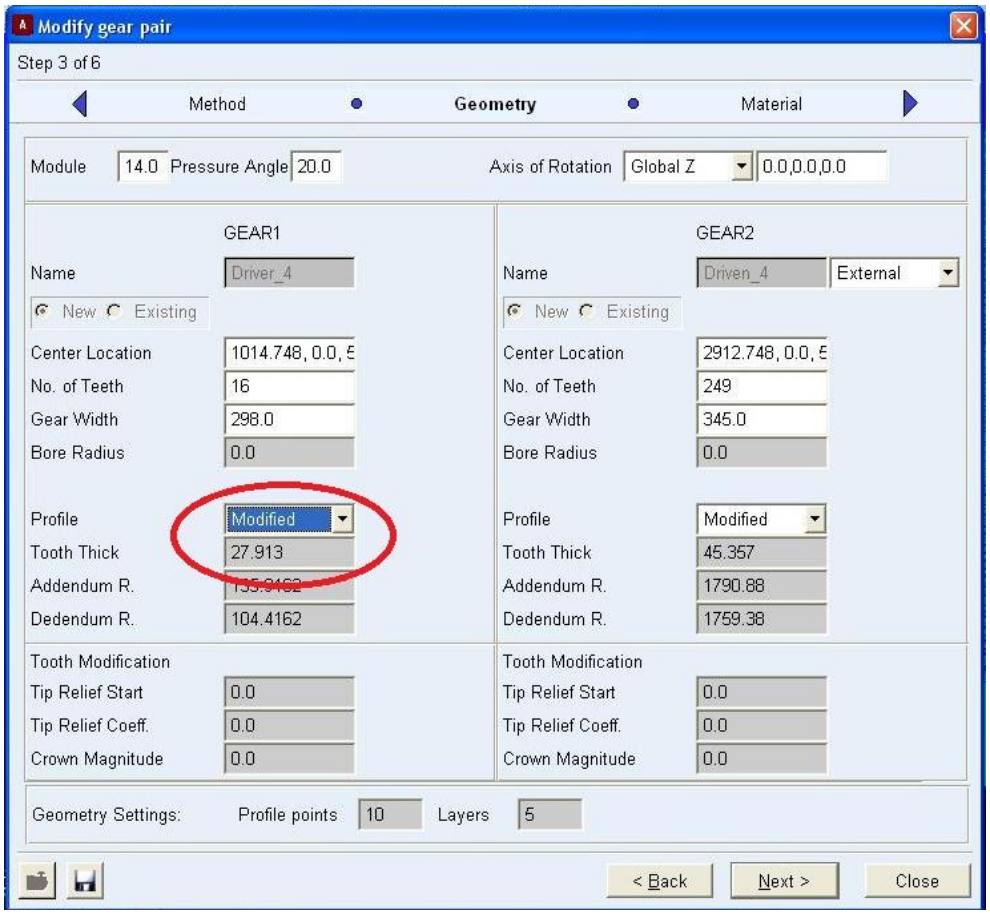

Рисунок 1.3 – Модификация профиля зуба

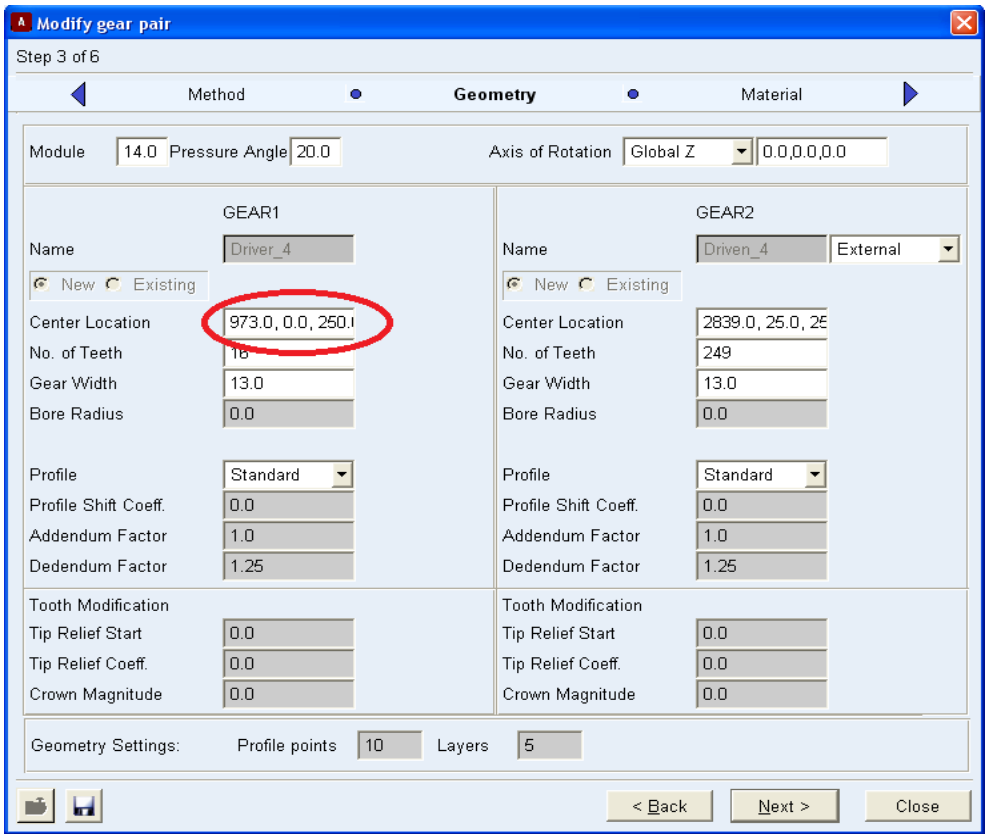

Рисунок 1.4 – Модификация межосевого расстояния

Метод расчёта контакта зубчатых зацеплений – 3D contact. Для оценки параметров точности механических передач ОПУ в динамике задано уравнение движения входного вала: $d(t) = \mathrm{A}\cos\omega t$, где d – угол поворота, А – амплитуда, t – время в секундах.

Анализ результатов движения механизма производится графически. Программный комплекс рассчитывает координаты движения входного и выходного валов механических передач и представляет их графически (рисунок 1.5). Одинаковому положению выходного вала при прямом и обратном вращении ставились в соответствие два положения входного вала. Разница двух положений входного вала – Δ делилась на передаточное число редуктора, полученное значение принято за кинематическую точность механических передач ОПУ:

$$\Delta_{\Sigma} = \frac{\Delta}{q_{\text{ред}}}, \tag{1.18}$$

где $q_{\text{ред}}$ – передаточное число редуктора.

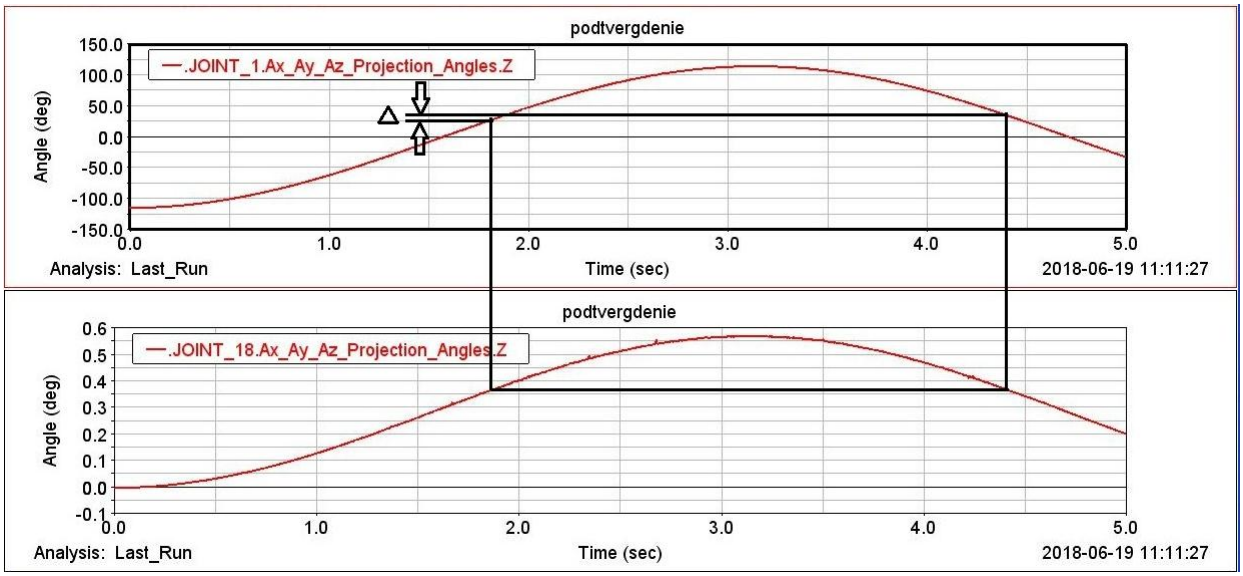

Рисунок 1.5 – Графики движения входного и выходного валов

Моделирование кинематической точности в MSC Adams для механических передач до воздействия коррозии позволило получить значение 0,305 угл.мин. Полученное значение сопоставлено с результатами расчёта по известной методике. Сходимость полученных результатов в 0,254 угл.мин. (без учёта упругих и температурных деформаций) при расчёте и 0,305 угл.мин. при моделировании

кинематической точности до воздействия атмосферной коррозии позволяют сделать вывод о достоверности полученной модели.

По предложенной методике моделирования кинематической точности с учётом воздействия коррозии, произведён расчёт значения кинематической точности для 15 лет воздействия атмосферы и 30 лет воздействия атмосферы. При расчётах использованы верхняя и нижняя границы коэффициента скорости коррозии по ГСССД 152-90, в результате образован диапазон возможного изменения кинематической точности механических передач.

В результате расчёта получены значения в 0,699 угл.мин. и 2,69 угл.мин. для продолжительности воздействия атмосферы 15 лет, а также значения 0,8 угл.мин. и 3,24 угл.мин. для 30 лет атмосферного воздействия соответственно. Полученные значения позволяют приступить к исследованию зависимости между продолжительностью воздействия атмосферной коррозии и изменениями кинематической точности механических передач ОПУ.

1.4 Анализ результатов расчёта кинематической точности механических передач ОПУ

В результате исследования предложены формулы расчёта кинематической точности механических передач ОПУ, учитывающие воздействие атмосферной коррозии (1.15, 1.17), рассмотрен и предложен способ моделирования кинематической точности на основе программного комплекса MSC Adams, получены значения кинематической точности механических передач ОПУ на момент изготовления, а также интервал возможного изменения значения для 15 лет и 30 лет воздействия атмосферной коррозии.

Анализ результатов расчётов и изменения кинематической точности механических передач редуктора целесообразно представить графически. На графике (рисунок 1.6) по оси абсцисс – продолжительность нахождения в атмосфере, выраженная в годах, по оси ординат – значение кинематической точности, кривая 1 – график изменения кинематической точности механических

передач редуктора при минимально возможной коррозионной потере металла, кривая 2 – график изменения кинематической точности механических передач редуктора при максимально возможной коррозионной потере металла. Область между кривыми – интервал возможного изменения кинематической точности механических передач редуктора при продолжительном воздействии коррозии. Графики интерполированы по гипотезе непрерывности функции распределения кинематической точности во времени и отсутствия скачкообразных изменений между точками, поскольку используется линейная функция скорости коррозии.

Анализ результатов показывает, что значительные изменения кинематической точности происходят в течение первых 15 лет, в дальнейшем значения изменяются незначительно. После получения расчётного интервала возможного изменения, и построения графика зависимости кинематической точности от времени для исследуемых механических передач редуктора после продолжительного воздействия атмосферной коррозии, определено доступное для измерения фактическое значение кинематической точности механической передачи путём прямого измерения зазора механической передачи ОПУ.

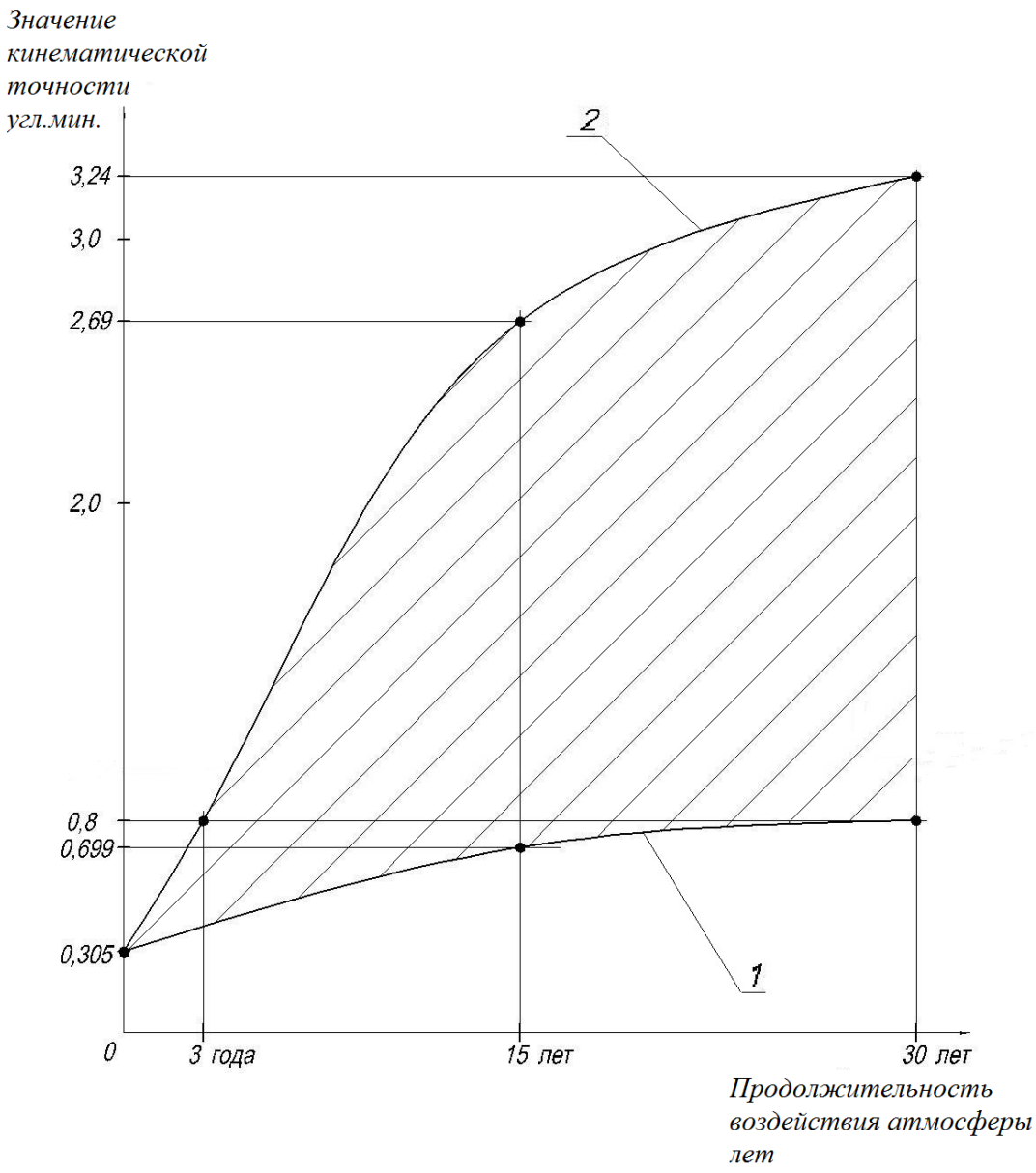

Рисунок 1.6 – График зависимости кинематической точности от времени воздействия коррозии для механических передач исследуемого редуктора

Выводы по главе 1

1) Предложена математическая зависимость, описывающая влияние факторов атмосферной коррозии на параметры, характеризующие кинематическую точность механических передач опорно-поворотного устройства, которая позволяет рассчитать и прогнозировать изменение кинематической точности во времени.

2) Проведён анализ методов расчёта коррозионных потерь металла в зависимости от времени воздействия коррозионной среды. На основании результатов эмпирических исследований РАН, собранных в ГСССД 152-90, определены значения коэффициента скорости коррозии металла.

3) Предложен способ моделирования точности механических передач, учитывающий воздействие факторов атмосферы и вызываемых ею коррозионных потерь металла на основе программного комплекса MSC Adams, который позволяет автоматизировать расчёты изменения кинематической точности во времени.

4) На основании результатов расчётов и моделирования получена зависимость кинематической точности механических передач опорно-поворотного устройства от времени воздействия атмосферных факторов. В результате установлено, что атмосферные факторы влияют на кинематическую точность, при этом существенные изменения происходят в течение первых 15 лет и незначительные в последующие годы.

Глава 2 Результаты экспериментальных исследований

2.1 Цель экспериментальных исследований

Целью экспериментальных исследований является подтверждение результатов расчётов по полученной математической зависимости путём прямого измерения точности на объекте исследования после 30 лет пребывания в условиях открытой атмосферы и воздействия коррозии.

2.2 Обзор методов измерения кинематической точности механических передач

Существуют различные методы контроля и измерения параметров механических передач редукторов приводов и их зубчатых колёс, но для исследования наиболее применимыми являются методы прямого измерения кинематической точности по способу сопоставления контролируемой и образцовой величины [38-39]. Их два:

1) Кинематический метод непрерывного сопоставления действительной и заданной закономерности движения контролируемых элементов. Этот метод известен как метод кинематомерии, когда на входной и выходной вал устанавливают высокоточные датчики угловых положений и при вращении происходит измерение параметров.

2) Статический метод дискретного определения различия между контролируемой и образцовой величиной, определяемой линией измерения на колесе при различных фиксированных положениях колёс редуктора.

Первый метод отличается высокой информативностью и большим количеством полученных данных, однако его применение для построенного в единственном экземпляре крупногабаритного устройства очень сложно и очень дорого. Второй метод позволяет измерить значение кинематического мёртвого хода для конкретного положения зубчатых колёс, но не позволяет определять закономерности движения контролируемых элементов, как в случае с

кинематомерией, однако в данном случае для оценки кинематической точности является достаточным и предпочтительным по причине простоты реализации и более низкой стоимости.

2.3 Описание проведения и результаты измерений

Проведено измерение фактического значение кинематической точности механических передач привода на объекте исследования после 30 лет атмосферного воздействия. При визуальном осмотре установлено значительное воздействие факторов атмосферы на ОПУ: повреждение лакокрасочного покрытия, очаги коррозии на элементах конструкции, корпусах редукторов, валах и зубчатых колёсах. Внешнее состояние зубчатых передач и опор редуктора после воздействия факторов коррозии представлены на рисунках 2.1, 2.2.

Измерения точности проводились методом половинного момента, описанным в программе и методике обследования технического состояния ОПУ. Для этого на базовые поверхности ведущей полумуфты (входной вал) проверяемого редуктора установлен специальный ключ (рисунок 2.3) длиной 1 метр и через динамометр ДПУ 0,1-2 приложено усилие равное 41кгс (рисунок 2.4). В азимутальной плите ОПУ предусмотрены два контрольных окна, обеспечивающих доступ к выходному зубчатому колесу, расположенному внутри азимутальной плиты. В этом окне азимутальной плиты установлен индикатор ИЧ10 (рисунок 2.5), ножка индикатора упирается в зуб азимутального колеса, дав натяжку индикатора около 5мм, установили шкалу на 0. Данное положение зафиксировали в виде рисок на наружной поверхности полумуфты и корпуса редуктора.

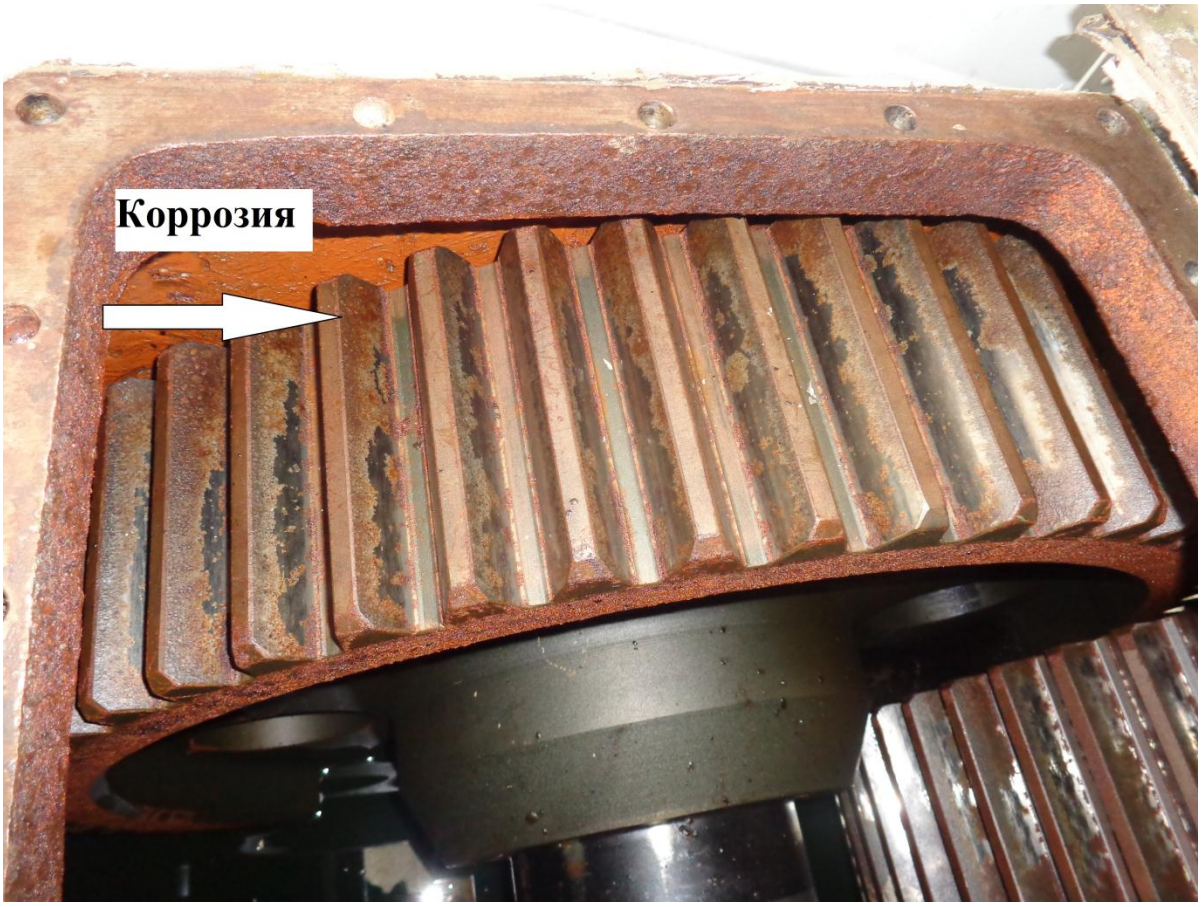

Рисунок 2.1 – Состояние зубчатых передач

Рисунок 2.2 – Состояние опор редуктора

Рисунок 2.3 – Установка спецключа на ведущей полумуфте

Рисунок 2.4 – Приложение усилия к входному валу через динамометр ДПУ

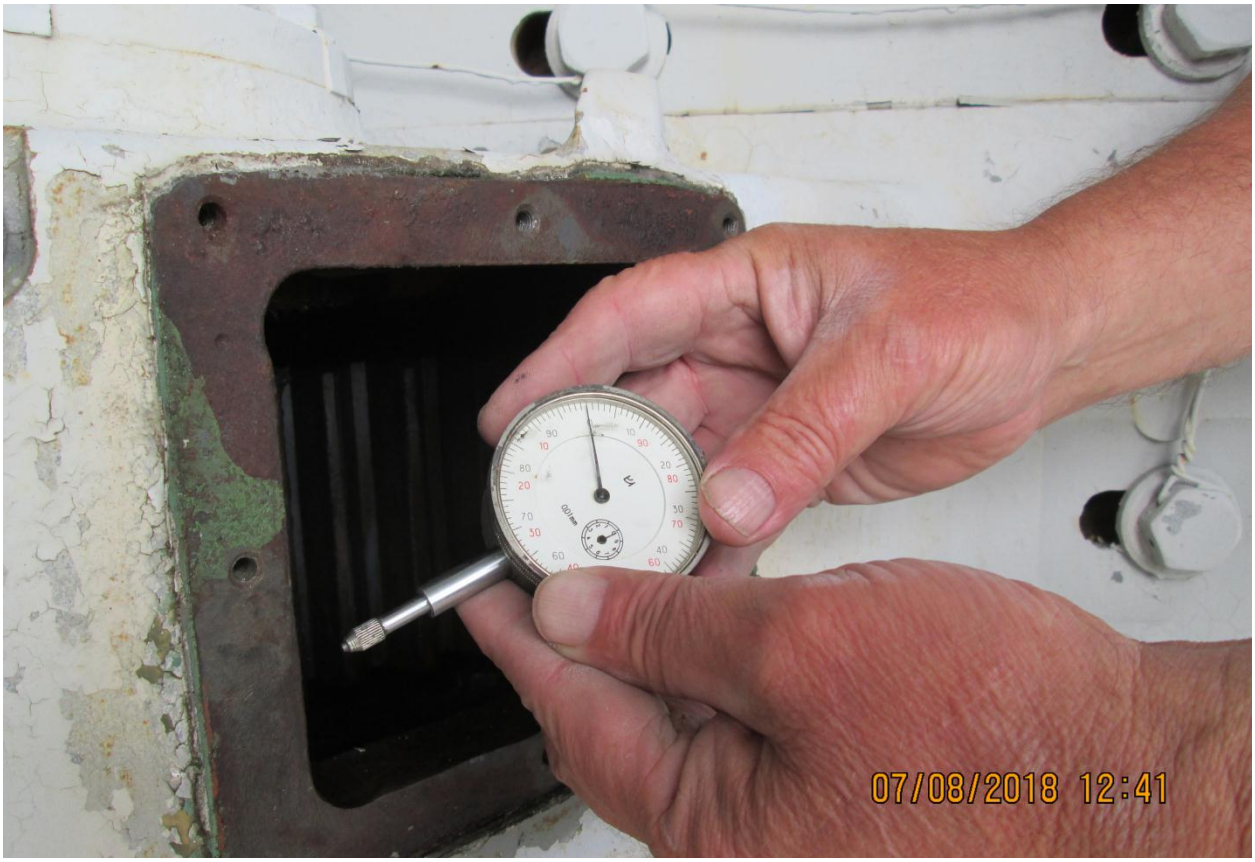

Рисунок 2.5 – Установка индикатора ИЧ 10 в окне азимутальной плиты

Затем приложили усилие к ключу в обратном направлении. На наружной поверхности полумуфты, напротив риски на корпусе, нанесли вторую риску и замерили длину дуги между этими рисками (оказалась равной 9 мм). В то же время сняли показание индикатора ИЧ10 (оказалось равным 0,9мм). Общая схема измерения представлена на рисунке 2.6.

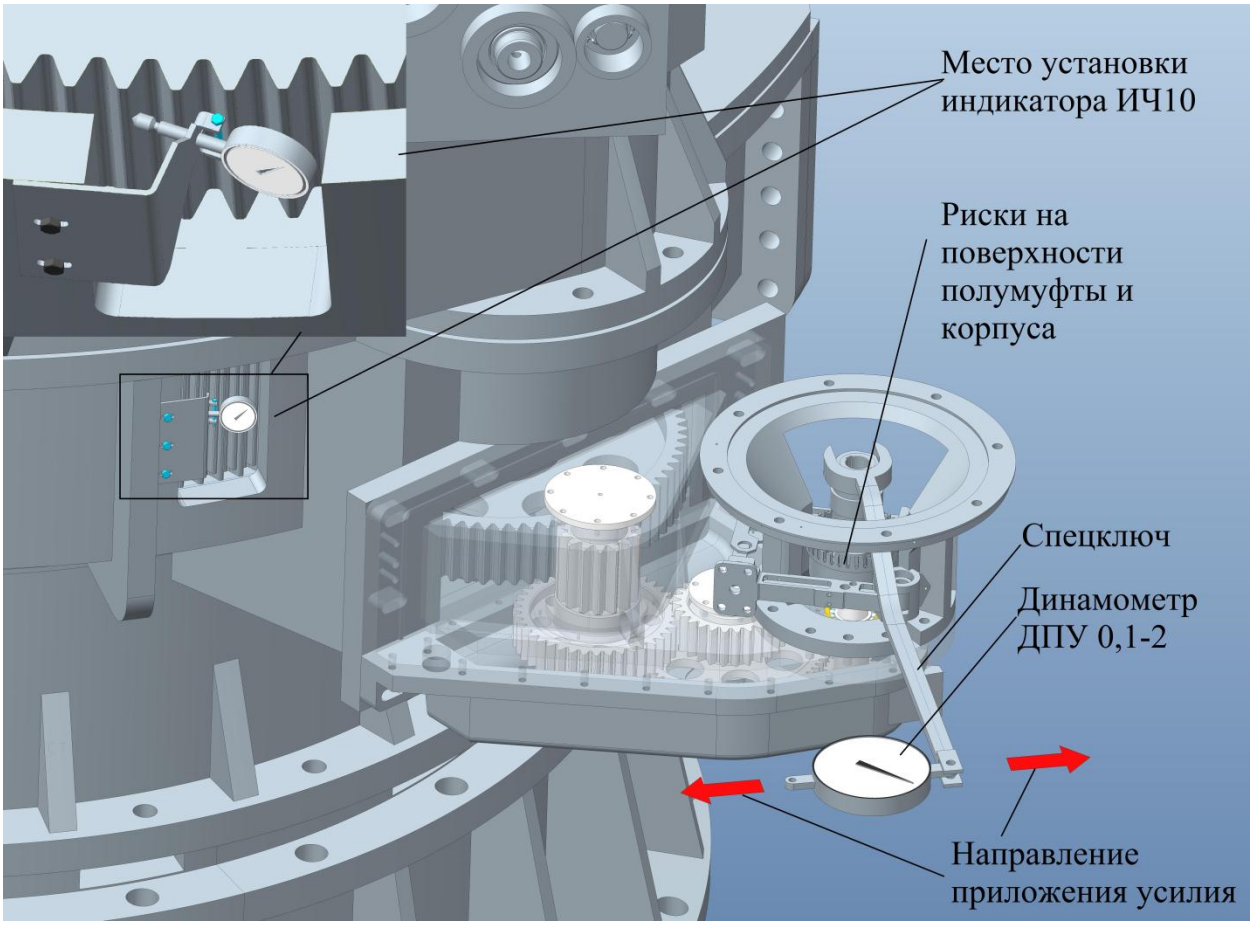

Рисунок 2.6 – Схема измерения

Расчет погрешности производился по формуле:

$$\Delta_{аз} = \left(\frac{L}{r} - \frac{\lambda \times q_{аз}}{R_{аз}}\right) \times \frac{57{,}3 \times 60}{q_{аз}}, \quad (2.1)$$

где L – длина дуги в мм, измеренная на наружной поверхности гайки полумуфты,

r – радиус наружной поверхности гайки полумуфты,

λ – показание индикатора в мм, измеренное на выходном валу,

$q_{аз}$ – передаточное число привода,

$R_{аз}$ – радиус азимутального колеса в мм.

$$\Delta_{аз} = \left(\frac{9}{105} - \frac{0{,}9 \times 400{,}43}{1785}\right) \times \frac{57{,}3 \times 60}{400{,}43} = 0{,}997 \text{ угл. мин.}$$

В результате измерения кинематической точности механических передач редуктора привода на опорно-поворотном устройстве после воздействия атмосферы продолжительностью в 30 лет получено значение 0,997 угловых минут.

Полученное в результате измерения значение нанесено на график зависимости кинематической точности от времени (рисунок 2.7).

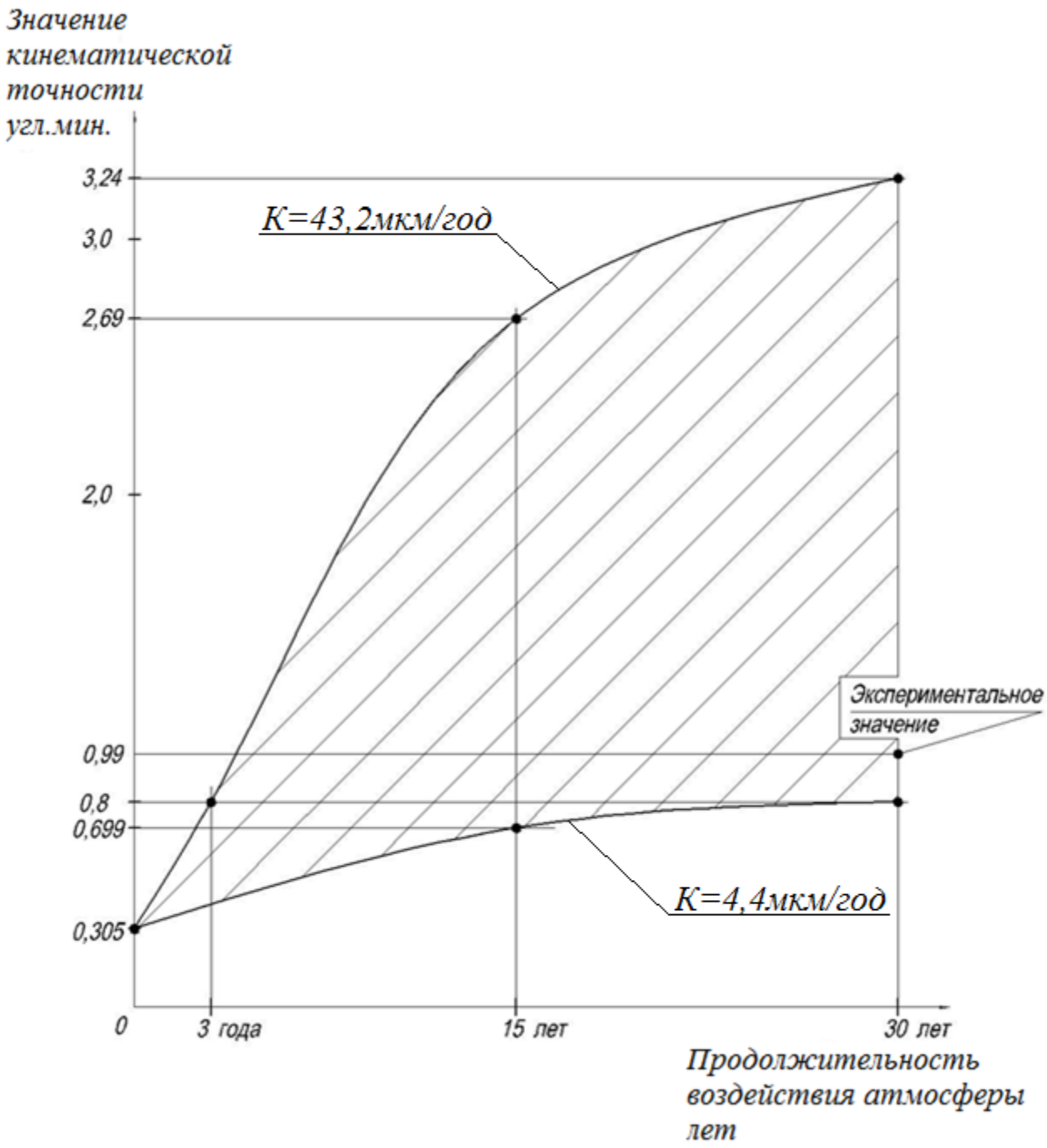

Рисунок 2.7 – График зависимости кинематической точности от времени для исследуемых механических передач с учётом экспериментального значения

Полученное экспериментальное значение кинематической точности исследуемых механических передач после продолжительного воздействия коррозии находится в интервале расчётных значений. Результаты расчётов и натурных измерений подтверждают снижение точности, вызванное действием коррозии. Принятие решения о возможности использования существующей

конструкции ОПУ после воздействия коррозии возможно после рассмотрения путей восстановления кинематической точности приводных систем ОПУ.

Выводы по главе 2

1) Проведено измерение кинематической точности механических передач редуктора на объекте исследования после продолжительного воздействия атмосферы статическим методом определения точности, описанным в программе и методике обследования технического состояния ОПУ, позволившее установить значение коррозионных потерь металла.
2) Полученное в результате измерения значение точности механических передач редуктора после продолжительного атмосферного воздействия находится в интервале расчётных значений, что свидетельствует о достоверности построенной модели, метода расчёта кинематической точности, а также корректности применяемой методики определения значений коррозионных потерь металла.

Глава 3 Пути восстановления кинематической точности приводов ОПУ

3.1 Анализ распределения кинематической ошибки по ступеням редуктора

В главе 1 показано, что суммарная кинематическая точность механических передач редуктора привода зависит от различных производственных и эксплуатационных факторов, которые определяются погрешностями: в зазорах; формы профиля зуба; в опорах, а также погрешностями, вызванными упругой и температурной деформациями.

Поскольку кинематическая точность зависит от ряда факторов, то рассматривалось коррозионное воздействие, которое оказывает влияние только на параметры связанные с геометрией передачи: погрешности в зазорах, погрешности профиля, погрешности в опорах. На погрешности связанные с упругими и температурными деформациями коррозионное воздействие значительного влияния не оказывает. Воздействие атмосферной коррозии на зубчатые колёса редукторов приводит к изменениям исходного контура поверхности, близким к тем, которые возникают в производстве при смещении режущего инструмента, а также к увеличению боковых зазоров в передаче. Коррозия в опорах приводит к смещениям валов и увеличению межосевых расстояний. Эти процессы происходят во всех ступенях редуктора. Известно, что доля каждой пары колёс, вносимая в суммарную кинематическую точность редуктора, пропорциональна передаточному числу, т.е. удалённости передачи от выходного звена [40].

Анализ кинематической точности механических передач исследуемого редуктора, проведённый на основе результатов расчётов, для состояния, подвергшегося коррозионному воздействию со скоростью коррозии 4,4 мкм в год, в течение 30 лет, показал, что суммарная кинематическая погрешность равна 0,8 угловых минут. Распределение кинематической погрешности по ступеням исследуемого редуктора, характеристики которого даны в таблице В.1, вносимой в суммарную точность, представлено на рисунке 3.1.

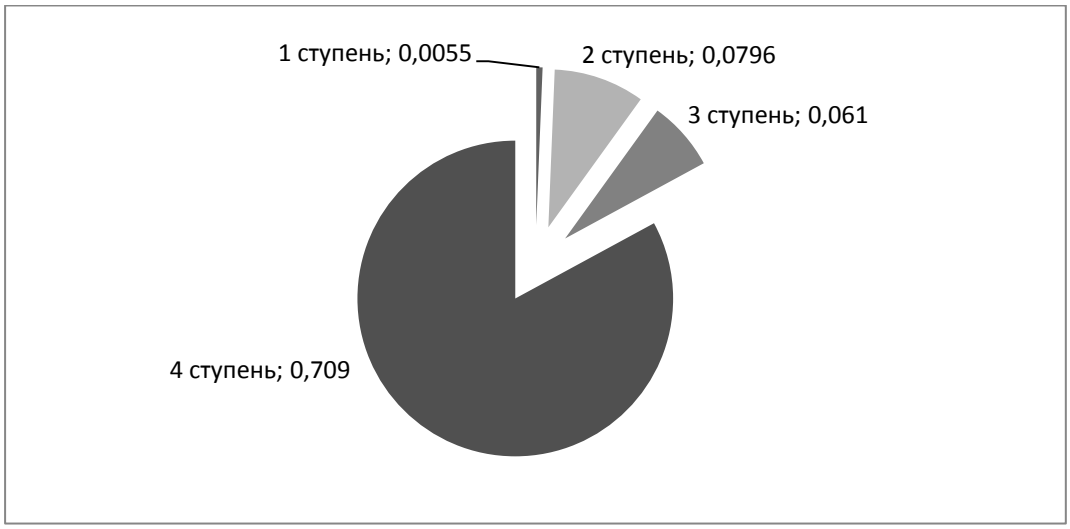

Рисунок 3.1 – Распределение кинематической погрешности по ступеням

Из диаграммы следует, что наибольшее значение оказывает точность последней ступени редуктора. Кинематическая погрешность последней ступени складывается из погрешности в зазорах, погрешности профиля и погрешности в опорах. Первые две связаны с отклонением фактического профиля эвольвенты зубчатых колёс от теоретического профиля, а последняя – с возникновением зазоров в опорах. Распределение кинематической погрешности в четвёртой (выходной) ступени представлено на рисунке 3.2.

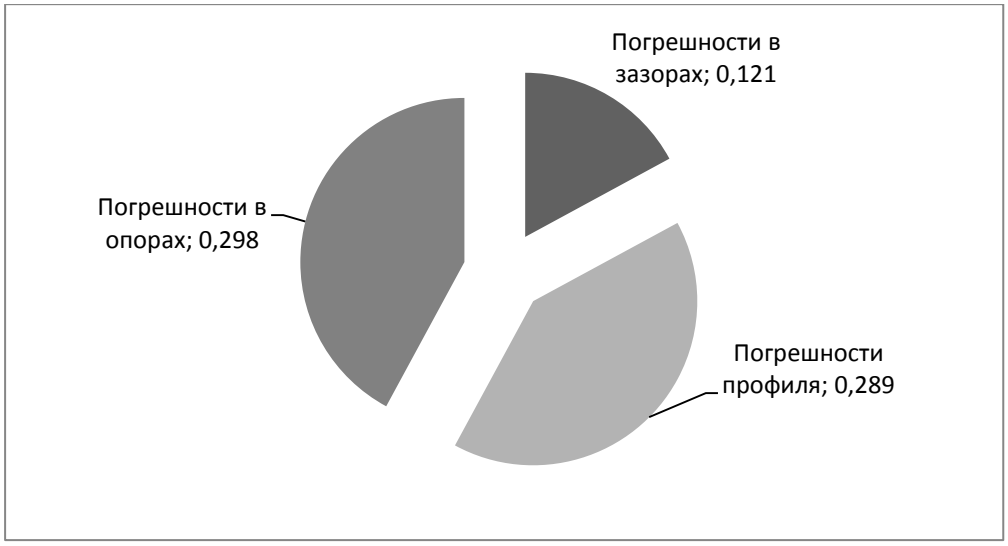

Рисунок 3.2 – Распределение кинематической погрешности в выходной ступени редуктора

Из диаграммы следует, что для снижения кинематической погрешности редуктора следует уменьшать погрешности в опорах, а также погрешности профиля эвольвенты, вызванные воздействием коррозии.

Для обеспечения требуемых значений кинематической точности и обеспечения работоспособности ОПУ после длительного воздействия атмосферы требуется восстановить геометрические размеры зубчатых колёс и посадочных мест подшипников.

3.2 Восстановление геометрии повреждённых деталей путём наращивания слоя материала

Существует два пути восстановления точности зубчатых колёс: замена повреждённых деталей, и восстановление геометрии повреждённых деталей. Наибольшее распространение на ремонтных предприятиях получили следующие способы восстановления зубчатых колёс: наплавка торцов зубьев, горячая объёмная штамповка и ротационное пластическое деформирование [41]. В последние годы широкое распространение при ремонте зубчатых колёс получили композитные материалы холодного отверждения и методы напыления материалов [42-44].

Восстановление зубчатых колёс наплавкой производят при высоких значениях потери металла – более 2мм, восстановление объёмной штамповкой – путём изготовления закрытого штампа, что для ремонта несерийного изделия, построенного в единственном экземпляре достаточно дорого.

В основе метода восстановления деталей при помощи композитных материалов холодного отверждения лежит химическая реакция полимеризации. Базовыми компонентами в этих материалах являются полимеры. Ремонтные композиты холодного отверждения состоят из нескольких компонентов: базы и отвердителя, при смешивании которых в обычных условиях (без нагревания и повышения давления) происходит химическая реакция полимеризации. Смесь

имеет небольшое время жизнеспособности, после чего застывает и уже не может менять форму, и не способна контактировать с ремонтируемой поверхностью. Отдельно компоненты могут храниться достаточно долго. В качестве наполнителя выступают частицы различных металлов (Fe, Ti, Zn, Mo и т. д.), керамики размером, соизмеримым с размерами образующихся в процессе полимеризации ячеек. Наполненность этих полимеров частицами составляет 93−96%. Благодаря ряду специфических добавок этот полимер по многим свойствам приближается к металлам. Метод эффективен при восстановлении повреждений корпусов и посадочных мест подшипников [42].

Напыление материалов – процесс нанесения покрытия на поверхность детали с помощью высокотемпературной скоростной струи, содержащей частицы порошка или капли расплавленного напыляемого материала, осаждающегося на основном материале при ударном столкновении с его поверхностью. Существующую технологию напыления в зависимости от применяемого источника тепловой энергии разделяют на два основных вида: газоплазменное напыление, при котором используется теплота, выделяющаяся при сгорании смеси горючего газа с кислородом, и электрическое напыление, основанное на использовании теплоты, выделяющейся при горении электрической дуги. Современный уровень технологии напыления позволяет осуществить восстановление и упрочнение деталей машин и механизмов порошковыми композиционными материалами и получить специальные покрытия, обладающие уникальными свойствами.

Преимуществами технологии напыления являются: возможность нанесения покрытий на изделия, изготовленные практически из любого материала; отсутствие ограничений по размеру обрабатываемых деталей; возможность нанесения слоя до нескольких миллиметров; относительная простота конструкции оборудования и его малая масса; простота технологических операций напыления; не требуется специальной дорогостоящей обработки (очистки) продуктов загрязняющих окружающую среду.

К недостаткам технологии напыления относят: малую эффективность нанесения покрытия на мелкие детали из-за низкого коэффициента использования

материала (отношение массы покрытия к массе израсходованного материала); вредные условия работы операторов; выделение дыма и аэрозолей во время напыления [43-44].

Конструкция редукторов ОПУ такова, что выходное зубчатое колесо интегрировано в азимутальную колонну и её демонтаж возможен только при полной разборке ОПУ. Однако, возможен доступ к зубьям этого колеса через несколько люков в азимутальной плите. Сопрягаемая с этим колесом выходная шестерня может быть демонтирована, при этом будет получен доступ к подшипниковым узлам вала шестерни. Посадочные места подшипников целесообразно восстанавливать полимерными материалами холодного отверждения. Потерянный в результате действия коррозии слой металла на зубьях выходной шестерни и колеса возможно восстановить напылением слоя металла. При этом напыление на выходное колесо, расположенное внутри азимутальной плиты возможно производить через контрольные люки (рисунок 3.3). Данные операции позволят устранить зазор в опорах выходной шестерни и восстановить профиль выходной шестерни до первоначального.

Применение данного способа восстановления кинематической точности редукторов после продолжительного воздействия атмосферы возможно после проведения технико-экономической оценки.

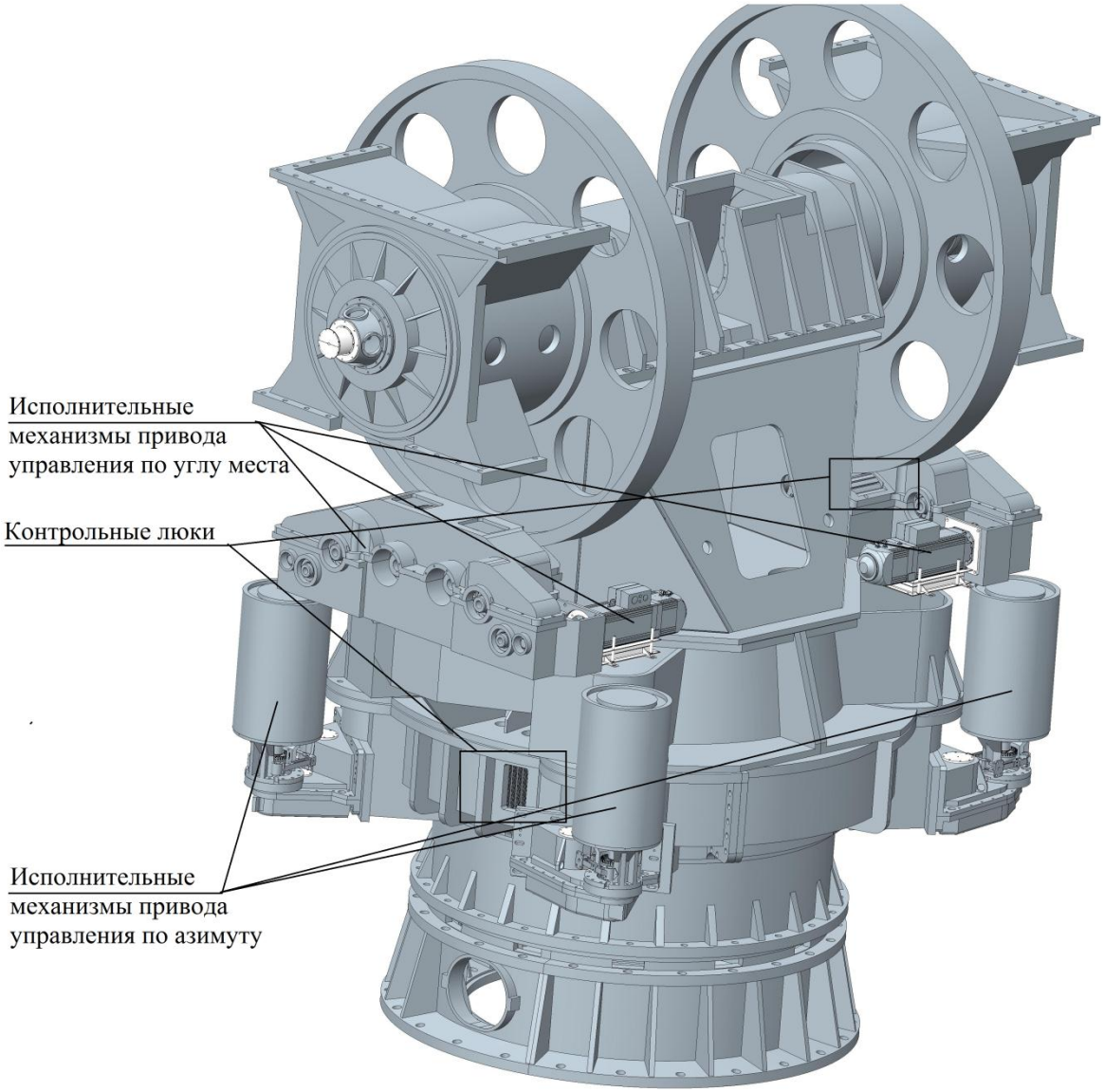

Рисунок 3.3 – Расположение контрольных люков опорно-поворотного устройства

3.3 Технико-экономическая оценка восстановления наращиванием слоя материала

Произведён расчёт стоимости и времени выполнения работ по восстановлению кинематической точности (КТ) приводов для метода газодинамического напыления в сочетании с применением материалов холодного отверждения. Построен сетевой график проведения работ. Для каждой работы определены минимальная продолжительность выполнения и трудоёмкость работы. После расчёта параметров сетевого графика построена линейная диаграмма

проекта, график распределения ресурса по времени и суммарный график стоимости работ.

Дополнительно подсчитана стоимость покупки оборудования, материалов, а также затрат на транспортировку. В результате получено, что продолжительность восстановительных работ составит 41 рабочий день (около двух календарных месяцев при 40 часовой рабочей неделе), суммарная трудоёмкость составит 496 нормо-часов, стоимость оборудования и материалов на момент расчёта (январь 2019 года) составит 5 млн. 190 тыс. руб.

Расчёт КТ показал, что данные операции, без напыления слоя металла на выходное колесо, позволяет получить значение КТ 0,36 угл.мин. Напыление металла на выходное колесо через контрольные люки позволит ещё повысить значение КТ, однако недостатком данной операции является неравномерность нанесения толщины покрытия на зубья колеса ручным инструментом через контрольные люки, и трудности при контроле толщины покрытия. Расчёт позволил установить, что при равномерном напылении слоя металла на выходное зубчатое колесо до номинального размера, возможно получить значение КТ 0,33 угл.мин. Однако, превышение толщины напыляемого покрытия может привести к возникновению заклиниваний во время работы и при изменении температуры, что является существенным недостатком данного метода.

Применение газодинамического напыления для восстановления КТ механических передач ОПУ возможно. Оборудование, сравнительно, недорогое и достаточно распространённое, однако, для восстановления зубчатых колёс с высокой точностью требуется стационарное оборудование. Возможности демонтировать выходное зубчатое колесо нет, поэтому восстановительные работы возможно производить только переносным (ручным) оборудованием. Сложность нанесения восстанавливающего покрытия не высока, однако точность данной технологической операции низкая, также возникнут затруднения при контроле толщины наносимого покрытия. Газодинамическое напыление в сочетании с применением материалов холодного отверждения позволит повысить КТ до приемлемых значений, однако данный способ устранения возникших в результате

продолжительного атмосферного воздействия зазоров для электропривода, содержащего 4 электродвигателя, не является единственным.

Для электропривода, содержащего четыре взаимосвязанных электродвигателя, следует рассмотреть и другие способы повышения точности.

3.4 Пути повышения точности электропривода

Наличие зазоров, вызванных коррозией, в механических передачах редукторов оказывает значительное влияние на точность исполнительных механизмов. В приводах следящих систем наличие зазоров существенно ухудшает их динамические свойства, поскольку на время выбора зазора система оказывается разомкнутой.

Известны принципы построения редукторов, позволяющие на этапах проектирования повысить точность электропривода [26-27]:

1) оптимальный с позиции точности выбор механических передач;
2) выбор механических передач с малым числом звеньев;
3) разбивка передаточного отношения механизма по ступеням исходя из условия $q_{12} < q_{23} < q_{(n-1)n}$;
4) постановка на последних ступенях высокоточных передач;
5) повышение точности изготовления зубчатых колёс, валов, корпусов;
6) увеличение жёсткости валов и их соединения с передачами.

Когда используемых конструкторских и технологических решений оказалось недостаточно, разработчики приводных систем для повышения точности использовали в исполнительных механизмах упругие элементы для устранения зазоров передач. Одним из первых решений в этой области явилось использование разрезных зубчатых колёс, между секторами которого установлена пружина, обеспечивающая распор секторов колеса относительно парного зубчатого колеса [22]. Применение одного такого колеса в каждой паре зубчатых колёс исполнительного механизма позволило получить безлюфтовую передачу.

Недостатком данного технического решения является пониженный КПД привода из-за увеличенного трения на разрезных колёсах, низкая надёжность пружин, а также ограничения по передаваемому моменту, связанные с величиной усилия создаваемого пружиной, установленной в разрезанном зубчатом колесе.

Дальнейшее развитие приводных систем привело к использованию блоков порошковых и гистерезисных муфт, имеющих идентичные независимые кинематические цепи вплоть до выходного звена передачи [45]. В силовых механизмах получили распространение торсионные валы из упругой стали 60Г2, которые устанавливали параллельно предпоследнему *n*-1 валу (на последнем установлен объект управления). Угол закрутки φ (обычно около 30^0) торсионного вала обеспечивает выбор люфта, сам торсион конструктивно прост, но сложна технология закрутки [46].

Развитие элементной базы систем управления электроприводом позволило перейти от конструктивно сложных приводных систем с механическим торсионом, к приводным системам с электромеханическим торсионом. В этом случае момент выбора люфта достигается за счёт использования в механизме двух приводов, имеющих независимые кинематические цепи вплоть до выходного звена передачи [47].

Применение двух двигателей в электроприводе оказалось удачным техническим решением, и дальнейшее развитие точных приводных систем с компенсацией зазора развивалось на базе многодвигательного электропривода.

В многодвигательном электроприводе, в связи с возможностью изменения знака момента в «тормозной» ветви кинематической цепи, возможно создать не тормозной, а движущий момент, необходимый для разгона собственных инерционных масс, при сохранении пассивного момента прижима определённой величины, тем самым может быть ослаблено влияние паразитной инерционной нагрузки. Поскольку условия компенсации зазора требуются не во всех режимах работы электропривода, появляется возможность использовать момент электродвигателя «тормозной» ветви для существенного повышения динамических

возможностей привода в целом, максимально возможное ускорение и замедление может быть увеличено почти вдвое.

Следует рассмотреть способы компенсации зазора в механических передачах с несколькими взаимосвязанными электродвигателями подробнее.

3.5 Способы компенсации зазора в механических передачах с несколькими взаимосвязанными электродвигателями

Наибольшее распространение в электроприводе получили три схемы компенсации зазора, описанные в работах [48-52]:

1) Момент натяжения компенсируется возрастающим моментом нагрузки таким образом, чтобы при определённом моменте нагрузки момент выбора зазора исчезал, и вращающие моменты обоих двигателей имели при этом одинаковый знак. Достоинство этого способа в том, что максимальный момент отдельного привода может быть меньше максимального момента нагрузки. Недостатком является то, что при компенсации зазора при знакопеременных моментах нагрузки происходит смена рабочих поверхностей боковых сторон зубьев в зубчатом зацеплении, при которой происходит возникновение резкого толчка (рисунок 3.4а).

2) Каждый из двух приводов обеспечивает вращение в определённом направлении, а при движении в противоположном создаёт некоторую величину момента натяжения, однако моменты приводов должны быть больше максимального нагрузочного момента на величину момента принудительного натяжения (момента компенсации зазора) (рисунок 3.4б).

3) Момент натяжения при максимальном моменте нагрузки исчезает, а при моменте нагрузки равном нулю имеет максимальную величину. Момент каждого привода в этом случае должен быть равен максимальному моменту нагрузки (рисунок 3.4в).

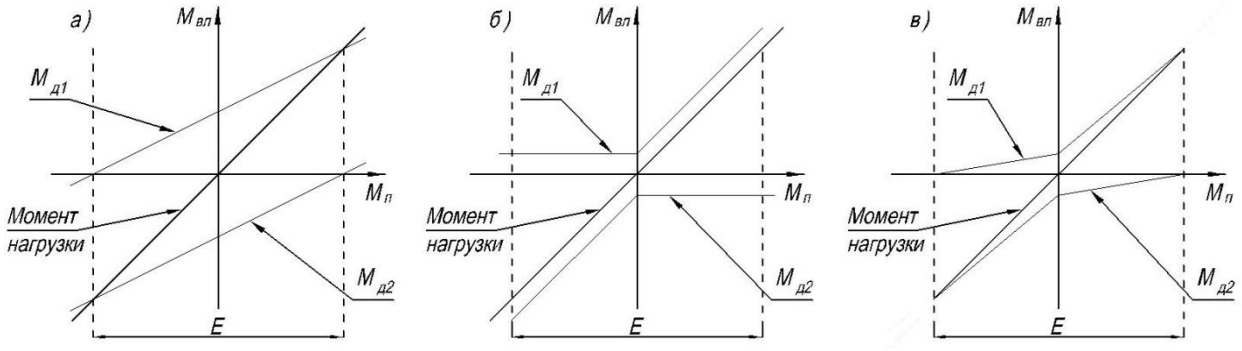

Рисунок 3.4 – Схемы построения привода с электромеханической компенсацией зазора

На рисунке 3.4 Мп – момент привода; Мвл – момент компенсации зазора (принудительного натяжения); Е – диапазон компенсации зазора; $Мд_1$ – момент развиваемый первым двигателем; $Мд_2$ – момент развиваемый вторым двигателем.

Привода исследуемого ОПУ состоят из четырёх исполнительных механизмов, приводящих в движение один выходной элемент. Наличие четырёх исполнительных механизмов обусловлено уменьшением габаритов привода, приведённых моментов инерции каждого канала, а также равномерности распределения момента по диаметру колеса. Для приводов азимутального наведения выходным элементом является цилиндрическое зубчатое колесо, установленное в центральной части поворотного устройства. Кинематическая схема азимутального привода представлена на рисунке В.2. Для приводов наведения по углу места выходными элементами являются два зубчатых колеса, размещённых на общем валу. Каждое колесо контактирует с двумя исполнительными механизмами. Их размещение хорошо видно на рисунке 3.3.

Привод наведения по углу места имеет меньшую мощность, чем привод азимутального наведения, и для его управления использована идентичная схема. Поэтому в дальнейшем рассматривается только привод азимутального наведения.

Приводы должны обеспечивать работу ОПУ в режиме целеуказания, гармонического сигнала наведения, и в режиме сопровождения.

Момент, развиваемый одним двигателем, рассчитывается по формуле:

$$M_{\text{аз.дв}} = \frac{M_{\text{тр}} + M_{\text{в}} + J\dot{\omega}}{q\eta}, \qquad (3.1)$$

где $M_{тр}$ – суммарный момент трения, приведённый к оси вращения ОПУ; $M_{в}$ – ветровой момент при скорости ветра 15 м/с (максимальная рабочая скорость ветра); J – приведённый момент инерции канала; ω̈ – ускорение при разгоне канала в рад/с^2; q – передаточное число одного канала; η – КПД редуктора.

Суммарный момент, развиваемый двигателями азимутального привода равен 2850 Нм. Каждый двигатель ПМ 101ОМ5 используемый в азимутальном приводе обеспечивает номинальное значение момента равное 570 Нм, максимальное значение – 830Нм.

Максимальный суммарный момент, создаваемый четырьмя двигателями для азимутального привода:

$$M_{\sum} = 4 \times M_{дв} = 3320\text{Нм}.$$

Следовательно, при максимальном значении ветрового потока, а также движения с максимальными скоростями и ускорениями (в режиме целеуказания) должны быть задействованы все четыре электродвигателя. При работе в режиме сопровождения рабочие скорости и ускорения незначительны, а влияние зазоров на работу системы управления, напротив, достаточно велико, поэтому при сопровождении и в режиме гармонического наведения целесообразно применить электромеханическую компенсацию зазоров по первой известной схеме. Для удобства первую схему устройства компенсации зазора будем называть схемой с введением сигнала смещения (УКЗ СС).

3.6 Устройство компенсации зазора на основе введения сигнала смещения

В предыдущем параграфе было показано, что для приводов исследуемого ОПУ возможно применение схемы с введением сигнала смещения. Первоначально моменты распора создавались подведением дополнительных питающих напряжений к электродвигателям [50]. Позже, для создания моментов распора, вместо подачи напряжений на двигатели применили электронный блок моментов

распора, который вводит смещение в сигнал динамической ошибки. Данная схема стала первым электронным устройством компенсации зазора [48].

Прежде чем перейти к особенностям данного типа устройств рассмотрим структуру электропривода, в составе которого работает устройство компенсации зазора. Блок-схема устройства управления электроприводом представлена на рисунке 3.5.

Электропривод состоит из последовательно расположенных: устройства формирования сигнала управления 1, согласующего усилителя-сумматора 2, электронного устройства компенсации зазора 3, двух контуров управления 4,5, состоящих из усилителя мощности, электродвигателя, редуктора, моменты которых суммируются на общем колесе, жёстко соединённым с объектом управления 6 и датчика обратной связи 7.

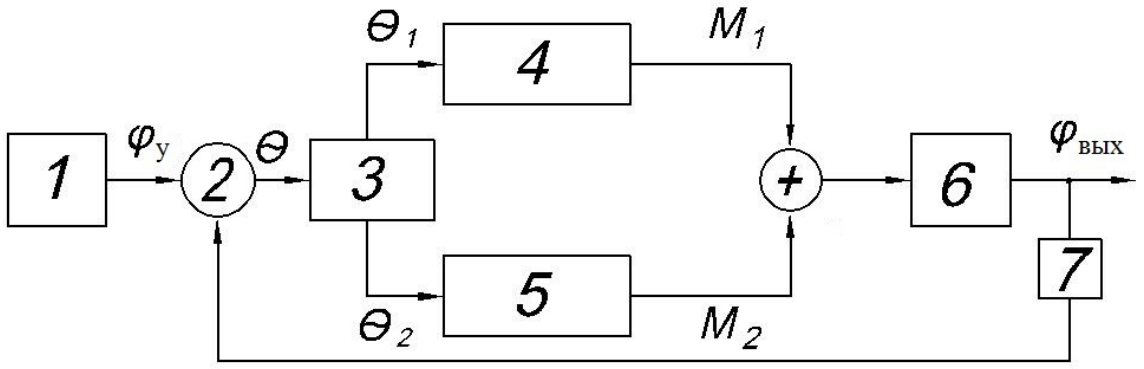

Рисунок 3.5 – Схема устройства управления электроприводом

Устройство формирования сигнала управления 1, вырабатывающее сигнал управления φ_y, подключено к первому входу согласующего усилителя-сумматора 2, а второй его вход соединён с датчиком обратной связи 7. Выход усилителя-сумматора 2 соединён с входом устройства компенсации зазора 3. Устройство компенсации зазора 3 имеет два выхода, на которые поступают сигналы θ_1, θ_2. Эти выходы подключены к каналам управления 4,5, содержащим электрические

преобразователи, формирующие токи и напряжения управления двигателями, электродвигатели. Каналы управления создают управляющие моменты, каждый из которых, через механические люфтосодержащие передачи, соединён с общим выходным колесом, жёстко соединённым с объектом управления 6.

Устройство управления электроприводом работает следующим образом: устройство формирования сигнала управления 1 выдаёт сигнал положения объекта управления φ_y на согласующий усилитель-сумматор 2, который сравнивает значение задающего сигнала с сигналом текущего положения, поступающим от датчика обратной связи 7, и, по разнице сигналов, формирует сигнал динамической ошибки θ, поступающий на вход устройства компенсации зазора 3. Устройство компенсации зазора преобразует получаемый сигнал в сигналы управления каналами привода θ_1, θ_2, которые формируют управляющие токи и создают моменты. В каналы управления, после усилителя-сумматора 2 сигнала динамической ошибки θ вводятся дополнительные сигналы смещения (рисунок 3.6) равные по величине и различные по знаку. Это обеспечивает моменты распора привода при нулевом значении управляющего сигнала аналогично действию пружины [48].

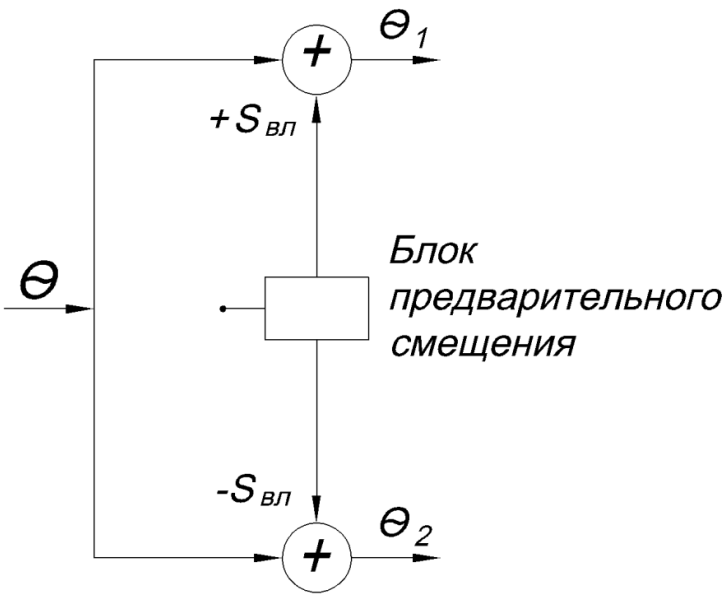

Рисунок 3.6 – Схема устройства компенсации зазора с введением сигналов смещения

При поступлении сигнала управления, например положительного, величина сигнала в соответствующем канале увеличивается, а в противоположном уменьшается на величину сигнала смещения. Первый канал начинает вращать объект управления в определённом направлении, а второй обеспечивает момент компенсации зазора. Циклограмма сигналов на выходе устройства компенсации зазора при поступлении гармонического сигнала наведения, с учётом смещения, приведена на рисунке 3.7. Когда сигнал управления по величине превысит сигнал смещения, сигнал в канале компенсации зазора изменит знак, и моменты исполнительных механизмов будут суммироваться.

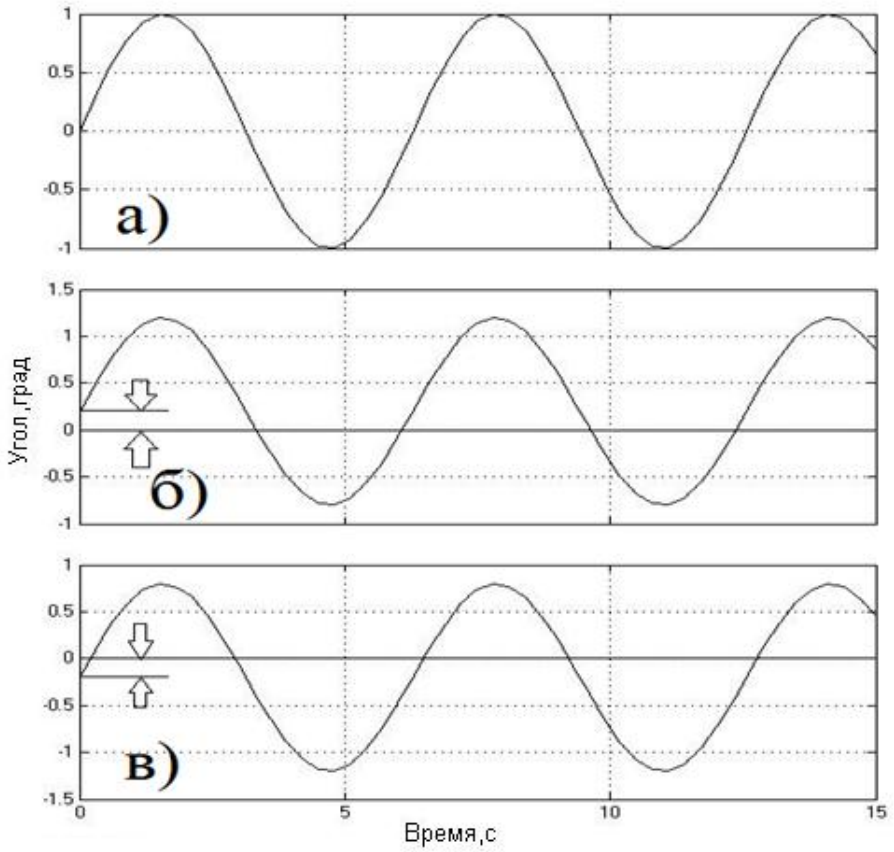

Рисунок 3.7 – Циклограмма сигналов устройства компенсации зазора с введением сигналов смещения: а) сигнал динамической ошибки, б) сигнал в первом канале, в) сигнал во втором канале. На графиках показана величина смещения

Формирование токов каждого электропривода осуществляют контурами регулирования токов, индивидуальными для каждого электропривода. Достоинством данной схемы устройства является автономность внутренних контуров регулирования отдельных электроприводов, точность отработки при

компенсации зазора, а также возможность суммирования моментов при превышении порога смещения.

Известными недостатками данного устройства является то, что сигналы смещения, действующие во всём диапазоне работы, приводят к потере энергии из-за высокого взаимного нагружения исполнительными механизмами друг друга и снижению КПД.

3.7 Разработка электронного устройства компенсации зазора с перекрёстными связями

Устранение недостатков известной схемы возможно за счёт построения специального устройства компенсации зазора, в котором сигналы смещения, и соответственно, моменты распоров действуют не во всём диапазоне отработки, а только в ограниченных интервалах времени. Указанных свойств устройства возможно достичь за счёт введения дополнительных связей и создания многосвязной системы, преобразующей сигнал динамической ошибки.

В процессе работы разработано многосвязное устройство компенсации зазора с введением перекрёстных связей, позволяющее учитывать отличие характеристик каждого канала электропривода. Схема обеспечивает автономность внутренних контуров регулирования отдельных каналов привода с возможностью настройки моментов распоров в зависимости от параметров приводной системы и требований к качеству управления. Для удобства разработанную схему устройства компенсации зазора будем называть схемой с перекрёстными связями (УКЗ ПС).

Разработанная схема устройства компенсации зазора с перекрёстными связями представлена на рисунке 3.8. Устройство компенсации зазора состоит из двух разветвителей 1,2, двух фильтров 3,4, двух апериодических звеньев 5,6 с постоянными времени T_1, T_2, блока выделения модуля сигнала 7, четырёх блоков умножения 8-11 и двух блоков суммирования 12, 13. Вход устройства компенсации зазора разветвлён разветвителем 1 на три выхода. Первые два выхода подключены к соответствующим фильтрам 3 и 4.

Третий выход разветвителя 1 подключён к входу разветвителя 2, который имеет четыре выхода. Каждый из выходов разветвителя 2 подключён к одному из входов блоков умножения 8-11. Фильтры 3,4 имеют по два выхода. Фильтр 3 образует две ветви, одна через первый блок умножения 8 подключена к первому входу сумматора 12, а вторая через апериодическое звено 6 и второй блок умножения 11 образует перекрёстную связь, подключённую ко второму входу на второй сумматор 13. В одну из ветвей после фильтра 4 включён блок выделения модуля сигнала 7, необходимый для согласования знаков сигналов на выходах звеньев 9 и 10. Блок 7 имеет два выхода, первый подключён к входу апериодического звена 5, а второй ко второму входу блока 9. Сигналы с выходов блоков суммирования 12,13 являются выходными сигналами устройства компенсации зазора θ_1, θ_2.

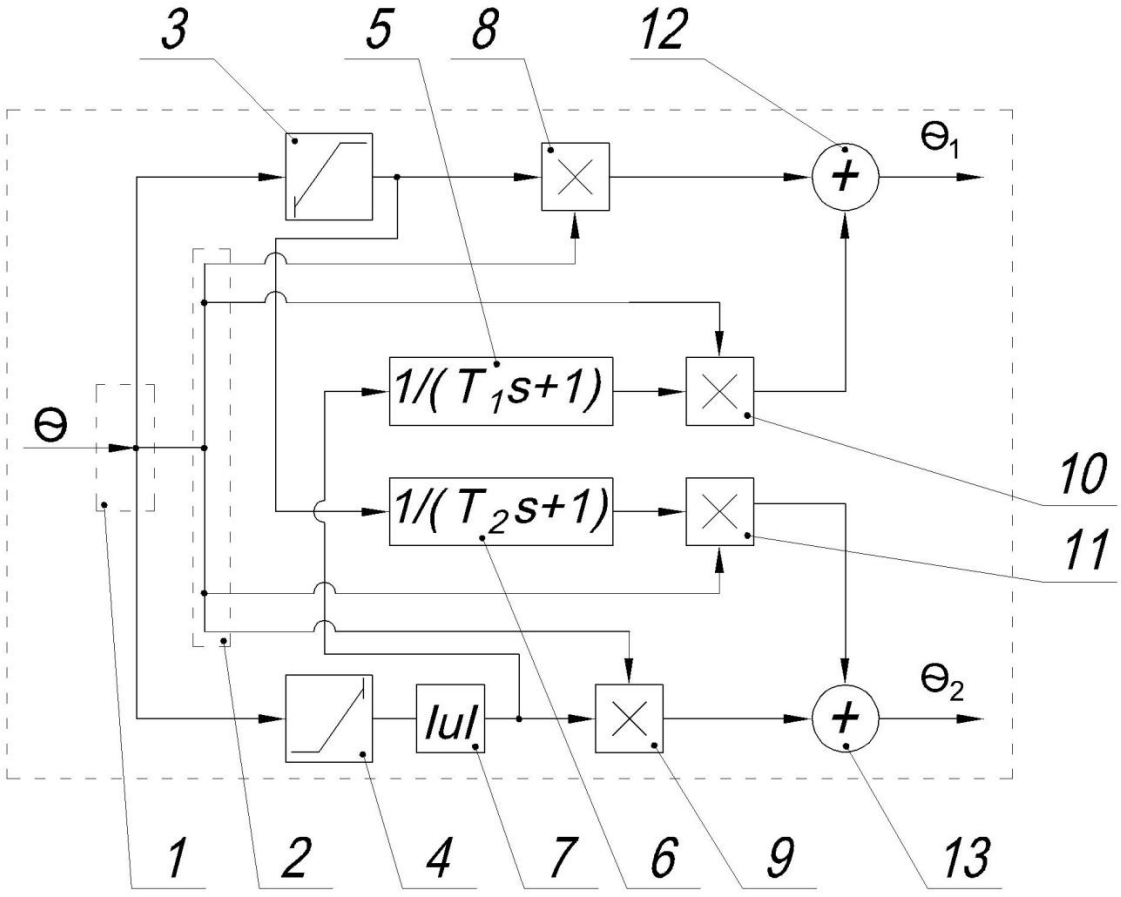

Рисунок 3.8 – Схема устройства компенсации зазора с перекрёстными связями

Принцип работы, последовательность преобразования сигналов управления устройством компенсации зазора, параметры работы электропривода с разработанным устройством, а также особенности настройки следует рассмотреть отдельно.

3.8 Анализ путей восстановления кинематической точности ОПУ

Исследование возможностей обеспечения кинематической точности ОПУ путём восстановления слоя материала, а также путём применения устройства компенсации зазора позволило установить, что оба пути применимы.

Восстановление слоя материала позволит повысить точность механических передач редукторов на момент проведения работ, в дальнейшем, под воздействием коррозии и эксплуатационного износа, точность будет снижаться, что приведёт к потребности проведения повторных работ.

Использование устройства компенсации зазора позволит обеспечить точность приводных систем при эксплуатации и не потребует проведения дополнительных работ по восстановлению точности, также данный путь не потребует закупки дорогостоящего специализированного оборудования и материалов, для нанесения слоя металла, потерянного в результате коррозии, поэтому применение устройства компенсации зазора для обеспечения точности приводных систем после продолжительного нахождения в условиях атмосферы является предпочтительным.

Из трёх известных схем устройства компенсации зазора в исследуемом ОПУ возможно применение только схемы с введением сигнала смещения, поскольку только эта схема обеспечивает суммирование моментов отдельных исполнительных механизмов. Существенным недостатком данной схемы является высокая потеря энергии на взаимное нагружение каналами привода друг друга, что приводит к снижению КПД системы, поэтому разработка устройства компенсации зазора с повышенным быстродействием и КПД является актуальной задачей.

Выводы по главе 3

1) В результате анализа распределения кинематической ошибки по ступеням редуктора, возникшей в результате коррозии, вызванной длительным нахождением в условиях атмосферы, определены наиболее значимые с позиции кинематической точности элементы, которые следует восстанавливать в размерах, для обеспечения требуемой кинематической точности.

2) Установлено, что обеспечение кинематической точности путём восстановления геометрических параметров деталей не является эффективным способом для приводных систем исследуемого опорно-поворотного устройства в долгосрочной перспективе, поскольку совместное действие коррозии и износа при эксплуатации, будут приводить к снижению кинематической точности.

3) Рассмотрены основные способы компенсации зазора в приводных системах с несколькими исполнительными электродвигателями, в результате установлено, что для исследуемого опорно-поворотного устройства возможно применение устройства компенсации зазора на основе введения сигнала смещения.

4) Проведённый сравнительный анализ возможных путей обеспечения кинематической точности, а также экономическая оценка реализации рассмотренных путей показывает, что для электропривода, содержащего четыре исполнительных электродвигателя, наиболее эффективным способом обеспечения кинематической точности является использование устройства компенсации зазора.

5) В результате рассмотрения различных устройств компенсации зазора в механических передачах предложена новая схема устройства компенсации зазора с перекрёстными связями.

Глава 4 Устройство компенсации зазора с перекрёстными связями

4.1 Принцип работы устройства компенсации зазора с перекрёстными связями

Ранее, в главе 3 было показано, что одним из перспективных путей обеспечения точности приводов ОПУ с несколькими исполнительными механизмами после продолжительного воздействия коррозии является использование устройства компенсации зазора. В процессе работы разработана и предложена схема устройства компенсации зазора с перекрёстными связями (рисунок 3.8). Рассмотрим подробно принцип работы схемы с перекрёстными связями.

Исследуя работу электропривода с зазором (люфтом), обращает на себя внимание тот факт, что при прохождении гармонического сигнала через математический блок люфта (кривая 1 на рисунке 4.1) происходит уменьшение сигнала по амплитуде – А, что приводит к смещению фазы – Б (кривая 2 на рисунке 4.1).

Данное смещение фаз не зависит от частоты, но изменяется при изменении амплитуды, это смещение выходного сигнала по форме напоминает задержку сигнала. Эта особенность положена в основу разработки нового устройства компенсации зазора.

В разработанной схеме устройства в первый канал (в дальнейшем будем называть его ведущим) поступает сигнал управления без изменений (кривая 1 на рисунке 4.1), во второй канал (будем называть его реверсивным) сигнал поступает с задержкой (кривая 3 на рисунке 4.1) так, что изменение сигнала по амплитуде α оказывается большим, чем изменение производимое блоком люфта $\delta\varphi$ (кривая 2 на рисунке 4.1). Указанное изменение по амплитуде и фазе достигается введением апериодических звеньев с постоянными времени – T_1, T_2, величины которых определяют амплитуды смещения. На этапе рассмотрения принципа действия

устройства компенсации зазора примем, что постоянные времени одинаковы, т.е. $T_1 = T_2$.

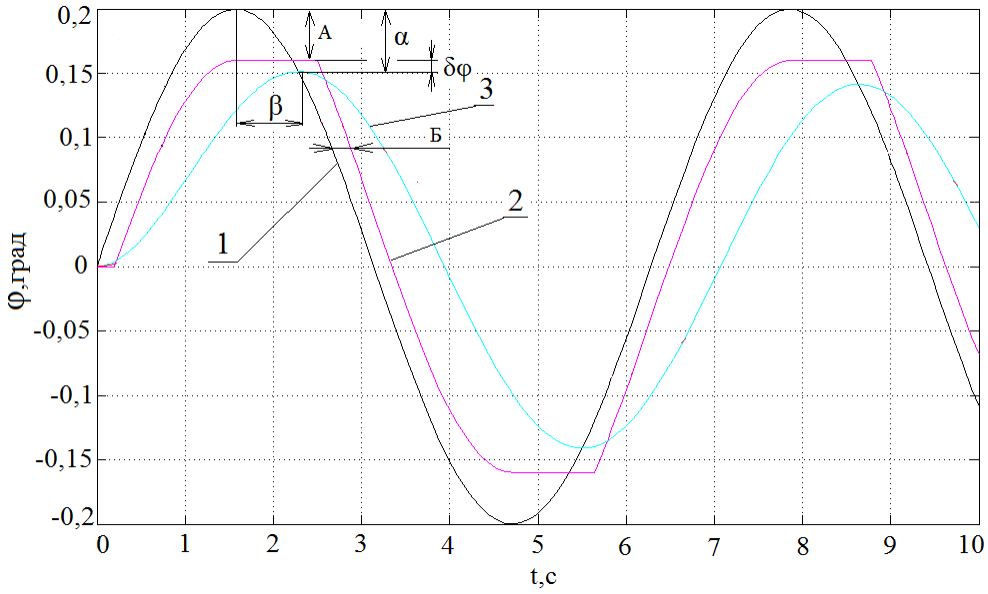

Рисунок 4.1 – Смещение сигналов вызываемых люфтом и блоком задержки.

где 1 – гармонический сигнал, 2 – сигнал смещённый люфтом, 3 – сигнал смещённый блоком задержки во втором канале

Данное смещение управляющего сигнала, большее, чем смещение, производимое люфтом, приводит к отставанию реверсивного канала от ведущего при отработке большему, чем на величину люфта. Поскольку ведущий и реверсивный каналы связаны общим выходным колесом, фактическое отставание реверсивного канала будет равно величине люфта, а дополнительное смещение δφ приведёт к возникновению тормозного момента, производимого реверсивным каналом. Тормозной момент будет тем выше, чем больше разница амплитуд δφ. Отсюда следует, что величина смещения в реверсивном канале и, соответственно, момент, определяются величиной люфта.

Известно, что наибольшее влияние в следящей системе люфт оказывает при изменении направления движения, в этот момент происходит изменение рабочих поверхностей (сторон) зубьев, и на время этого переключения система оказывается разомкнутой. Изменение направления движения объекта управления требует переключения каналов из ведущего режима в реверсивный режим и наоборот.

Переключения используются для исключения раскрытия зазора при изменении направления движения. Для этой цели используются переключающие фильтры и перекрёстные связи.

Изменением направления движения в системе замкнутой основной обратной связью по положению, является момент перехода сигнала динамической ошибки через нулевое значение. При переходе сигнала динамической ошибки через ноль происходит переключение фильтров ограничителей сигнала с 1 на 0, и с 0 на -1. Данные фильтры выполняют функции реле. Принцип действия фильтров, перекрёстных связей рассмотрим на примере гармонического сигнала наведения.

Последовательность преобразования гармонического сигнала наведения устройством компенсации зазора с перекрёстными связями (рисунок 3.8) поясняется осциллограммами сигналов на выходах отдельных звеньев данного устройства, которые показаны на рисунке 4.2. Сигнал динамической ошибки θ (рисунок 4.2а) через разветвитель 1 устройства компенсации зазора поступает на входы фильтров с ограничителями 3,4, на выходах которых сигналы положительной (рисунок 4.2б), либо отрицательной (рисунок 4.2в) единицы. Каждый из фильтров имеет по два выхода, сигналы с первого выхода фильтров умножаются блоками 8 и 9 на сигнал динамической ошибки (рисунок 4.2г, 4.2д). Два других сигнала с фильтров проходят апериодические звенья 5,6 с постоянной времени T_1, T_2 (рисунок 4.2е, 4.2ж), и умножаются блоками 10,11 на сигнал динамической ошибки (рисунок 4.2и, 4.2к). Полученные сигналы поступают на сумматоры 12,13 каналов управления (рисунок 4.2л). При изменении знака динамической ошибки происходит переключение фильтров и изменение сигналов на выходах сумматоров 12 и 13.

Каналы привода 4,5 (рисунок 3.5) по получаемым сигналам θ_1, θ_2 формируют управляющие напряжения и токи двигателей, моменты которых обеспечивают движение объекта управления 6 с заданными скоростями и ускорениями.

При изменениях знака динамической ошибки и переключении фильтров, сигнал управления реверсивным каналом меньше сигнала ведущего канала, что приводит к появлению значительного момента торможения, компенсирующего

зазор во всей механической цепи. Реализуется эффект электромеханического торсиона. При установившемся движении (режим нарастания скорости и ускорения) дополнительный сигнал близок к основному сигналу ведущего канала. Поэтому моменты отдельных исполнительных механизмов суммируются. Уровень сигнала (величина смещения) в реверсивном канале зависит от выбранной постоянной времени апериодического звена.

Таким образом, эффект компенсации зазора достигается смещением амплитуды сигнала в реверсивном канале электропривода. Если указанное смещение амплитуды больше, чем смещение, вызванное действием зазора, то в системе действует момент распора, данный режим работы устройства компенсации зазора с перекрёстными связями будем называть режимом силового распора.

Если постоянные времени апериодических звеньев выбраны таким образом, что смещение в реверсивном канале меньше смещения, производимого действием зазора, то моменты распора не возникают. Данный режим работы будем называть режимом без распора.

Рассмотрим подробно работу электропривода с устройством компенсации зазора с перекрёстными связями в моментном режиме работы, а также в режиме без распора. Анализ параметров работы электропривода с устройством компенсации зазора с перекрёстными связями в режимах силового распора и без распора предпочтительно провести путём моделирования. Для этого построена модель исследуемого электропривода.

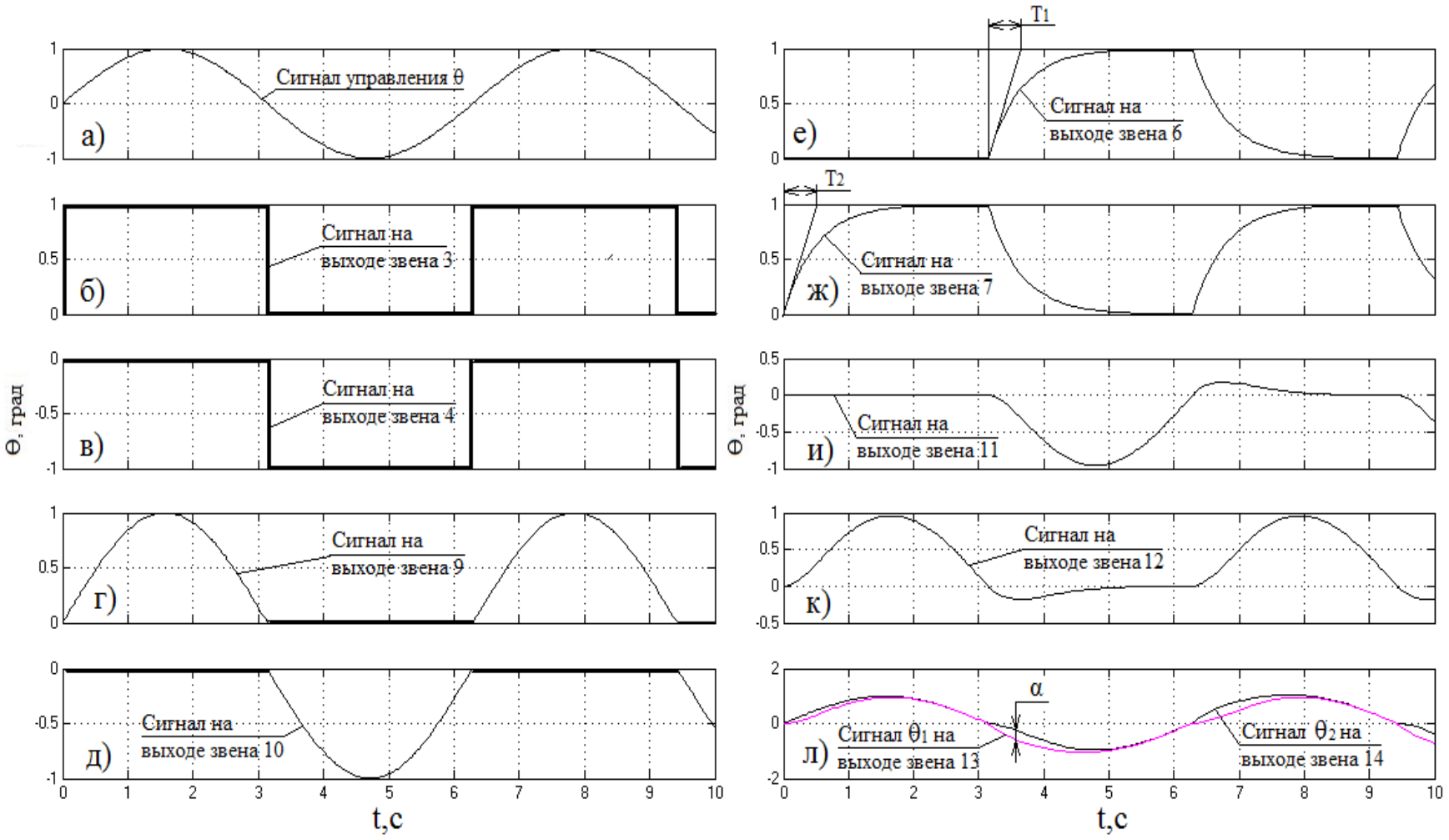

Рисунок 4.2 – Схема преобразования сигналов устройством компенсации зазора с перекрёстными связями

4.2 Построение математической модели электропривода в программной среде Simulink

Функционально исследуемый электропривод состоит из следующих блоков: согласующего усилителя-сумматора, усилителей мощности каналов управления, включая последовательно соединённый с усилителем электродвигатель, промежуточные механические передачи, содержащие зазор в кинематической связи с общим выходным колесом, жёстко соединённым с объектом управления, а также обратную связь по положению.

Математическая модель электропривода представляет собой систему дифференциальных уравнений, записываемых в обычной форме, или в форме структурной схемы [53,54]. Построение математической модели удобно производить, используя систему имитационного блочного моделирования Simulink.

Для оценки работы электропривода с устройством компенсации зазора, составлена математическая модель в программной среде Simulink, состоящая из двух исполнительных механизмов, работающих на общую нагрузку. В модели люфт представлен блоком «зона нечувствительности», последовательно соединённым с блоком жёсткости передачи. Данное представление звеньев используется для построения моделей с несколькими исполнительными механизмами в структуре следящего привода [55]. Структурная схема разработанной модели показана на рисунке 4.3, где $\varphi_{ц}$ – сигнал целеуказания; θ – сигнал динамической ошибки; $U_{у}$ – напряжение управления; $i_{я}$ – ток двигателя; $M_{дв}$ – момент развиваемый двигателем; $\ddot{\varphi}_{дв}$ – ускорение развиваемое двигателем; $\dot{\varphi}_{дв}$ – скорость двигателя; $\varphi_{дв}$ – угол поворота двигателя; $\varphi_{ред}$ – угол поворота вала редуктора; $M_{1,2}$ – момент на валу редуктора; $\ddot{\varphi}_{н}$ – ускорение развиваемое нагрузкой; $\dot{\varphi}_{н}$ – скорость нагрузки; $\varphi_{с}$ – отработка нагрузкой сигнала наведения.

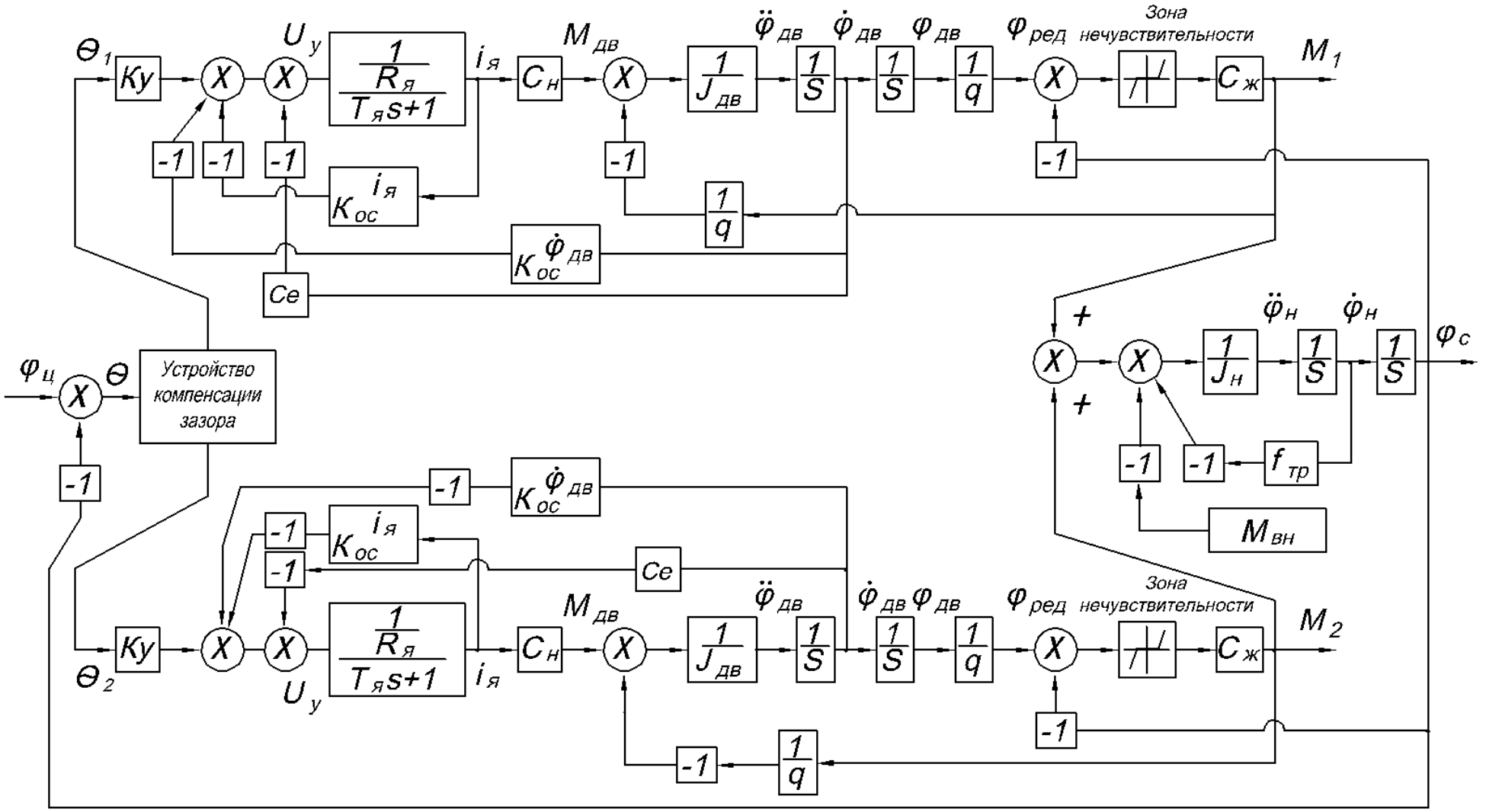

Рисунок 4.3 – Структурная схема системы с нелинейностью люфт

Построенная в программной среде Simulink модель представлена на рисунках 4.4 – 4.9.

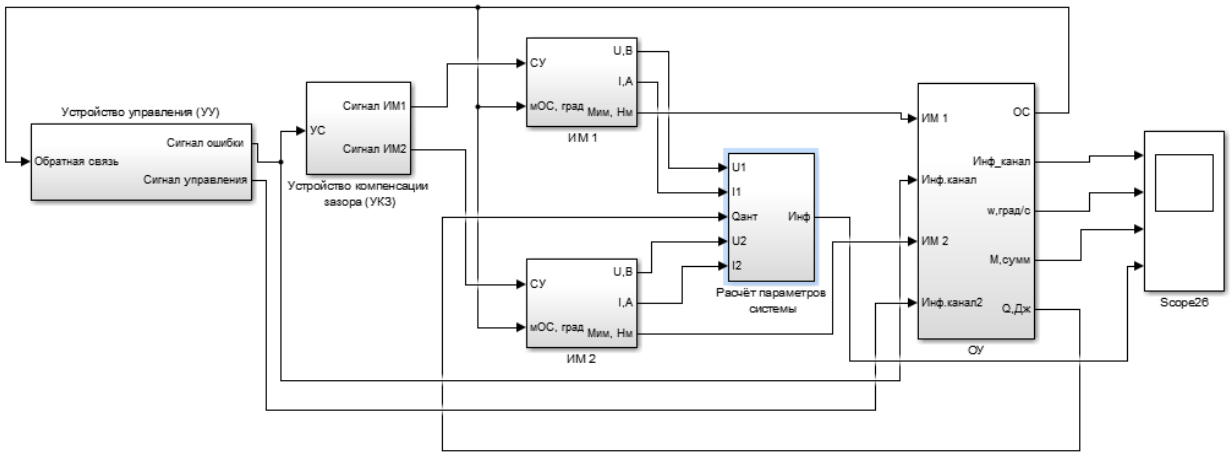

Рисунок 4.4 – Модель электромеханического привода, состоящая из двух исполнительных механизмов

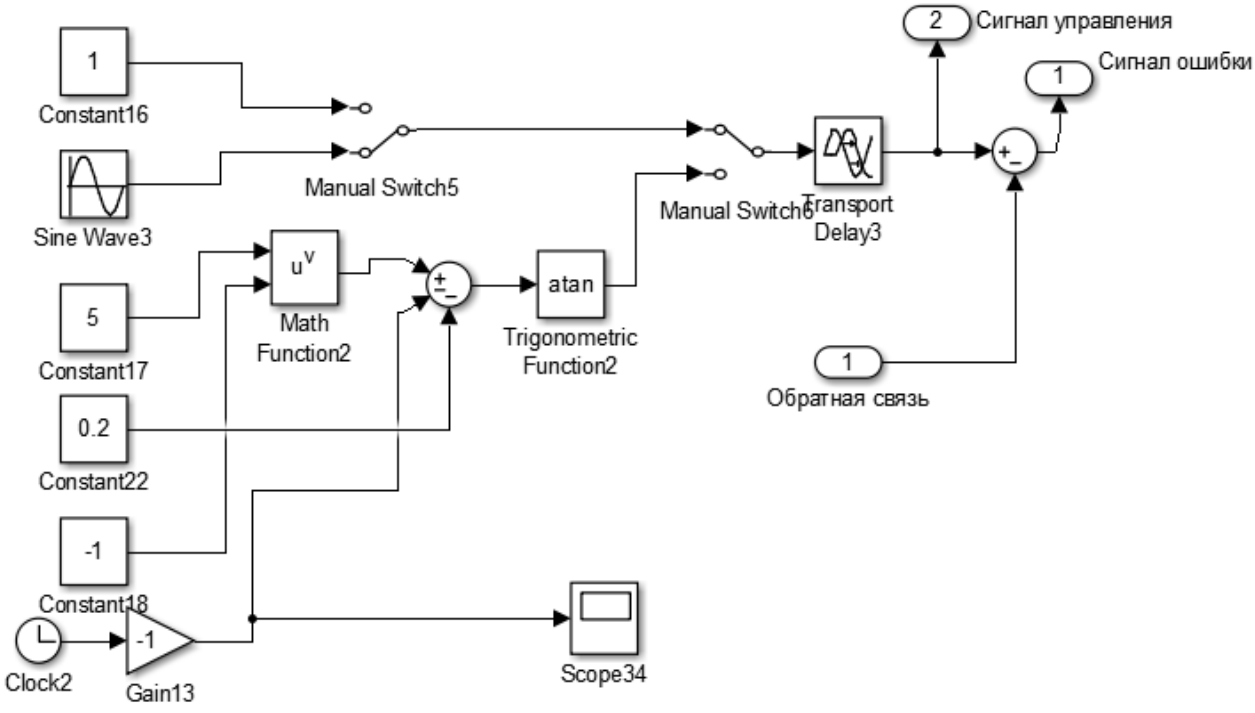

Рисунок 4.5 – Структура устройства управления

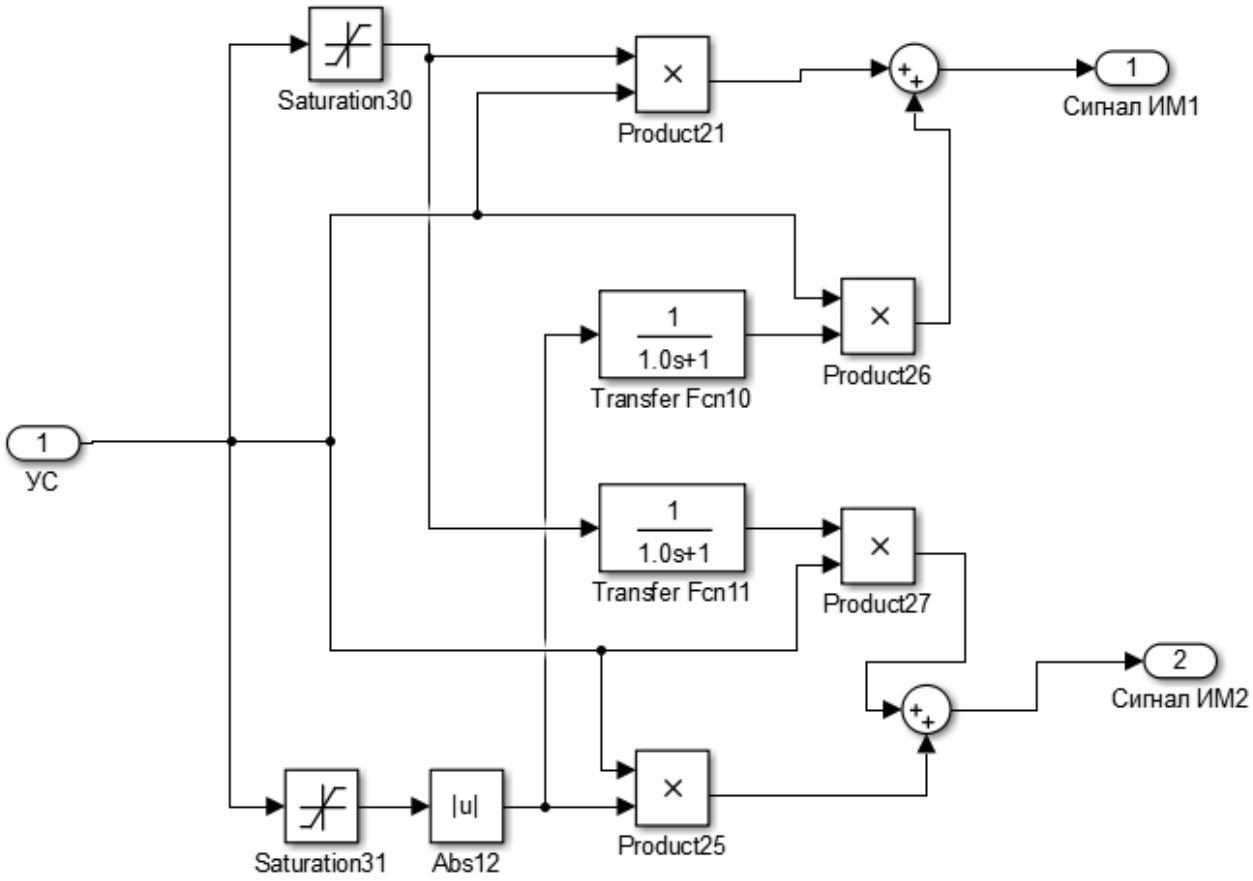

Рисунок 4.6 – Структура устройства компенсации зазора с перекрёстными связями

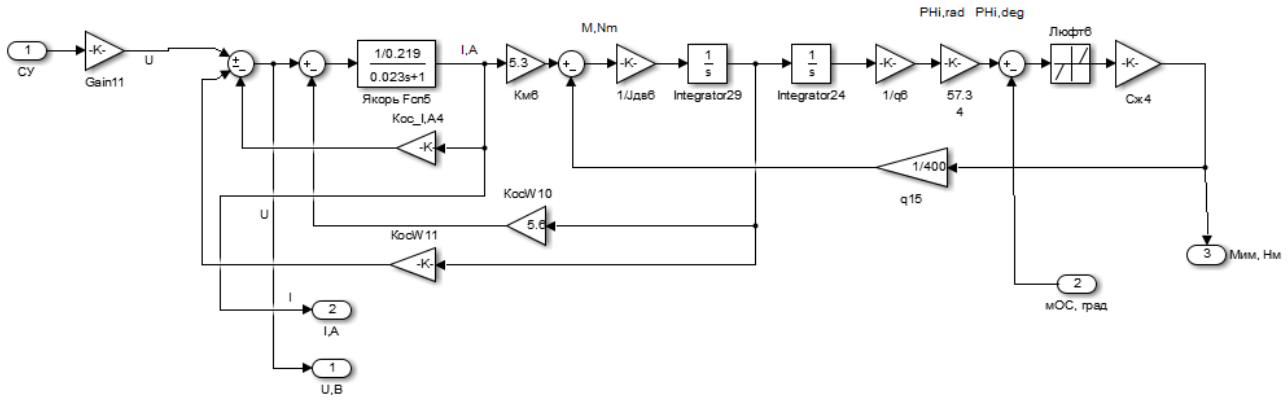

Рисунок 4.7 – Структура исполнительного механизма электромеханического привода

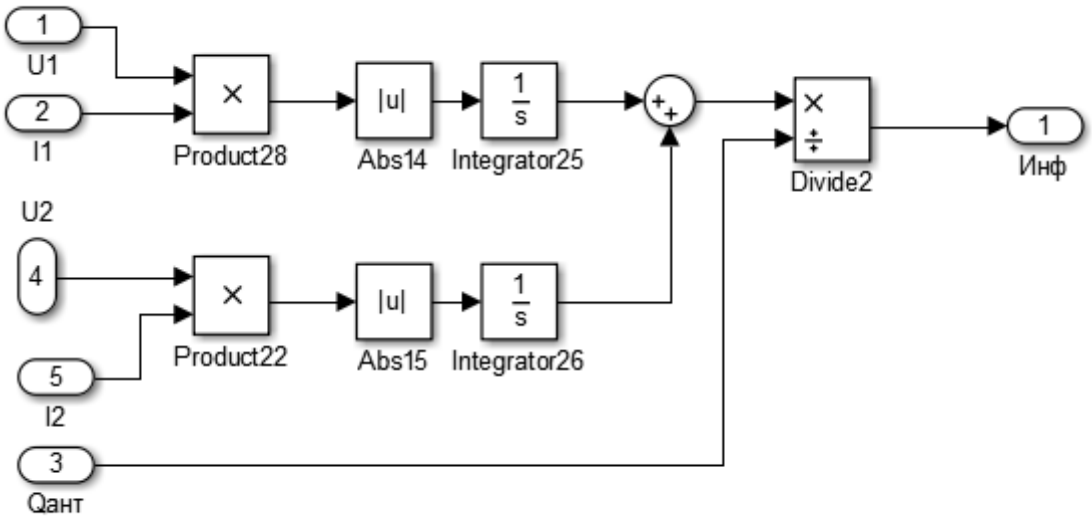

Рисунок 4.8 – Структура информационного устройства

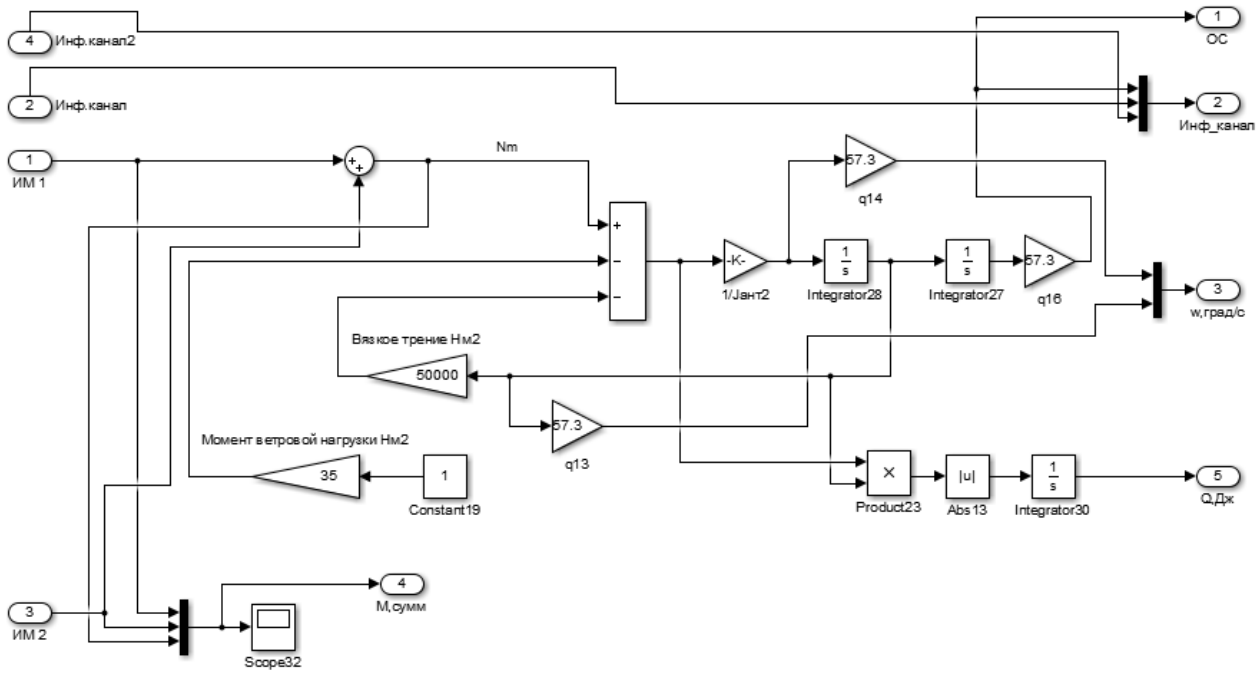

Рисунок 4.9 – Структура объекта управления

Построив математическую модель электропривода на основе программного комплекса Simulink, следует произвести моделирование работы электропривода с зазором и устройством компенсации зазора с перекрёстными связями в режиме силового распора и без распора, которое позволит понять особенности работы устройства с перекрёстными связями.

4.3 Анализ параметров работы электропривода с устройством компенсации зазора с перекрёстными связями

В параграфе 4.1 показано, что режим, при котором сигнал в реверсивном канале имеет смещение большее, чем смещение, производимое действием люфта, приводит к возникновению момента торможения, компенсирующего зазор. Величина и продолжительность момента компенсации зазора зависит от выбранной постоянной времени апериодического звена, а также параметров сигнала наведения. Режимы работы рассмотрим на примере гармонического сигнала наведения. Величина люфта соответствует измеренному экспериментальному значению, полученному в главе 2. Постоянные времени T_1, T_2 = 1с. Осциллограммы отработки электроприводом с устройством компенсации зазора с перекрёстными связями гармонического сигнала наведения амплитудой 1^0 показаны на рисунке 4.10.

Результаты моделирования показывают, что электропривод с устройством компенсации зазора отрабатывает гармонический сигнал наведения (рисунок 4.10а), люфт не оказывает влияния на параметры отработки. Устройство обеспечивает плавное изменение скорости и ускорения объекта управления при отработке (рисунок 4.10б). В момент включения наблюдается плавное изменение координат, скорости и ускорения, что свидетельствует о высоком качестве переходного процесса (рисунок 4.10 а, б). На рисунке 4.10в показаны осциллограммы моментов отдельных исполнительных механизмов и суммарный момент привода. На осциллограммах наблюдаются участки суммирования моментов отдельных исполнительных механизмов (без распора), также наблюдаются участки, на которых действуют моменты распоров, связанные с компенсацией зазора.

На рисунке 4.10г показана осциллограмма изменения КПД системы с устройством компенсации зазора, которая характеризует отношение количества энергии, подводимого к объекту управления (в модели это произведение момента объекта управления и угловой скорости, проинтегрированное по времени) к

общему количеству энергии, потребляемому электродвигателями (в модели это сумма модулей электрический мощности проинтегрированная по времени). Из осциллограммы следует, что для исследуемого электропривода с выбранной постоянной времени КПД примерно равен 60%.

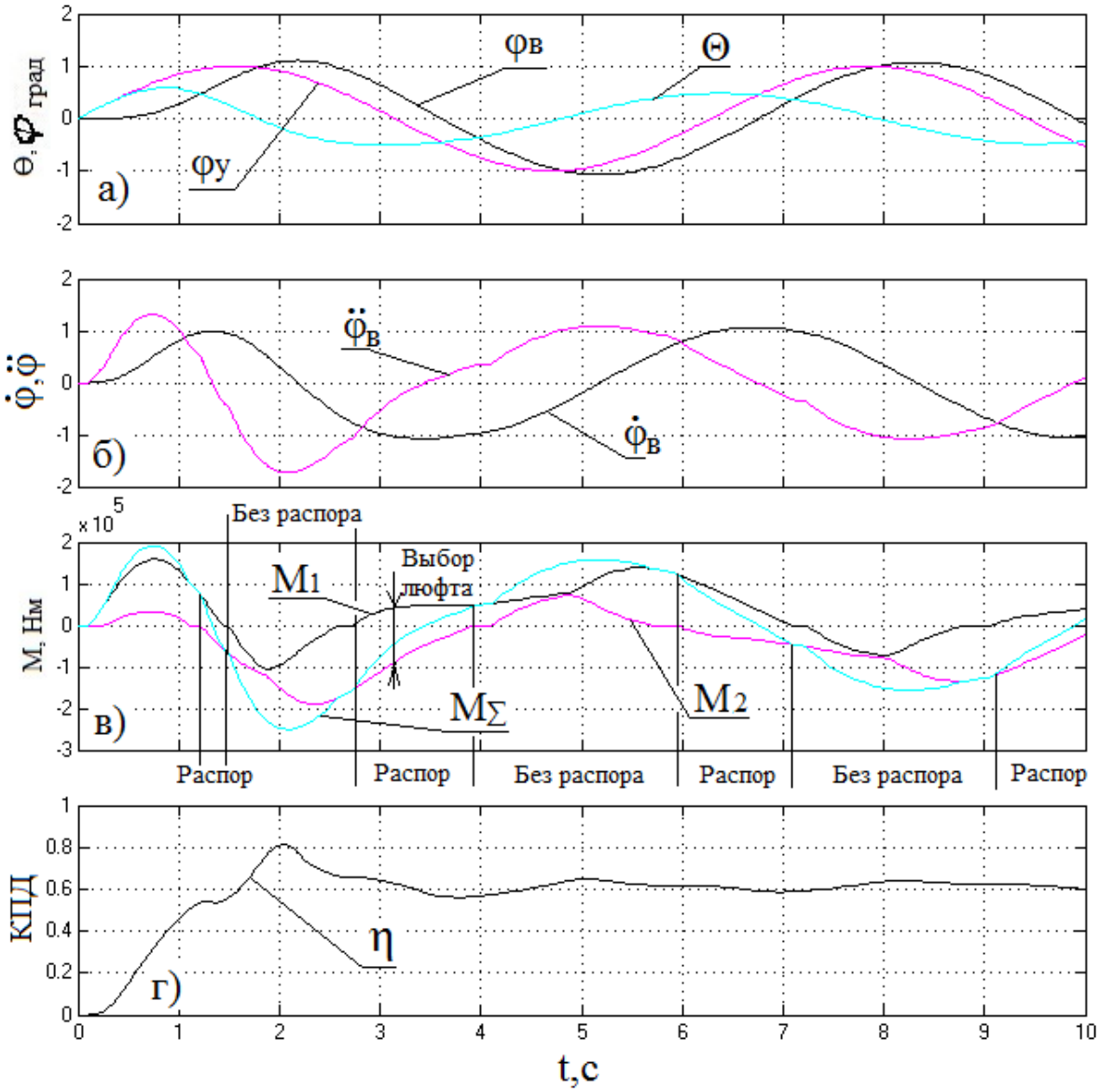

Рисунок 4.10 – Осциллограммы работы электропривода с устройством компенсации зазора с перекрёстными связями для значений T_1, T_2 =1с и амплитуды сигнала наведения 1^0: а) сигнал наведения φ_y, отработка приводом сигнала наведения $\varphi_в$ и сигнал динамической ошибки привода θ; б) скорость и ускорение, развиваемые объектом управления; в) моменты, развиваемые отдельными исполнительными механизмами, и суммарный момент привода; г) коэффициент полезного действия (КПД) электропривода - η

Рассмотрим параметры отработки электроприводом с люфтом в механических передачах и устройством компенсации зазора гармонического сигнала наведения амплитудой 1^0 при меньшем значении постоянных времени апериодических звеньев $T_1, T_2 = 0{,}5$с и величине люфта, соответствующей результатам экспериментальных исследований, полученных в главе 2 (рисунок 4.11).

Выбранные значения постоянных времени позволяют обеспечить электроприводу плавность отработки сигнала наведения (рисунок 4.11а). Сигнал динамической ошибки также имеет плавную характеристику. Осциллограммы моментов (рисунок 4.11в) показывают, что в системе нет моментов распоров, а моменты отдельных исполнительных механизмов суммируются во всём диапазоне отработки. Однако обращают внимание наличие участков, на которых моменты принимают нулевое значение, связанное с прохождением исполнительных механизмов через зону люфта. Действие люфта можно наблюдать и на осциллограммах скорости и ускорения объекта управления (рисунок 4.11б). Важной особенностью данного режима является то, что люфт не оказывает влияния на точность отработки сигнала наведения, и не приводит к возникновению автоколебаний. Данный эффект становится возможным за счёт неравенства сигналов управления при изменении направления движения.

В момент переключений, отдельные исполнительные механизмы развивают моменты, величины которых не равны по амплитуде и сдвинуты по фазе (рисунок 4.12). Таким образом, при изменении направления движения и преодолении люфта, устройство компенсации зазора производит в системе два импульса, сдвиг которых по фазе β гасит автоколебания. Отличительной особенностью работы устройства компенсации зазора без распора является повышенный КПД (рисунок 4.11г), который приближается к 85%.

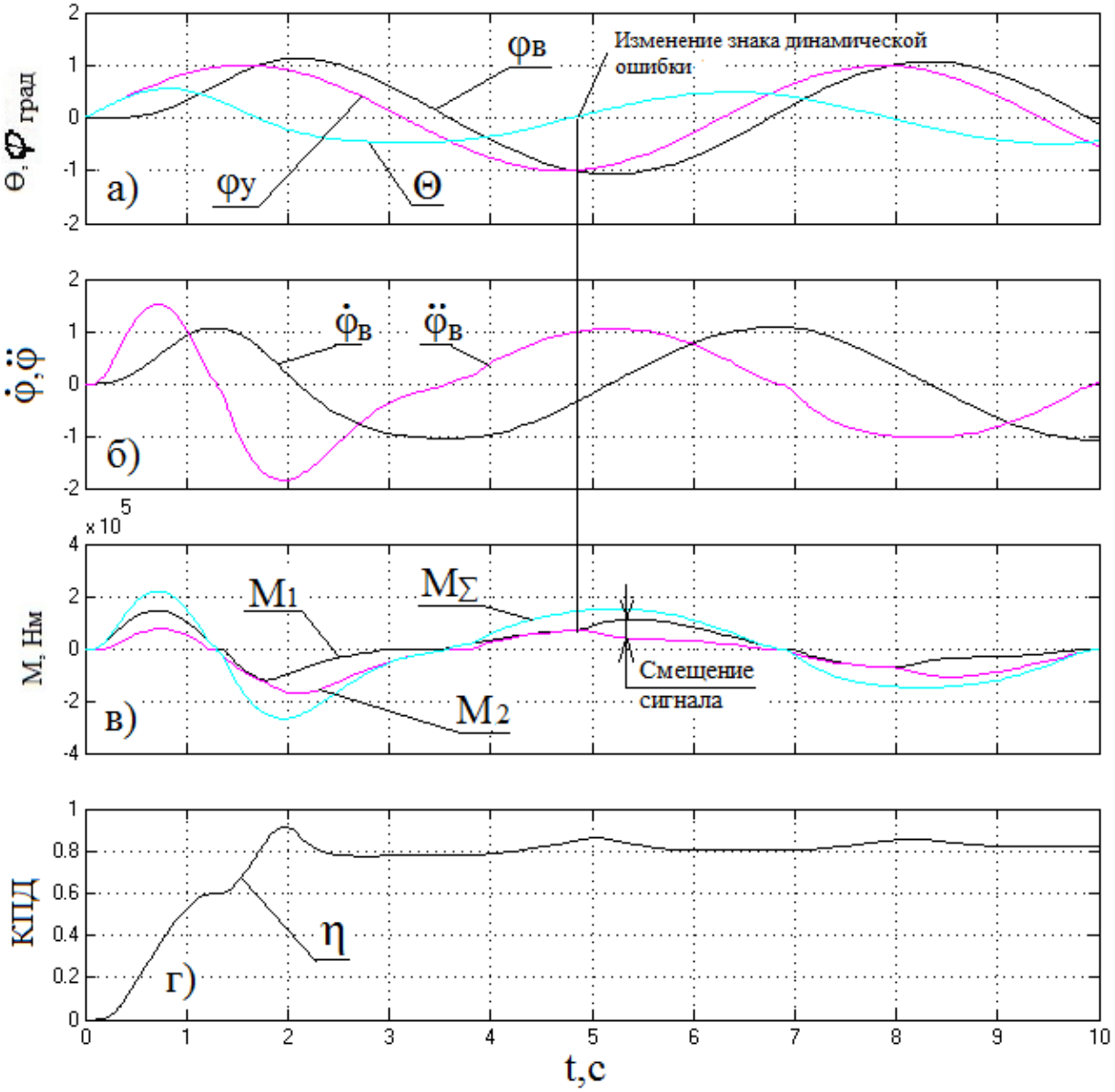

Рисунок 4.11 – Осциллограммы работы электропривода с устройством компенсации зазора с перекрёстными связями для значений T_1, T_2 =0,5с и амплитуды сигнала наведения 1^0: а) сигнал наведения φ_y, отработка приводом сигнала наведения $\varphi_в$ и сигнал динамической ошибки привода θ; б) скорость и ускорение, развиваемые объектом управления; в) моменты, развиваемые отдельными исполнительными механизмами, и суммарный момент привода; г) коэффициент полезного действия (КПД) электропривода - η

Зависимость КПД электропривода от выбранных значений постоянных времени T_1, T_2 показана на рисунке 4.13. График получен путём моделирования отработки электроприводом гармонического сигнала наведения амплитудой 1^0.

Рисунок показывает, что увеличение постоянных времени T_1, T_2 приводит к снижению КПД, поскольку увеличиваются смещения в реверсивном канале и в системе начинают появляться моменты распоров, которые приводят к потерям энергии.

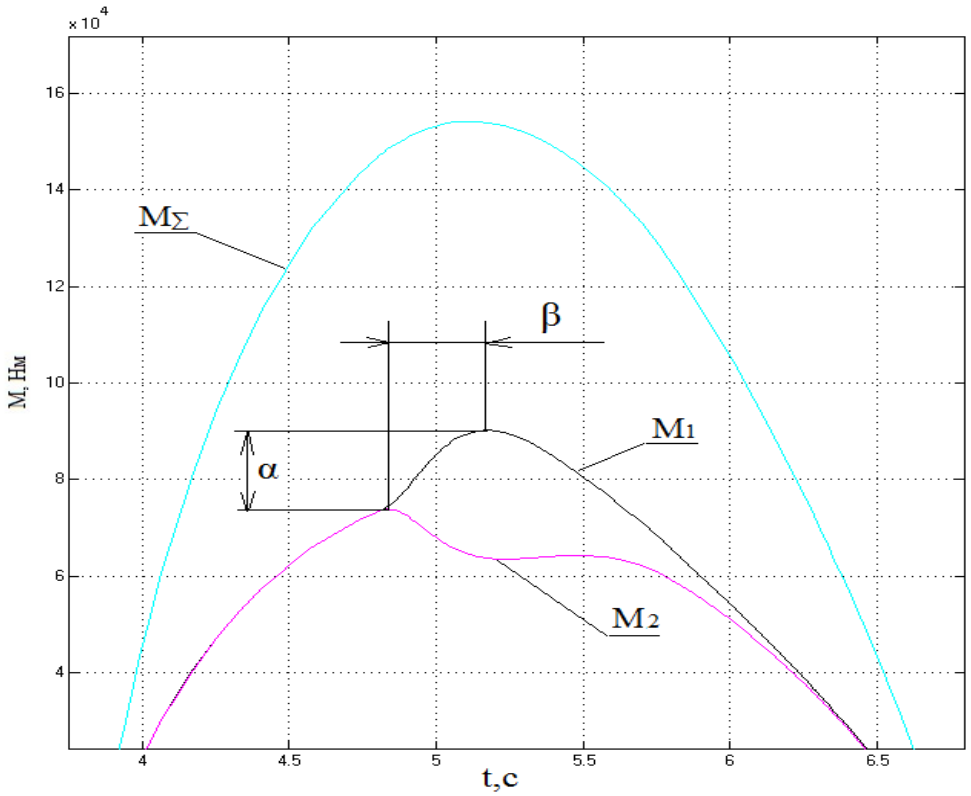

Рисунок 4.12 – Смещение сигнала управления в реверсивном канале при изменении направления движения

Таким образом, устройство компенсации зазора с перекрёстными связями в режиме работы без распора, при сниженных значениях постоянных времени, обеспечивает точность отработки сигналов наведения без возникновения автоколебаний, за счёт фазового смещения управляющего сигнала реверсивного канала в момент изменения направления движения и обеспечивает повышенный КПД электропривода.

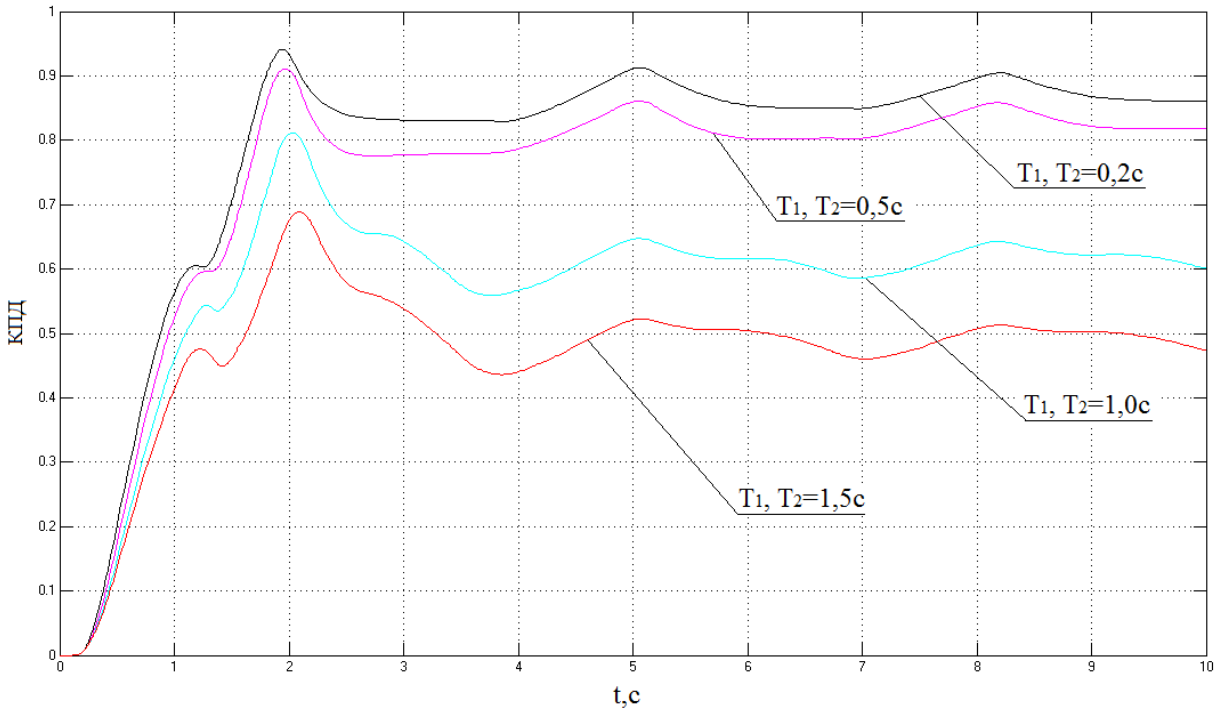

Рисунок 4.13 – Зависимость КПД электропривода от выбранных значений постоянных времени T_1, T_2

4.4 Зависимость параметров устройства компенсации зазора с перекрёстными связями от величины люфта

Проведённый анализ параметров работы электропривода с устройством компенсации зазора с перекрёстными связями показал, что увеличение значений постоянных времени – T_1, T_2 апериодических звеньев приводит к увеличению смещения управляющего сигнала в реверсивном канале, а также снижению КПД электропривода и увеличению моментов распоров отдельных исполнительных механизмов при переключениях.

Путём моделирования, установлено, что для выбранного сигнала наведения и величины люфта существует такое значение постоянной времени – T_1, T_2 = 0,65с, при котором фазовое смещение в реверсивном канале приближено к смещению, производимому действием люфта. Относительно этой точки построен принципиальный график режимов работы электропривода и моментов отдельных исполнительных механизмов от величины – T (рисунок 4.14). Данную точку, для

удобства, будем называть точкой перехода. При выборе значений – T_1, T_2 левее точки перехода электропривод будет работать без моментов распора, правее – в системе будут существовать моменты компенсации зазора. Увеличение значений T_1, T_2 значительно правее точки перехода будет приводить к снижению участия второго канала в совместной работе вплоть до превращения привода в одноканальный с пассивной нагрузкой, подобно схеме показанной на рисунке 3.4б.

Данный график справедлив только для конкретного значения люфта и параметров сигнала наведения. При выборе значений T_1, T_2 = 0 электропривод будет работать без смещений и сигналы в каналах будут равными.

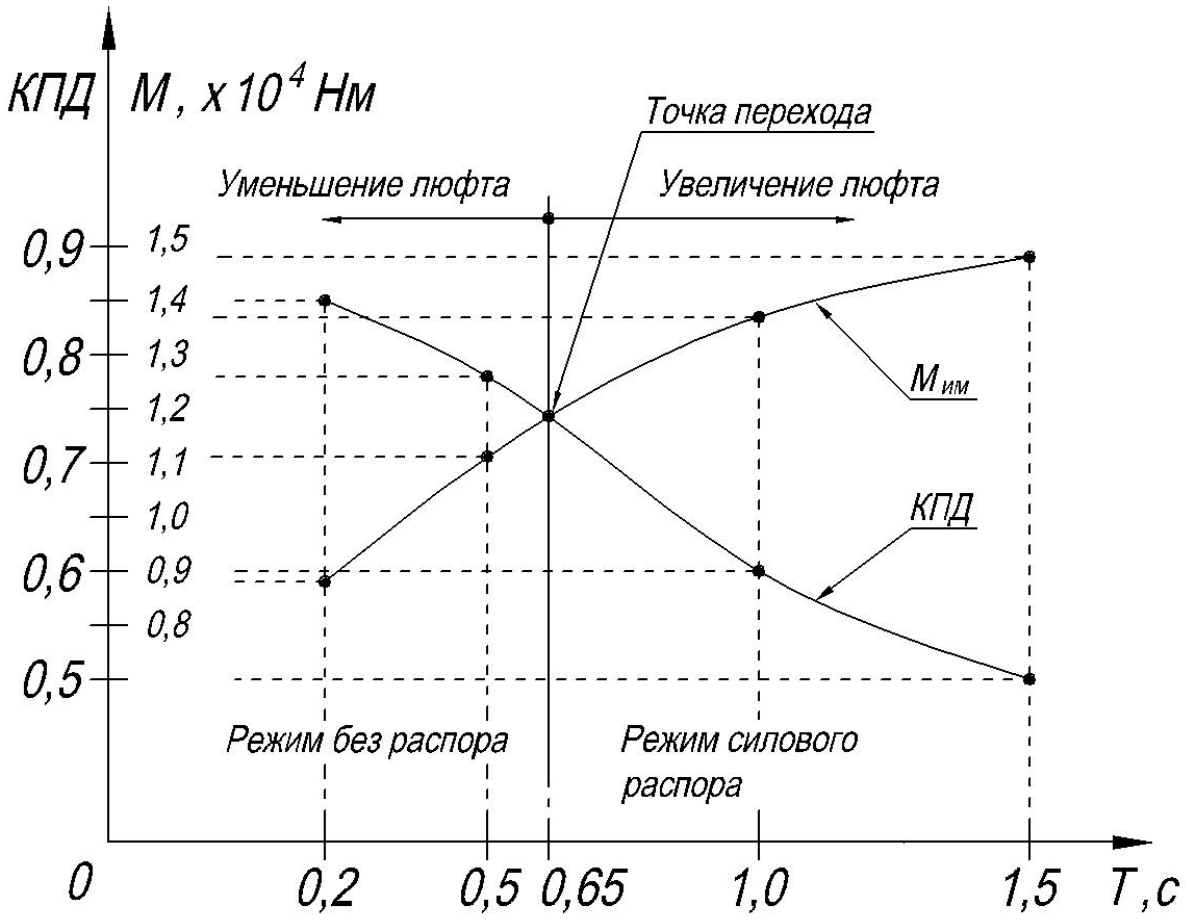

Рисунок 4.14 – Принципиальный график режимов работы электропривода и моментов отдельных исполнительных механизмов от постоянной времени – T устройства компенсации зазора

Увеличение люфта приведёт к смещению точки перехода вправо, снижение люфта – влево. Путём моделирования установлены величины постоянных времени

точки перехода для исследуемого электропривода в диапазоне значений люфта от $0{,}0016^0$ до $0{,}07^0$, данные значения представлены в таблице 4.1.

На основе полученных результатов построен график зависимости постоянной времени динамического запаздывания точки перехода, от величины люфта механической передачи, представленный на рисунке 4.15.

Таблица 4.1 – значения постоянных времени T_1, T_2 точки перехода для различных величин люфта исследуемого электропривода.

	Величины люфта		
Величина люфта, град.	0,016	0,04	0,07
Значение постоянной времени T,с.	0,65	0,95	1,5

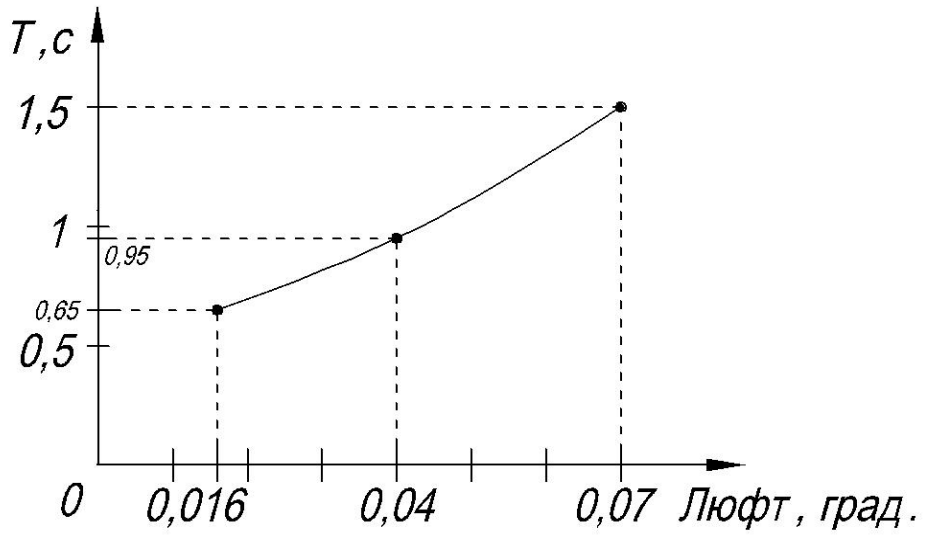

Рисунок 4.15 – График зависимости постоянной времени – T точки перехода от величины люфта для исследуемого электропривода

Конкретные значения – T_1, T_2 зависят от параметров быстродействия электродвигателей и усилителей мощности, поэтому выбор значений необходимо производить индивидуально, на основе результатов рассмотрения каждого конкретного случая.

Точность механических передач, со временем, под влиянием коррозии и износа может снижаться. Поэтому важной задачей является определение значений постоянных времени динамического запаздывания T_1, T_2 в зависимости от величины люфта механических передач.

Из графика следует, что для исследуемого диапазона люфта от $0{,}016^0$ до $0{,}07^0$ зависимость близка к линейной. Данные из таблицы 4.1 зависимости постоянной времени от величины люфта учитываются при разработке регламента технического обслуживания ОПУ на ближайшие годы. Так, при проектировании новой системы управления приводами ОПУ требуется измерить фактическое значение величины люфта в механических передачах и, в соответствии с измеренными величинами, а также результатами моделирования, выбрать параметры апериодических звеньев.

Спустя год с момента введения в эксплуатацию ОПУ произвести измерение фактического значения люфта механических передач приводов ОПУ. При увеличении люфта более чем на $0{,}02^0$ от первоначальной величины, произвести корректировку постоянных времени динамического запаздывания – T_1, T_2 апериодических звеньев для каждого канала, в соответствии с таблицей 4.1.

Операцию по измерению величины люфта механических передач, и корректировке параметров (при необходимости), производить ежегодно в рамках регламента технического обслуживания. Устройство компенсации зазора с перекрёстными связями позволяет обеспечить кинематическую точность приводов ОПУ после продолжительного воздействия атмосферы, а также обеспечить её при последующей эксплуатации.

4.5 Результаты работы устройства компенсации зазора с перекрёстными связями и дальнейшие пути исследования

В результате рассмотрения работы устройства компенсации зазора с перекрёстными связями установлена принципиальная возможность работы электропривода с устройством в двух режимах работы: с силовым распором и без силового распора. Режим силового распора наступает в том случае, если управляющий сигнал во втором канале (реверсивном), имеет смещение большее, чем смещение вызываемое люфтом (рисунок 4.1). Без силового распора указанное смещение меньше смещения, производимого люфтом. Если электропривод работает только с определёнными, заранее известными сигналами наведения, то существует возможность точной настройки режимов работы устройства компенсации зазора с перекрёстными связями (с распором или без распора). При работе электропривода с произвольными (случайными) сигналами наведения возможна переменная работа в двух режимах: с распором и без распора.

Недостатком режима без распора является несколько сниженная плавность изменения скорости и ускорения (рисунок 4.11б), что для исследуемой системы не является принципиальным. Однако работа в режиме без распора значительно эффективнее с позиции затрат энергии (рисунок 4.11г). Поскольку точность и устойчивость исследуемого электропривода с устройством компенсации зазора с перекрёстными связями обеспечивается и в режиме силового распора (рисунок 4.10) и в режиме без распора (рисунок 4.11), получение высоких энергетических характеристик является приоритетной задачей.

Использование устройства компенсации зазора для обеспечения характеристик электроприводов ОПУ после продолжительного воздействия атмосферы является перспективным и эффективным решением. Выбор конкретного устройства компенсации зазора возможен после проведения сравнительного анализа. В дальнейшем, будут рассмотрены параметры работы исследуемого электропривода с устройством компенсации зазора с перекрёстными связями в режиме без распора, как наиболее эффективной с позиции затрат энергии

схемы. В качестве эталонной, для проведения сравнения, будем использовать известную схему устройства компенсации зазора на основе введения сигналов смещения (рисунок 3.6), как наиболее распространённую и эффективную схему, позволяющую обеспечить точность работы электропривода с люфтом и возможность суммирования моментов отдельных исполнительных механизмов в режимах целеуказания.

Выводы по главе 4

1) Установлено, что существует два режима работы устройства компенсации зазора: режим силового распора и режим без распора, который определяется выбором значений постоянных времени – T_1, T_2.
2) Режим силового распора обеспечивает высокую плавность изменения характеристик отработки электропривода, однако приводит к повышенным затратам энергии и снижению КПД.
3) Установлено, что постоянная времени динамического запаздывания – T устройства компенсации зазора связана с величиной люфта в механических передачах опорно-поворотного устройства. Чем выше значение люфта, тем выше величина постоянной времени динамического запаздывания устройства.

Глава 5 Моделирование работы электропривода с различными устройствами компенсации зазора

5.1 Моделирование работы электропривода с люфтом без специализированных устройств компенсации зазора

В структурной схеме исследуемого привода (рисунок 4.3), люфт, относящийся к неоднозначным (петлевым) нелинейностям, соединён последовательно с линейной частью. Результаты моделирования показывают, что первая гармоника выходных колебаний сдвинута по фазе относительно входного гармонического сигнала. Сдвиг по фазе не зависит от частоты входного сигнала, но изменяется при изменении амплитуды. При больших амплитудах сдвиг по фазе мал, при амплитудах, приближающихся к ширине люфта, становится весьма значительным (рисунок 4.1).

Выходным сигналом является угол выходного вала с учётом люфта, значение которого сдвинуто по фазе относительно входного сигнала и ограничено по амплитуде. Как следствие, привод не обеспечивает требуемый закон движения объекта управления.

В следящей системе, замкнутой обратной связью по положению, появление люфта в кинематической схеме механизма приводит к снижению точности, а в некоторых случаях к потере устойчивости и возникновению автоколебаний. Автоколебания проявляются при изменении скорости, в режиме сопровождения и при поступлении гармонического сигнала наведения.

Для приводов рассматриваемого ОПУ наиболее характерны три режима наведения (управляющих сигнала):

1) режим целеуказания, при котором требуется перемещение объекта управления на значительные углы, за минимально возможное время;
2) сигнал гармонического наведения;
3) режим сопровождения, характеризует слежение за удаляющимся объектом с постоянно снижающейся скоростью.

Рассмотрим параметры работы электропривода с люфтом в наиболее характерных режимах наведения. Отработка электроприводом сигнала наведения в режиме целеуказания показана на рисунке 5.1.

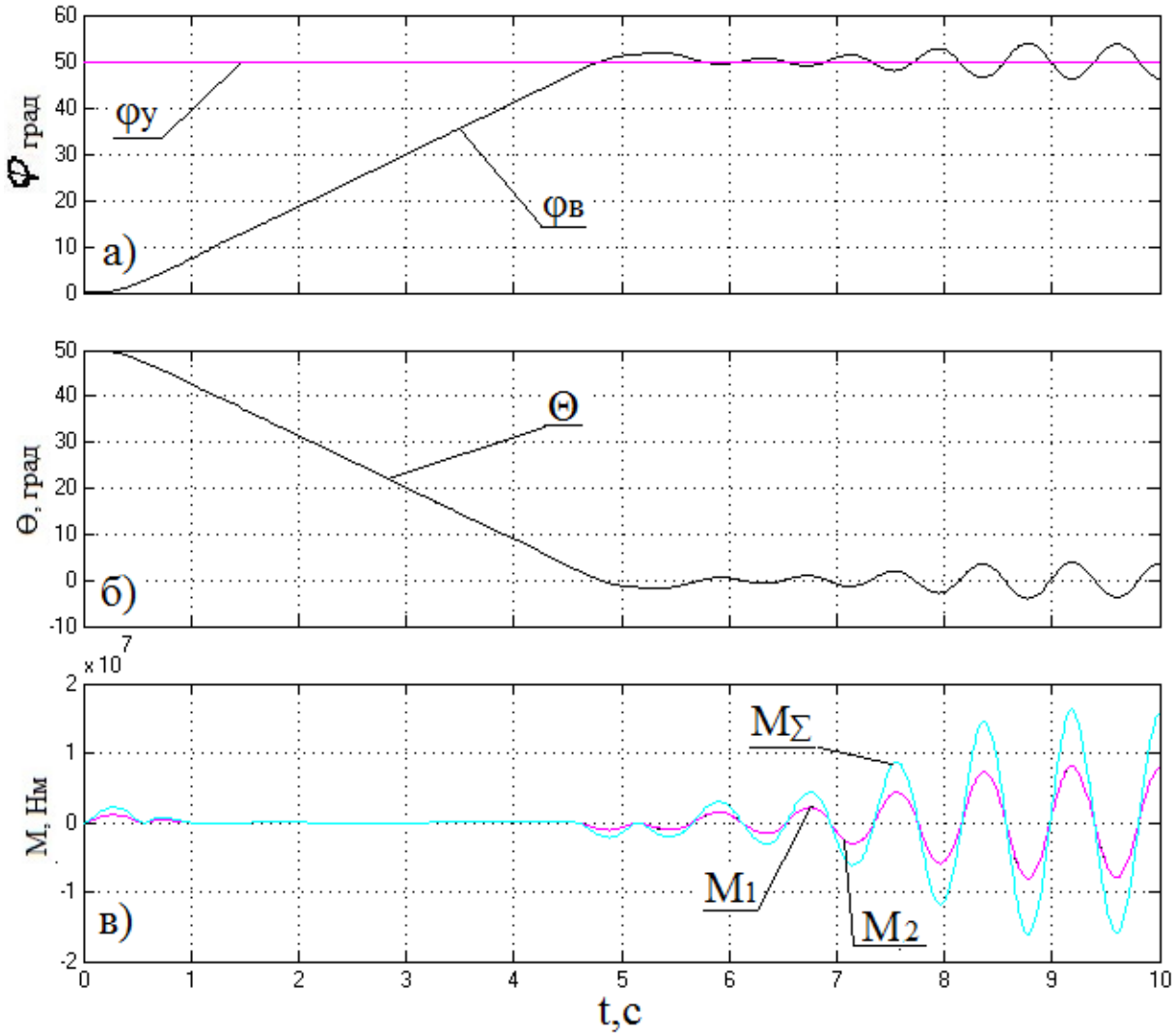

Рисунок 5.1 – Осциллограммы работы привода с люфтом в режиме целеуказания: а) сигнал наведения $\varphi_у$ и возникновение автоколебаний при отработке сигнала наведения $\varphi_в$; б) сигнал динамической ошибки привода θ; в) моменты, развиваемые отдельными исполнительными механизмами, и суммарный момент привода

В данном режиме привод обеспечивает перемещение объекта управления на 50^0 с максимально возможной скоростью (до 12^0/сек для исследуемого привода) и остановку в требуемом положении. В момент включения наблюдается суммирование моментов отдельных исполнительных механизмов (рисунок 5.1в),

при достижении координаты целеуказания наличие люфта препятствует точной остановке привода и вызывает возникновение автоколебаний (рисунок 5.1а).

На рисунке 5.2 показана отработка гармонического сигнала наведения малой амплитуды. В данном режиме люфт приводит к потере точности отработки (рисунок 5.2б) и возникновению толчков, которые хорошо иллюстрирует осциллограмма моментов (рисунок 5.2в).

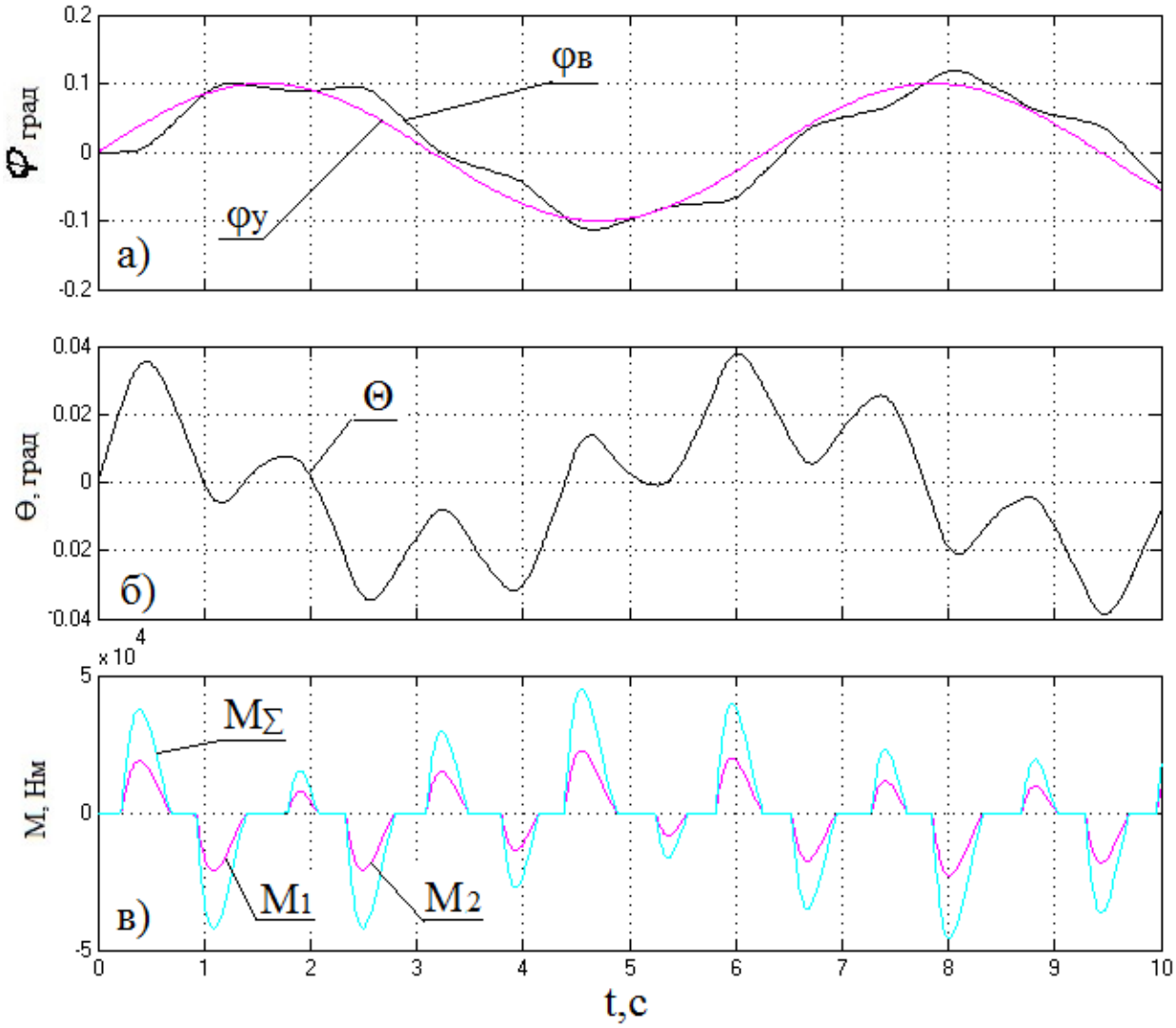

Рисунок 5.2 – Осциллограммы работы привода с люфтом при поступлении гармонического сигнала наведения: а) сигнал наведения φ_y и отработка приводом сигнала наведения $\varphi_в$; б) сигнал динамической ошибки привода θ; в) моменты, развиваемые отдельными исполнительными механизмами, и суммарный момент привода

На рисунке 5.3 показана отработка режима сопровождения. На рисунке 5.3б наблюдаются колебания сигнала ошибки, вызванные люфтом, а осциллограмма моментов (рисунок 5.3в) свидетельствует о возникновении толчков.

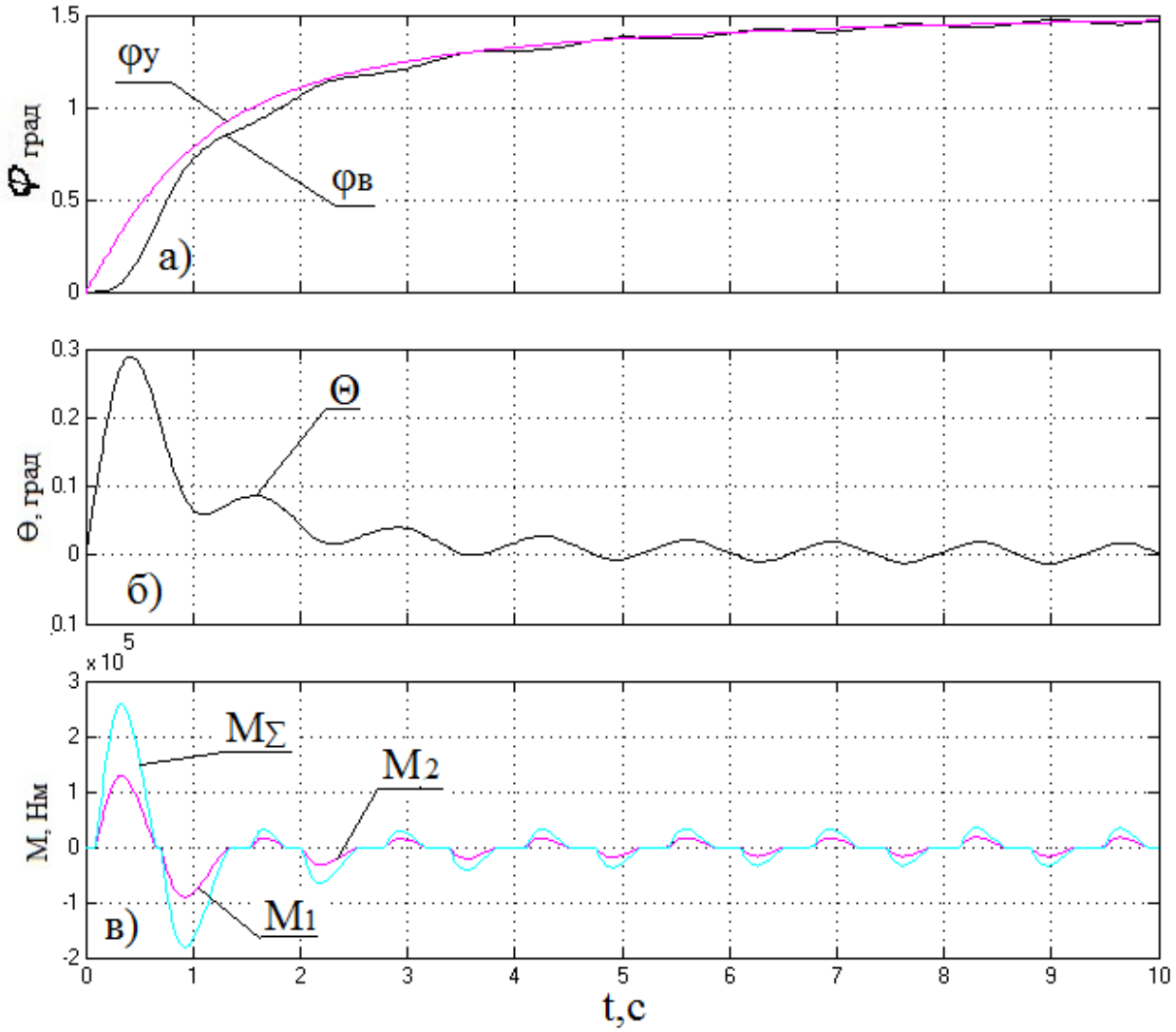

Рисунок 5.3 – Осциллограммы работы привода с люфтом в режиме сопровождения: а) сигнал наведения $\varphi_у$ и отработка приводом сигнала наведения $\varphi_в$; б) сигнал динамической ошибки привода θ; в) моменты, развиваемые отдельными исполнительными механизмами, и суммарный момент привода

Анализ параметров отработки сигналов наведения электроприводом с люфтом указывает на то, что наличие зазора, вызванного продолжительным атмосферным воздействием, в механической передаче снижает точность работы, в

режиме целеуказания вызывает потерю устойчивости электроприводом и возникновение автоколебаний (рисунок 5.1).

Из этого следует, что введение устройства компенсации зазора в систему управления, которое позволит обеспечить точность работы исследуемого электропривода является актуальной задачей.

5.2 Моделирование работы идеализированного электропривода без люфта

Целью построения идеализированной модели является получение эталонных параметров отработки приводом рассматриваемых сигналов наведения для проведения анализа параметров работы схем устройств компенсации зазора. Построенная идеализированная модель не содержит люфтов механических передач и устройств компенсации зазора. Задачей исследования идеализированной модели является определение значений ошибок наведения, связанных с индивидуальными параметрами электропривода и инерционными характеристиками металлоконструкции объекта управления.

Параметры отработки идеализированным электроприводом режима целеуказания показаны на рисунке 5.4. В данном режиме при достижении электроприводом координаты целеуказания наблюдается незначительное перерегулирование равное $0{,}6^0$ (рисунок 5.4а). В момент пуска и торможения можно увидеть суммирование моментов отдельных исполнительных механизмов (рисунок 5.4в), максимальное значение моментов исполнительных механизмов достигает 10^6 Нм. Параметры отработки при поступлении гармонического сигнала наведения показаны на рисунке 5.5. Ошибка отработки сигнала наведения не превышает $0{,}045^0$ (рисунок 5.5б). Моменты отдельных исполнительных механизмов суммируются, обеспечивая движение объекта управления (рисунок 5.5в), максимальное значение моментов не превышает $0{,}67 \times 10^4$ Нм. Отработка электроприводом сигнала сопровождения показана на рисунке 5.6. В момент пуска ошибка достигает $0{,}38^0$ и постепенно снижается (рисунок 5.6б). Моменты отдельных исполнительных механизмов не превышают $6{,}5 \times 10^4$ Нм (рисунок 5.6в).

Анализ параметров работы идеализированного электропривода позволил определить эталонные характеристики, которые позволят произвести сравнение схем устройств компенсации зазора. Осциллограммы отработки идеализированного электропривода без люфта позволяют сделать вывод об устойчивости привода.

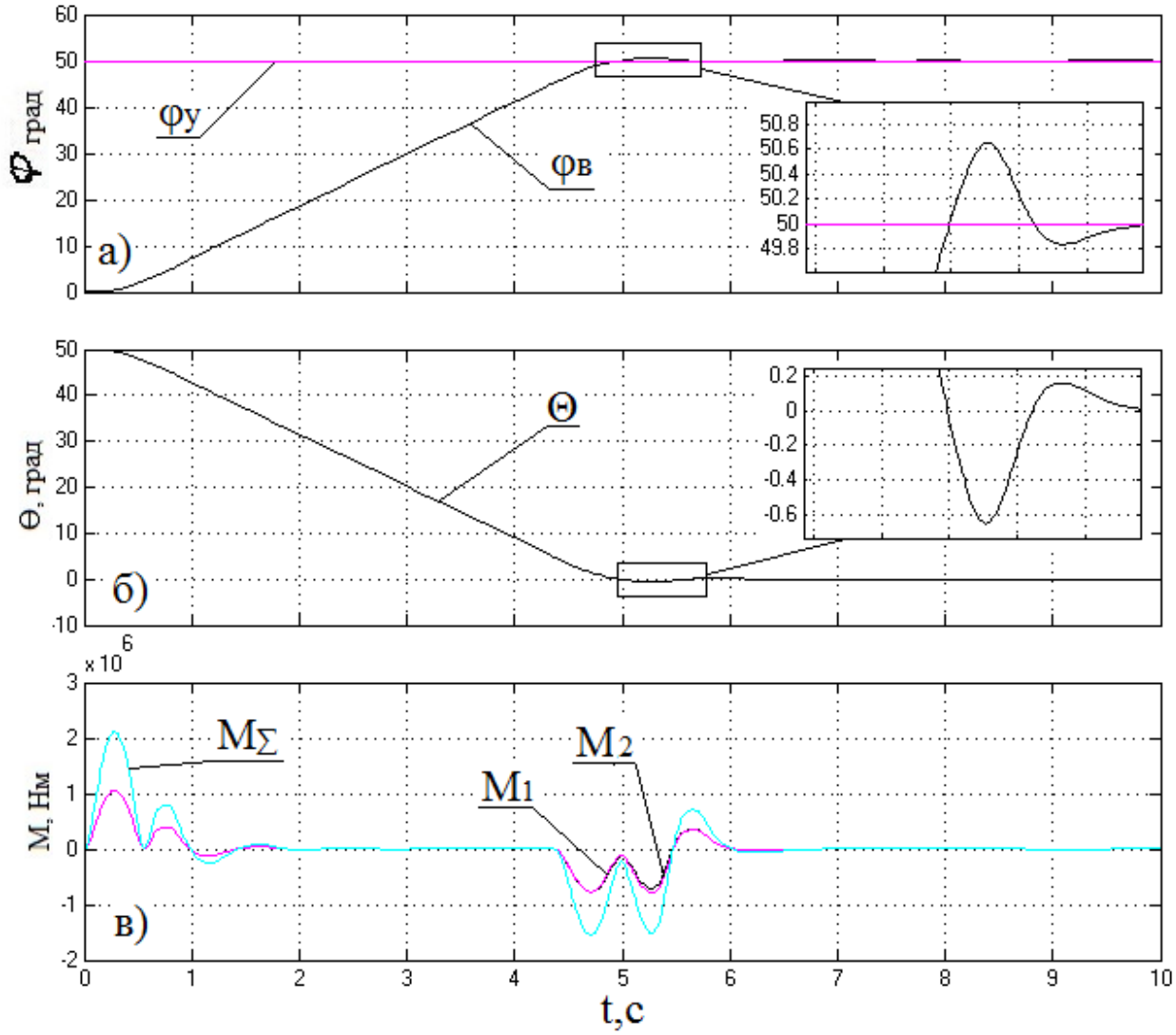

Рисунок 5.4 – Осциллограммы работы идеализированного электропривода в режиме целеуказания: а) сигнал наведения φ_y и отработка приводом сигнала наведения $\varphi_в$; б) сигнал динамической ошибки привода θ; в) моменты, развиваемые отдельными исполнительными механизмами, и суммарный момент привода

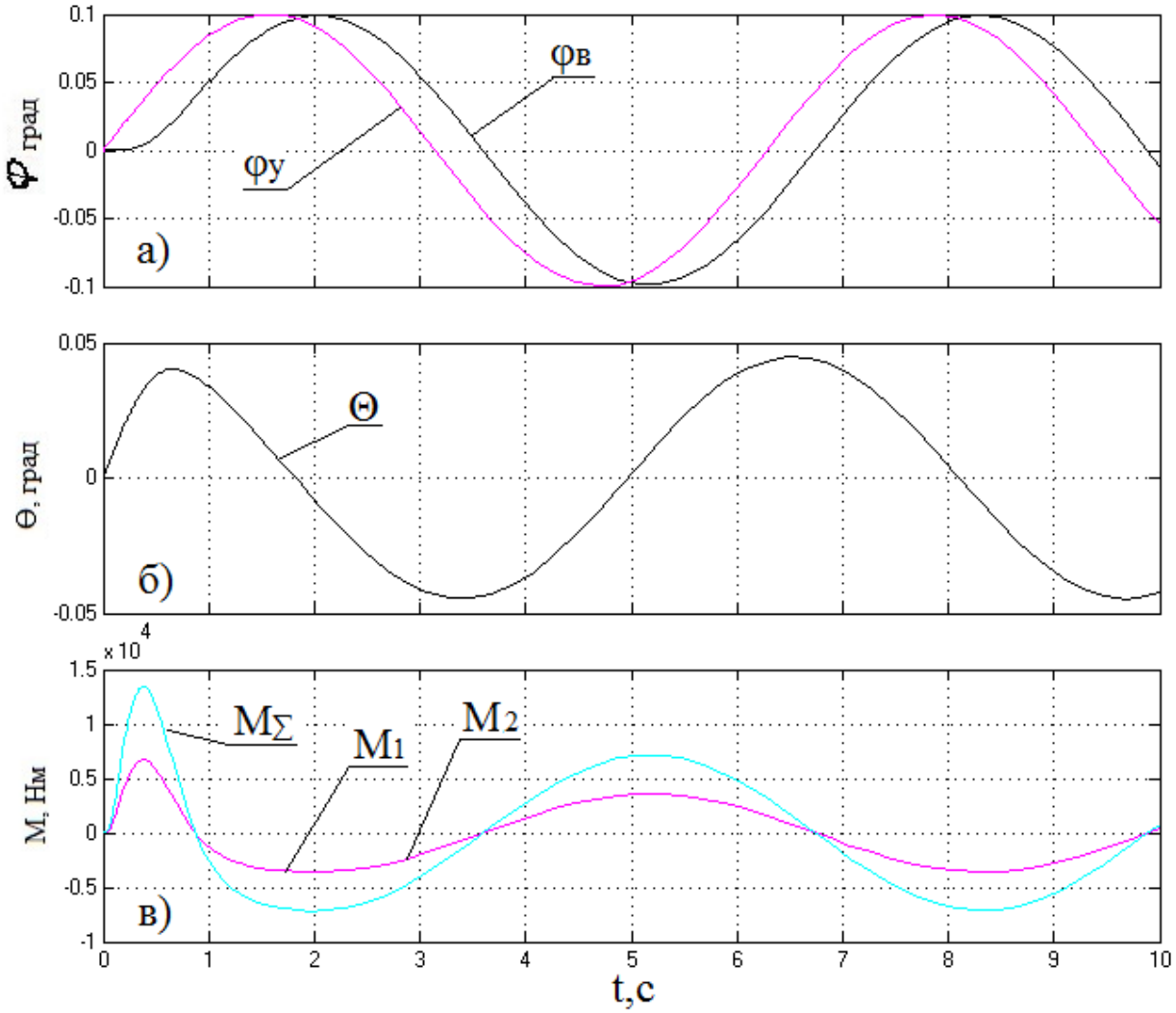

Рисунок 5.5 – Осциллограммы работы идеализированного электропривода при поступлении гармонического сигнала наведения: а) сигнал наведения $\varphi_у$ и отработка приводом сигнала наведения $\varphi_в$; б) сигнал динамической ошибки привода θ; в) моменты, развиваемые отдельными исполнительными механизмами, и суммарный момент привода

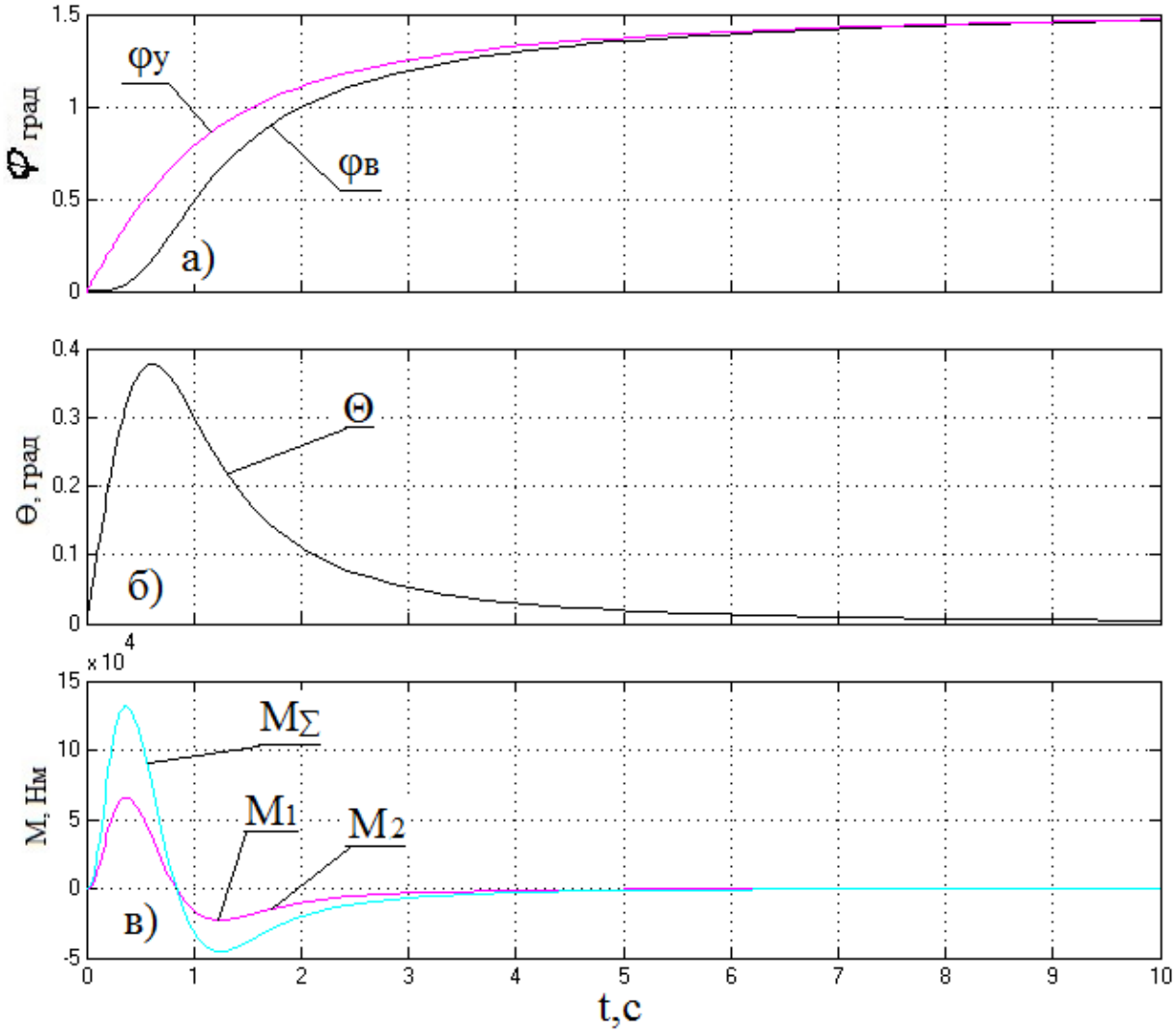

Рисунок 5.6 – Осциллограммы работы идеализированного электропривода в режиме сопровождения: а) сигнал наведения φ_y и отработка приводом сигнала наведения $\varphi_в$; б) сигнал динамической ошибки привода θ; в) моменты, развиваемые отдельными исполнительными механизмами, и суммарный момент привода

5.3 Моделирование работы электропривода с устройством компенсации зазора на основе введения сигнала смещения

В главе 3 было показано, что для электропривода, содержащего четыре исполнительных механизма, возможно применение устройства компенсации зазора на основе введения сигнала смещения (параграф 3.6, рисунок 3.6), особенностью которого является возможность суммирования моментов при превышении

сигналом ошибки диапазона компенсации зазора. Рассмотрим параметры отработки электроприводом с люфтом в механических передачах и устройством компенсации зазора на основе введения сигналов смещения, рассматриваемых сигналов наведения.

На рисунке 5.7 приведены параметры работы привода с устройством компенсации зазора на основе введения сигнала смещения в режиме целеуказания.

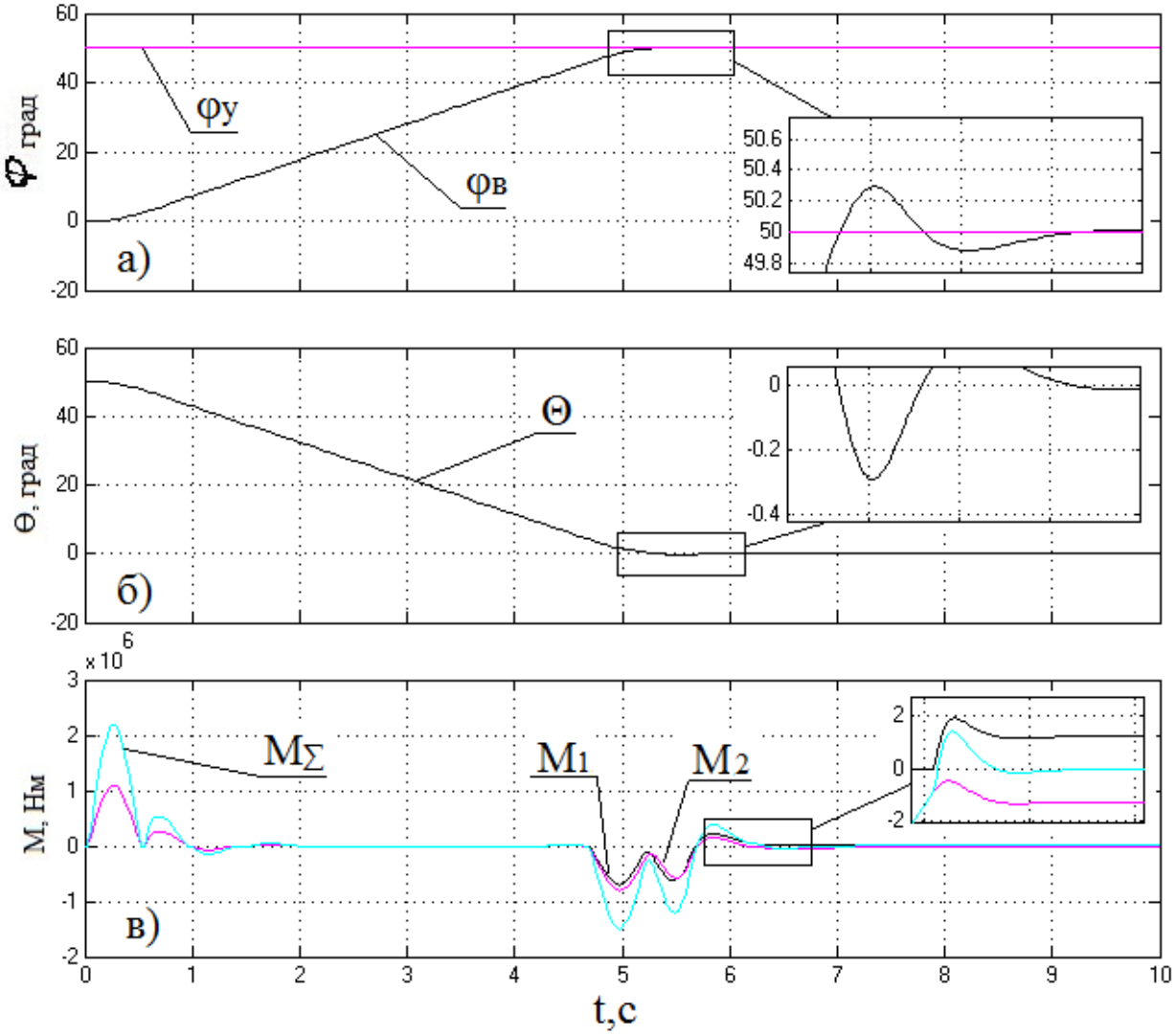

Рисунок 5.7 – Осциллограммы работы привода со схемой устройства компенсации зазора на основе введения сигнала смещения в режиме целеуказания: а) сигнал наведения $\varphi_у$ и отработка приводом сигнала наведения $\varphi_в$; б) сигнал динамической ошибки привода θ; в) моменты, развиваемые отдельными исполнительными механизмами, и суммарный момент привода

Заметно суммирование моментов каналов привода при высоком значении сигнала динамической ошибки (рисунок 5.7б), и момент распора при нулевом значении сигнала ошибки (рисунок 5.7в). При этом величина перерегулирования меньше чем в идеализированной модели – $0{,}3^0$. Снижение величины перерегулирования связано с действием устройства компенсации зазора: при приближении сигнала ошибки к нулю (переходе порога компенсации зазора), сигналы смещения в одном из каналов создают момент, противоположный направлению движения, который частично компенсирует инерционную нагрузку при торможении.

На рисунке 5.8 приведены параметры работы привода с устройством компенсации зазора на основе введения сигнала смещения при поступлении гармонического сигнала наведения. Сигнал динамической ошибки не превышает $0{,}051^0$ (рисунок 5.8б), что незначительно превышает аналогичную величину идеализированной модели ($0{,}045^0$). Однако моменты, развиваемые исполнительными механизмами, в шесть раз превышают моменты идеализированной модели (рисунок 5.8в). Обращает внимание, что привод развивает значительные моменты распора при сигналах динамической ошибки ниже порога компенсации зазора (величины смещения). Следовательно, в следящих режимах, когда сигнал динамической ошибки мал по величине, моменты распора действуют постоянно, и компенсации зазора осуществляется при значительных потерях энергии, которая расходуется на нагрев электродвигателей. В данном режиме КПД электропривода находится в интервале от 10 до 15% (рисунок 5.8г).

Аналогичная ситуация наблюдается и в режиме сопровождения (рисунок 5.9). Сигнал динамической ошибки системы не превышает $0{,}0385^0$ (рисунок 5.9б), что незначительно превышает значение идеализированной модели в $0{,}038^0$, однако и здесь максимальный момент, развиваемый отдельным исполнительным механизмом, вдвое превышает аналогичный параметр идеализированной модели.

Данная схема с введением сигнала смещения динамической ошибки реализуема и даёт эффект, аналогичный эффекту механической пружины.

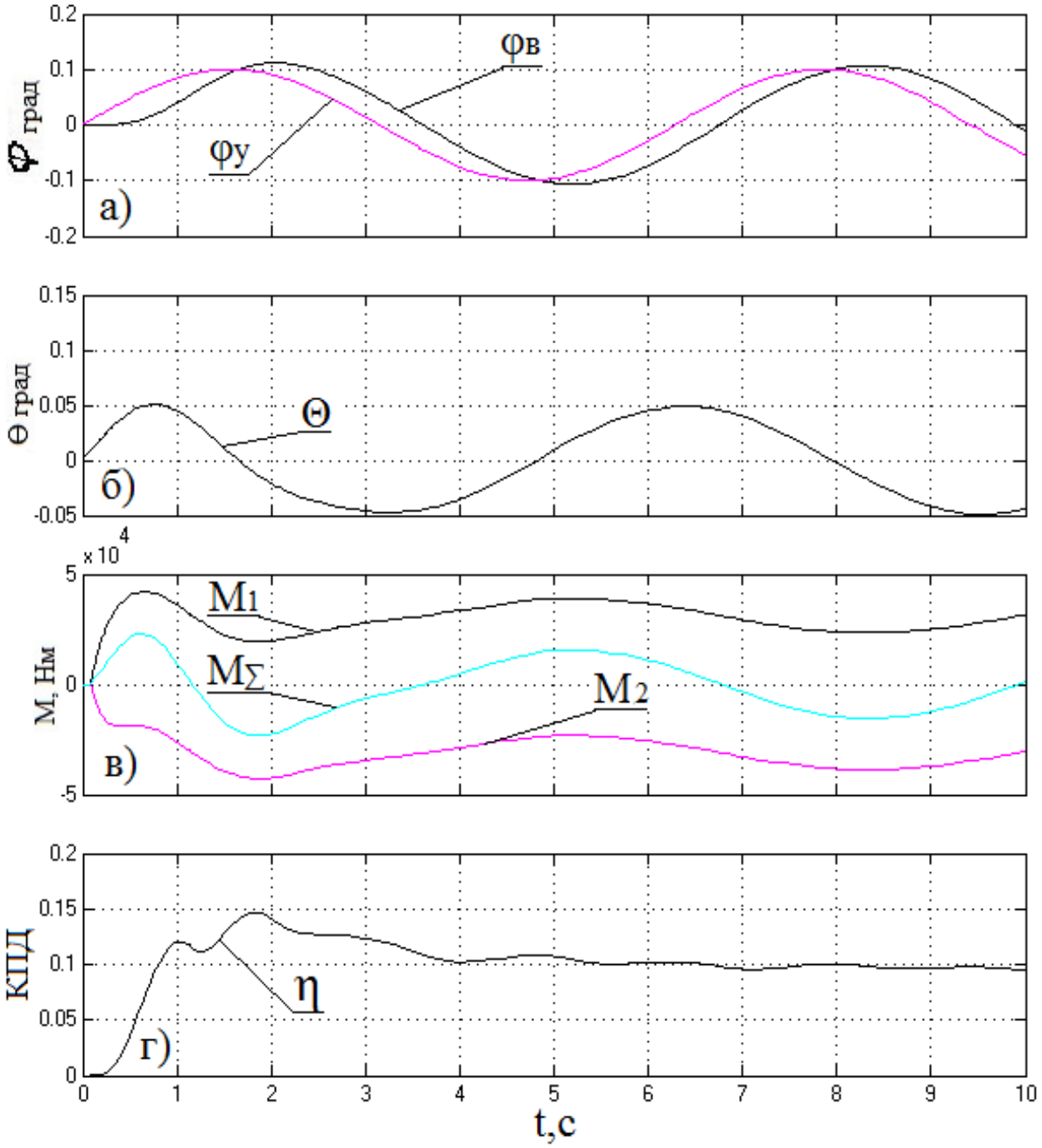

Рисунок 5.8 – Осциллограммы работы привода со схемой устройства компенсации зазора на основе введения сигнала смещения при гармоническом сигнале наведения: а) сигнал наведения φ_y и отработка приводом сигнала наведения $\varphi_в$; б) сигнал динамической ошибки привода θ; в) моменты, развиваемые отдельными исполнительными механизмами, и суммарный момент привода; г) коэффициент полезного действия электропривода

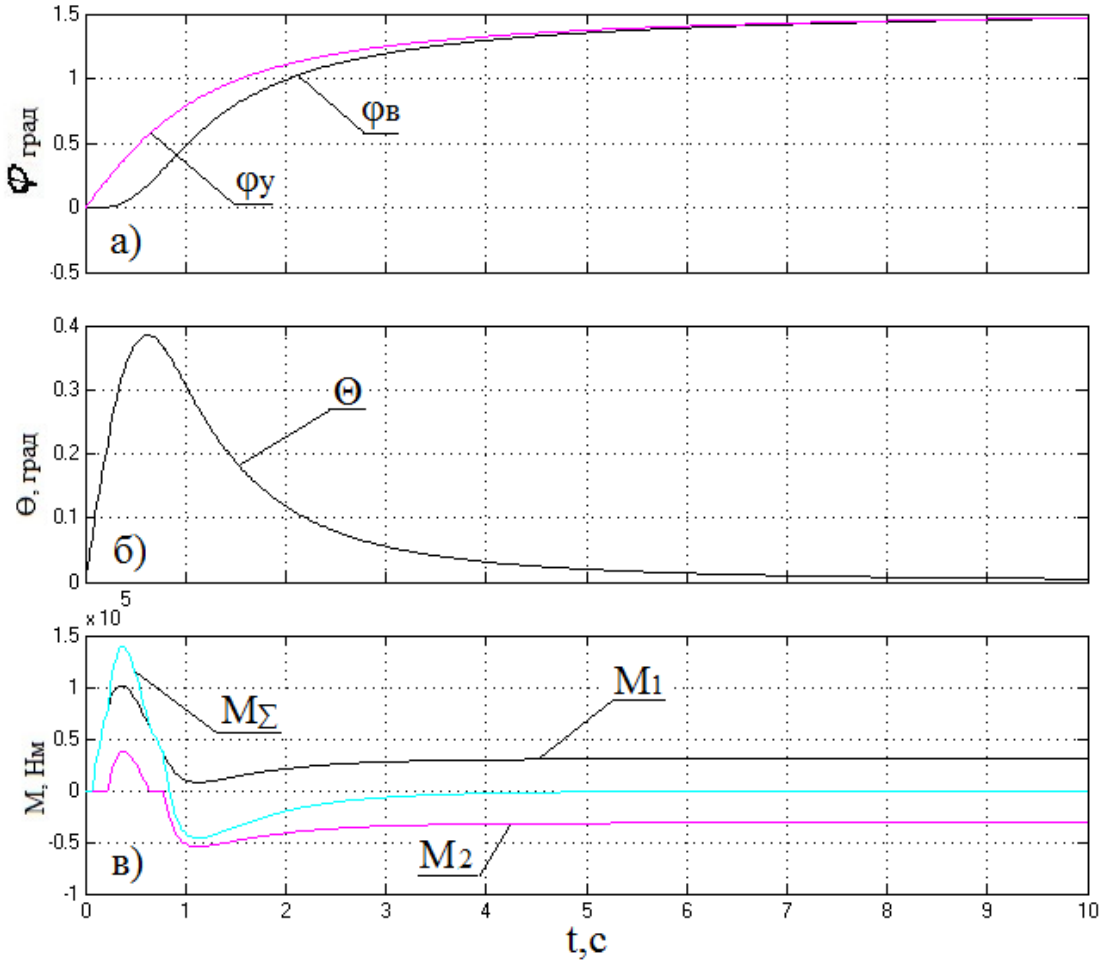

Рисунок 5.9 – Осциллограммы работы привода со схемой устройства компенсации зазора на основе введения сигнала смещения в режиме сопровождения: а) сигнал наведения $\varphi_у$ и отработка приводом сигнала наведения $\varphi_в$; б) сигнал динамической ошибки привода θ; в) моменты, развиваемые отдельными исполнительными механизмами, и суммарный момент привода

Результаты моделирования показывают, что применение устройства компенсации зазора на основе введения сигнала смещения позволяет компенсировать влияние зазора, возникшего в результате воздействия коррозии и обеспечить требуемую точность работы.

Параметры работы, в части отработки управляющего сигнала, максимально приближены к параметрам привода без люфта, однако высокий момент распора, приводит к высоким затратам энергии и снижению КПД.

5.4 Моделирование работы электропривода с устройством компенсации зазора с перекрёстными связями

Рассмотрим параметры работы электропривода с устройством компенсации зазора с перекрёстными связями (рисунок 3.8), и возможность его применения в исследуемом ОПУ.

Работу электропривода с люфтом в механических передачах и устройством компенсации зазора с перекрёстными связями в режиме целеуказания иллюстрирует осциллограмма на рисунке 5.10. В момент пуска и торможения наблюдается суммирование моментов отдельных исполнительных механизмов (рисунок 5.10в). Величина перерегулирования не превышает $0{,}55^0$, что меньше величины идеализированной модели, поскольку в момент остановки устройство с перекрёстными связями создаёт дополнительный момент торможения за счёт сигналов с перекрёстных связей, принцип действия которых описан в главе 4. Результаты моделирования показывают, что разработанное устройство обеспечивает устойчивость привода с люфтом при отработке режима целеуказания (рисунок 5.10а).

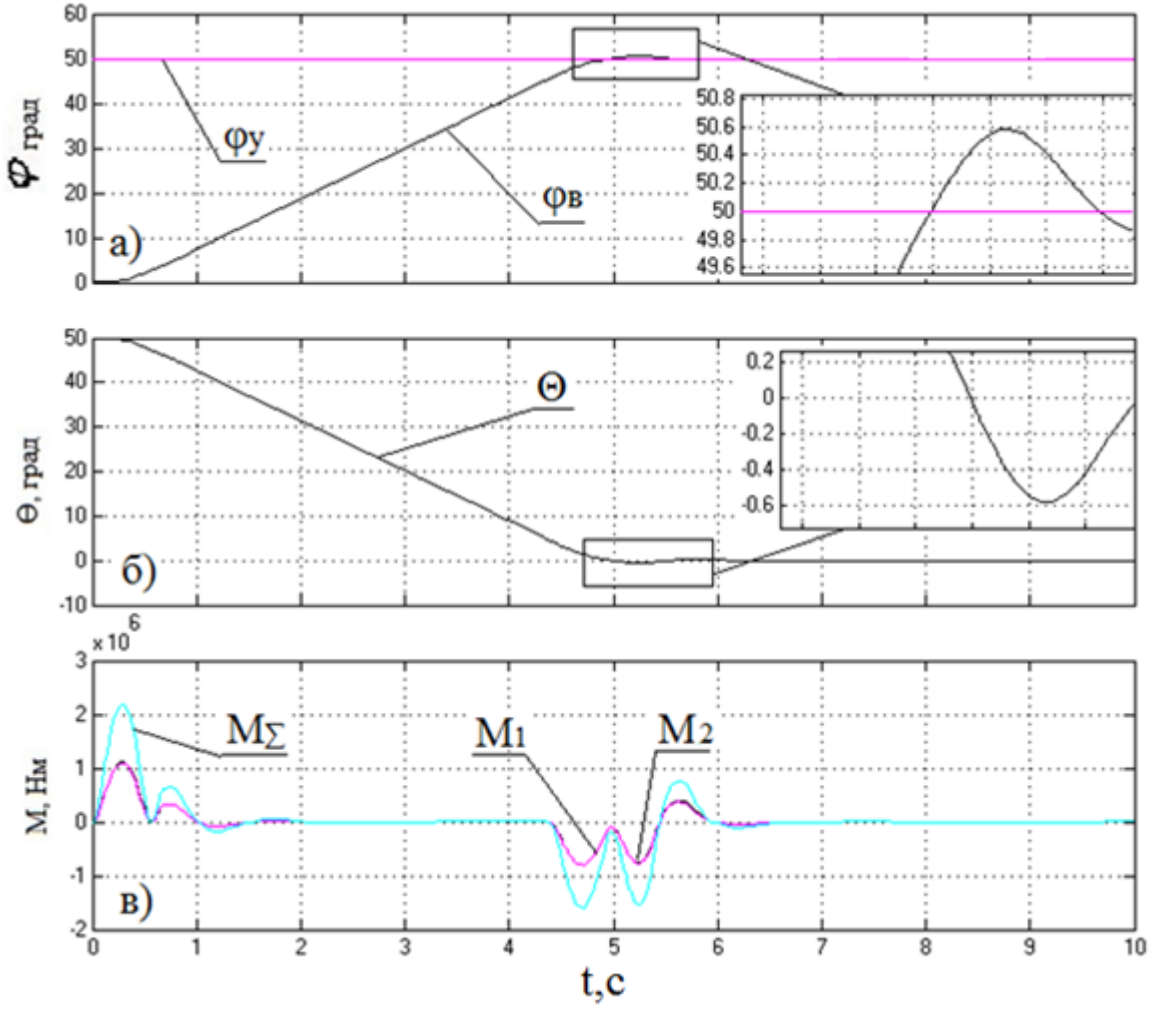

Рисунок 5.10 – Осциллограммы работы привода со схемой устройства компенсации зазора с перекрёстными связями в режиме целеуказания: а) сигнал наведения $\varphi_у$ и отработка приводом сигнала наведения $\varphi_в$; б) сигнал динамической ошибки привода θ; в) моменты, развиваемые отдельными исполнительными механизмами, и суммарный момент привода

Работа привода при поступлении гармонического сигнала наведения показана на рисунке 5.11. На осциллограммах можно наблюдать, что при изменении знака сигнала динамической ошибки (рисунок 5.11б), что соответствует изменению направления движения, моменты отдельных исполнительных механизмов имеют незначительное смещение (рисунок 5.11в).

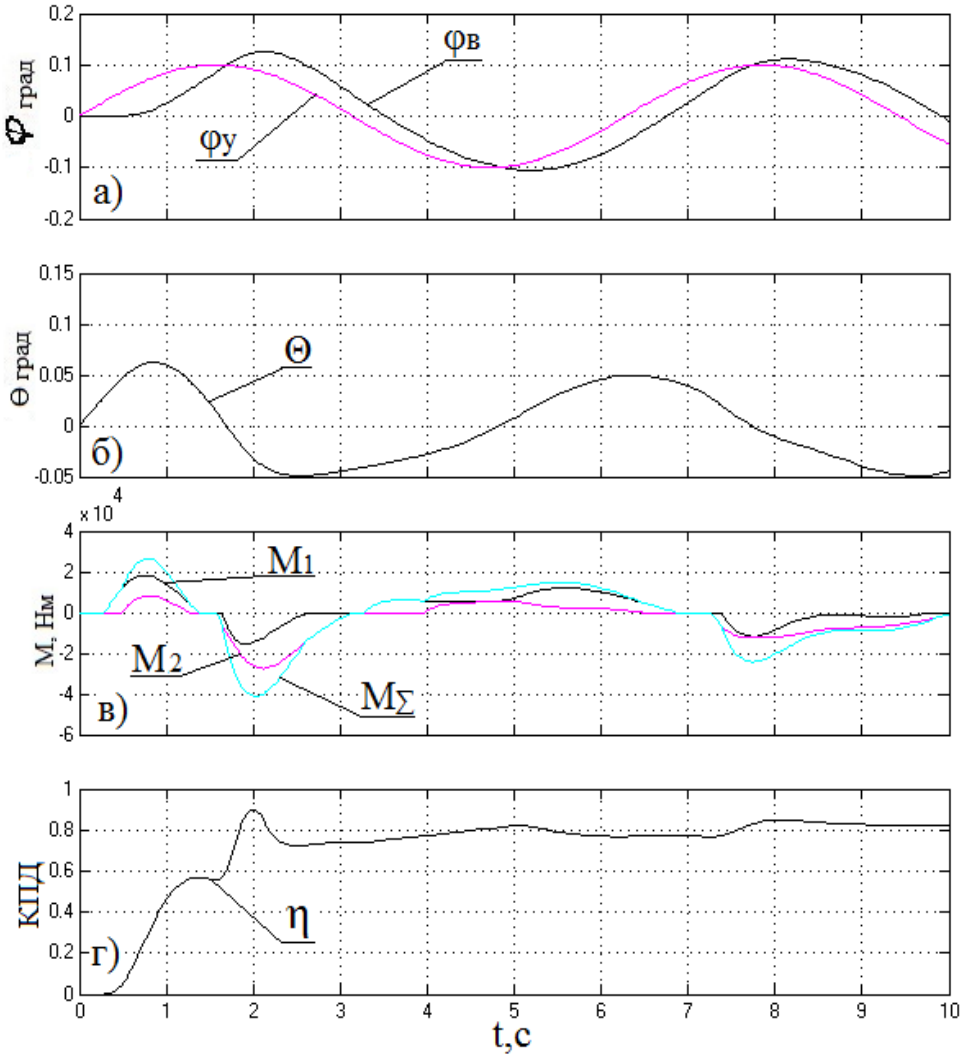

Рисунок 5.11 – Осциллограммы работы привода со схемой устройства компенсации зазора с перекрёстными связями при гармоническом сигнале наведения: а) сигнал наведения φ_y и отработка приводом сигнала наведения $\varphi_в$; б) сигнал динамической ошибки привода θ; в) моменты, развиваемые отдельными исполнительными механизмами, и суммарный момент привода; г) коэффициент полезного действия электропривода

Величина динамической ошибки при отработке не превышает $0{,}055^0$, что немного превышает значение идеализированной модели. Максимальные моменты, развиваемые отдельными исполнительными механизмами, в три раза превышают моменты идеализированной модели (рисунок 5.5), и в два раза ниже, чем при работе со схемой устройства компенсации зазора на основе введения сигнала

смещения (рисунок 5.8). При этом КПД электропривода составляет 80% (рисунок 5.11г).

Работа привода в режиме сопровождения показана на рисунке 5.12.

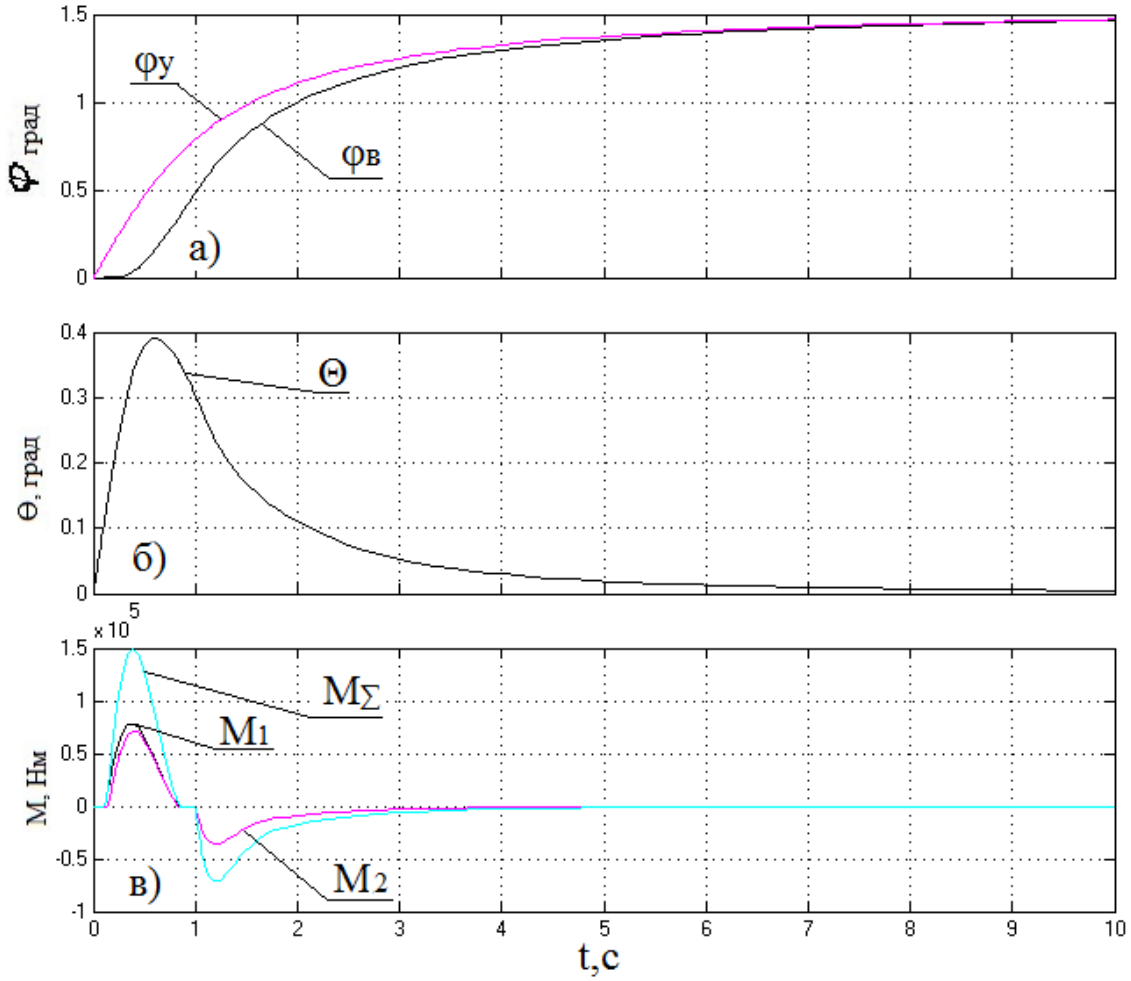

Рисунок 5.12 – Осциллограммы работы привода со схемой устройства компенсации зазора с перекрёстными связями в режиме сопровождения: а) сигнал наведения $\varphi_у$ и отработка приводом сигнала наведения $\varphi_в$; б) сигнал динамической ошибки привода θ; в) моменты, развиваемые отдельными исполнительными механизмами, и суммарный момент привода

Форма сигнала наведения в режиме сопровождения близка к функции arctg. На графике хорошо видно суммирование моментов отдельных исполнительных механизмов (рисунок 5.12в). Сигнал динамической ошибки в момент пуска достигает $0{,}39^0$, что сопоставимо с идеализированной моделью (рисунок 5.6). Максимальный момент, развиваемый отдельными исполнительными механизмами,

на 15% превышает момент идеализированной модели, и на 25% ниже, чем в схеме с введением сигнала смещения.

5.5 Результаты сравнения работы электропривода с различными устройствами компенсации зазора

Результаты моделирования отработки рассматриваемых сигналов наведения приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – параметры отработки электроприводом сигналов наведения.

	Режим целеуказания		Гармонический сигнал наведения		Режим сопровождения	
	Ошибка Θ (град)	Максимальный момент исполнительного механизма (Нм)	Ошибка Θ (град)	Максимальный момент исполнительного механизма (Нм)	Ошибка Θ (град)	Максимальный момент исполнительного механизма (Нм)
Идеализированная модель	0,6	$1x10^6$	0,045	$0,67x10^4$	0,38	$0,65x10^5$
Устройство компенсации зазора на основе введения сигнала смещения	0,3	$1x10^6$	0,051	$4,5x10^4$	0,385	$1x10^5$
Устройство компенсации зазора с перекрёстными связями	0,55	$1x10^6$	0,055	$2,2x10^4$	0,39	$0,75x10^5$

В режиме целеуказания обе схемы устройств компенсации зазора обеспечивают суммирование моментов отдельных исполнительных механизмов, при этом точность отработки даже выше, чем в идеализированной модели. При

гармоническом сигнале наведения точность отработки идеализированной модели и двух схем устройств отличаются незначительно. Отличаются моменты отдельных исполнительных механизмов. В схеме с перекрёстными связями, развиваемые моменты в три раза выше, чем в идеализированной модели, а в известной схеме с сигналом смещения выше в шесть раз. В режиме сопровождения ошибки отработки всех трёх моделей равны, моменты отдельных исполнительных механизмов в разработанной схеме с перекрёстными связями на 25% ниже, чем в известной схеме.

Из сказанного следует, что точность отработки электромеханическим приводом с люфтом и исследуемыми устройствами компенсации зазора сигналов наведения сопоставима с точностью отработки идеализированной модели, ошибка отработки не превышает установленных техническим заданием 12 угловых минут. Схема устройства компенсации зазора с введением сигнала смещения, реализуется наиболее просто и даёт эффект, аналогичный эффекту механической пружины. Как показали результаты моделирования, при выборе наименьшего значения смещений сигнала ошибки по условию отсутствия автоколебаний, исполнительные механизмы развивают момент, значительно превышающий необходимый. Эффект компенсации зазора в динамике достигается значительными потерями энергии на взаимную нагрузку каналов.

В схеме с перекрёстными связями, при выборе постоянной времени апериодического звена по отсутствию автоколебаний в установившейся части переходного процесса, обеспечивается незначительное взаимное нагружение каналов, проявляющееся только в очень ограниченных интервалах времени – при смене знака скорости. Динамика основного движения близка к динамике идеализированной модели при отсутствии люфта.

В нежёстком механизме увеличение уровня трения имеет положительный эффект: в схеме с введением сигнала смещения снижается величина смещения, в схеме с перекрёстными связями уменьшается постоянная времени динамического запаздывания, что способствует более экономичному режиму работы многодвигательного привода.

Таким образом, проведённое моделирование показывает, что разработанное устройство компенсации зазора с перекрёстными связями позволяет обеспечить точность электропривода с люфтом в механических передачах, вызванным воздействием коррозии так, что при изменении знака сигнала динамической ошибки, создаёт смещение сигнала в реверсивном канале, обеспечивая компенсацию зазора, а при установившемся движении создаёт суммирование моментов отдельных исполнительных механизмов на общем колесе, обеспечивая быстродействие и повышение КПД. Анализ параметров работы привода с различными схемами построения устройства компенсации зазора позволяет сделать вывод о целесообразности применения схемы с перекрёстными связями.

Выводы по главе 5

1) Разработанное устройство компенсации зазора с перекрёстными связями, обеспечивает управление каналами электропривода так, что при изменении знака сигнала динамической ошибки создаёт смещение сигнала в реверсивном канале, обеспечивая компенсацию зазора, а в режиме установившегося движения создаёт суммирование моментов отдельных исполнительных механизмов на общем колесе.
2) Проведено моделирование работы электропривода в программной среде Matlab Simulink, которое подтверждает работоспособность разработанного устройства компенсации зазора и возможность его применения в исследуемом опорно-поворотном устройстве.
3) Компенсации зазора осуществляется электронным устройством за счёт преобразования сигнала динамической ошибки системы в маломощных слаботочных электрических цепях управления, следовательно, обеспечение точности электропривода возможно произвести без существенных финансовых затрат.

Глава 6 Исследование работы устройств компенсации зазора в электроприводе, содержащем несколько исполнительных механизмов

6.1 Предпосылки исследования работы устройств компенсации зазора в многодвигательном электроприводе

В главах 3-5 рассмотрены пути повышения точности электропривода с зазорами в механических передачах, в том числе вызванных коррозией, вследствие продолжительного атмосферного воздействия. Показано, что для электропривода, содержащего несколько исполнительных электродвигателей, предпочтительным является использование устройства компенсации зазора. Путём моделирования рассмотрена работа известной схемы устройства компенсации зазора на основе введения сигнала смещения (УКЗ СС), которая позволяет обеспечить точность отработки электроприводом сигнала наведения в режиме сопровождения, а также при гармоническом сигнале наведения, при этом обеспечивая суммирование моментов отдельных каналов в режиме целеуказания, повышая динамические возможности электропривода. К недостаткам схемы следует отнести высокий момент распора (около 20% от максимального момента электропривода) и, как следствие, высокую потерю энергии на взаимное нагружение.

Разработана и предложена схема устройства компенсации зазора на основе введения блоков задержки сигнала и перекрёстных связей, которая позволяет, компенсировать влияние люфта в режимах слежения, при изменениях направления движения, когда влияние люфта наиболее заметно, и обеспечивает суммирование моментов отдельных исполнительных механизмов в режиме целеуказания. Данная схема устройства компенсации зазора с перекрёстными связями (УКЗ ПС) обеспечивает меньшее взаимное нагружение каналов, но более требовательна к настройке параметров запаздывания, которые зависят от величины люфта.

Исследование работы проведено для электромеханического привода с электродвигателями и механическими передачами, обладающими идентичными характеристиками. Поскольку электромеханические приводы исследуемого ОПУ

содержат четыре исполнительных механизма с люфтами в механических передачах, характеристики которых могут отличаться, принятие решения об использовании устройства компенсации зазора для обеспечения характеристик электропривода возможно после проведения дополнительного исследования работы схем устройств компенсации зазора в многодвигательном электроприводе при некотором рассогласовании параметров отдельных каналов: электрического сопротивления якоря электродвигателя, электромеханической постоянной времени электродвигателя, величины люфта.

6.2 Особенности работы устройств компенсации зазора в электромеханическом приводе, состоящем из трёх исполнительных механизмов

Рассмотрим схему электромеханического привода, состоящего из трёх исполнительных механизмов (ИМ). В схеме с чётным количеством ИМ (2, 4 и т.д.) реализация устройства компенсации зазора с введением сигнала смещения не вызывает затруднений. Выделяются две группы, состоящие из равного количества ИМ, и на каждую группу ИМ подаются равные по величине, но различные по знаку смещения, обеспечивая тем самым моменты распора и компенсацию зазоров.

В электромеханическом приводе с нечётным количеством ИМ, например тремя, два канала должны создавать момент в одном направлении, а третий в противоположном. Рассмотрим работу электропривода состоящего из трёх ИМ. Если величины напряжений смещения равны, то моменты распора, создаваемые на общем колесе объекта управления в противоположных направлениях не равны, поскольку два ИМ создают больший момент. При наличии высокой величины трения в системе, эта особенность не влияет на отработку приводом сигнала наведения в режиме целеуказания (рисунок 6.1). Величина перерегулирования (рисунок 6.1б) составляет $0{,}88^0$. На рисунке 6.1в видно, что моменты всех трёх ИМ суммируются, обеспечивая движение объекта управления. Максимальный момент, развиваемый отдельным ИМ составил $1{,}35 \times 10^6$Нм.

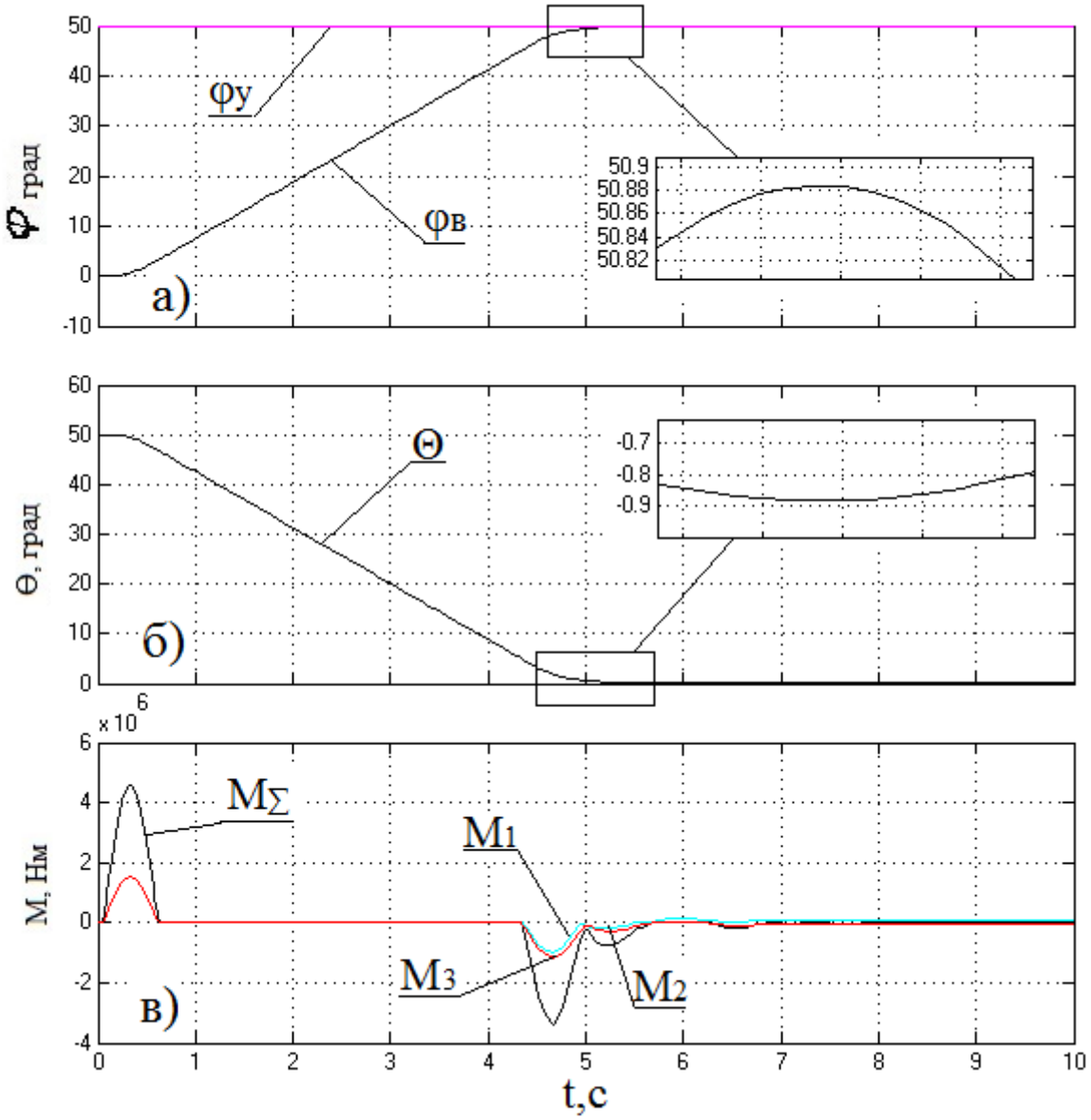

Рисунок 6.1 – Осциллограммы работы трёхканального привода со схемой УКЗ СС в режиме целеуказания

В режиме сопровождения различие моментов распора также не оказывает существенного влияния на параметры отработки приводом сигнала наведения (рисунок 6.2). Сигнал динамической ошибки не превышает $0{,}48^0$ (рисунок 6.2б). Момент, развиваемый отдельным ИМ составил $2x10^5$Нм. При поступлении гармонического сигнала наведения (рисунок 6.3), различие моментов распора (рисунок 6.3в) влияет на отработку сигнала наведения, это проявляется в различии точности отработки в прямом ($0{,}115^0$) и обратном ($0{,}07^0$) направлении (рисунок 6.3б).

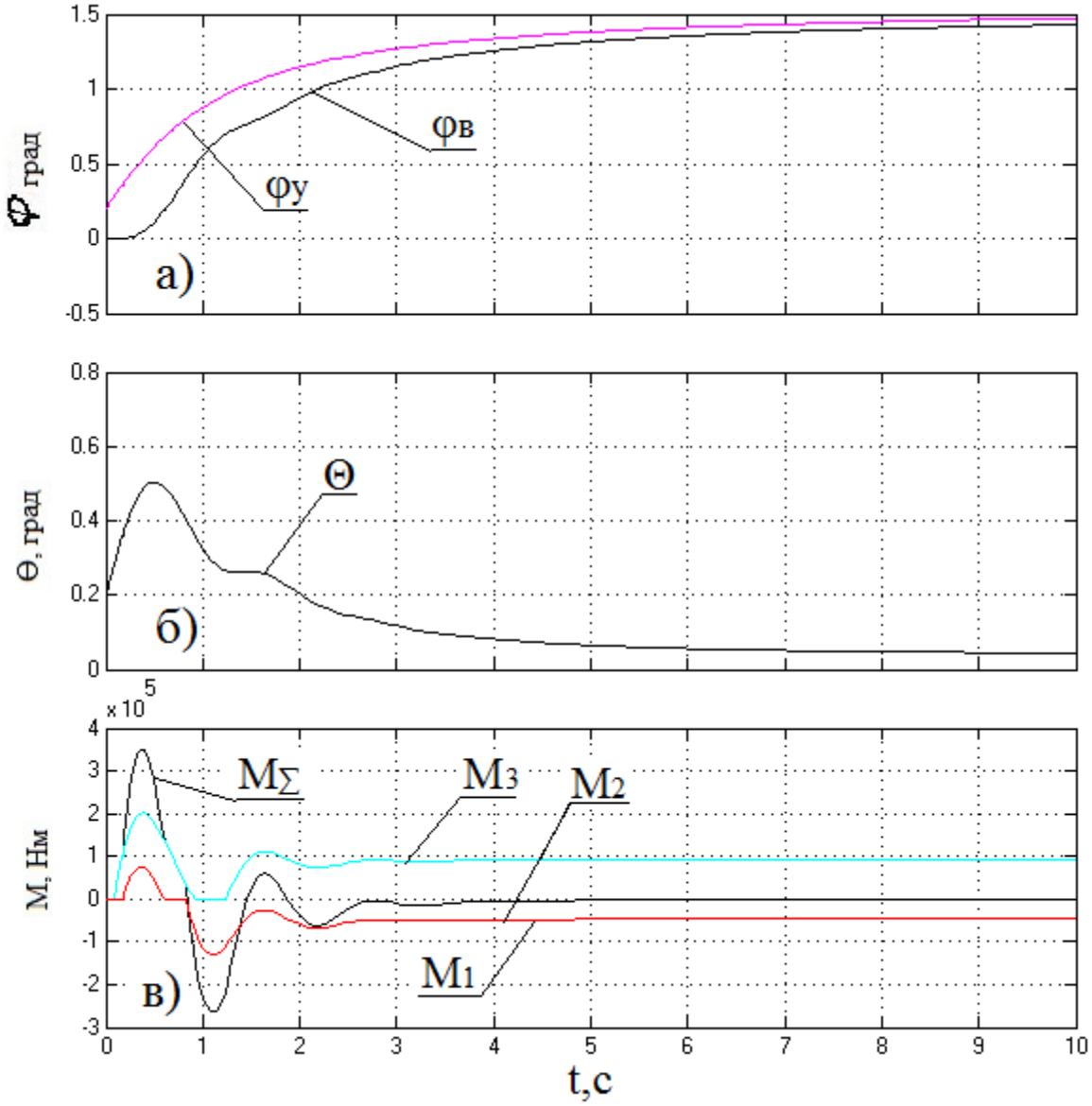

Рисунок 6.2 – Осциллограммы работы трёхканального привода со схемой УКЗ СС в режиме сопровождения

Увеличение сигнала смещения в канале, работающем индивидуально, позволит обеспечить равные моменты распора, что позволит обеспечить точность и симметрию характеристик отработки электромеханическим приводом при поступлении гармонического сигнала наведения (рисунок 6.4). На рисунке 6.4б хорошо видно, что сигнал динамической ошибки системы при движении в различных направлениях имеет равные значения ($0{,}09^0$), а момент, развиваемый отдельным каналом (рисунок 6.4в), вдвое превышает момент, развиваемый парными каналами.

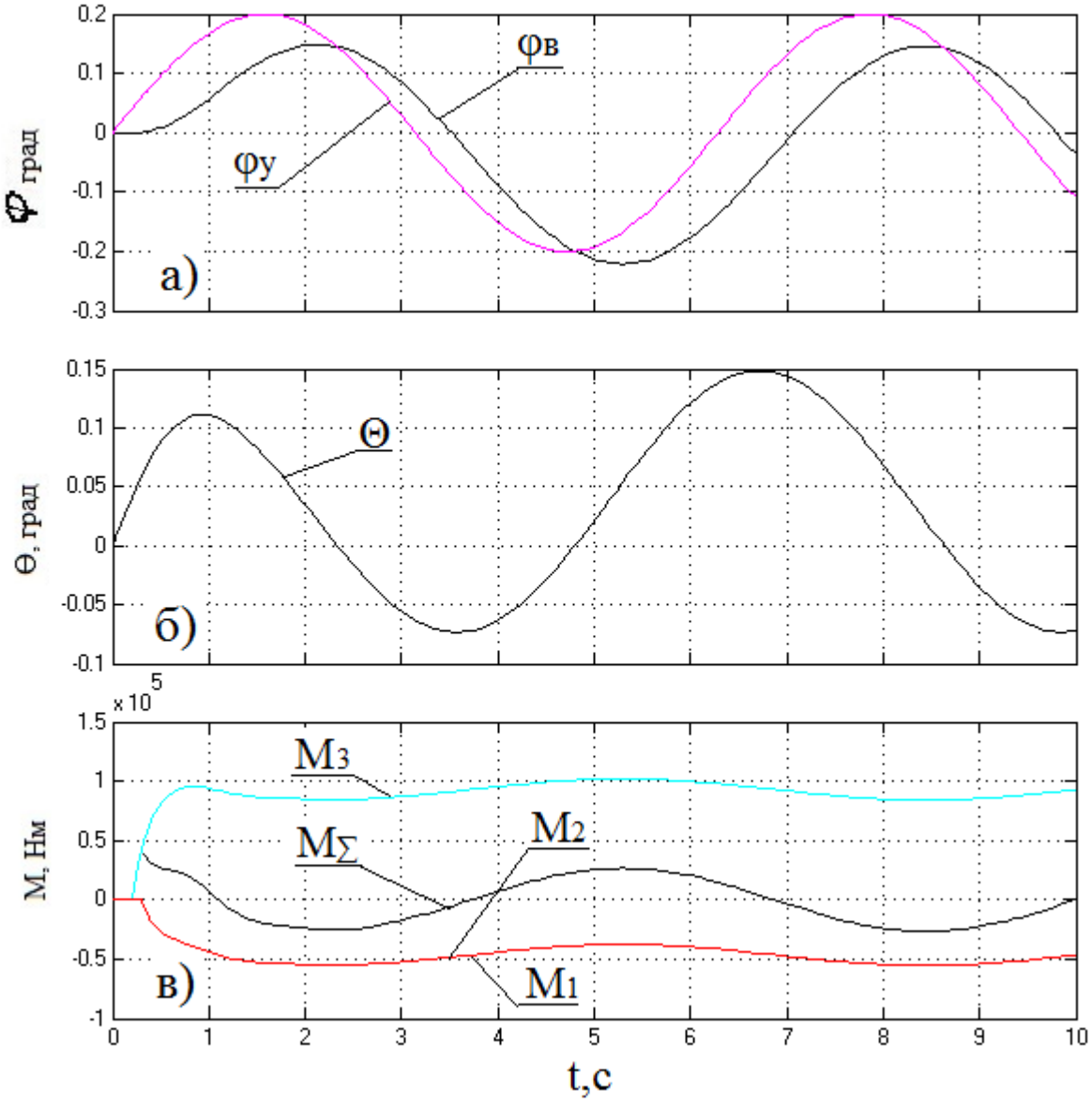

Рисунок 6.3 – Осциллограммы работы трёхканального привода со схемой УКЗ СС при поступлении гармонического сигнала наведения

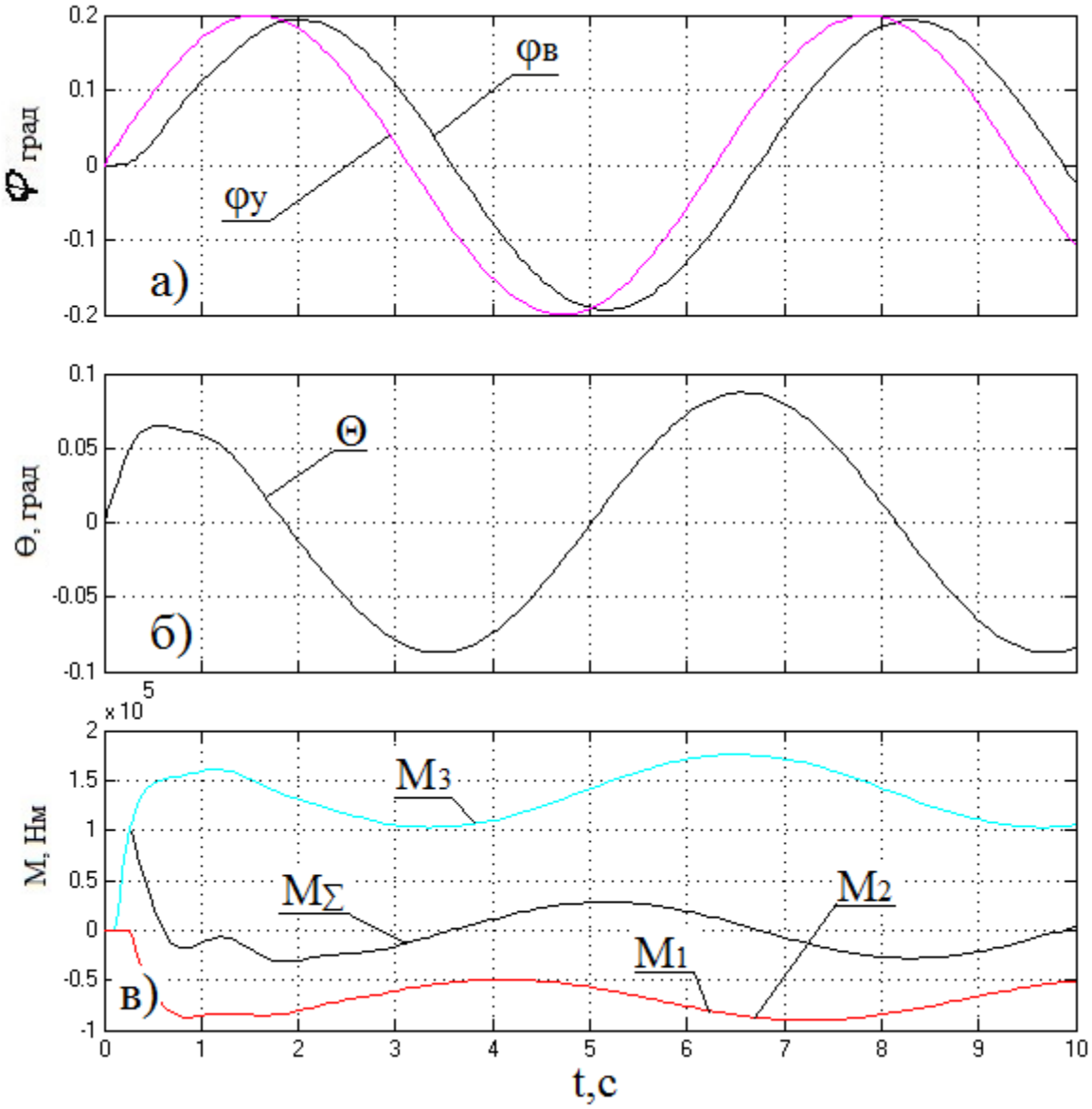

Рисунок 6.4 – Осциллограммы работы трёхканального привода со схемой УКЗ СС при поступлении гармонического сигнала наведения с увеличенным смещением в индивидуальном канале

При отработке режима целеуказания (рисунок 6.5) величина перерегулирования составляет $0{,}89^0$ (рисунок 6.5б). В режиме сопровождения (рисунок 6.6) электромеханический привод, содержащий три канала управления с увеличенным сигналом смещения в индивидуальном канале, развивает момент $1{,}47 \times 10^5$ Нм (рисунок 6.6в), а сигнал динамической ошибки не превышает $0{,}47^0$ (рисунок 6.6б).

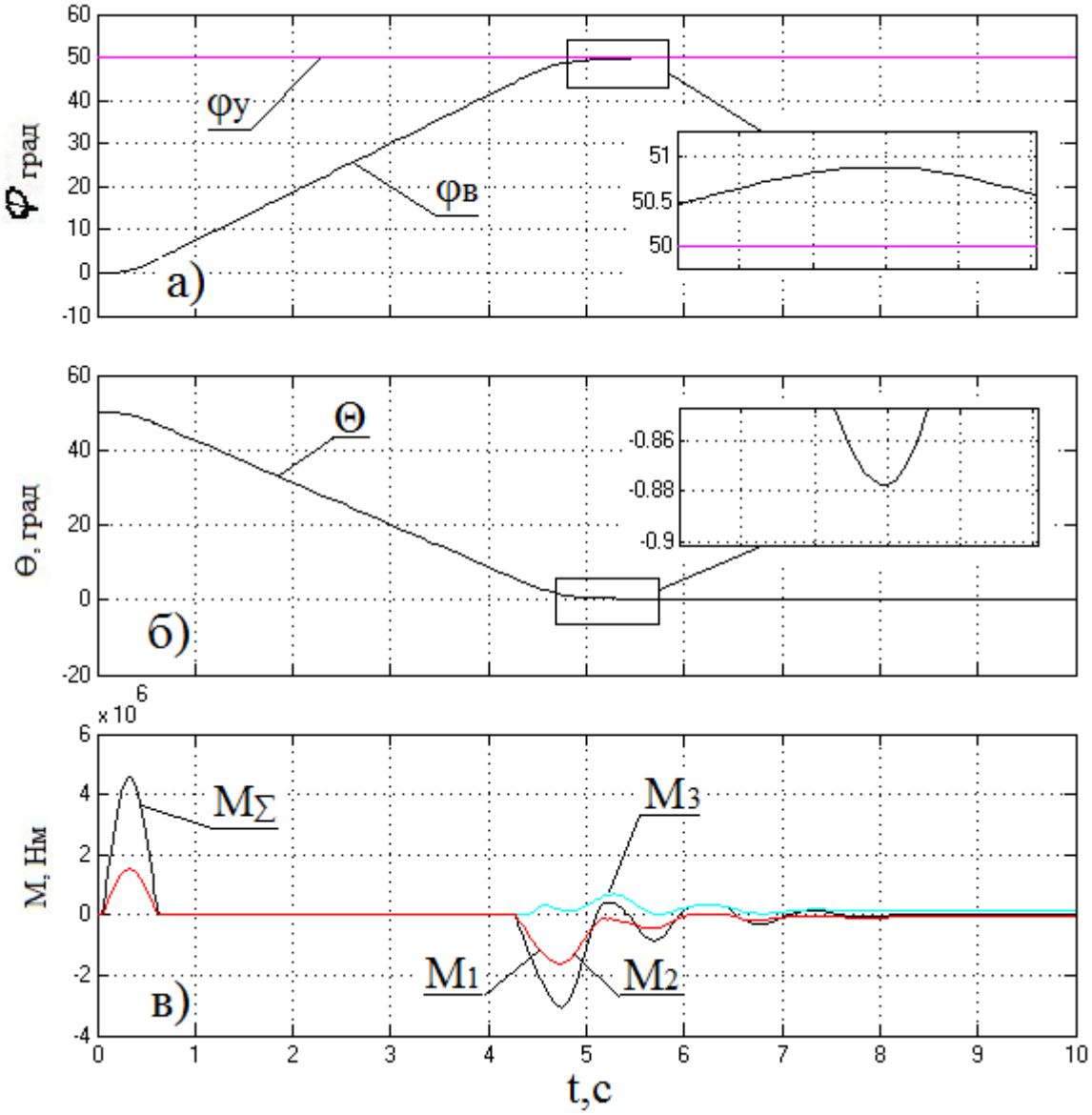

Рисунок 6.5 – Осциллограммы работы трёхканального привода со схемой УКЗ СС в режиме целеуказания с увеличенным смещением в индивидуальном канале

Другим способом реализации устройства компенсации зазора на основе введения сигнала смещения в трёхканальном электроприводе является использование схемы «2+1», при которой в режиме сопровождения и при поступлении гармонического сигнала наведения привод работает как двухканальный, а третий выступает дополнительной нагрузкой, и используется только в режиме целеуказания, обеспечивая увеличение динамических возможностей электропривода. Основным недостатком использования схемы «2+1» является повышенный расход энергии на преодоление сопротивления

третьего канала в режимах слежения и, как следствие, снижение КПД. Дальнейшая проработка этого варианта реализации не проводилась.

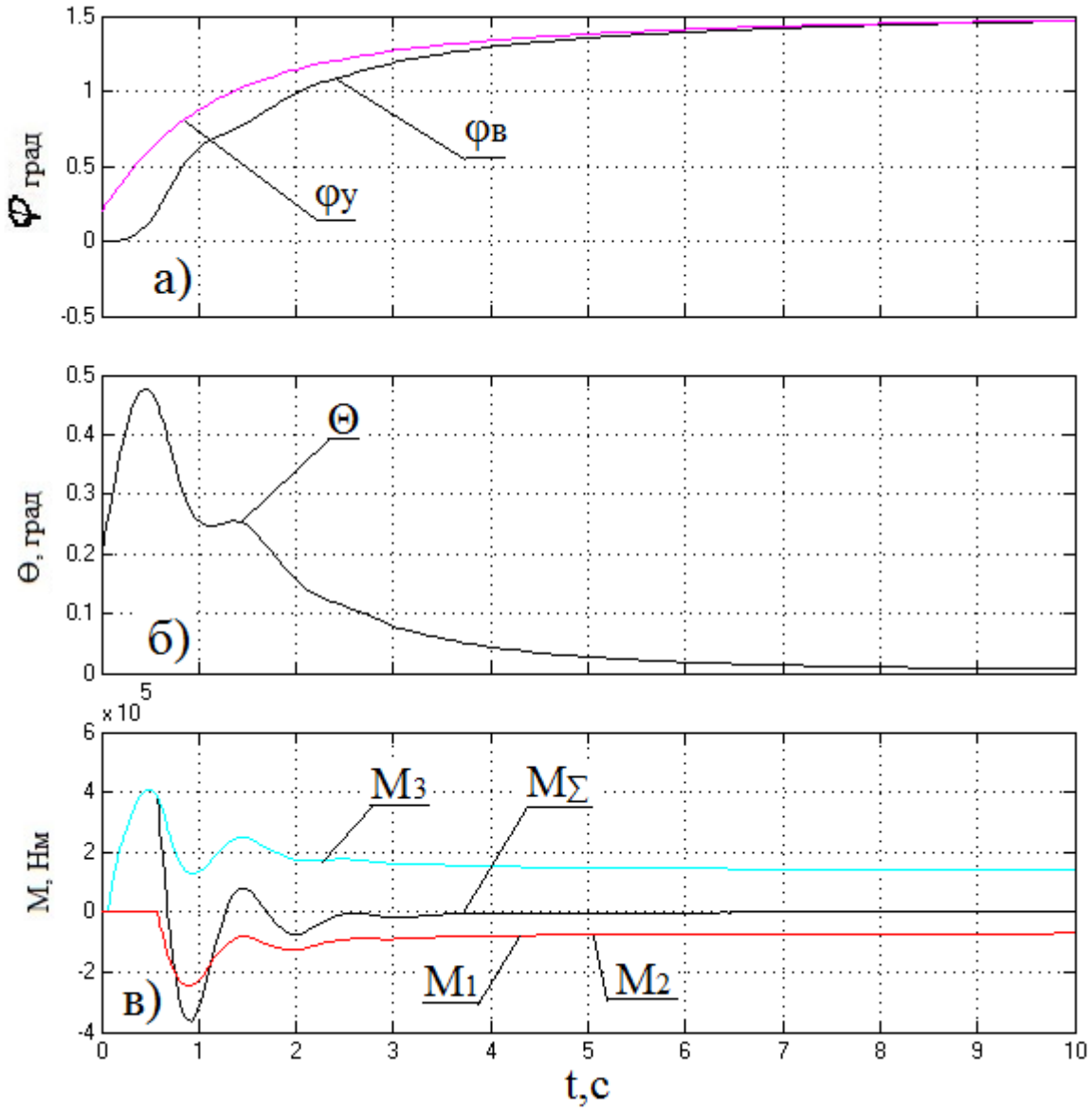

Рисунок 6.6 – Осциллограммы работы трёхканального привода со схемой УКЗ СС в режиме сопровождения с увеличенным смещением в индивидуальном канале

Рассмотрев особенности работы устройства компенсации зазора на основе введения сигнала смещения в трёхканальном электроприводе, следует рассмотреть работу устройства компенсации зазора с перекрёстными связями в аналогичном электроприводе. Преобразованное устройство с перекрёстными связями для работы в трёхканальном электроприводе показано на рисунке 6.7.

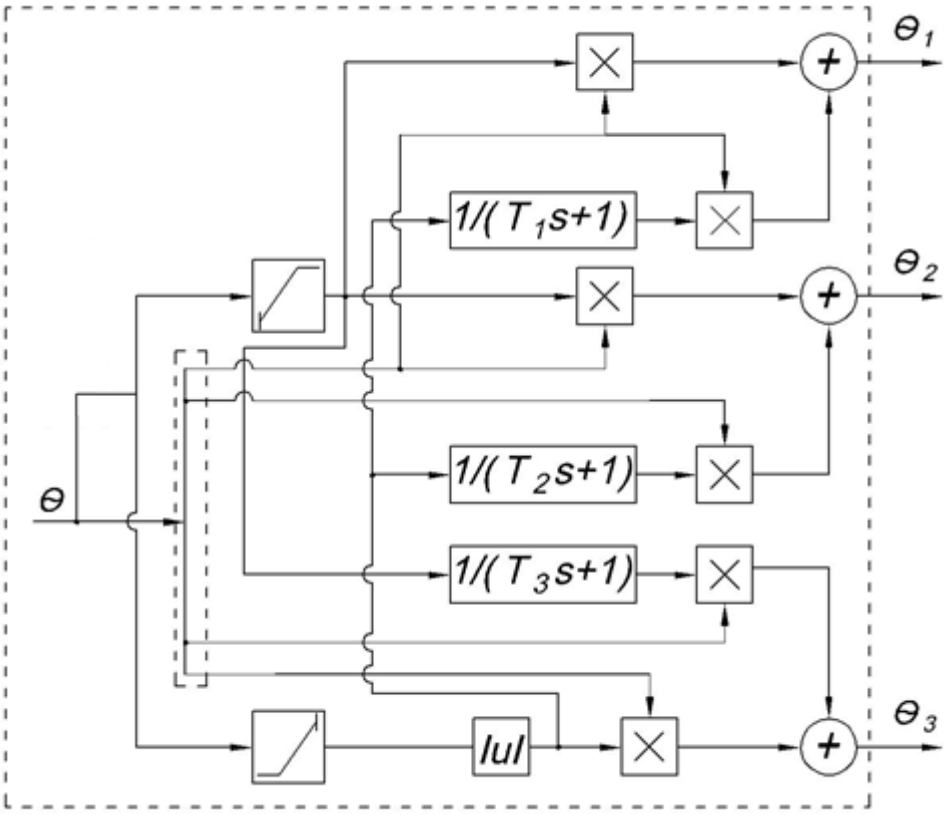

Рисунок 6.7 – Преобразованное устройство компенсации зазора с перекрёстными связями для работы в составе трёхканального электропривода

Схема устройства компенсации зазора с перекрёстными связями имеет возможности по индивидуальной настройке отдельных каналов электропривода в части величины задержки и коэффициента усиления отдельного канала. Рассмотрим параметры работы электропривода, содержащего три канала управления при отработке типовых сигналов наведения при идентичных характеристиках отдельных ИМ и параметров звеньев запаздывания.

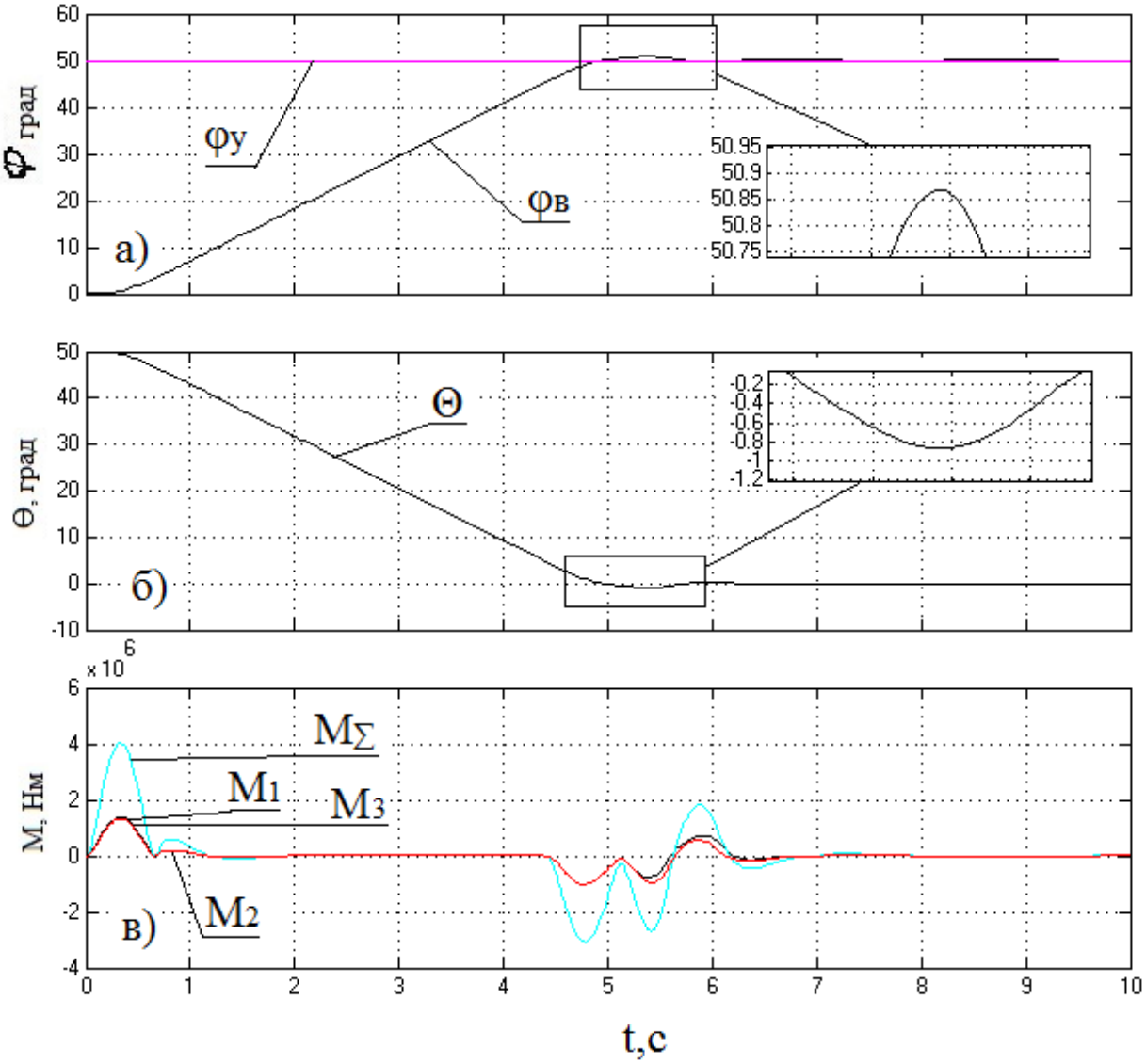

Рисунок 6.8 – Осциллограммы работы трёхканального привода со схемой УКЗ ПС в режиме целеуказания

В режиме целеуказания, когда требуется суммирование моментов отдельных каналов, электропривод эффективно отрабатывает сигнал наведения (рисунок 6.8). На рисунке 6.8в хорошо видно суммирование моментов отдельных каналов в момент пуска и торможения. Величина перерегулирования равна $0{,}85^0$ (рисунок 6.8б). Момент, развиваемый отдельным ИМ составил $1{,}35 \times 10^6$Нм.

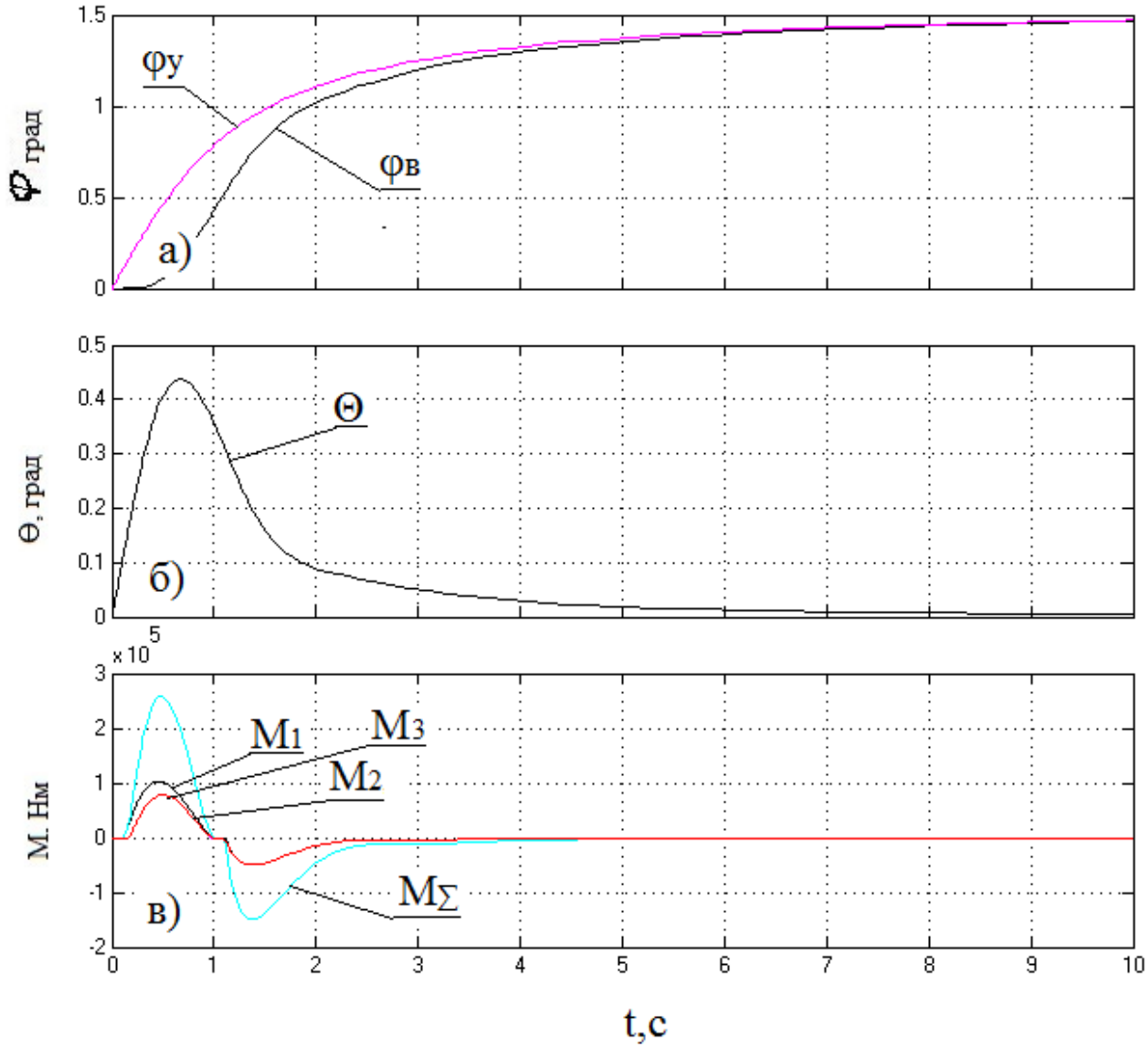

Рисунок 6.9 – Осциллограммы работы трёхканального привода со схемой УКЗ ПС в режиме сопровождения

Отработка трёхканальным электроприводом сигнала сопровождения показана на рисунке 6.9. Величина динамической ошибки в момент пуска составила $0{,}438^0$ (рисунок 6.9б), а моменты отдельных ИМ достигают $1{,}0 \times 10^5$Нм (рисунок 6.9в).

При поступлении гармонического сигнала наведения (рисунок 6.10) наблюдается суммирование моментов ИМ при пуске, и расхождение осциллограмм моментов при изменении направления движения (рисунок 6.10в). Различия значений сигнала ошибки в зависимости от направления движения не наблюдается

(рисунок 6.10б). Ошибка наведения не превышает $0{,}092^0$, максимальный момент $2{,}5x10^4$Нм.

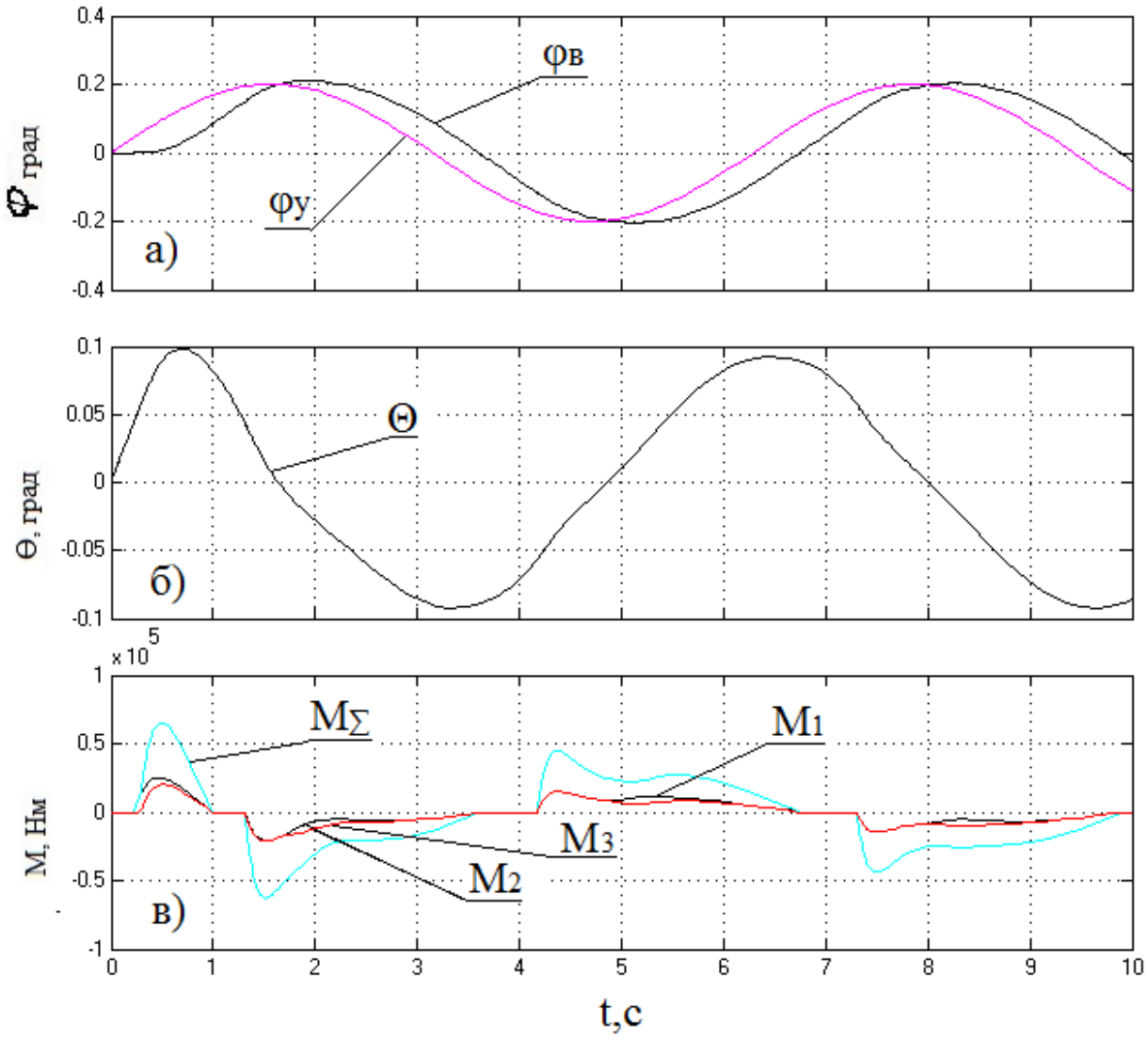

Рисунок 6.10 – Осциллограммы работы трёхканального привода со схемой УКЗ ПС при поступлении гармонического сигнала наведения

Результаты моделирования позволяют утверждать, что схема устройства компенсации зазора с перекрёстными связями, при работе в составе несимметричного трёхканального электропривода с люфтом не требует дополнительной настройки апериодических звеньев.

Результаты моделирования и анализ параметров работы трёхканального электропривода с исследуемыми устройствами компенсации зазора позволили установить, что схема с тремя ИМ является работоспособной. Особенность её

использования с устройством компенсации зазора на основе введения сигнала смещения заключается в том, что два канала управления работают парно в режимах слежения, обеспечивающих точность отработки, при этом третий канал работает индивидуально и производит повышенный момент. Для обеспечения корректной работы трёхканального электропривода требуется дополнительная настройка момента распора.

Схема устройства компенсации зазора с перекрёстными связями при работе в составе трёхканального электропривода не требует дополнительных настроек.

6.3 Особенности работы устройств компенсации зазора в электромеханическом приводе, состоящем из четырёх исполнительных механизмов

Электромеханический привод, состоящий из четырёх каналов управления, как было отмечено ранее, приближен к электроприводу, состоящему из двух каналов. В двухканальном электроприводе каждый из каналов, условно, обеспечивает движение в определённом направлении. В четырёхканальном электроприводе, по аналогии с двухканальным, два канала, условно, обеспечивают движение в прямом направлении, другие два канала – движение в противоположном. Характеристики отработки четырёхканальным электроприводом сигналов наведения с использованием устройств компенсации зазора на основе введения сигналов смещения, максимально приближены к аналогичным характеристикам двухканального электропривода. Отработка режима целеуказания показана на рисунке 6.11. Величина перерегулирования при достижении координаты целеуказания равна $0{,}57^0$ (рисунок 6.11б). В момент пуска и торможения моменты, развиваемые отдельными ИМ, достигают $1{,}1 \times 10^6$ Нм (рисунок 6.11в). В режиме сопровождения (рисунок 6.12) сигнал динамической ошибки (рисунок 6.12б) в момент пуска равен $0{,}43^0$, при этом на осциллограмме моментов (рисунок 6.12в) наблюдаются значительные моменты распоров. Значительные моменты распоров также наблюдаются при отработке

гармонического сигнала (рисунок 6.13). Момент, развиваемый отдельным ИМ достигает 6,4x10^4 Нм. Величина динамической ошибки составляет 0,089^0 (рисунок 6.13б).

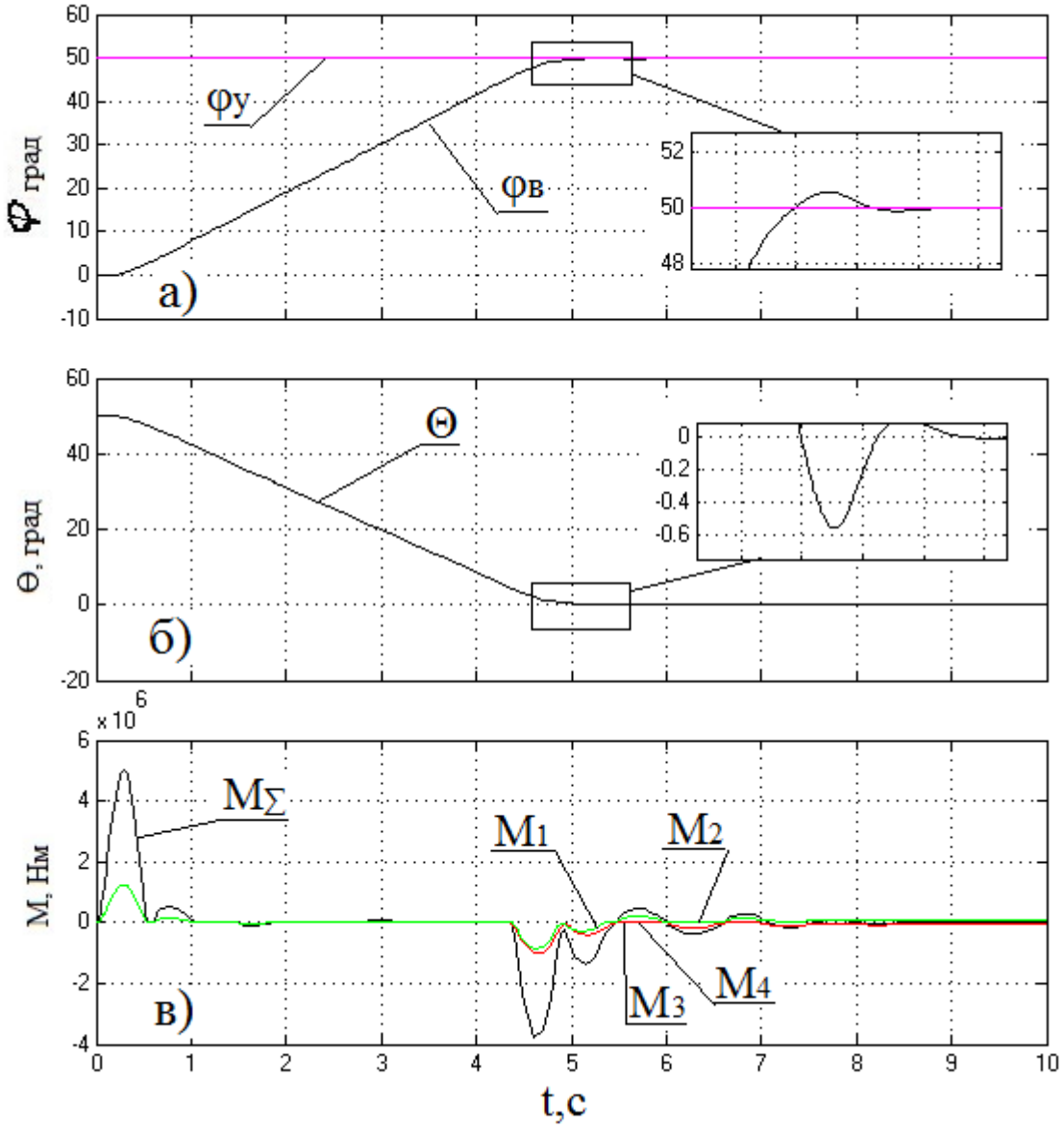

Рисунок 6.11 – Осциллограммы работы четырёхканального привода со схемой УКЗ СС в режиме целеуказания

Для электропривода, содержащего четыре ИМ и устройства компенсации зазора с перекрёстными связями, получены характеристики отработки сигналов наведения приближенные к характеристикам двухканального электропривода (рисунки 6.14-6.16). Схема подключения устройства с перекрёстными связями в четырёхканальном электроприводе аналогична двухканальному. В режиме целеуказания величина перерегулирования четырёхканального электропривода

составляет $0{,}56^0$ (рисунок 6.14б). В режиме сопровождения (рисунок 6.15) величина динамической ошибки в момент включения достигает $0{,}4^0$ (рисунок 6.15б), моменты, развиваемые отдельными ИМ, равны $8{,}5 \times 10^4$ Нм (рисунок 6.15в), что ниже аналогичных значений трёхканального электропривода (рисунок 6.8). Параметры отработки гармонического сигнала наведения (рисунок 6.16) приближены к параметрам двухканального электропривода, величина ошибки (рисунок 6.16б) не превышает $0{,}089^0$.

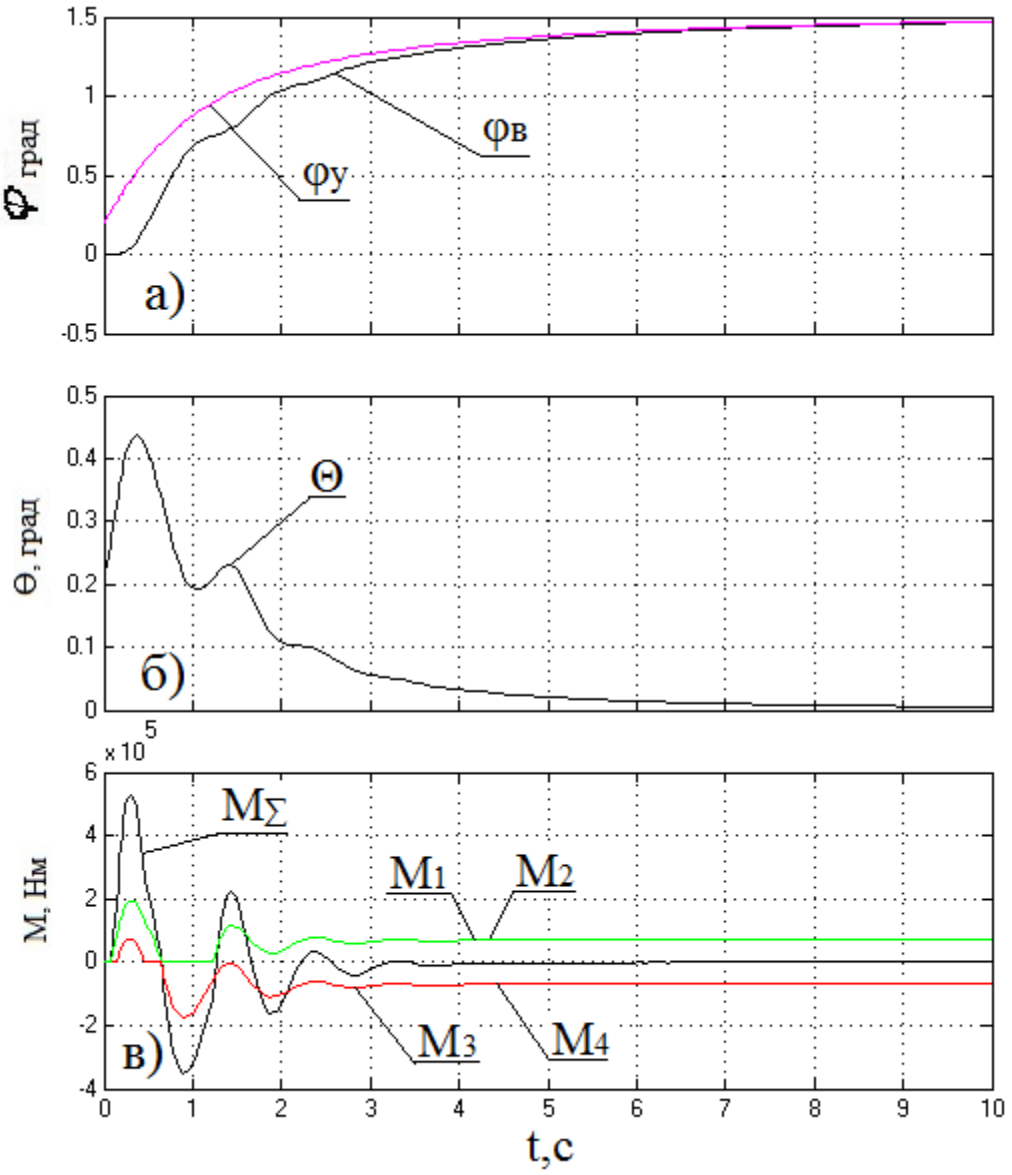

Рисунок 6.12 – Осциллограммы работы четырёхканального привода со схемой УКЗ СС в режиме сопровождения

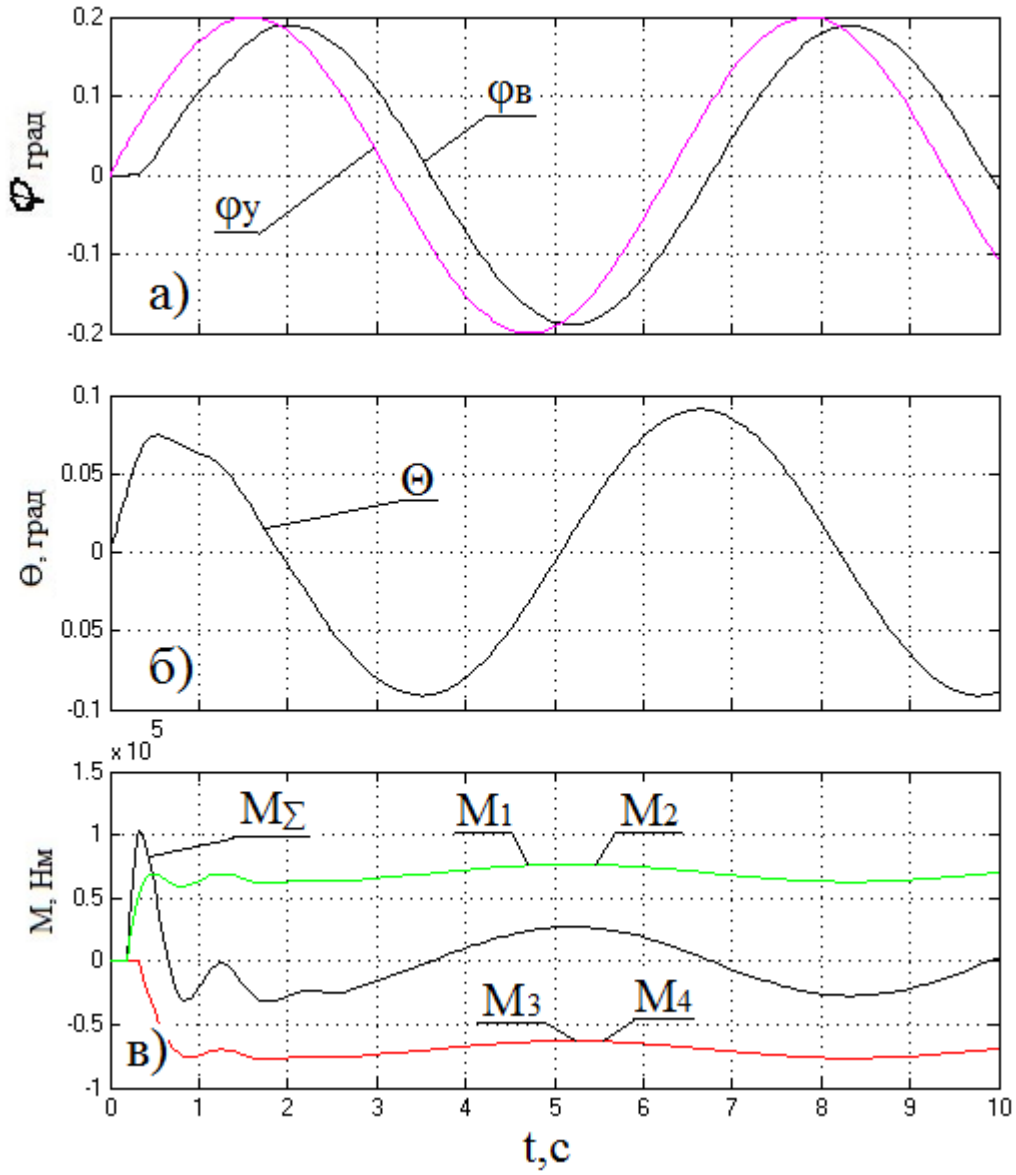

Рисунок 6.13 – Осциллограммы работы четырёхканального привода со схемой УКЗ СС при поступлении гармонического сигнала наведения

Существует и другая возможность подключения каналов четырёхканального электропривода, близкая к варианту трёхканального электропривода: три канала подключены для работы в прямом направлении, и один канал для работы в обратном. В режиме целеуказания все четыре канала задействуются для суммирования динамических возможностей электропривода.

Недостатком данной схемы подключения, как и в случае трёхканального электропривода, является асимметрия характеристик отработки в следящих режимах, которая потребует корректировки параметров устройств компенсации

зазора для одиночного канала электропривода, который будет развивать повышенный момент, что неминуемо скажется на надёжности электропривода. Поскольку никаких преимуществ перед симметричной схемой подключения данная схема не имеет, дальнейшая проработка этого варианта не проводилась.

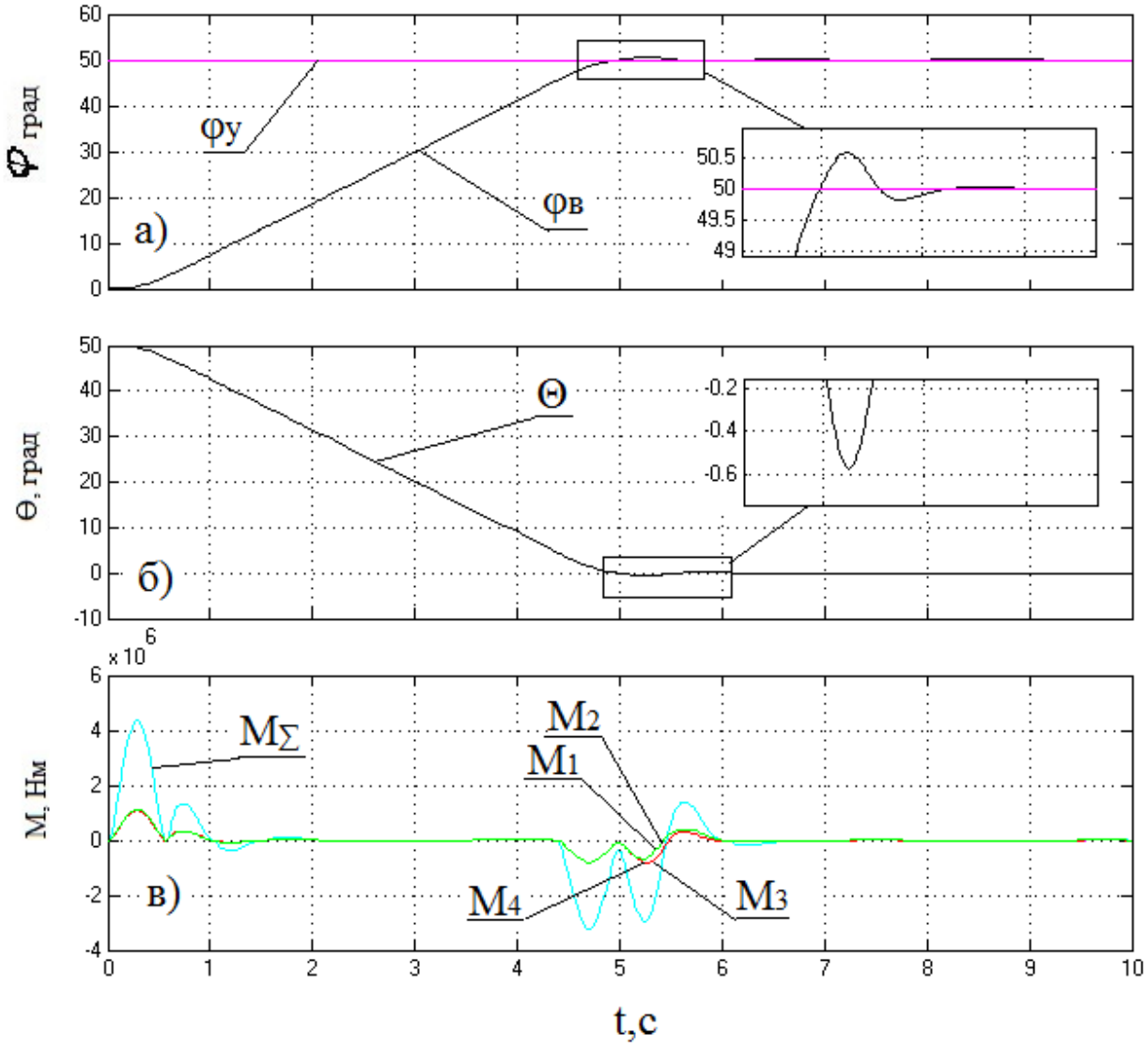

Рисунок 6.14 – Осциллограммы работы четырёхканального привода со схемой УКЗ ПС в режиме целеуказания

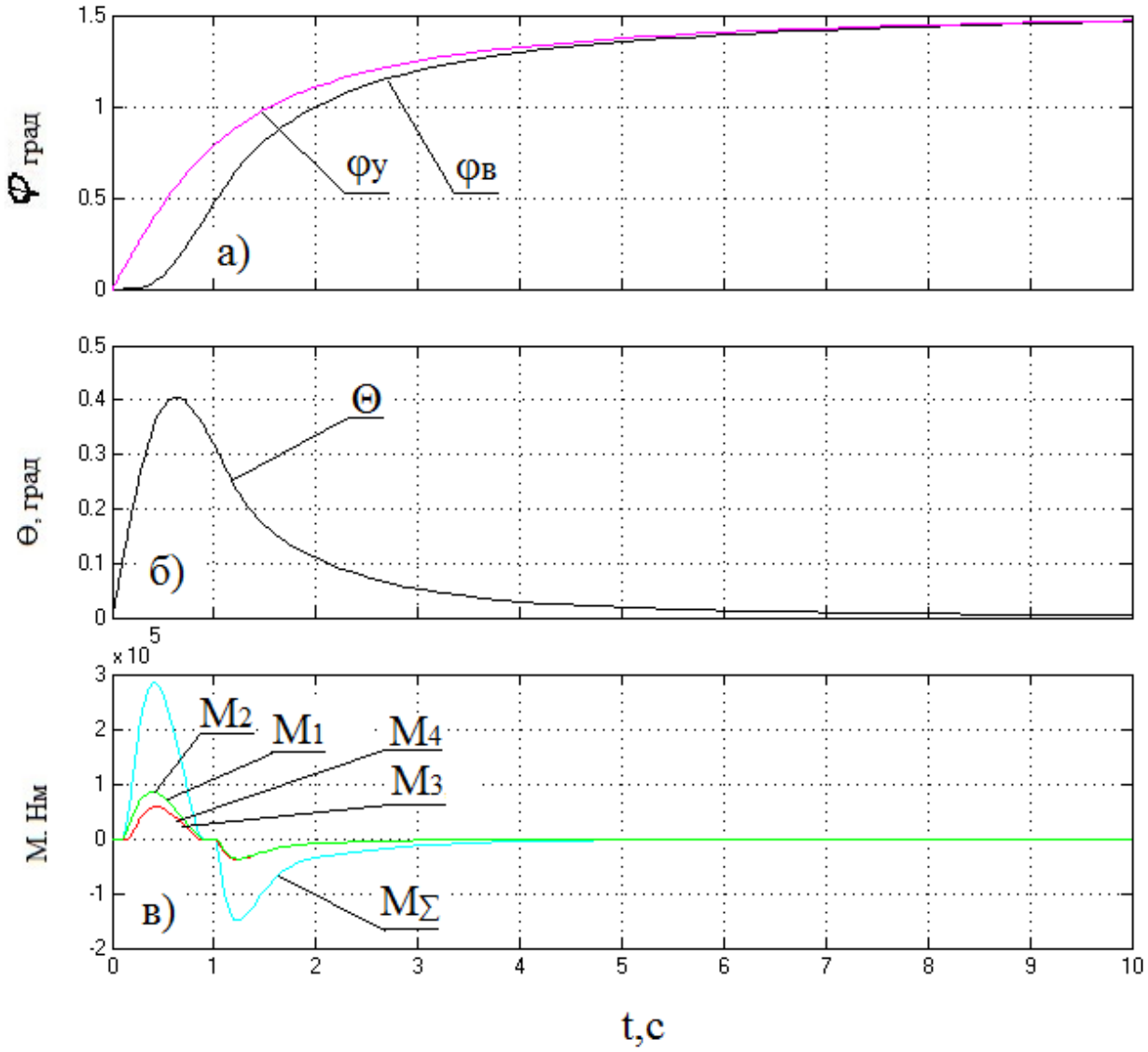

Рисунок 6.15 – Осциллограммы работы четырёхканального привода со схемой УКЗ ПС в режиме сопровождения

Таким образом, проведённое моделирование позволило установить, что для электромеханического привода, содержащего четыре канала управления, предпочтительной является симметричная схема управления каналами, при которой параметры работы электропривода максимально приближены к системе двухканального электропривода.

Реальные системы электроприводов, в частности приводы рассматриваемого ОПУ, имеют некоторый разброс характеристик отдельных каналов. Механические передачи содержат люфты, величины которых отличаются в каждом из четырёх каналов. Электрическое сопротивление якорной цепи двигателя,

электромеханическая постоянная времени электродвигателя также может отличаться, что может привести к различию быстродействия отдельных каналов электропривода.

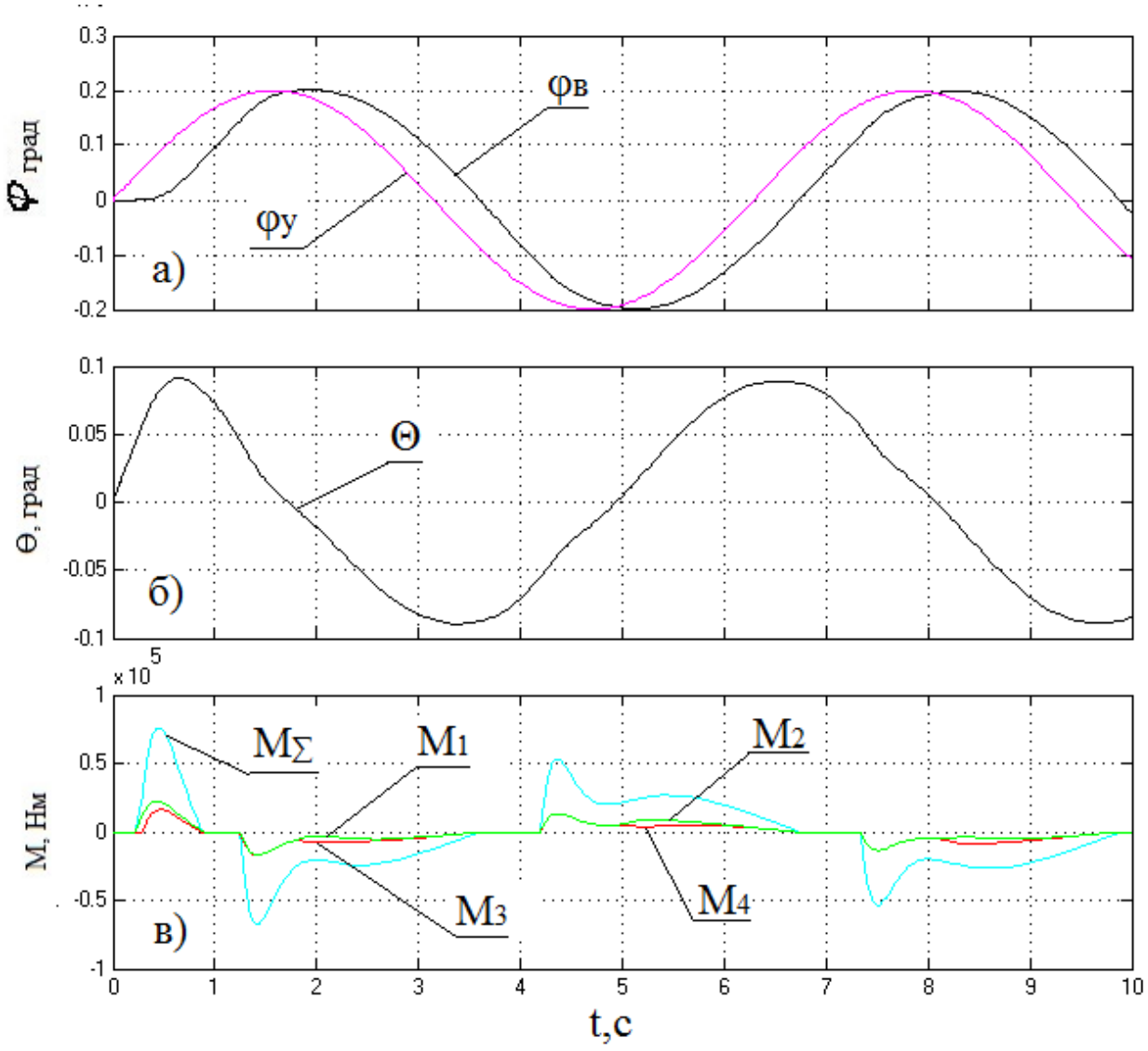

Рисунок 6.16 – Осциллограммы работы привода со схемой УКЗ ПС при поступлении гармонического сигнала наведения

Особенности работы четырёхканального электромеханического привода с различными устройствами компенсации зазора при не идентичности параметров отдельных каналов следует рассмотреть подробнее для выработки рекомендаций по восстановлению характеристик исследуемого ОПУ.

6.4 Исследование особенностей работы четырёхканального электропривода при не идентичности величин зазора механических передач

Ранее в главе 1 получена формула расчёта точности механической передачи, с учётом воздействия коррозии, вызванной продолжительным атмосферным воздействием. В результате расчёта установлен интервал возможного изменения точности механических передач после воздействия коррозии. Согласно полученным результатам, кинематическая точность механической передачи каждого канала электропривода находится в интервале от 0,7 угл.мин ($0{,}011^0$) до 3,24 угл.мин ($0{,}054^0$). Для двух каналов принимаем крайние значения данного интервала. Согласно результатам измерения кинематической точности (величины люфта) механической передачи на объекте исследования, представленным в главе 2, получено значение 0,99 угл.мин ($0{,}016^0$). Данное значение принимаем для третьего канала. Значение величины люфта четвёртого канала принимаем равным 5 угл.мин ($0{,}082^0$) – максимальное допустимое значение люфта для механической передачи электропривода, согласно руководству по эксплуатации ОПУ.

Получив значение величин люфта для каждого из четырёх каналов, следует оценить работу электропривода с устройствами компенсации зазора при не идентичных характеристиках отдельных каналов.

Результаты моделирования работы четырёхканального электропривода с устройством компенсации зазора на основе введения сигнала смещения показывают, что различие величин люфта в отдельных каналах практически не влияет на отработку приводом рассматриваемых сигналов наведения (рисунки 6.17-6.19). Отработка режима целеуказания показана на рисунке 6.17. Величина перерегулирования при достижении координаты целеуказания равна $0{,}45^0$ (рисунок 6.17б). В момент пуска и торможения моменты, развиваемые отдельными ИМ, достигают значения в $1{,}25 \times 10^6$ Нм (рисунок 6.17в). В режиме сопровождения (рисунок 6.18) моменты распора действуют с момента включения (рисунок 6.18в), величина момента распора значительно превышает суммарный момент, прикладываемый к объекту управления. Величина динамической ошибки в момент

включения достигает $0{,}41^0$ (рисунок 6.18б). При отработке гармонического сигнала наведения (рисунок 6.19) величина ошибки достигает $0{,}1^0$ (рисунок 6.19б), моменты распора (рисунок 6.19в) также значительно превышают суммарный момент.

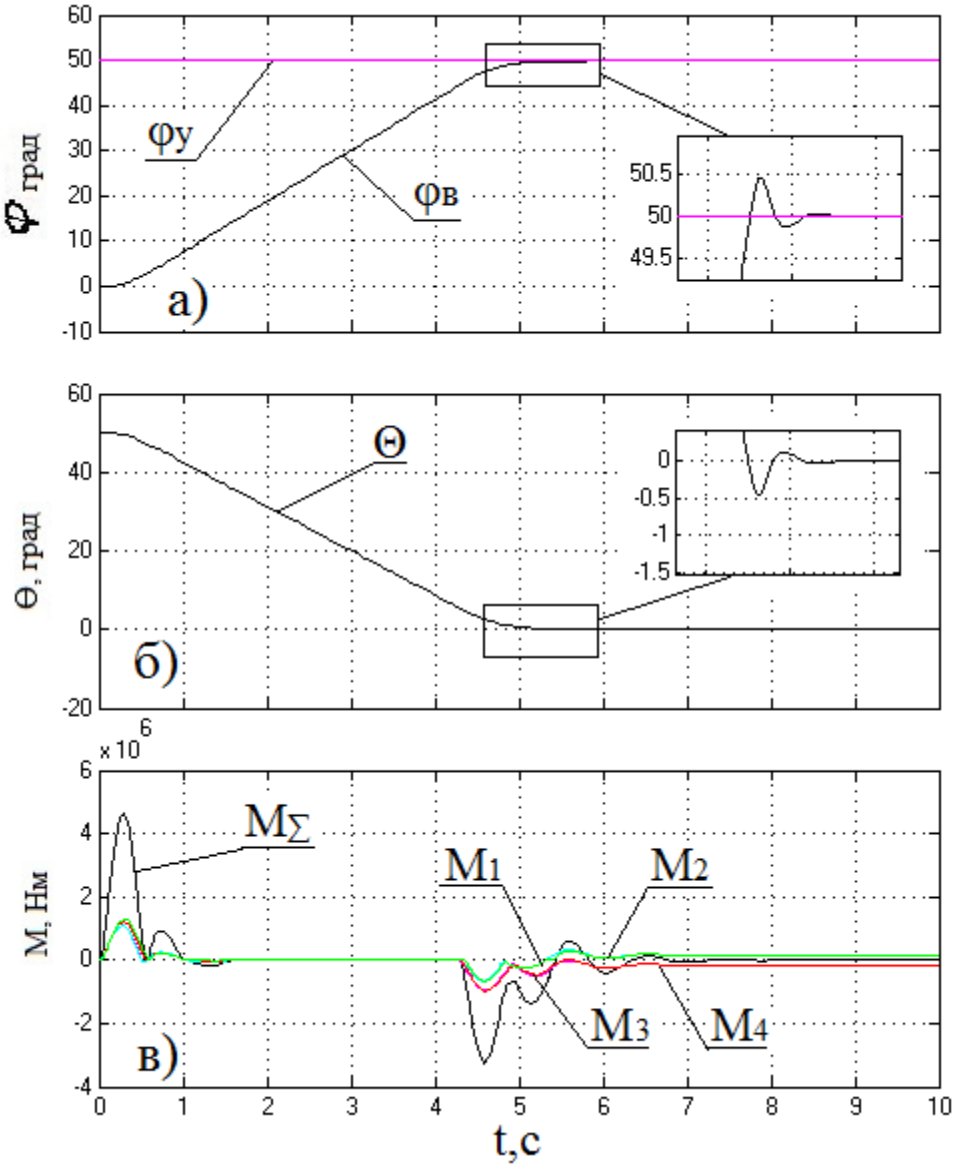

Рисунок 6.17 – Осциллограммы работы четырёхканального привода со схемой УКЗ СС в режиме целеуказания при не идентичности величин люфта

Результаты моделирования работы четырёхканального электропривода с устройством компенсации зазора с перекрёстными связями показывают, что различие величин люфта в отдельных каналах так же, как и при работе устройства компенсации зазора на основе введения сигнала смещения, практически не влияет на характеристики отработки типовых сигналов наведения (рисунки 6.20-6.22).

Отработка режима целеуказания показана на рисунке 6.20. Величина перерегулирования при достижении координаты целеуказания равна $0{,}485^0$ (рисунок 6.20б). В момент пуска и торможения моменты, развиваемые отдельными ИМ, суммируются (рисунок 6.20в).

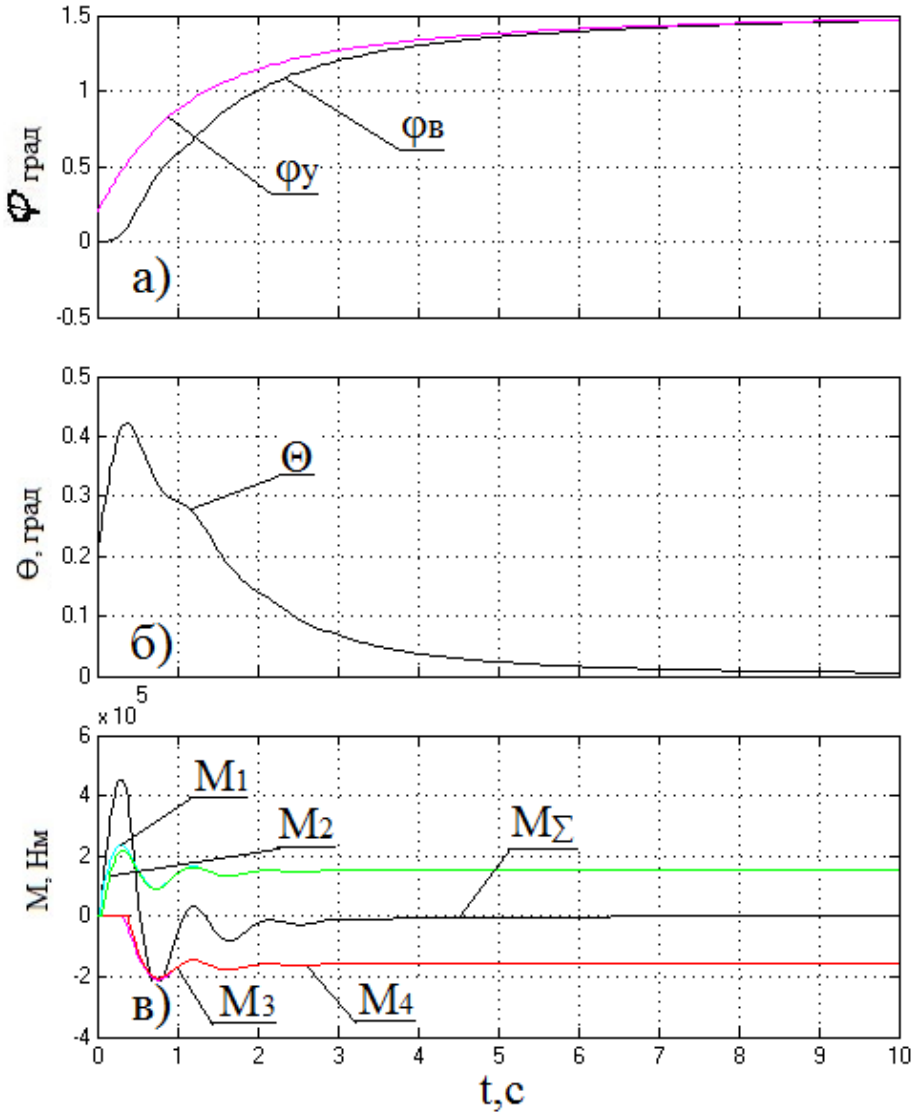

Рисунок 6.18 – Осциллограммы работы четырёхканального привода со схемой УКЗ СС в режиме сопровождения при не идентичности величин люфта

При отработке сигнала сопровождения (рисунок 6.21) величина динамической ошибки в момент включения достигает $0{,}415^0$ (рисунок 6.21б). На осциллограмме моментов (рисунок 6.21в) можно наблюдать различие моментов отдельных ИМ, связанных с необходимостью настройки устройства с перекрёстными связями на величину люфта.

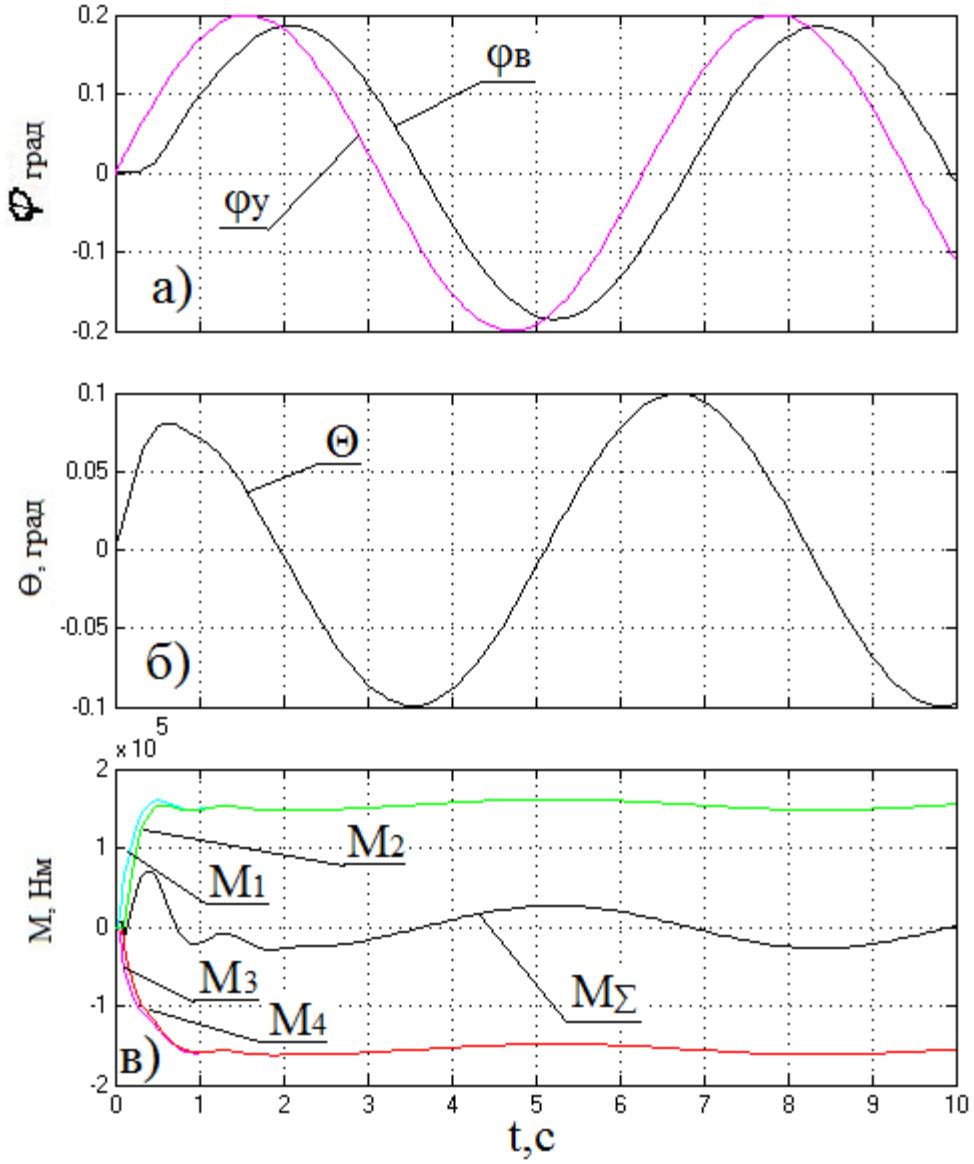

Рисунок 6.19 – Осциллограммы работы четырёхканального привода со схемой УКЗ СС при поступлении гармонического сигнала наведения при не идентичности величин люфта

Аналогичная ситуация наблюдается при отработке гармонического сигнала (рисунок 6.22). Величина динамической ошибки при отработке достигает $0{,}09^0$ (рисунок 6.22б). На осциллограмме моментов (рисунок 6.22в) хорошо видно различие моментов отдельных ИМ, поскольку параметры устройства компенсации зазора с перекрёстными связями для всех четырёх каналов в модели равны. Ранее, в главе 4, было показано, что параметры устройства зависят от величины люфта и требуют отдельной настройки.

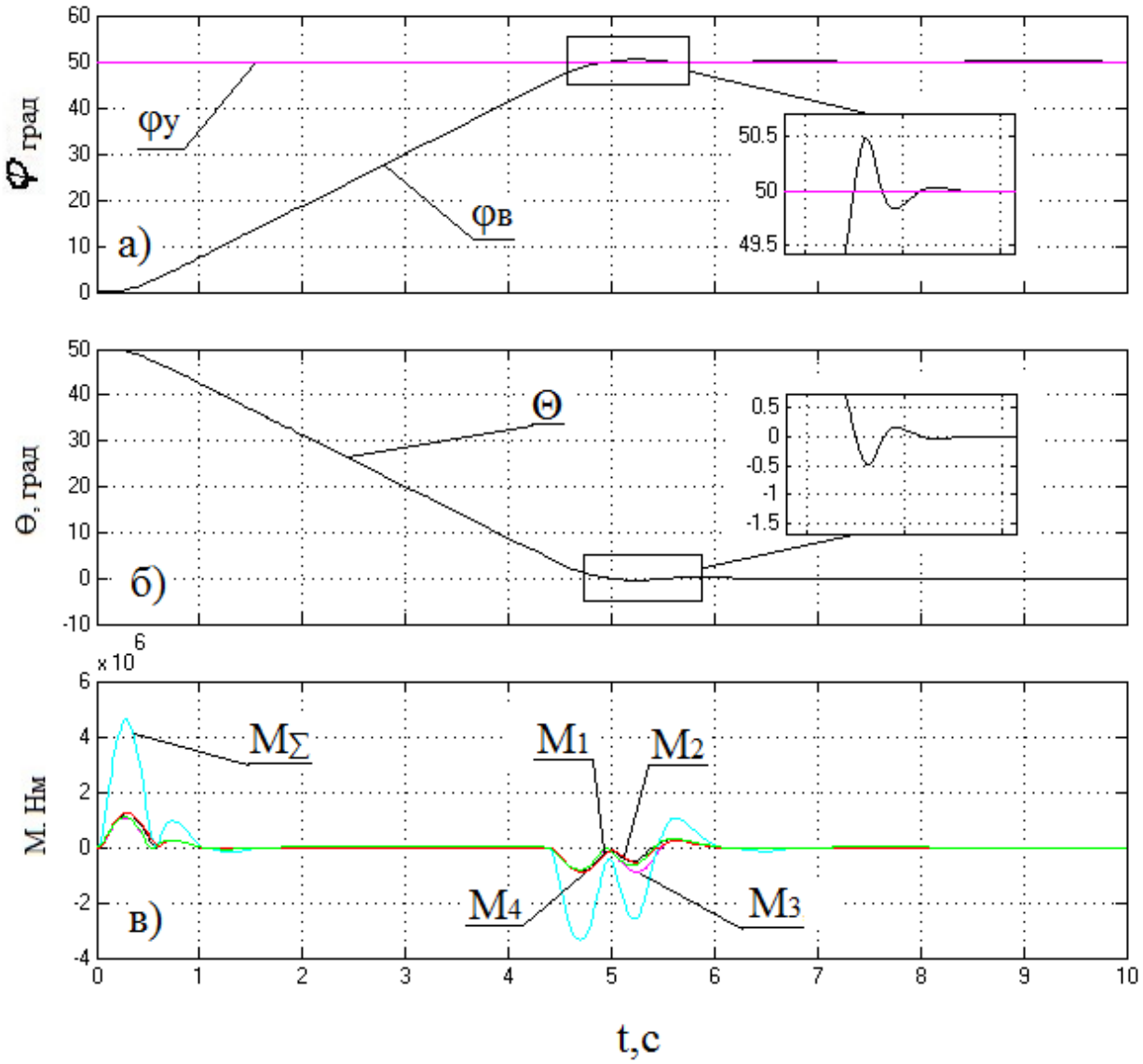

Рисунок 6.20 – Осциллограммы работы четырёхканального привода со схемой УКЗ ПС в режиме целеуказания при не идентичности величин люфта

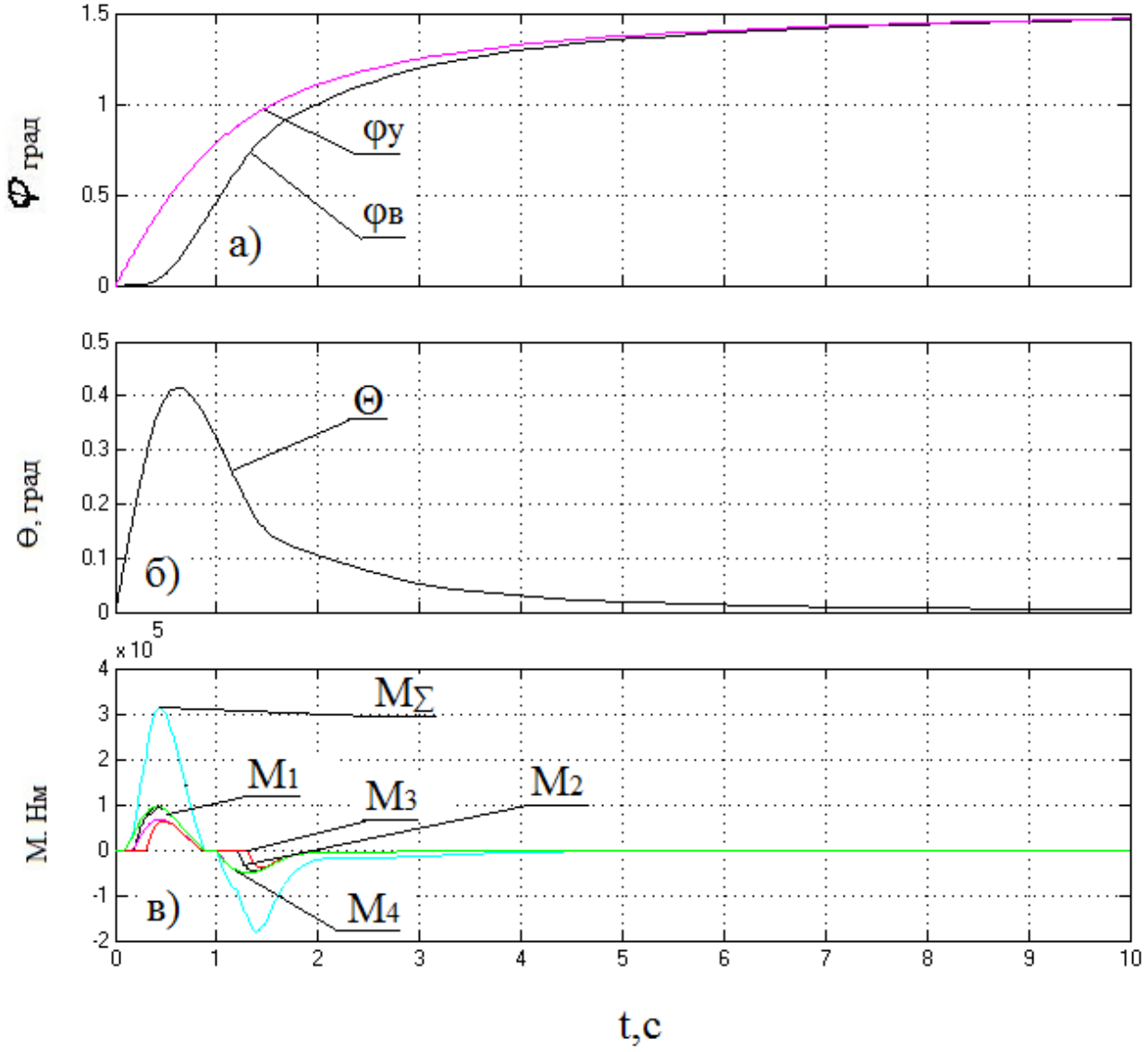

Рисунок 6.21 – Осциллограммы работы четырёхканального привода со схемой УКЗ ПС в режиме сопровождения при не идентичности величин люфта

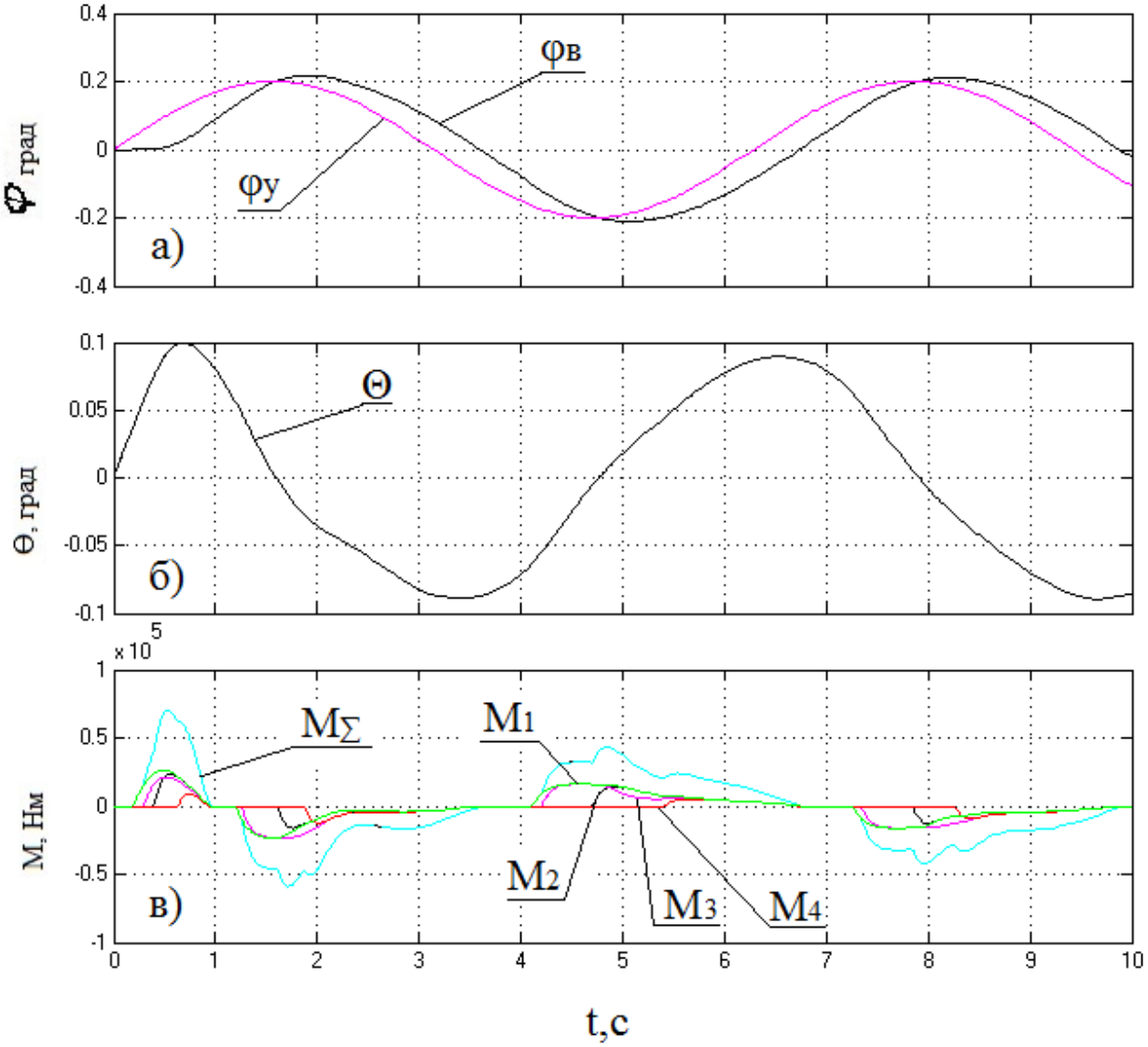

Рисунок 6.22 – Осциллограммы работы четырёхканального привода со схемой УКЗ ПС при поступлении гармонического сигнала наведения при не идентичности величин люфта

Анализ результатов моделирования позволяет сделать вывод, что в четырёхканальном электроприводе с устройством компенсации зазора разброс параметров люфта отдельных каналов не оказывает существенного влияния на работу электропривода. Устройство с перекрёстными связями требует настройки параметров звеньев запаздывания на величину люфта, устройство с введением сигнала смещения позволяет отрабатывать сигналы наведения без дополнительных настроек.

6.5 Исследование особенностей работы четырёхканального электропривода при не идентичности значений сопротивления якорной цепи

Существенным параметром, оказывающим влияние на работу системы электромеханического привода, является сопротивление якорной обмотки, изменение которого оказывает влияние на быстродействие электродвигателя, потребляемый ток, и соответственно, на производимый момент.

Поскольку точные сведения о величинах электрического сопротивления якорных цепей для каждого конкретного электропривода отсутствуют, предполагается, что различия значений сопротивления находится в пределах ±10% от номинального значения, тогда:

$$R_{я\,max} = 1{,}1 \times R_{я\,ном} = 1{,}1 \times 0{,}219 = 0{,}24[\text{Ом}];$$

$$R_{я\,min} = 0{,}9 \times R_{я\,ном} = 0{,}9 \times 0{,}219 = 0{,}19[\text{Ом}].$$

Таким образом, электромеханическая постоянная времени будет принимать значение в интервале:

$$T_{max} = \frac{L_я}{R_{я\,min}} = \frac{0{,}005}{0{,}19} = 0{,}026[\text{с}];$$

$$T_{min} = \frac{L_я}{R_{я\,max}} = \frac{0{,}005}{0{,}24} = 0{,}02[\text{с}].$$

Полученные значения введены в математическую модель электромеханического привода со следующим распределением: первый канал -10% от номинального значения; второй канал +10% от номинального значения; третий канал +5% от номинального значения; четвёртый канал – номинальное значение.

Рассмотрим параметры работы электромеханического привода с устройством компенсации зазора на основе введения сигнала смещения, при отработке сигналов наведения, при не идентичных параметрах электрического сопротивления и электромеханической постоянной времени в отдельных каналах.

При отработке электроприводом сигнала в режиме целеуказания (рисунок 6.23) характер движения объекта управления приближен к идеализированной модели, осциллограмма развиваемых моментов (рисунок 6.23в) показывает, что в

момент пуска, развиваемые отдельными ИМ моменты суммируются, а при достижении указанной координаты, производят моменты распора.

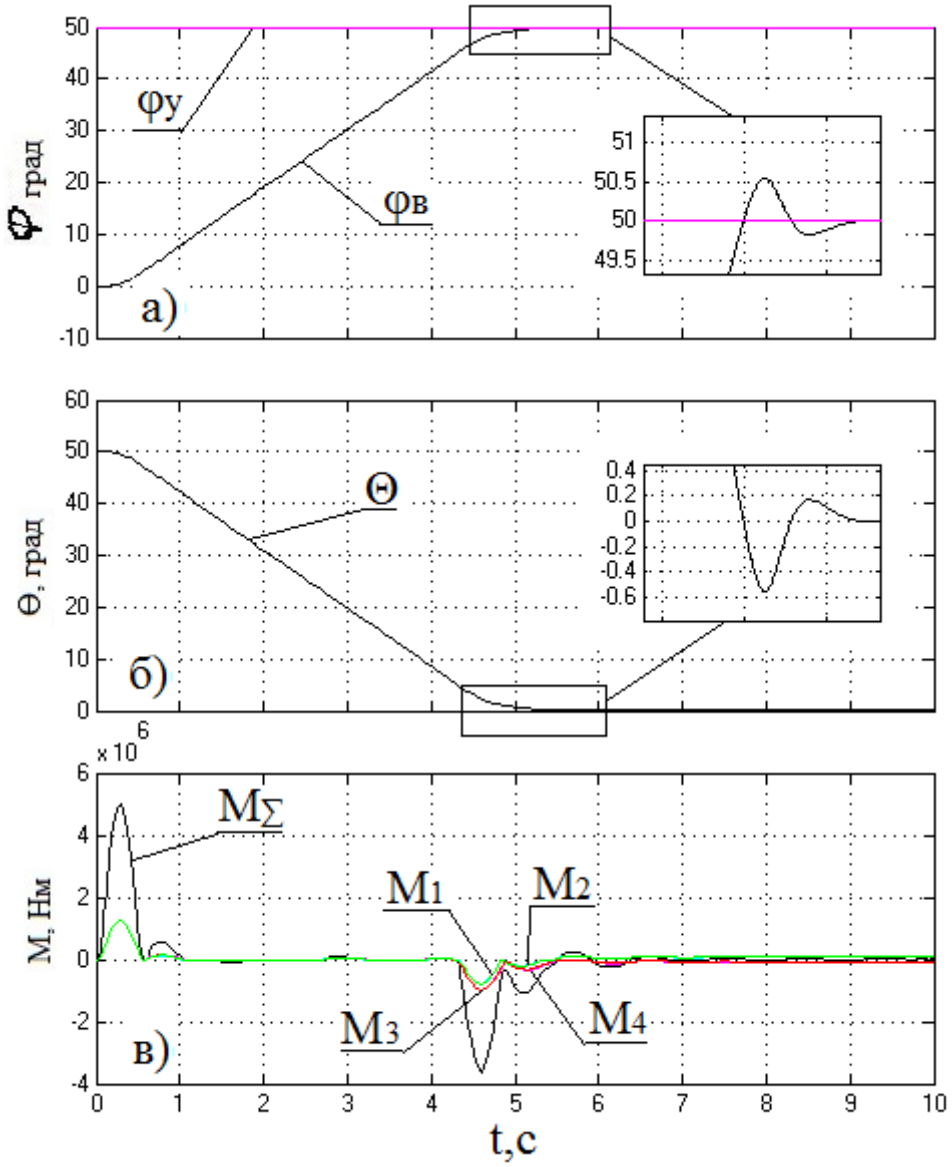

Рисунок 6.23 – Осциллограммы работы четырёхканального привода со схемой УКЗ СС в режиме целеуказания при не идентичности параметров электродвигателей

Максимальное значение момента ИМ равно $1{,}1 \times 10^6$ Нм. Величина перерегулирования при достижении координаты целеуказания равна $0{,}56^0$ (рисунок 6.23б).

При отработке сигнала в режиме сопровождения (рисунок 6.24) наблюдается незначительные расхождения осциллограмм моментов отдельных каналов,

связанных с не идентичностью параметров электродвигателей (рисунок 6.24в). Максимальное значение момента ИМ равно $1{,}7 \times 10^5$ Нм. Величина ошибки в момент включения достигает $0{,}44^0$ (рисунок 6.24б).

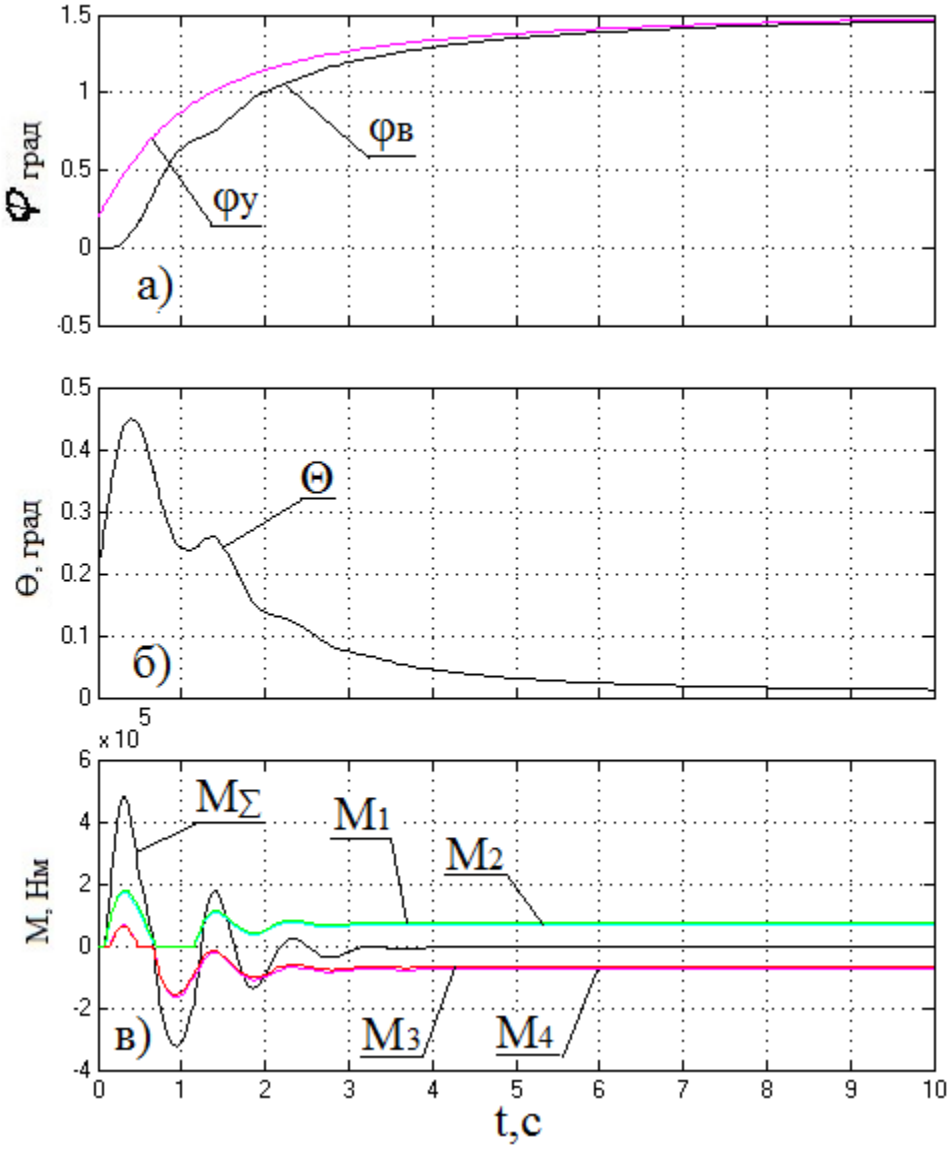

Рисунок 6.24 – Осциллограммы работы четырёхканального привода со схемой УКЗ СС в режиме сопровождения при не идентичности параметров электродвигателей

Отработка электромеханическим приводом гармонического сигнала наведения при не идентичных параметрах электродвигателей в отдельных каналах показана на рисунке 6.25.

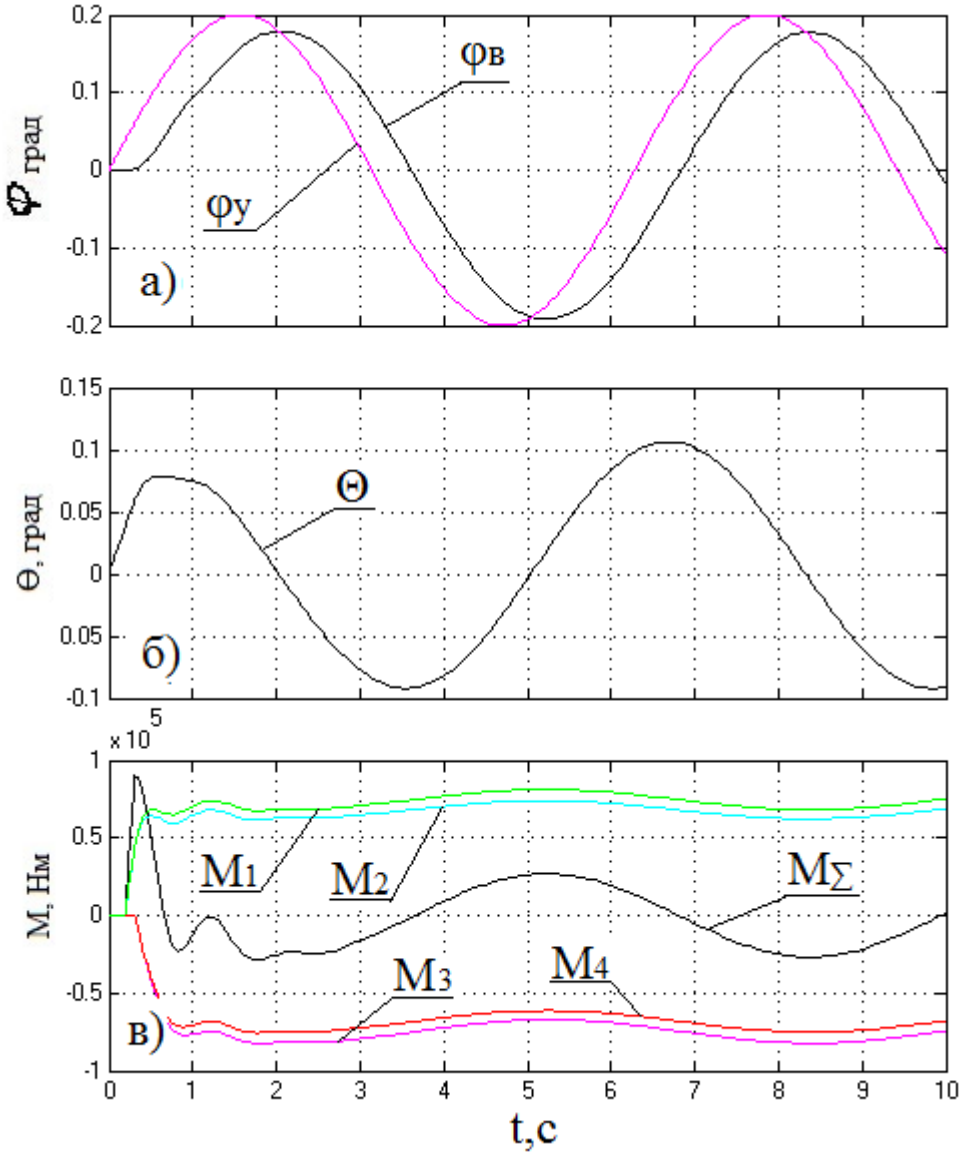

Рисунок 6.25 – Осциллограммы работы четырёхканального привода со схемой УКЗ СС при поступлении гармонического сигнала наведения при не идентичности параметров электродвигателей

Отработка гармонического сигнала малой амплитуды имеет отличительную особенность: не идентичность параметров влияет на развиваемые моменты (рисунок 6.25в), что приводит к увеличению ошибки отработки сигнала наведения в зависимости от направления движения – $0{,}09^0$ при движении в прямом, и $0{,}11^0$ при работе в обратном направлениях (рисунок 6.25б).

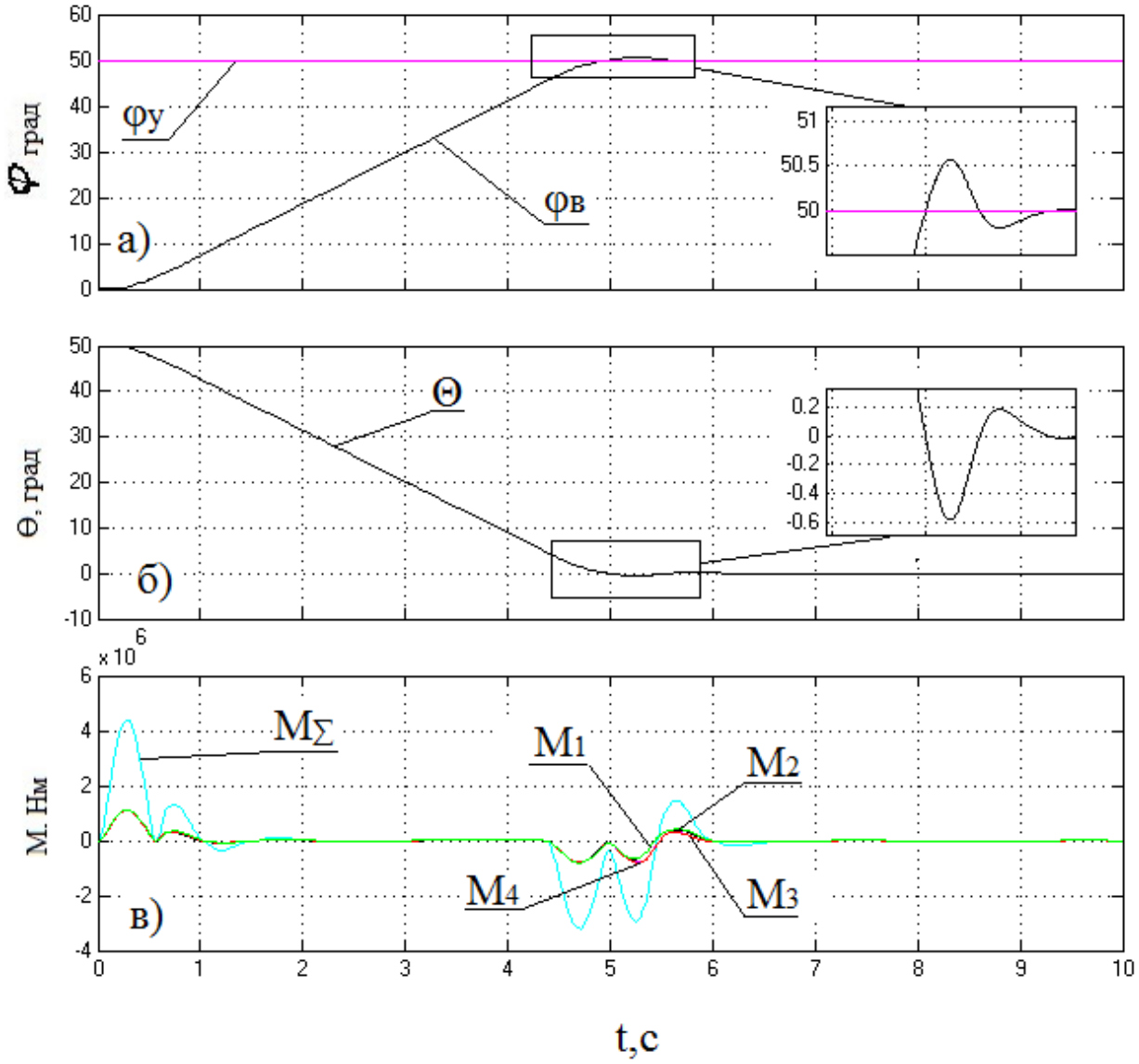

Рисунок 6.26 – Осциллограммы работы четырёхканального привода со схемой УКЗ ПС в режиме целеуказания при не идентичности параметров электродвигателей

Анализ параметров работы устройства компенсации зазора, на основе введения сигнала смещения, при не идентичности параметров отдельных электродвигателей показывает, что привод работоспособен, однако обеспечение точности отработки требует корректировки параметров электродвигателей, которые возможно произвести путём введения дополнительных сопротивлений в цепи двигателей.

Рассмотрим параметры работы электромеханического привода с устройством компенсации зазора с перекрёстными связями при не идентичности параметров

электродвигателей в отдельных каналах и равной величине люфта. Осциллограммы отработки электромеханическим приводом сигнала наведения в режиме целеуказания показаны на рисунке 6.26. В момент включения наблюдается суммирование моментов. На рисунке 6.26в, различие развиваемых моментов отдельными ИМ не наблюдается, при этом общая характеристика отработки приближена к идеализированной модели. Величина перерегулирования равна $0{,}57^0$ (рисунок 6.26б). Момент, развиваемый отдельным ИМ составил $1{,}1 \times 10^6$Нм.

При отработке электромеханическим приводом режима сопровождения (рисунок 6.27) различие развиваемых моментов (рисунок 6.27в) также не наблюдается. Величина динамической ошибки в момент пуска составила $0{,}4^0$ (рисунок 6.27б), а моменты отдельных ИМ достигает $8{,}8 \times 10^4$ Нм (рисунок 6.27в).

При поступлении на электромеханический привод гармонического сигнала наведения малой амплитуды (рисунок 6.28) наблюдается различие развиваемых моментов (рисунок 6.28в) при изменении направления движения, что не оказывает влияния на точность отработки сигнала наведения в прямом ($0{,}09^0$) и обратном ($0{,}09^0$) направлениях (рисунок 6.28б).

Анализ результатов моделирования работы четырёхканального электромеханического привода при не идентичности параметров электродвигателей в отдельных каналах показывает, что разброс характеристик электродвигателей ±10% оказывает влияния на характеристики отработки электроприводом сигналов наведения с устройством компенсации зазора на основе введения сигналов смещения.

В результате моделирования работы электропривода с устройством компенсации зазора с перекрёстными связями влияние не идентичностей параметров отдельных электродвигателей на точность отработки сигналов наведения не обнаружено. Несмотря на это, использование устройства компенсации зазора с перекрёстными связями в электроприводе с различием параметров быстродействия электродвигателей не желательно, поскольку при ином распределении отклонений в отдельных каналах, и в других режимах наведения точность работы может быть снижена. Поэтому, при использовании устройства с

перекрёстными связями в системе с не идентичными параметрами отдельных электродвигателей рекомендуется, как и для устройства на основе введения сигналов смещения, использовать дополнительные сопротивления в цепях электродвигателей для обеспечения соответствующих характеристик.

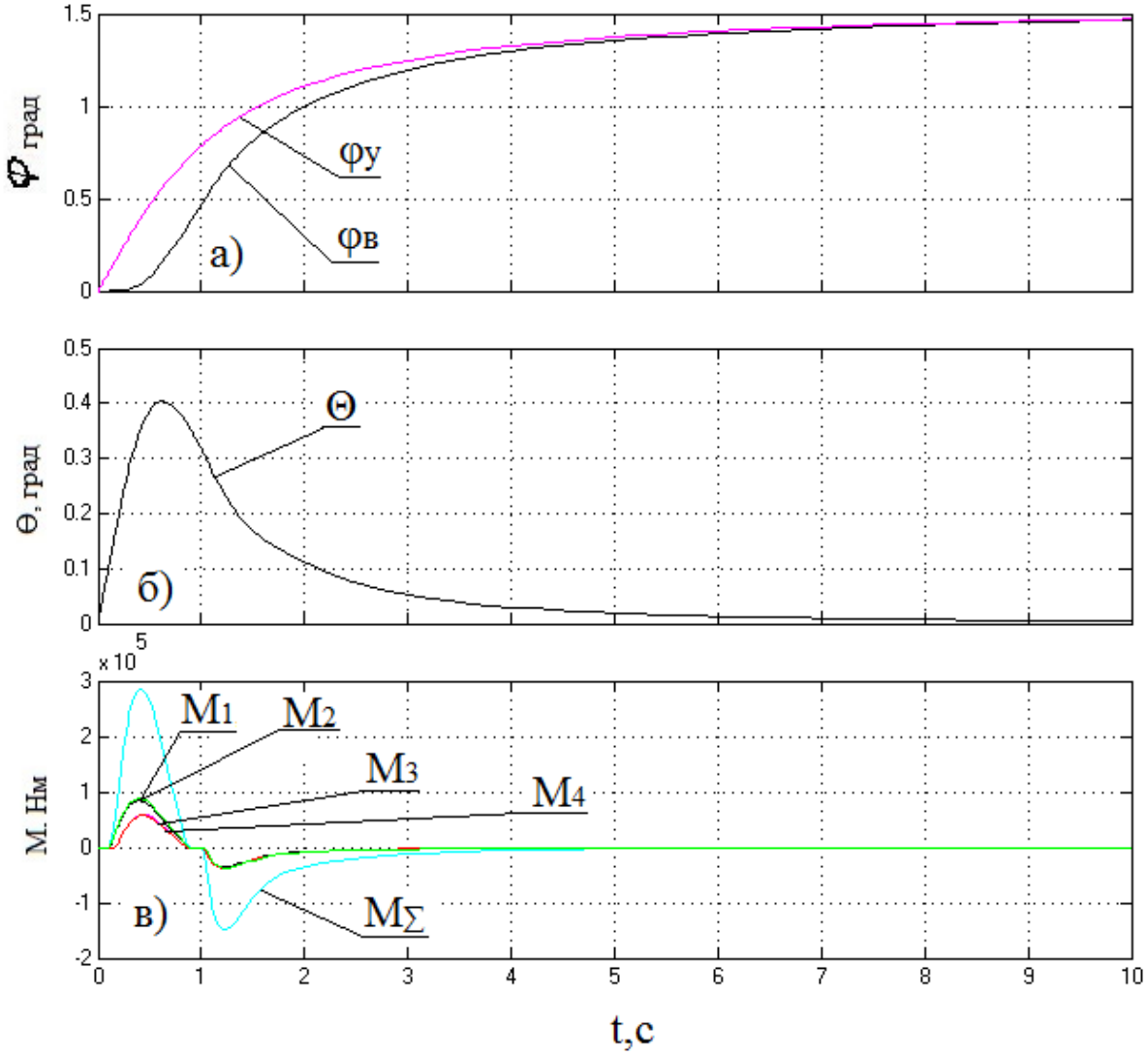

Рисунок 6.27 – Осциллограммы работы четырёхканального привода со схемой УКЗ ПС в режиме сопровождения при не идентичности параметров электродвигателей

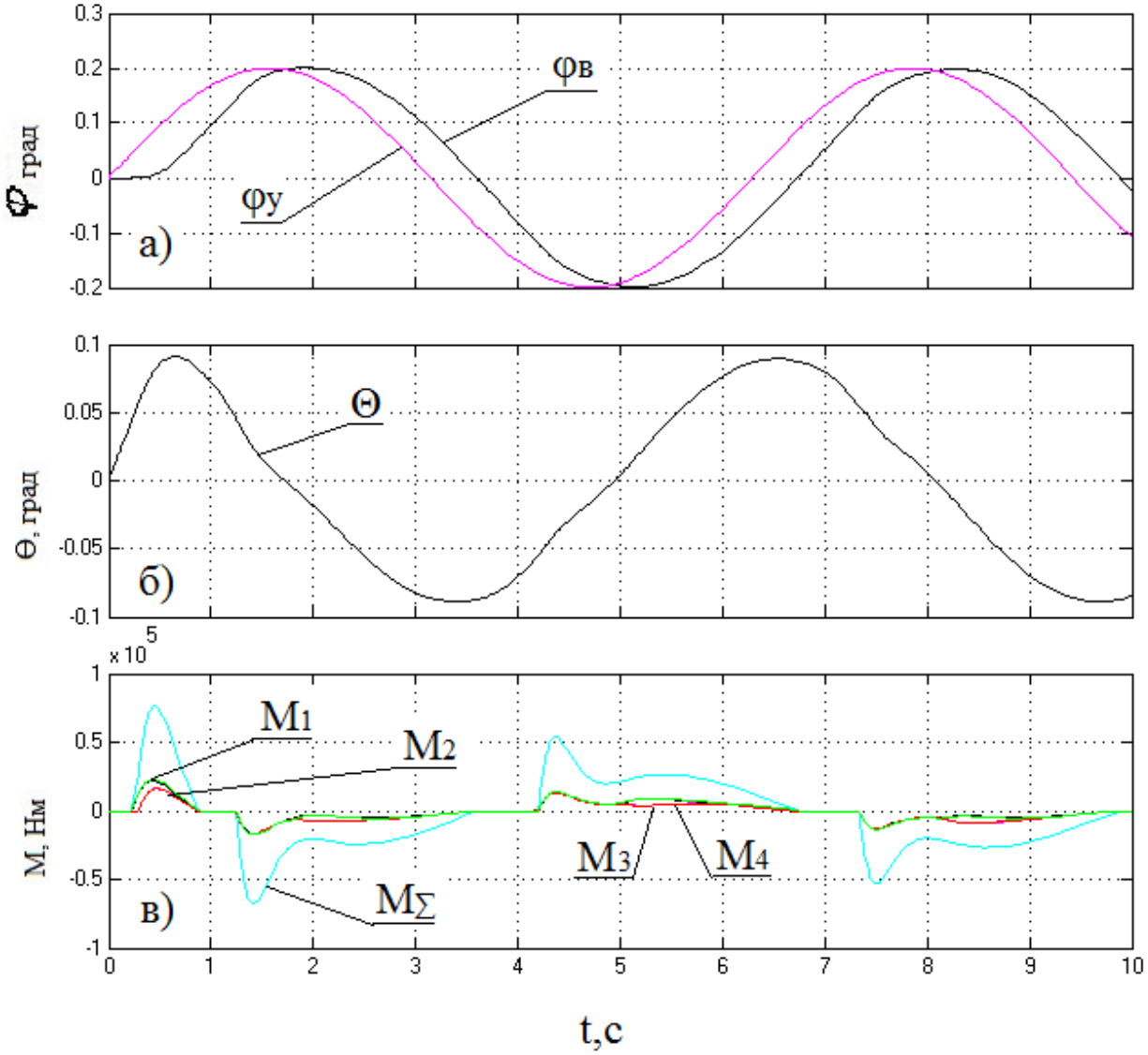

Рисунок 6.28 – Осциллограммы работы четырёхканального привода со схемой УКЗ ПС при поступлении гармонического сигнала наведения при не идентичности параметров электродвигателей

6.6 Разработка рекомендаций по восстановлению параметров точности крупногабаритного ОПУ после продолжительного атмосферного воздействия

Продолжительное атмосферное воздействие привело к образованию коррозии элементов ОПУ. Коррозия деталей редукторов привела к увеличению зазоров в механических передачах (люфтов) и снижению точности работы электроприводов.

Рассмотрены возможные способы восстановления геометрических размеров деталей механических передач путём нанесения слоя материала, потерянного в результате коррозии. Поскольку приводы исследуемого ОПУ содержат четыре исполнительных механизма, существует возможность восстановления точности работы электропривода, использованием специальных схем управления исполнительными механизмами, с целью компенсации действия люфтов созданием моментов распоров (моментов выборки люфта).

В результате анализа возможных путей восстановления установлено, что использование устройства компенсации зазора (УКЗ) предпочтительно, поскольку данный путь восстановления и поддержания точности не потребует существенных затрат.

Рассмотрены возможные способы компенсации зазора в электроприводе, состоящем из нескольких исполнительных механизмов и выбрано УКЗ, которое возможно реализовать в исследуемом ОПУ. В результате рассмотрения особенностей выбранного УКЗ выявлены некоторые недостатки его работы, устранение которых привело к созданию нового УКЗ с перекрёстными связями. Принцип действия и особенности работы рассмотрены в главе 4.

Проведённое исследование позволило установить, что введение в систему управления приводами электронного устройства компенсации зазора является эффективным решением, позволяющим восстановить точность отработки электроприводом сигналов наведения после продолжительного атмосферного воздействия.

Не идентичность параметров исполнительных электродвигателей, а также отдельных механических передач не приводит к снижению точности отработки электроприводом с устройством компенсации зазора сигналов наведения, что установлено в результате проведённого моделирования.

Результаты моделирования и сравнения параметров работы схем устройств компенсации зазора позволяют сделать вывод, что обе схемы реализуемы. Схема устройства с введением сигнала смещения реализуется наиболее просто, и даёт эффект, аналогичный эффекту механической пружины. Основным недостатком

устройства компенсации зазора на основе введения сигнала смещения являются значительные затраты энергии при отработке сигналов наведения в следящих режимах.

Схема устройства компенсации зазора с перекрёстными связями реализуется несколько сложнее, требует настройки параметров отдельных каналов в зависимости от величины люфта и позволяет компенсировать влияние зазоров, вызванных продолжительным атмосферным воздействием. Параметры работы электропривода максимально приближены к идеализированной модели без люфта, которые достигаются без значительных потерь энергии.

Проведённый анализ позволяет рекомендовать к применению устройство компенсации зазора с перекрёстными связями для восстановления характеристик крупногабаритного опорно-поворотного устройства после продолжительного атмосферного воздействия.

6.7 Методика расчёта параметров устройства компенсации зазора с перекрёстными связями

Параметры устройства компенсации зазора с перекрёстными связями непосредственно связаны с параметрами электродвигателей, объекта управления и механических передач. Одним из ключевых параметров при настройке устройства компенсации зазора является люфт механических передач. В зависимости от стадии разработки значение люфта может быть измерено фактически, рассчитано по одной из известных методик [25-27, 34], получено путём моделирования в CAE-системе, либо рассчитано с использованием математической зависимости, учитывающей воздействие коррозии, полученной в главе 1.

В результате проведённой работы предложена методика расчёта параметров устройства компенсации зазора, позволяющая обеспечить быстродействие и точность приводных систем опорно-поворотного устройства с несколькими взаимосвязанными электроприводами, имеющими люфтосодержащие механические передачи, включающая следующие основные этапы:

1) Составление функциональной схемы электромеханического привода и построение математической модели для отработки электроприводом, состоящим из двух исполнительных механизмов, гармонического сигнала наведения.

2) Определение величины люфта в механических передачах, в зависимости от стадии разработки и доступности объекта измерения (натурные измерения, определение величины люфта по графику зависимости зазора от времени действия коррозии (рисунок 1.6), расчёт величины люфта, либо моделирование в специализированной CAE-системе).

3) На основе паспортных данных или результатов измерений и испытаний, определить параметры, оказывающие влияние на электромеханическую постоянную времени электродвигателей. При не идентичности параметров отдельных электродвигателей определить состав и параметры корректирующих устройств, которые позволят выровнять параметры отдельных электродвигателей.

4) Моделирование работы электропривода без люфта (идеализированная модель) заданных режимов наведения для получения эталонных параметров. В качестве эталонных могут выступать параметры точности, устойчивости, энергетические характеристики. Эталонным сигналом в общем случае является гармонический сигнал наведения. Параметры сигнала наведения выбираются в зависимости от требований, предъявляемых к исполнительным механизмам, и величин люфтов.

5) Введение в математическую модель электропривода люфтов механических передач и устройства компенсации зазора с перекрёстными связями. Задать первоначальное значение постоянных времени $T_{1,2} = 0$ секунд.

6) Путём моделирования отработки электроприводом гармонического сигнала наведения, задавать значения постоянных времени апериодических звеньев от $T_{1,2} = 0$ и до значения, соответствующего удвоенному значению электромеханической постоянной времени электродвигателя $T_{1,2} = 2T_{эд}$, с шагом значений постоянных времени $0{,}25T_{эд}$, определить значения моментов исполнительных механизмов и КПД электропривода.

7) Построение графиков зависимости КПД электропривода и моментов отдельных исполнительных механизмов. Определение постоянной времени T_n точки перехода.

8) По построенным графикам определить постоянные времени апериодических звеньев для заданного (с распором или без распора) режима работы.

9) В процессе эксплуатации производить измерение величины люфта в рамках регламентных работ по техническому обслуживанию. При обнаружении снижения точности работы электропривода произвести измерение фактической величины люфта. Если люфт увеличился до значения, соответствующего середине интервала до ближайшего значения постоянной времени устройства компенсации зазора – T_n, произвести корректировку параметров устройства в сторону увеличения постоянных времени по графику, полученному в п.7.

Выводы по главе 6

1) Проведено исследование работы устройств компенсации зазора в электроприводе, содержащем три исполнительных механизма. Установлено, что известная схема устройства с введением сигнала смещения требует увеличения смещения в одном из каналов для обеспечения точности работы. Устройство с перекрёстными связями при работе в составе трёхканального электропривода не требует дополнительных настроек.

2) Проведено исследование работы устройств компенсации зазора в электроприводе, содержащем четыре исполнительных механизма. При симметричной схеме подключения каналов электропривода параметры работы максимально приближены к двухканальному электроприводу. Несимметричная схема подключения приводит к повышенному нагружению одного из каналов.

3) Не идентичность величин люфта в отдельных каналах не влияет на параметры работы четырёхканального электропривода с устройством компенсации зазора на основе введения сигналов смещения. Устройство с перекрёстными связями требует индивидуальной настройки параметров отдельных каналов на конкретную величину люфта.

4) Применение устройств компенсации зазора в электроприводе с не идентичными параметрами отдельных электродвигателей может оказывать влияние на точность

отработки сигналов наведения. При наличии разброса параметров отдельных электродвигателей рекомендуется использование корректирующих устройств, для компенсации указанного разброса.

5) В результате исследования разработана методика расчёта параметров устройства компенсации зазора с перекрёстными связями, позволяющая обеспечить быстродействие и компенсацию зазора в приводных системах опорно-поворотного устройства с несколькими взаимосвязанными электроприводами, имеющими люфтосодержащие механические передачи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В итоге проведённого исследования получены следующие результаты:

1) Анализ формул расчёта кинематической точности и результатов исследований коррозионных потерь металлов позволил получить математическую зависимость, описывающую влияние факторов атмосферной коррозии на параметры, характеризующие кинематическую точность зубчатых механических передач приводов опорно-поворотного устройства. Полученная зависимость позволяет рассчитать и прогнозировать изменение кинематической точности механической передачи привода во времени.

2) Предложен способ моделирования точности механических передач, учитывающий воздействие факторов атмосферы и вызываемых ею коррозионных потерь металла на основе программного комплекса MSC Adams, который позволяет автоматизировать расчёты изменения кинематической точности во времени. Достоверность результатов расчётов и моделирования точности механических передач исполнительных механизмов привода подтверждена натурным экспериментом, проведённым на объекте исследования после продолжительного атмосферного воздействия.

3) Показано, что обеспечение кинематической точности после продолжительного атмосферного воздействия возможно путём восстановления геометрических параметров деталей или за счёт использования электронного устройства компенсации зазора в системе управления. Установлено, что использование устройства компенсации зазора предпочтительно, поскольку данный путь позволяет восстановить и поддерживать точность приводов без существенных затрат.

4) Предложен и запатентован способ компенсации зазора и реализующее его устройство с перекрёстными связями, которое простыми средствами позволяет компенсировать влияние зазора в многодвигательном электроприводе.

5) Сравнение работы известного устройства компенсации зазора на основе введения сигналов смещения и устройства с перекрёстными связями, проведённое

путём моделирования работы электропривода в программной среде Matlab Simulink показало, что оба устройства позволяют компенсировать влияние зазора, вызванного коррозией, однако устройство с перекрёстными связями предпочтительно, поскольку обеспечивает более высокий КПД работы электропривода.

6) Разработана методика расчёта параметров устройства компенсации зазора с перекрёстными связями в приводных системах, содержащих два и более исполнительных механизмов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) ГОСТ 26656-85 Техническая диагностика. Контролепригодность. Общие положения.

2) Машиностроение. Энциклопедия / Ред. совет: К. В. Фролов. Измерение, контроль, испытания и диагностика. Т. III-7 / В. В. Клюев, Ф. Р. Соснин, В. Н. Филинов и др. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. Машиностроение, 2001. – 464с.

3) Биргер И. А. Техническая диагностика. – М.: Машиностроение, 1978. – 240с.

4) Верзаков Г. Ф. и др. Введение в техническую диагностику. Под ред. К. Б. Карандеева. – М.: Энергия, 1968. – 224с.

5) Клюев В. В., Пархоменко П. П., Абрамчук В. Е. Технические средства диагностирования. Справочник. Под общ. ред. В. В. Клюева – М.: Машиностроение, 1989. – 672с.

6) Кузнецов П. И., Пчелинцев Л. А., Гайденко В. С. Контроль и поиск неисправностей в сложных системах. – М.: Советское радио. 1969. – 240с.

7) Карибский В. В., Пархоменко П. П., Согомонян Е. С. Техническая диагностика объектов контроля. – М.: Энергия, 1967. – 80с.

8) Карибский В. В., Пархоменко П. П., Согомонян Е. С. Основы технической диагностики. В 2х книгах. Под ред. Пархоменко П. П. Кн. I. Модели объектов, методы и алгоритмы диагноза. – М.: Энергия, 1976. – 464с.

9) Самсонович С. Л., Горюнов Р. В. О методике исследования технического состояния крупногабаритного опорно-поворотного устройства после длительного неиспользования. // Контроль. Диагностика. (М.). – 2018 – №4 – С. 38-45.

10) Защита от коррозии, старения и биоповреждений машин, оборудования и сооружений. Справочник. Под ред. А. А. Герасименко. Том 1. – М.: Машиностроение. 1987. – 688 с.

11) Улиг Г. Г., Реви Р. У. Коррозия и борьба с ней. Введение в коррозионную науку и технику. Пер. с англ./ Под ред. А. М. Сухотина. – Л.: Химия, 1989. – 456с.

12) Семенова И. В., Флорианович Г. М., Хорошилов А. В. Коррозия и защита от коррозии./ Под ред. И. В. Семеновой – М. ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 336с.

13) Емелин М. И, Герасименко А. А. Защита машин от коррозии в условиях эксплуатации. М. Машиностроение, 1980. – 224с.

14) Малахов А. И., Жуков А. П. Основы металловедения и теории коррозии: учебник для машиностроительных техникумов. – М.: Высш. школа, 1978 – 192с.

15) Михайловский Ю. Н. Атмосферная коррозия металлов и методы их защиты. М.: Металлургия. – 1989. –102с.

16) Берукштис Г. К., Кларк Г. Б. Коррозионная устойчивость металлов и металлических покрытий в атмосферных условиях. – М.: Наука, 1971. – 159с.

17) Розенфельд И. Л. Атмосферная коррозия металлов. М.: Изд-во АН СССР. – 1960. – 372с.

18) Игонин Т. Н. Атмосферная коррозия углеродистой стали и цинка: моделирование и картографирование территории Российской Федерации: диссертация кандидата химических наук: 05.17.03/ Игонин Тимофей Николаевич. – М. 2012. – 131с.

19) ГОСТ 9.040-74 Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы и сплавы. Расчётно-экспериментальный метод ускоренного определения коррозионных потерь в атмосферных условиях.

20) ISO 9223:1992(E). Corrosion of Metals and Alloys—Corrosivity of Atmospheres—Classification, 1st ed.; International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 1992.

21) ISO 9223:2012. Corrosion of Metals and Alloys—Corrosivity of Atmospheres—Clasification, Determination and Estimation, 2nd ed.; International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2012.

22) ГОСТ ISO 9223-2017 Коррозия металлов и сплавов. Коррозионная агрессивность атмосферы. Классификация, определение и оценка.

23) ГСССД 152-90 Государственная служба стандартных справочных данных. Таблицы стандартных справочных данных. Низкоуглеродистые стали, цинк, медь, алюминий, магниевый сплав. Скорость коррозии в атмосферных условиях.

24) Тайц Б. А. Точность и контроль зубчатых колес. – М. Машиностроение, 1972. – 368с.

25) Куцоконь В. А., Шевченко-Грабский И. В. Расчёт статических моментов и мёртвых ходов в кинематических цепях точных приборов. – Л.: Машиностроение. 1968. – 147с.

26) Первицкий Ю. Д. Расчёт и конструирование точных механизмов. – Л.: Машиностроение. 1976. – 456с.

27) Слюдиков М. Н. Надёжность и точность механизмов приводов систем управления летательными аппаратами. – М.: Машиностроение, 1984. – 352с.

28) Тимофеев Б. П., Шалобаев Е. В. Состояние и перспективы нормирования точности зубчатых колёс и передач. // Вестник машиностроения. – 1990 – №12 – С. 34-36.

29) Попов П. К., Штриплинг Л. О. Предпосылки пересмотра нормативной документации по расчёту точности зубчатых передач. // Вестник машиностроения. – 1998 – №6 – С. 59-62.

30) Вулгаков Э. Б. Теория эвольвентных зубчатых передач. М.: Машиностроение, 1995. – 320с.

31) Нормирование точности в машиностроении: Учебн. для студентов машиностроит. специальностей вузов / Н. Н. Марков, В. В. Осипов, М. Б. Шабалина; Под ред. Ю. М. Соломенцева. – 2 изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк.: Academia, 2001. – 334с.

32) ГОСТ 1643-81 Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски.

33) ГОСТ 16532-70 Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные внешнего зацепления. Расчёт геометрии.

34) ГОСТ 21098-82 Цепи кинематические. Методы расчёта точности.

35) ОСТ 141671-91 Колёса зубчатые цилиндрические авиационные. Допуски.

36) ОСТ 142144-82 Колёса зубчатые авиационные. Методы контроля.

37) РД 92-0315-92 Расчёт динамической кинематической погрешности.

38) Ионак В. Ф Приборы кинематического контроля. М.: Машиностроение. – 1981. – 129с.

39) Фельдман В. Д. Кинематометрия – история и современность. Известные и малоизвестные подробности о возможностях метода углублённого диагностирования технического состояния механических передач. [Электронный ресурс]. – 2011. – Режим доступа: http://www.autex.spb.su/automation/kinematika/feldman2011.pdf. Дата обращения 29.08.2020г.

40) Беляковский В. П., Кипчарский С. В. Анализ причин, определяющих погрешности позиционирования рабочих органов станков с ЧПУ. // Вестник Приазовского государственного технического университета. – 2011 – №2 – С. 203-209.

41) Молодык Н. В., Зенкин А. С. Восстановление деталей машин. Справочник. – М.: Машиностроение, 1989. – 480с.

42) Скорынин В. И. Возможности метода восстановления деталей машин композитными материалами холодного отверждения Бельзона. // Литьё и металлургия. – 2013 – №1 – С. 132-138.

43) Хасуи А., Моригаки О. Наплавка и напыление. М.: Машиностроение. –1985. – 240с.

44) Кудинов В. В., Бобров Г. В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование. М.: Металлургия. – 1992. – 432с.

45) Романцов В. А., Терсков В. Г. К построению безлюфтовых исполнительных приводов. Тематический сборник научных трудов института. Выпуск 437. Динамические свойства приводов и их элементов. Под редакцией проф. Костина С.В. М.: Издательство МАИ. – 1978. – С. 7-11.

46) Диняева Н. С. Конструирование механизмов антенн: Учебное пособие. М.: Изд-во МАИ. – 2002. – 340с.

47) Башарин А. В., Новиков В. А., Соколовский Г. Г. Управление электроприводами: Учебное пособие для вузов. Л.: Энергоиздат. – 1982. –392с.

48) Яворский В. В. Устройство для компенсации люфта в двухдвигательном приводе. Патент СССР №746399, Бюл. №25, Опубл. 10.07.1980.

49) Горшков М. И., Мазнин В. А., Марков Ю. В., и др. Патент СССР №847309, Бюл. №26, Опубл. 18.07.1981.

50) Белянский П. В., Сергеев Б. Г. Управление наземными антеннами и радиотелескопами. М.: Сов. Радио. – 1980. – 280с.

51) Тарарыкин С. В., и др. Патент RU №2316886C1, Бюл.№4, Опубл.10.02.2008.

52) Полющенков И. С. Патент RU №2655723C1, Бюл.№16, Опубл.30.05.2018.

53) Петров Б. И., Полковников В. А., Рабинович Л. В., Стеблецов В. Г. и др. Динамика следящих приводов. – М.: Машиностроение. – 1982. – 496с.

54) Козлова Н. М., Рабинович Л. В. Динамика линейных, нелинейных и цифровых следящих систем. М.: МАИ-ПРИНТ. – 2008. – 80с.

55) Блейз Е. С., Зимин А. В., Иванов Е. С. и др./ Под ред. Чемоданова Б. К. Следящие приводы: в 3 т. 2-е изд., доп. и перераб. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 1999. –904с.

56) Авиационные зубчатые передачи и редукторы: Справочник. / Под ред. Э. Б. Вулгакова. – М.: Машиностроение, 1981. – 374с.

57) Антонов М. В., Акимова Н. А., Котеленец Н. Ф. Эксплуатация и ремонт электрических машин. Учебное пособие. – М.: Высш. шк. 1989. – 192с.

58) Бесекерский В. А., Попов Е. Н. Теория систем автоматического управления. Изд. 4-е, перераб и доп. – СПб, Изд-во «Профессия», 2003. – 752с.

59) Бобров В. Т., Сляднев А. М. Роботизированные системы неразрушающего контроля и технической диагностики промышленных объектов. // Контроль. Диагностика. (М.). – 2018 – №2 – С. 16-31.

60) Вавилов Д. В., Ереско С. П., Иптышев А. А., Усаков В. И. Методология компьютерного моделирования зубчатых передач с нормированием показателей точности. // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2011 – №4 – С. 173-176.

61) Зуховицкий С. И. Радчик И. А. Математические методы сетевого планирования. – М.: Наука. 1965. – 294с.

62) Кириллов А. А., Стеблецов В. Г. Основы электропривода летательных аппаратов. М.: Библио-Глобус, 2013. – 208с.

63) Клюев В. В., Артемьев Б. В. О развитии неразрушающего контроля и технической диагностики в России. // Контроль. Диагностика. (М.). – 2014 – №3 – С. 45-60.

64) Клюев В. В., Фурсов А. С., Филинов М. В. Подходы к построению систем оценки остаточного ресурса технических объектов // Контроль. Диагностика. (М.). – 2007 – №3 – С. 18-23.

65) Кристофидес Н. Теория графов. Алгоритмический подход. Пер.с англ. –М.: «Мир».1978 – 432с.

66) Куцоконь В. А., Малошевский С. Г., Тимофеев Б. П. Применение теории вероятностей при проектировании механизмов приборов. – Л.: Машиностроение, 1971. – 144с.

67) Лившиц П. С. Справочник по щёткам электрических машин. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 216с.

68) Мандыч Н. К. Ремонт электродвигателей. Пособие электромонтёру. – К.: Техника. 1989. – 152с.

69) Машиностроение. Энциклопедия / Ред. совет: К. В. Фролов (пред.) и др. – М.: Машиностроение. Автоматическое управление. Теория. Т. 1-4 / Е. А. Федосов, А. А. Красовский, Е. П. Попов и др. Под общ. ред. Е. А. Федосова. 2000. – 688с.

70) Машиностроение. Энциклопедия. Ред. совет: К. В. Фролов (пред.) и др. – М.: Машиностроение. Надежность машин. Т. IV-3 / В. В. Клюев, В. В. Болотин, Ф. Р. Соснин и др.; Под общ. ред. В. В. Клюева. 2003. – 592с.

71) Машиностроение. Энциклопедия / ред. совет: К. В. Фролов (пред.) и др. – М.: Машиностроение. Электроприводы. Т. IV-2 / Л. Б. Масандилов, Ю. Н. Сергиевский, С. К. Козырев и др. Под общ. ред. Л. Б. Масандилова. 2012. – 520с.

72) Морозовский В. Т. Многосвязные системы автоматического регулирования. М., «Энергия», 1970. – 288с.

73) Пантелеенко Ф. И., Лялякин В. П., Константинов В. М. Восстановление деталей машин. Справочник под ред. Иванова В. П. – М.: Машиностроение, 2003. – 672с.

74) Полковников В. А., Сергеев А. В. Расчёт основных параметров исполнительных механизмов следящих приводов летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1988. – 192с.

75) Ю. В. Постников, Г. Г. Соколовский, В. М. Стасовский, Д. А. Шустов, А. И. Говорушин, Б. П. Рысков, В. П. Рудаков. Двухдвигательный привод постоянного тока. Патент SU№1075360A, Бюл. №7, Опубл. 23.02.1984.

76) Самсонович С. Л., Горюнов Р. В. Исследование влияния атмосферной коррозии на кинематическую точность привода крупногабаритного опорно-поворотного устройства. // Справочник. Инженерный журнал. – 2019 – №2(февраль) – С.16-22.

77) Самсонович С. Л., Федотов Б. К., Горюнов Р. В. О восстановлении кинематической точности привода крупногабаритного опорно-поворотного устройства после длительного неиспользования. // Справочник. Инженерный журнал. – 2019 – №12(декабрь) – С.19-31.

78) Самсонович С. Л., Федотов Б. К., Горюнов Р. В. Способ и устройство выборки люфта в кинематической передаче опорно-поворотного устройства с двумя взаимосвязанными электроприводами. Патент RU№2726951C1 Опубл.17.07.2020, Бюл.№20.

79) Следящие приводы. В 2-х кн. Под ред. Б. К. Чемоданов. Кн. первая. М., «Энергия», 1976. – 480с.

80) Справочник по электрическим машинам: В 2 т. / Под общ. ред. И. П. Копылова и Б. К. Клокова. Т. 1. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 456с.

81) Стеблецов В. Г. Нелинейные системы с разрывными координатными связями: Теория и практика. М.: Машиностроение, 1992. – 256с.

82) Филипс Д., Гарсиа-Диас А. Методы анализа сетей: Пер.с англ. –М.: «Мир».1984 – 496с.

83) R. M. R. Bruns, J. F. P. B. Diepstraten, X. G. P. Schuurbiers, J. A. G. Wouters. Motion control of systems with backlash. Master team project. 2006. www.mate.tue.nl/mate/pdfs/7058.pdf. Date of the application 16.02.2020.

84) Dean S. W., Hernández-Duque Delgadillo G., Bushman J. B. Marine Corrosion in Tropical Environments, 1sted.; ASTM Stock Number STP 1399; American Society for Testing Materials: West Conshohocken, PA, USA, 2000; 305p.

85) Díaz I., Cano H.; Crespo D., Chico, B., de la Fuente D., Morcillo M. Atmospheric corrosion of ASTM A-242 and ASTM A-588 weathering steels in die rent types of atmosphere. Corros. Eng. Sci. Technol. 2018, 53, 449–459pp. Doi.org/10.1080/1478422X.2018.1500978/.

86) W. Gowronski, J. J. Beech-Brandt, H. G. Ahlstrom, Jr. and E. Maneri. Torque-bias profile for improved tracking of the deep space network antennas. IEEE Antennas and propagation magazine. Vol.42, No.6, 2000, p.35-45.

87) Z. Haider, F. Habib, M. H. Mukhtar, Dr. K. Munawar. Design, Control and Implementation of 2-DOF Motion Tracking Platform using Drive-Anti Drive Mechanism for Compensation of Backlash. IEEE International work shop on robotic and sensors environments. Ottava – Canada, 12-13 October 2007. DOI:10.1109/ROSE.2007.4373968.

88) LeBozec N., Thierry D., Persson D., Riener C. K., Luckeneder G. Influence of microstructure of zinc-aluminium-magnesium alloy coated Steel on the corrosion behavior in outdoor marine atmosphere. Surf. Coat. Technol. 2019, 897–909 pp. Doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.06.052.

89) Liu H., Cao F., Song G.-L., Zheng D., Shi Z., Dargusch M. S., Atrens A. Review of the atmospheric corrosion of magnesium alloys. J. Mater. Sci. Technol. 2019, 35, 2003–2016. Doi.org/10.1016/j.jmst.2019.05.001.

90) L. Márton. Adaptive friction compensation in the presence of backlash. Control engineering and applied informatics. Vol.11, No1, 2009, p.3-9.

91) Morcillo M., Díaz I., Cano H., Chico B., de la Fuente D. Atmospheric corrosion of weathering steels. Overview for engineers. Part I: Basic concepts. Constr. Build. Mater. 2019, 213, 723–737. Doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.334.

92) Nordin M., Gutman P.-O. Controlling mechanical systems with backlash – a survey. Automatica. No38. 2002. p 1633-1649.

93) Y. Oho, K. Iijima. Motor control device and motor control method. Patent US2019/0079487A1, publication date 14.03.2019.

94) S. Robertz, L. Halt, S. Kelkar, K. Nilsson, A. Robertsson, D. Schar, J. Schiffer. Precise robot motions using dual motor control. IEEE International conference on robotics and automation. May 3-8, 2010, Anchorage, Alaska, USA. p.5613-5620.

95) J. J. Santana, A. Ramos, A. Rodriguez-Gonzalez and others. Shortcomings of International Standard ISO 9223 for the Classification, Determination, and Estimation of Atmosphere Corrosivities in Subtropical Archipelagic Conditions – The Case of the Canary Islands (Spain). Metals 2019, 9, 1105; doi:10.3390/met9101105.

96) Y. Toyozawa, K. Maeda, N. Sonoda. Tandem control method based on a digital servo mechanism. Patent US005646495A, publication date 08.07.1997.

97) T. Uchida, A. Ito, N. Furuya, T. Oshima. Position system based on twin motor cooperative control with gear backlash compensation. DOI:10.1299/jsmemovic.2010.3D14-1.

98) ISO 1328–1:2020, Cylindrical gears – ISO system of flank tolerance classification – Part 1:Definitions and allowable values of deviations relevant to flanks of gear teeth.

99) ISO 1328–2:2020, Cylindrical gears – ISO system of flank tolerance classification – Part 2:Definitions and allowable values of double flank radial composite deviations.