

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»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва 2021

Работа выполнена на кафедре 702 «Системы приводов авиационно-космической техники» ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель:

Самсонович Семён Львович
доктор технических наук, профессор,
профессор каф.702 «Системы приводов
авиационно-космической техники» ФГБОУ
ВО «Московский авиационный институт
(национальный исследовательский
университет)».

Официальные оппоненты:

Крюков Владимир Алексеевич
доктор технических наук, профессор,
профессор каф. «Проектирование
механизмов и деталей машин» ФГБОУ ВО
«Тульский государственный университет».

Бакшаев Сергей Иванович
кандидат технических наук,
главный научный сотрудник управления
научно-исследовательского центра
«Центрального научно-исследовательского
института Военно-воздушных сил
Министерства обороны Российской
Федерации».

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Национальный
исследовательский университет МЭИ».

Защита состоится 21 июня 2022г. в 13:00 на заседании диссертационного совета Д 212.125.07 в Московском авиационном институте (национальном исследовательском университете) по адресу: 125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское ш., д.4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского авиационного института (национального исследовательского университета) и на сайте www.mai.ru.

Автореферат разослан «25» 03 2022г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.125.07

кандидат технических наук

Д. С. Дежин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. 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.

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.

Проблемам коррозии посвящено большое количество работ. Авторы А. А. Герасименко, Г. Г. Улиг, Р. У. Ревя, М. И. Емелин, И. В. Семёнова, Г. М. Флоранович, А. В. Хорошев, А. И. Малахов, А. П. Жуков рассматривали коррозию, физико-химические процессы коррозии металлов, пути защиты металла от коррозии. 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. Существуют стандарты ускоренного определения скорости коррозии металлов для различных климатических районов. Однако работ по исследованию изменений кинематической точности механических передач при воздействии атмосферной коррозии в технической литературе не обнаружено. Определение закономерности и прогнозирование изменения кинематической точности механических передач под воздействием атмосферной коррозии, в зависимости от времени воздействия факторов атмосферы, имеет научное и практическое значение.

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.

Диссертационная работа посвящена исследованию воздействия на кинематическую точность механических передач многодвигательных

электроприводов атмосферной коррозии, проблеме обеспечения длительной работоспособности, а также разработке способа компенсации люфта по принципу электромеханической пружины в зубчатых механических передачах с зазором, в том числе обеспечить длительную работоспособность опорно-поворотного устройства, подвергнувшегося воздействию атмосферной коррозии в течение 30 лет.

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, подвергнувшихся 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 параметров электродвигателей.

Объект исследования. Объектом исследования является многодвигательный электропривод с зубчатыми механическими передачами.

Предмет исследования. Предметом исследования является кинематическая точность многодвигательного электропривода в условиях долговременного воздействия атмосферной коррозии.

Научная новизна:

- 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 работы:

- 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 устройства компенсации зазоров в зависимости от параметров электродвигателей и механических передач, сократить время ввода электропривода в эксплуатацию.

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 опорно-поворотного устройства с использованием программного комплекса Matlab Simulink и методы теории автоматического управления.

Положения, выносимые на защиту:

- 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.

Достоверность полученных результатов. 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%.

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.

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. По теме диссертации опубликовано 8 печатных работ, в том числе 3 в журналах, рекомендованных ВАК. Получен патент Российской Федерации на изобретение.

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показано, что длительное нахождение ОПУ (рисунок 1) в условиях открытой атмосферы приводит к обширной коррозии элементов системы. Использование существующих конструкций, подвергшихся коррозии, в составе создаваемой станции подразумевает определение вида технического состояния и проведение технической диагностики.

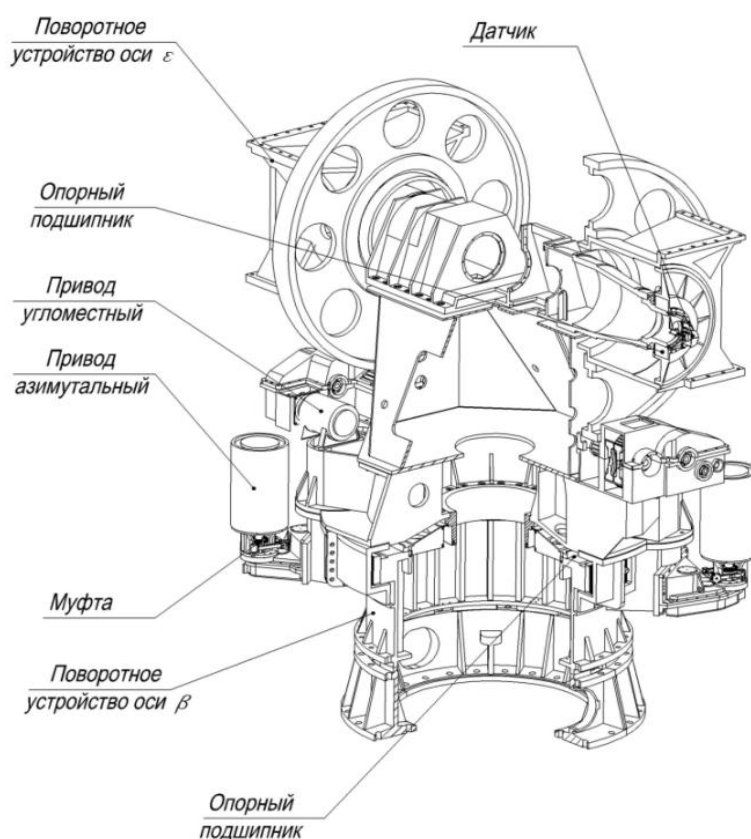


Рисунок 1 – Общий вид опорно-поворотного устройства

Известны работы авторов В. В. Ключева, 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 посвященные технической диагностике, анализу причин возникновения неисправностей. 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 изделий, в том числе содержащих зубчатые механические передачи, не найдены.

Показано, что отсутствие готовых решений в вопросе диагностирования крупногабаритных несерийных изделий, после воздействия коррозии потребовало проведения отдельного исследования и создания алгоритма технического диагностирования.

Во введении дано обоснование актуальности темы диссертационной работы, поставлены цели и задачи исследования, формулируются основные положения, выносимые на защиту, показана практическая значимость работы.

В первой главе рассмотрены существующие способы определения коэффициента скорости коррозии металла в любых конструкциях, в том числе зубчатых передачах, при продолжительном воздействии атмосферы. В результате анализа государственного стандарта ГОСТ 9.040-74 – ускоренного определения коэффициента скорости коррозии в атмосферных условиях установлено, что для рассматриваемого случая атмосферной коррозии механических передач, расположенных под укрытием, исключаяющим прямое попадание осадков, для любого не морского климатического района, коррозионная потеря металла является линейной от времени.

Коэффициент скорости коррозии металла – K (мкм/год) определён на основе результатов эмпирических исследований, собранных в документе ГСССД 152-90.

Рассмотрены существующие методики расчёта кинематической точности механических передач на основе известных показателей точности составляющих звеньев.

Наибольший интерес представляет работа автора Куцоконя В. А., в которой кинематическая точность механической передачи представлена как сумма независимых друг от друга погрешностей:

$$\Delta = \Delta_{з\Sigma} + \Delta_{о\Sigma} + \Delta_{пр\Sigma} + \Delta_{упр\Sigma} + \Delta_{т\Sigma}, \quad (1)$$

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

Поскольку кинематическая точность есть сумма значений погрешностей, а коррозионное воздействие оказывает значительное влияние только на параметры связанные с изменением геометрических размеров передачи, погрешности связанные с упругими и температурными деформациями не исследовались в

данной работе. Коррозионное воздействие оказывает влияние на погрешности в зазорах, погрешности в опорах и производственные погрешности.

В формуле (1) параметры точности составляющих звеньев (бокового зазора, погрешности профиля, зазора в опорах) указаны в микрометрах. 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 проведён через коэффициент скорости коррозии металла за год – K (мкм/год) и продолжительность воздействия коррозии – t , выраженной в годах. Величина коррозионной потери металла будет равна Kt .

В результате рассмотрения формулы (1), с учётом коррозионной потери металла величиной Kt , получена формула расчёта кинематической точности, учитывающая воздействие коррозионной среды:

$$\begin{aligned} \Delta &= \Delta_{3\Sigma} + \Delta_{0\Sigma} + \Delta_{\text{Пр}\Sigma} = \sum_{j=1}^q \Delta_{3j} + \sum_{n=1}^u \Delta_{0n} + \sum_{n=1}^u \Delta_{\text{Пр}n} = \\ &= \sum_{j=1}^q \frac{2.12(J_{nj}+2Kt)}{\cos \beta_{mz_{2j}}} + \sum_{n=1}^u (\bar{\Delta}_{0n} + \varepsilon(\Delta_{0B})_n) + \sum_{n=1}^u (\bar{\Delta}_{\text{Пр}n} + \varepsilon(\Delta_{\text{Пр}B})_n) = \\ &= \sum_{j=1}^q \frac{2.12(J_{nj}+2Kt)}{\cos \beta_{mz_{2j}}} + \sum_{n=1}^u \left(\frac{A((\rho_{PH}+Kt)_n + (\rho_{PB}+Kt)_n)}{2000\pi d_{2n}} \left(\frac{l_1}{L} + \frac{l_2}{L} \right)_n + \right. \\ &\quad \left. + \frac{A((\rho_{PH}+Kt)_n - (\rho_{PB}+Kt)_n)}{2000\pi d_{2n}} \sqrt{\left(\frac{l_1}{L} \right)_n^2 + \left(\frac{l_2}{L} \right)_n^2} \right) + \\ &\quad + \sum_{n=1}^u \left(\frac{A \tan 20^\circ}{1000\pi d_{2n}} \left[(\Delta_H A + \Delta_B A)_n + \left(\Delta_M M_1 + Kt + \frac{\delta M_1}{2} \right)_n + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \left(\Delta_M M_2 + Kt + \frac{\delta M_2}{2} \right)_n + 0,36 E_{B1n} + 0,36 E_{B2n} \right] + \right. \\ &\quad \left. + \sqrt{(\Delta_H A + \Delta_B A)_n^2 + \left(\frac{\delta M_1}{2} \right)_n^2 + \left(\frac{\delta M_2}{2} \right)_n^2 + 0,32 E_{B1n}^2 + 0,32 E_{B2n}^2} \right), \end{aligned} \quad (2)$$

где J_n – нормальная составляющая бокового зазора (единица измерения – мкм); β – угол наклона линии зуба колеса (для цилиндрических зубчатых колёс $\beta=0$); d_2 – диаметр делительной окружности ведомого колеса; A – коэффициент, учитывающий единицу измерения погрешности; ρ_{PH} – нижнее значение радиального люфта в опорах (единица измерения – мкм); ρ_{PB} – верхнее значение радиального люфта в опорах (единица измерения – мкм); l_1 , l_2 , L – геометрические параметры, характеризующие взаимное расположение опор и колёс; $\Delta_H A$ и $\Delta_B A$ – нижнее и верхнее отклонение межцентрового расстояния в мкм; $\Delta_M M$ – наименьшее отклонение размера исходного контура (в тело колеса) в

мкм; δM – допуск на размер исходного контура в мкм; E_B – предельное значение радиального биения зубчатого венца колеса в передаче в мкм; 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 (2) основана на расчётном методе «максимума-минимума» и учитывает предельные отклонения параметров звеньев кинематической цепи и самые неблагоприятные их сочетания. В прикладных инженерных задачах государственный стандарт ГОСТ 21098-75 допускает использование другого – «вероятностного» метода расчёта кинематической точности, учитывающего разброс реальных параметров погрешности и вероятность различных сочетаний отклонений составляющих звеньев. С учётом принятых допущений формула расчёта кинематической точности по «вероятностному» методу имеет вид:

$$\Delta = \sum_{j=1}^q \frac{2,12(J_n + 2Kt)_j}{\cos \beta m z_{2j}} + \sum_{n=1}^u \left(\frac{(6,88(F_{ir1} + Kt) + 2,5f_a)_n}{m z_{1n}} + \frac{(6,88(F_{ir2} + Kt) + 2,5f_a)_n}{m z_{2n}} \right) + \sum_{n=1}^u \frac{(6,88(q + 2Kt))_n}{m z_{2n}}, \quad (3)$$

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.

На основании результатов проведённых расчётов получена зависимость кинематической точности механических передач опорно-поворотного устройства от времени воздействия атмосферных факторов (рисунок 2). В результате, установлен характер влияния атмосферных факторов на кинематическую точность, при этом существенные изменения происходят в течение первых 15 лет и незначительные в последующие годы.

Во второй главе диссертационной работы представлены результаты экспериментальных исследований зазоров в кинематической цепи ОПУ после тридцати лет неиспользования и воздействия коррозии. Измерения точности проводились методом, описанным в эксплуатационных документах ОПУ. Полученное значение точности зубчатых механических передач нанесено на график зависимости кинематической точности от времени (рисунок 2). Полученное в результате измерения значение точности механических передач после продолжительного атмосферного воздействия находится в интервале расчётных значений, что свидетельствует о достоверности построенного графика,

математической зависимости кинематической точности, а также корректности принятых допущений при расчёте значений коррозионных потерь металла.

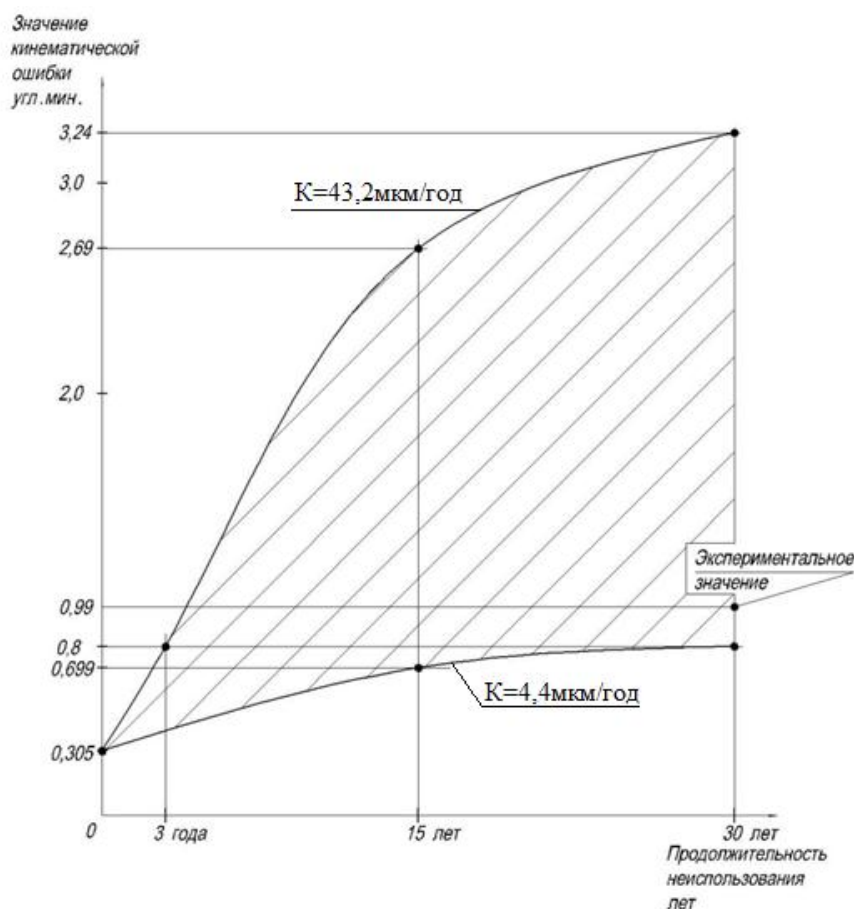


Рисунок 2 – График зависимости кинематической точности от времени воздействия коррозии для исследуемых механических передач

В третьей главе диссертационной работы представлены результаты анализа возможных путей восстановления точности электропривода после продолжительного воздействия коррозии. Показано, что обеспечение кинематической точности после продолжительного атмосферного воздействия возможно путём восстановления геометрических параметров деталей: за счёт газодинамического напыления слоя металла, потерянного в результате действия коррозии, и использования композитных материалов холодного отверждения. Восстановление слоя материала позволит повысить точность механических передач на момент проведения работ, в дальнейшем, под воздействием коррозии и эксплуатационного износа, точность будет снижаться, что приведёт к потребности проведения повторных работ.

Другим способом восстановления кинематической точности работы электропривода является использование устройства компенсации зазора (выборки люфта) в системе управления.

Анализ известных способов и устройств компенсации зазора показал, что для приводов исследуемого ОПУ возможно применение устройства компенсации зазора на основе введения постоянных сигналов смещения. Известным недостатком данного устройства является повышенные затраты энергии, что приводит к значительному снижению КПД электропривода.

С целью устранения недостатка известного устройства на основе введения сигналов смещения, разработан способ и предложена схема устройства компенсации зазора с введением перекрёстных связей. Схема обеспечивает автономность внутренних контуров регулирования каждого исполнительного механизма привода с возможностью настройки моментов расporов в зависимости от параметров приводной системы и требований к качеству переходного процесса. На разработанный способ и устройство компенсации зазора получен патент Российской Федерации на изобретение.

На рисунке 3 показано разработанное устройство компенсации зазора, которое 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).

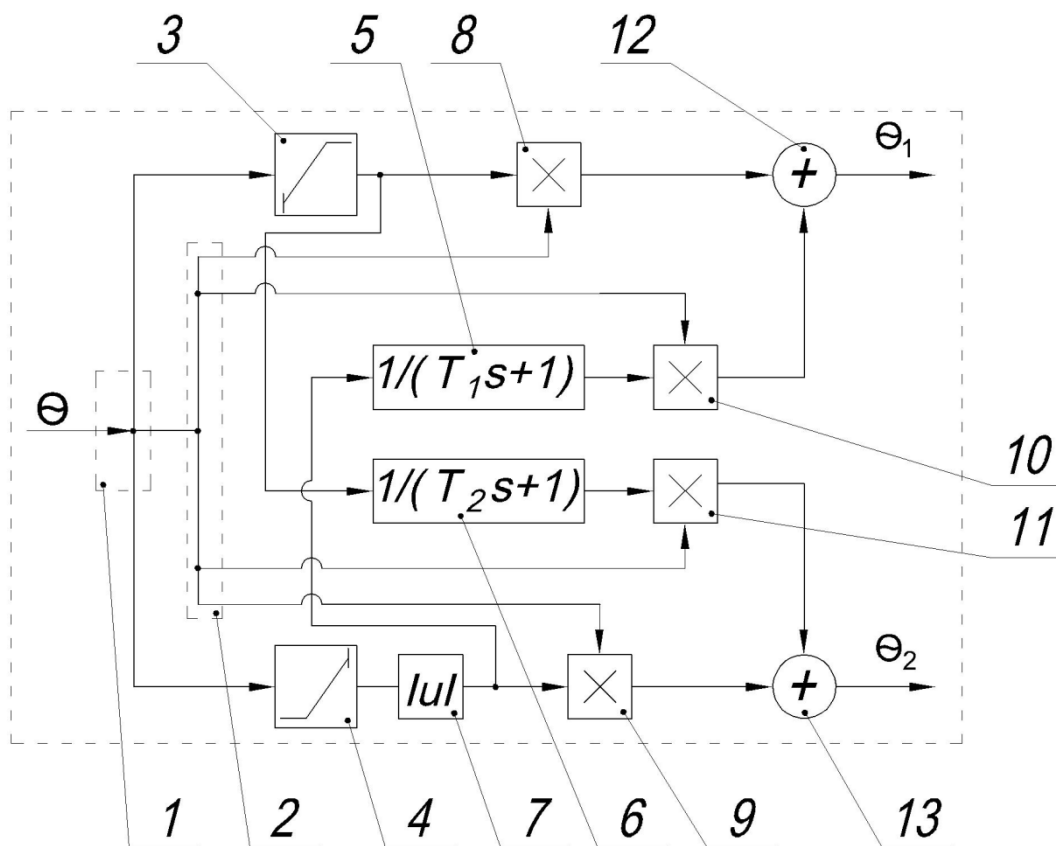


Рисунок 3 – Схема устройства компенсации зазора с перекрёстными связями

Проведённый сравнительный анализ возможных путей восстановления кинематической точности, а также экономическая оценка реализации рассмотренных путей показала, что для электропривода, содержащего четыре исполнительных механизма, наиболее эффективным способом восстановления кинематической точности является использование устройства компенсации зазора.

В четвёртой главе диссертационной работы описан принцип работы устройства компенсации зазора с перекрёстными связями. Компенсация зазора осуществляется за счёт введения запаздывания в сигнал управления одного из каналов электропривода. Выбор величины запаздывания зависит от значения люфта в механической передаче, индивидуальных параметров цепи канала, выраженных электромеханической постоянной времени электродвигателя ($T_{эд}$) и параметрами усилителя мощности (рисунок 4).

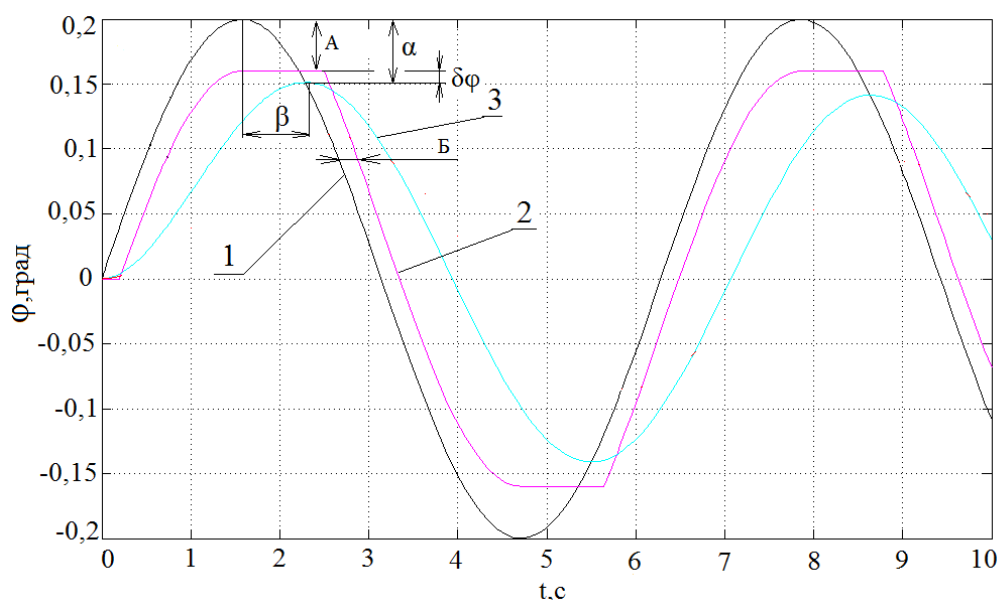


Рисунок 4 – Смещение сигналов вызываемых люфтом и блоком задержки, где 1 – гармонический сигнал, 2 – сигнал смещённый люфтом, 3 – сигнал смещённый блоком задержки во втором канале.

Фазовое смещение управляющего сигнала в одном из каналов электропривода, содержащего несколько исполнительных механизмов, большее, чем смещение производимое действием люфта, приводит к возникновению тормозного момента, выбирающего люфт. На рисунке 5 показаны осциллограммы отработки электроприводом с люфтом в механических передачах гармонического сигнала наведения малой амплитуды с разработанным устройством компенсации зазора.

На рисунке 5в наблюдаются участки суммирования моментов отдельных исполнительных механизмов (без распора), также показаны участки, на которых действуют моменты распоров, связанные с компенсацией зазора. На рисунке 5г

показано изменение КПД системы с устройством компенсации зазора, осциллограмма характеризует отношение количества энергии, подводимого к объекту управления к общему количеству энергии, потребляемому электродвигателями.

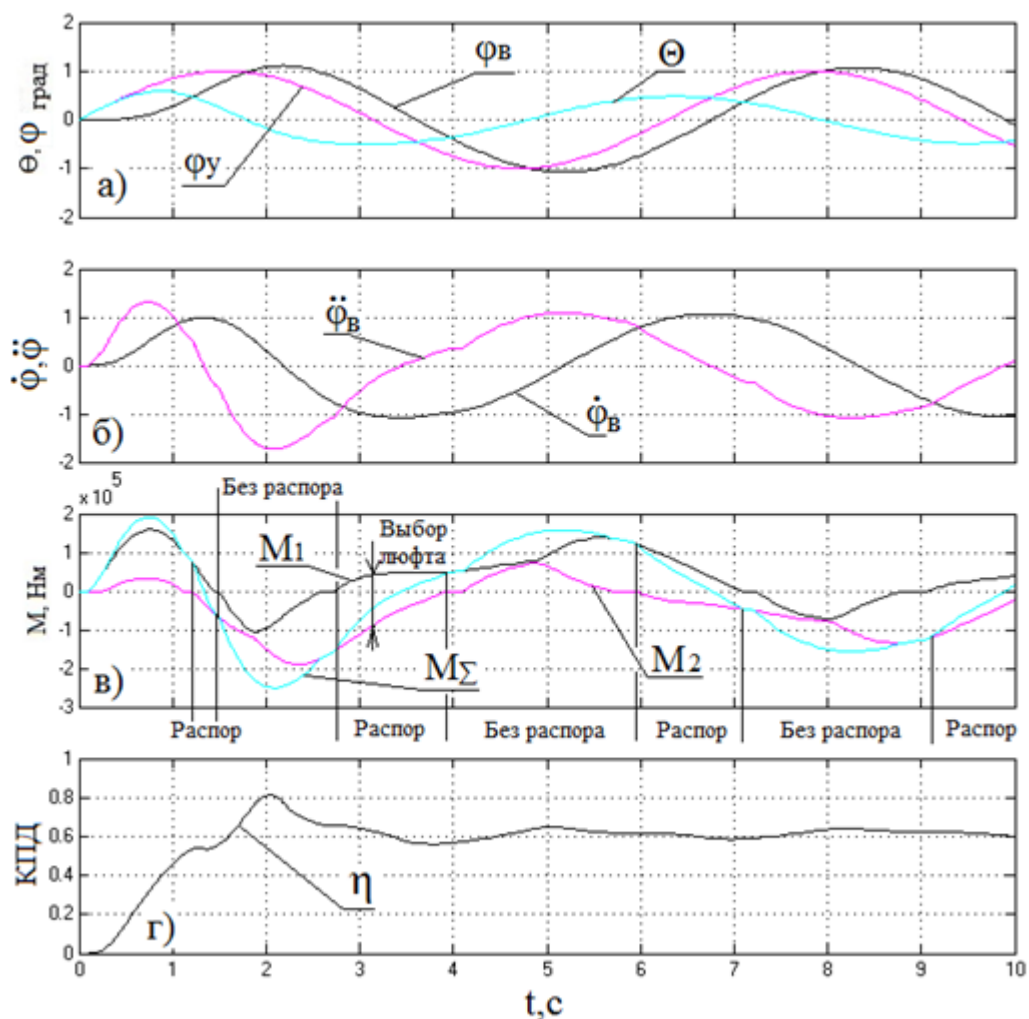


Рисунок 5 – Осциллограммы работы электропривода с устройством компенсации зазора с перекрёстными связями для значений $T_1, T_2 = 1$ с и амплитуды сигнала наведения 1^0 : а) сигнал наведения φ_y , отработка приводом сигнала наведения φ_v и сигнал динамической ошибки привода θ ; б) скорость и ускорение,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

Моделирование проводилось в программной среде MatLab Simulink, на основе составленной математической модели исследуемой приводной системы (рисунок 6). В модели люфт представлен блоком «зона нечувствительности», последовательно соединённым с блоком жёсткости передачи.

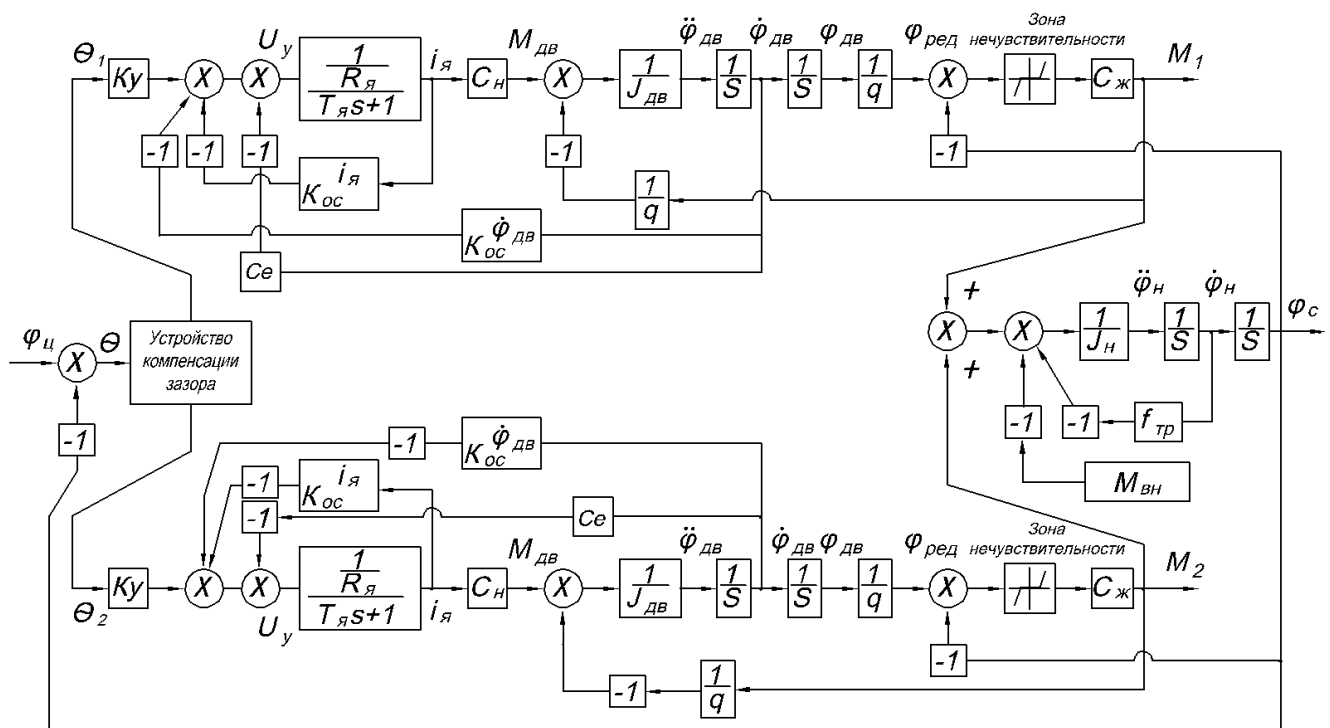


Рисунок 6 – Структурная схема системы с нелинейностью люфт

Установлено, что существует два режима работы устройства компенсации зазора с перекрёстными связями: режим силового распора и режим без распора, который определяется выбором значений постоянных времени – T_1, T_2 устройства. Для выбранного сигнала наведения и величины люфта существует такое значение постоянной времени – $T_1, T_2 = 0,65\text{с}$ (точка перехода), при которой фазовое смещение в реверсивном канале приближено к смещению, производимому действием люфта (рисунок 7).

При выборе значений – T_1, T_2 левее точки перехода электропривод будет работать без моментов распора, правее – в системе будут существовать моменты компенсации зазора. При выборе значений $T_1, T_2 = 0$ электропривод будет работать без смещений и сигналы в каналах будут равными. Увеличение люфта приведёт к смещению точки перехода вправо, снижение люфта – влево.

Режим силового распора обеспечивает высокую плавность изменения характеристик отработки электропривода, однако приводит к повышенным затратам энергии и снижению КПД. Режим без распора обеспечивает повышенный КПД, однако плавность отработки несколько снижена.

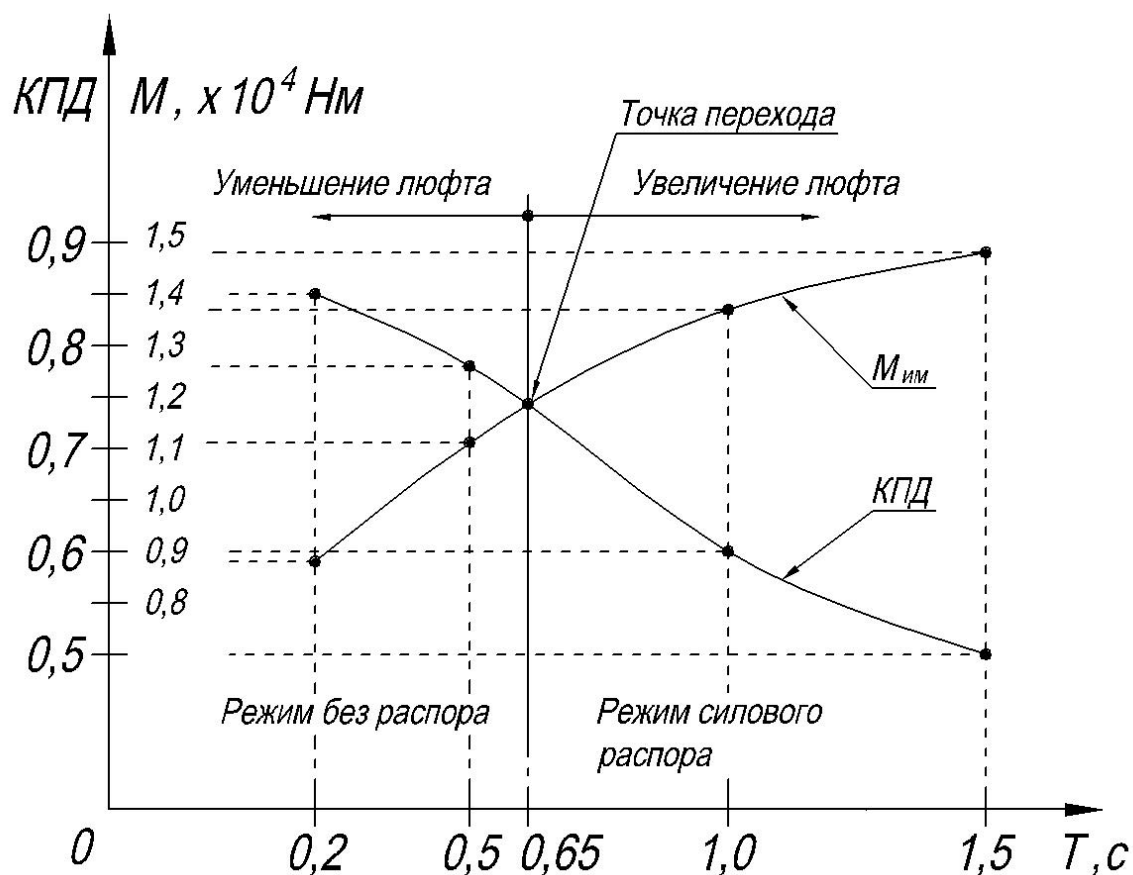


Рисунок 7 – Принципиальный график режимов работы электропривода и моментов отдельных исполнительных механизмов от постоянной времени – T_n устройства компенсации зазора

Пятая глава диссертационной работы посвящена математическому моделированию работы электропривода с различными устройствами компенсации зазора. Моделирование проводилось в программной среде MatLab Simulink, на основе составленной математической модели исследуемого электропривода.

Первоначально, моделировалась работа идеализированного привода без люфта, в результате получены эталонные характеристики отработки приводом сигналов наведения. Затем в модель был введён люфт и рассмотрены результаты его воздействия.

Далее в систему управления приводов вводили одно из электронных устройств компенсации зазора и проводили синтез параметров до достижения характеристик приводов ОПУ, соответствующих идеализированной безлюфтовой модели.

Результаты моделирования показали, что и устройство на основе введения сигналов смещения, и устройство с перекрёстными связями позволяют восстановить кинематическую точность работы после продолжительного воздействия коррозии и поддерживать её при последующей эксплуатации. Схема

устройства компенсации зазора с введением сигнала смещения, реализуется наиболее просто и даёт эффект, аналогичный эффекту механической пружины. 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. Анализ параметров работы привода с различными схемами построения устройства компенсации зазора позволил сделать вывод о целесообразности применения схемы с перекрёстными связями.

В шестой главе диссертационной работы рассмотрены особенности работы устройств компенсации зазора в электроприводе, содержащем три и четыре исполнительных механизма (электродвигателя), а также при не идентичности параметров отдельных исполнительных механизмов.

Установлено, что известная схема устройства с введением сигнала смещения, при работе в составе электропривода содержащего три исполнительных механизма (ИМ) (при подключении двух ИМ с положительным смещением, и одного ИМ с отрицательным смещением), требует увеличения смещения для одного ИМ с отрицательным смещением для обеспечения точности работы. Устройство с перекрёстными связями при работе в составе аналогичного электропривода не требует дополнительных настроек.

В электроприводе, содержащем четыре ИМ, при симметричной схеме подключения каналов электропривода параметры работы максимально приближены к электроприводе, содержащему два ИМ. Несимметричная схема подключения (три ИМ подключены с положительным смещением, и один ИМ с отрицательным смещением) приводит к повышенному нагружению ИМ с отрицательным смещением.

В результате проведённой работы предложена методика расчёта параметров устройства компенсации зазора с перекрёстными связями, позволяющая обеспечить точность приводных систем опорно-поворотного устройства с несколькими взаимосвязанными ИМ, 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.

- 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 2), расчёт величины люфта, либо моделирование в специализированной САЕ-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 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 технических требований, предъявляемых к исполнительным механизмам ОПУ.
- 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.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В итоге проведённого исследования получены следующие основные 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.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

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.