

На правах рукописи



**ТЮРИН Максим Владимирович**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ БЕЗРЕДУКТОРНОГО  
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО УСИЛИТЕЛЯ РУЛЕВОГО  
УПРАВЛЕНИЯ АВТОМОБИЛЯ**

Специальность: 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

НОВОСИБИРСК – 2009

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования  
«Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент  
Боченков Борис Михайлович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Пантелеев Василий Иванович

доктор технических наук, профессор  
Малинин Леонид Иванович

Ведущая организация: ФГУП ПО «Север», г. Новосибирск

Защита состоится «17» декабря 2009 г., в 10-00 часов, на заседании диссертационного совета Д 212.173.04 при Новосибирском государственном техническом университете по адресу: 630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета

Автореферат разослан «16» ноября 2009 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
к.т.н., доцент



Бородин Н.И.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

**Актуальность темы.** За последние десять лет в мировой и в отечественной автомобильной промышленности наметилась тенденция к использованию в системе рулевого управления автомобилей электромеханических усилителей. По сравнению с гидравлическими усилителями они обладают рядом преимуществ, основными из которых являются следующие: лучшие массогабаритные показатели, гибкость управления и экономичность.

Среди многочисленных типов электромеханических усилителей рулевого управления (ЭМУР) для легковых автомобилей массой до 1,5 т. наиболее широкое распространение получили усилители «колончатого» типа, которые встраиваются непосредственно в рулевую колонку автомобиля. Как правило, усилители данного типа изготавливаются на базе высокоскоростного двигателя и редуктора. Исследование ЭМУР данного типа ведется с начала 90-х годов, что находит свое отражение в большом количестве патентов на конструкцию ЭМУР и способ управления. К числу инновационных можно отнести разработки японских исследователей Yasuo Shimizu, Atsuhiko Yoneda, Hitoshi Shiobara, Takashi Kuribayashi, Hirofumi Matsuoka. Серийное производство автомобилей с ЭМУР этого типа ведется уже более 10 лет следующими автопроизводителями: Renault, Citroen, Opel, Fiat, Toyota, Honda. В РФ исследованием и разработкой редукторных ЭМУР «колончатого» типа совместно с ОАО «АВТОВАЗ» занимаются с конца 90-х НПП «Эметрон» и «Авиаагрегат» г. Новочеркасск, и НПК «Энергия» г. Воронеж.

Вместе с тем, для ряда применений наиболее предпочтительным является использование безредукторного ЭМУР, разработанного группой новосибирских ученых. Отсутствие редуктора позволяет исключить необходимость компенсации сухого и вязкого трения в редукторе, необходимость реализовывать активный самовозврат в алгоритме управления ЭМУР, а также повышает безопасность системы рулевого управления, так как по сравнению с редукторным вариантом, в случае выхода из строя ЭМУР, на рулевой колонке не возникает дополнительного момента сопротивления. Безредукторный ЭМУР представляет собой мехатронный модуль, выполненный на базе синхронного двигателя магнитоэлектрического возбуждения с интегрированным в корпус двигателя датчиком момента. Безредукторный ЭМУР впервые разрабатывается в России и не имеет аналогов в мире. Опытный образец вышел в 2000 г., а серийное производство началось только в 2007. Исходя из этого, в мировой практике еще не накоплен большой опыт, и имеется ряд проблем требующих своего решения.

На стадии первичной разработки, одним из основных требований, предъявляемых к ЭМУР, являлось обеспечение пропорциональности между моментом, прикладываемым к рулевому колесу водителем, и выходным моментом, вырабатываемым электродвигателем. Не имея в своем составе редуктора, безредукторный ЭМУР представлялся настолько простым объектом управления, что его собственные конструктивные особенности и динамические

свойства не были исследованы в полном объеме. В последующем это требование преобразовалось в следующую форму: во всем диапазоне рабочих частот должна сохраняться пропорциональность между моментом, прикладываемым водителем к рулевому колесу, и моментом на выходном валу ЭМУРа. От точности выполнения данного требования зависит сохранение так называемого «чувства дороги», непосредственно сама точность управления автомобилем и, как следствие, безопасность движения.

Основным ограничением в выполнении данного условия является сложность прямого измерения момента, прикладываемого водителем к рулевому колесу. В связи с этим, пропорциональность измеренного момента с моментом, создаваемым электродвигателем, не может обеспечить требуемой точности управления, которая обеспечивается только в статических режимах. В настоящее время для измерения момента, как в редукторном, так и в безредукторном варианте ЭМУР, используется датчик момента, принцип действия которого основан на измерении угла скручивания относительно нежесткого торсиона. Выходной сигнал с этого датчика пропорционален моменту, прикладываемому к рулевому колесу водителем только в статических режимах. Данное ограничение приводит к необходимости косвенным путем восстанавливать достоверную информацию о моменте, прикладываемом к рулевому колесу водителем в динамических режимах, и формировать требуемый сигнал на выработку момента электродвигателя.

**Цель работы и задачи исследования.** Целью работы является повышение эффективности функционирования безредукторного ЭМУР на основе высокоточных элементов измерительной системы и алгоритмов формирования сигнала на выработку выходного момента, обеспечивающих высокую статическую и динамическую точность.

Для достижения сформулированной цели в работе поставлены и решены следующие задачи:

1. Разработана классификация систем управления синхронными двигателями магнитоэлектрического возбуждения (СДМВ), позволяющая получить наглядное представление о возможных вариантах построения систем векторного управления СДМВ и провести рациональный выбор системы управления электродвигателем в составе ЭМУР.
2. Проведен анализ математической модели системы рулевого управления автомобиля с безредукторным ЭМУР, на основании которого сформулировано требование к моменту, вырабатываемому ЭМУР.
3. Проведен анализ динамических свойств системы рулевого управления с ЭМУР и выявлены факторы, ухудшающие динамическую точность.
4. Разработан алгоритм формирования сигнала на выработку выходного момента безредукторного ЭМУР, обеспечивающего высокую статическую и динамическую точность.
5. Разработаны элементы измерительной системы безредукторного ЭМУР, обеспечивающие высокое качество управления и упрощающие алгоритм формирования сигнала на выработку выходного момента ЭМУР.

**Методы исследований.** Для достижения поставленной цели в работе использовались методы теории электропривода, теории автоматического управления, системного анализа, математического и имитационного моделирования, а также экспериментальные исследования.

**На защиту выносятся следующие основные результаты:**

- Сформулированное требование к выходному моменту ЭМУР, выполнение которого позволяет провести декомпозицию, выделив ЭМУР из общей структурной схемы системы рулевого управления как подсистему, не влияющую на динамические свойства системы рулевого управления, что также допускает проведение синтеза алгоритма формирования сигнала на выработку выходного момента ЭМУР по математической модели непосредственно самого ЭМУР.
- Предложенный алгоритм формирования сигнала на выработку выходного момента ЭМУР, обеспечивающий высокую статическую и динамическую точность.
- Разработанные элементы измерительной системы ЭМУР:
  - датчик крутящего момента, применение которого позволяет обеспечить высокое качество управления;
  - датчик углового ускорения, позволяющий упростить реализацию алгоритма формирования сигнала на выработку выходного момента ЭМУР.

**Научная новизна** основных результатов диссертации заключается в следующем:

1. Предложен алгоритм формирования сигнала на выработку выходного момента ЭМУР, дополнительно учитывающий компенсацию погрешности измерений датчика момента в динамических режимах и компенсацию динамического момента самого ЭМУР, что обеспечивает высокую статическую и динамическую точность.
2. Сформулировано требование к выходному моменту ЭМУР, являющееся, по своей сути, новой постановкой задачи управления. Выполнение данного требования позволяет рассматривать ЭМУР как отдельную подсистему, не влияющую на динамические свойства системы рулевого управления, и допускает проведение синтеза алгоритма формирования сигнала на выработку выходного момента ЭМУР по математической модели непосредственно самого ЭМУР.

**Практическая значимость результатов работы:**

1. Определен критерий оценки качества ЭМУР при проведении сравнительных испытаний, основой которого является динамическая погрешность в заданном диапазоне частот. Предложенный критерий дает возможность провести сравнительные оценки на этапе исследования новых типов ЭМУР и их алгоритмов.
2. Предложен алгоритм формирования сигнала на выработку выходного момента ЭМУР, позволяющий исключить влияние ЭМУР на динамические свойства системы рулевого управления.

3. Предложена конструкция ЭМУР с датчиком момента на основе магнитоупругого эффекта, в результате применения которого повышается точность измерения момента и до 20% повышается точность воспроизведения выходного момента при отработке реакции со стороны дороги с частотой до 20 Гц по сравнению с датчиком момента, имеющим относительно нежесткий торсион.

**Реализация результатов работы.** Результаты исследований в виде алгоритмов повышения динамической точности безредукторного ЭМУР используются в ООО «НИИ Автоматики и силовой электроники». Получен акт о применении результатов, а также справка об использовании результатов диссертации в учебном процессе при подготовке инженеров, бакалавров, магистрантов на кафедре ЭАПУ Новосибирского государственного технического университета.

**Апробация результатов работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на XIII Международной научно-технической конференции «Электроприводы переменного тока» ЭППТ-05 (Екатеринбург, 2005); на II Международной научно – технической конференции «Электротехника, Электромеханика, Электротехнологии» ЭЭЭ-05 (Новосибирск, 2005); на Международной конференции IFOST-2006 (Улсан, Корея, 2006) на научных семинарах кафедры автоматики и кафедры ЭАПУ НГТУ (2003-2009).

**Публикации.** Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 6 печатных работах, в том числе одна работа в журнале, входящем в перечень ВАК, 3 статьи в трудах международных конференций и 2 в научных сборниках.

#### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников из 112 наименований и 5 приложений. Работа содержит 162 страницы основного текста, 70 рисунков, 13 таблиц.

### **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Введение.** Отражены суть проблемы, актуальность темы, сформулированы цель и задачи работы, описаны методы исследований. Приведены основные положения, выносимые на защиту, изложены сведения о научной значимости и практической ценности, реализации и апробации работы.

**В первой главе** освещено современное состояние и тенденции развития разработок усилителей рулевого управления. Проведен обзор возможных вариантов построения систем рулевого управления с электромеханическими усилителями рулевого управления. Проведен анализ возможных вариантов датчика момента и типов электродвигателя для применения в составе ЭМУР.

**Во второй главе** приведено математическое описание СДМВ и полученные на его основе структурные схемы, позволяющие анализировать режимы его работы.

Мехатронные системы представляют собой синергию взаимно интегрированных электромеханических и электронных элементов, формирующих систему управления движением, и, как правило, обозначенные элементы обладают предельными показателями. Наибольшее распространение в таких системах получили синхронные двигатели с магнитоэлектрическим возбуждением (СДМВ), обладающие наилучшими удельными и эксплуатационными показателями благодаря отсутствию скользящих контактов и потерь в роторе, а также лучшему использованию материалов по моменту.

Для управления моментом бесколлекторного двигателя необходима система управления, преобразующая сигнал задания требуемого момента и информацию о состоянии двигателя в сигналы задания управляющих воздействий, воспринимаемых двигателем. Причём на показатели качества электропривода решающее значение оказывает принцип построения этой системы управления.

Существует большое количество возможных вариантов построения систем управления. Многообразие применяемых систем управления объясняется вариацией возможных исполнений отдельных элементов этих систем. Практически все системы включают в себя регулятор тока, преобразователь координат, инвертор напряжения с ШИМ, формирователь сигнала положения вращающейся системы координат,  $m$ -фазный двигатель. Наиболее часто варьируются типы и принцип построения первых трех элементов.

Предложенная классификация систем векторного управления СДМВ сведена в таблицу 1. В качестве классификационных признаков используется следующее: 1) тип регулятора, 2) тип ШИМ, 3) тип системы координат, в которой ведется регулирование тока. Таблица может быть расширена путем вариации и других элементов системы, например, типов формирователей сигнала положения вращающейся системы координат, количества фаз двигателя и т.п.

Таблица 1

Классификация систем векторного управления СДМВ

Тип регулятора тока	Тип ШИМ	Тип системы координат, в которой ведется регулирование тока			
		Вращающаяся ортогональная $d, q$	Неподвижная ортогональная $\alpha, \beta$	Неподвижная трехосевая $a, b, c$	Полярная $I_m, \beta$
Двухпозиционный	—	1	2	3	4
Квазине-прерывный	Векторная	5	6	7	8
	Пофазная	9	10	11	12

Под номерами с 1-го по 12-ый подразумеваются схемы, отвечающие совокупности пересекающихся признаков. Все схемы также приведены во второй главе.

Безусловно, для обоснованного выбора той или иной системы управления необходимо иметь представление о преимуществах и недостатках, которые присущи как отдельным элементам, так и их комбинации. В данной главе приведены некоторые особенности составных элементов систем управления.

Ряд схем, полученных путем синтеза по предложенной классификационной таблице, не был реализован ранее. Но, не исключено, что для каких-либо приложений именно они будут наиболее удобны для применения.

При анализе различных функциональных схем можно сделать вывод о том, что для системы управления ЭМУР наиболее предпочтительна схема с формированием токов в полярной системе координат с векторной модуляцией и квазинепрерывными регуляторами тока (рис. 1).

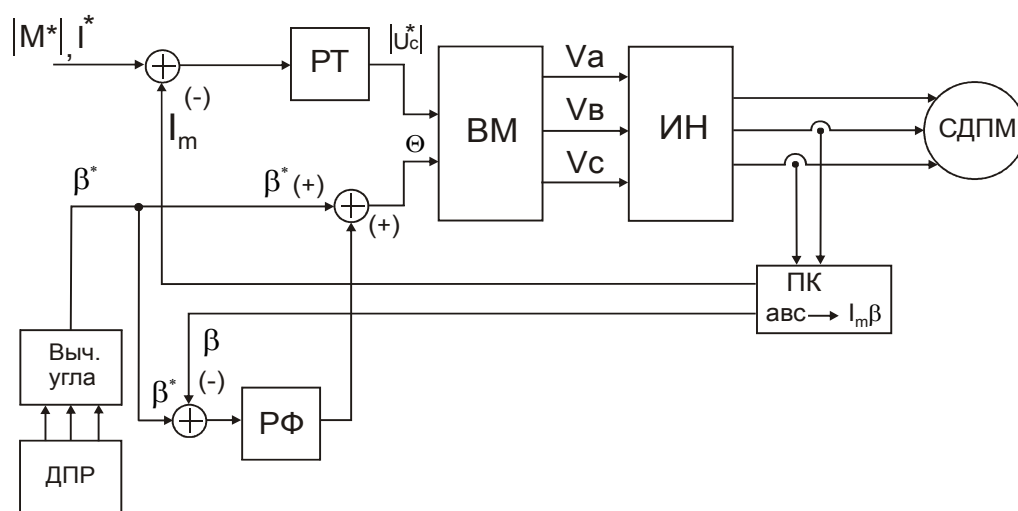


Рис. 1. Функциональная схема системы управления с векторной модуляцией в полярной системе координат

Состав системы: РТ – регуляторы тока, РФ – регулятор фазы, ВМ – векторный модулятор, ИН- инвертор напряжения, СДПМ – синхронный двигатель с постоянными магнитами, ДПР – датчик положения ротора, ПК- преобразователь координат.

**Третья глава** посвящена анализу математической модели системы рулевого управления автомобилем и анализу режимов работы ЭМУР; сформулировано требование к выходному моменту ЭМУР; выявлены факторы, влияющие на динамическую точность управления.



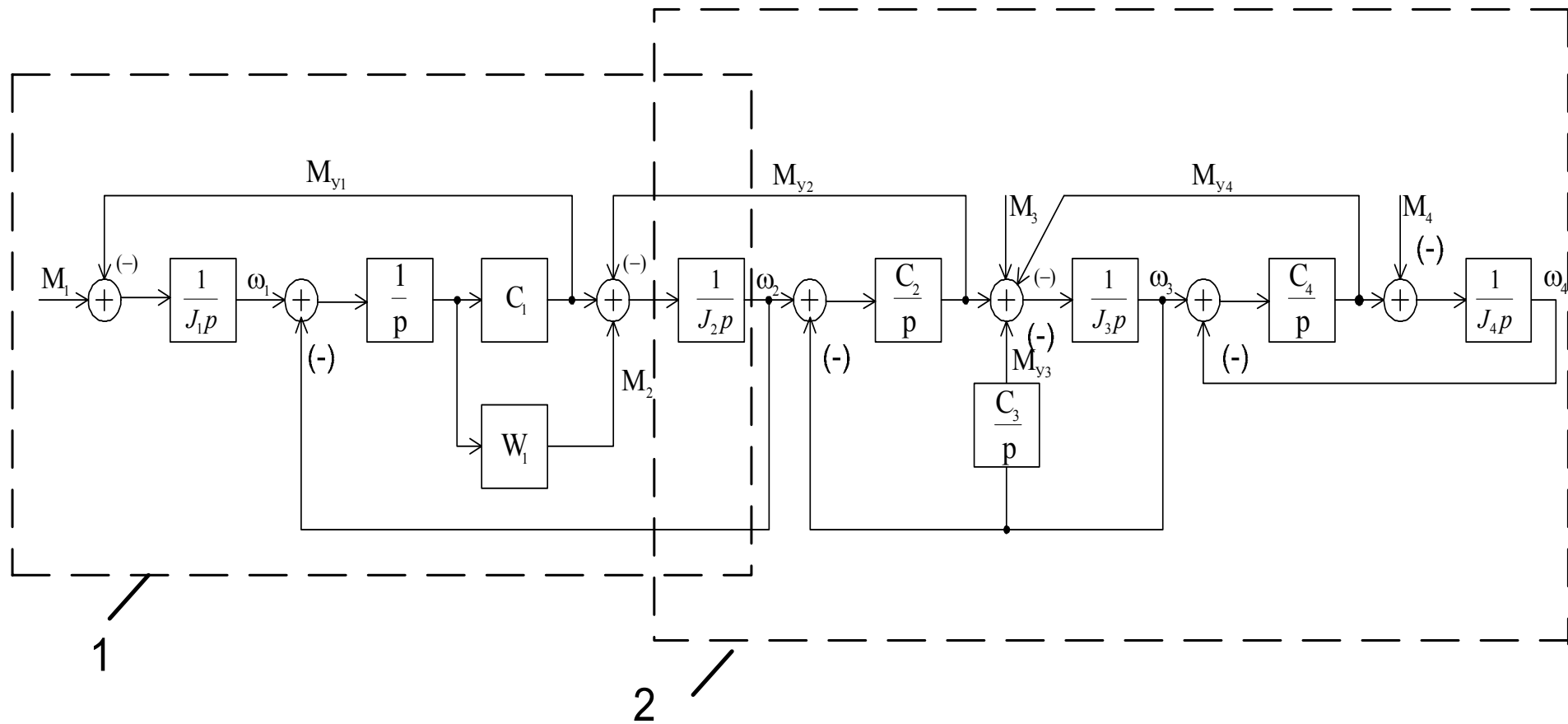


Рис. 2. Структурная схема рулевого управления с безредукторным ЭМУР

Структурная схема, соответствующая системе уравнений описывающих систему рулевого управления с ЭМУР приведена на рис. 2.

На структурной схеме (рис. 2) приняты следующие обозначения:

$M_1$  - момент, создаваемый водителем на рулевом колесе;

$M_2$  - выходной момент, создаваемый двигателем ЭМУР;

$M_3$  – приведенный момент от воздействия микропрофиля дороги;

$M_4$  – момент сопротивления среды;

$C_1$  - жесткость торсиона ЭМУР;

$C_2$  – жесткость эластичной муфты и рулевых тяг;

$C_3$  – крутильная жесткость шин;

$C_4$  – приведенная боковая жесткость шин и жесткость рычагов подвески;

$M_{y1}$  - момент упругий, порождаемый относительной нежесткостью торсиона в составе датчика момента;

$M_{y2}$  - момент упругий, порождаемый нежесткостью эластичной муфты и рулевых тяг;

$M_{y3}$  – момент упругий, возникающий вследствие нежесткости шин при кручении;

$M_{y4}$  – момент упругий, возникающий вследствие боковой нежесткости шин и рычагов подвески;

$J_1$  – момент инерции рулевого колеса;

$J_2$  – момент инерции ротора электродвигателя ЭМУР;

$J_3$  – приведенный момент инерции колес относительно оси поворота;

$J_4$  – приведенный момент инерции носителя;

$\omega_1$  – частота вращения рулевого колеса;

$\omega_2$  - частота вращения выходного вала ЭМУР;

$\omega_3$  – угловая частота поворота колес;

$\omega_4$  - приведенная угловая частота вращения носителя.

$W_1(p)$  – передаточная функция электропривода ЭМУР, формирующего момент  $M_2$  в функции угла скручивания торсиона ( $\varphi_1$ ).

На схеме (рис. 2.) пунктирными линиями выделены две подсистемы: 1-двухмассовая модель самого ЭМУР, 2 – модель системы рулевого управления без ЭМУР, в которой момент инерции ротора двигателя ЭМУР условно является моментом инерции рулевого колеса. Представленная в таком виде математическая модель безредукторного ЭМУР наглядно демонстрирует, что для исключения влияния ЭМУР на свойства системы в целом, необходимо обеспечить пропорциональность между моментом на рулевом колесе  $M_1$  и моментом на выходном валу ЭМУР, представляющим собой сумму момента, вырабатываемого электродвигателем ЭМУР, и момента упругого  $M_{y1}$ .

Таким образом, для адаптации ЭМУР в существующую кинематическую схему рулевого управления и для устранения влияния ЭМУР на динамические характеристики системы «автомобиль» необходимо, чтобы при формировании выходного момента во всем диапазоне рабочих скоростей и частот изменения момента выполнялось следующее условие:

$$M_2 + M_{y1} = kM_1, \quad (1)$$

где  $k > 1$  - коэффициент пропорциональности (являющийся функцией скорости движения автомобиля).

Выполнение условия (1) является одним из основных требований, предъявляемых к ЭМУР, а точность его выполнения в заданном диапазоне частот является важным критерием оценки ЭМУР при проведении сравнительных испытаний.

Для анализа динамических свойств ЭМУР и синтеза алгоритма формирования сигнала задания на выработку выходного момента ЭМУР составлена математическая модель самого ЭМУР. Существующая на сегодняшний день конструкция ЭМУР предполагает наличие относительно нежесткого торсиона в составе датчика момента, соединяющего вал рулевого колеса и выходной вал ЭМУР. Данное обстоятельство приводит к тому, что система носит характер двухмассовой.

С учетом допущения, что угол скручивания торсиона не ограничен, по приведенным в данной главе дифференциальным уравнениям, описывающим динамику двухмассовой системы, составлена структурная схема (рис. 3), отражающая алгоритм формирования сигнала задания на выработку выходного момента электродвигателя пропорциональному моменту, измеряемому датчиком момента, т.е. углу скручивания торсиона:

$$M_{дв} = k \cdot \Delta\varphi, \quad (2)$$

где  $k$  - коэффициент усиления, зависящий от скорости движения автомобиля,  $\Delta\varphi$  - угол скручивания торсиона.

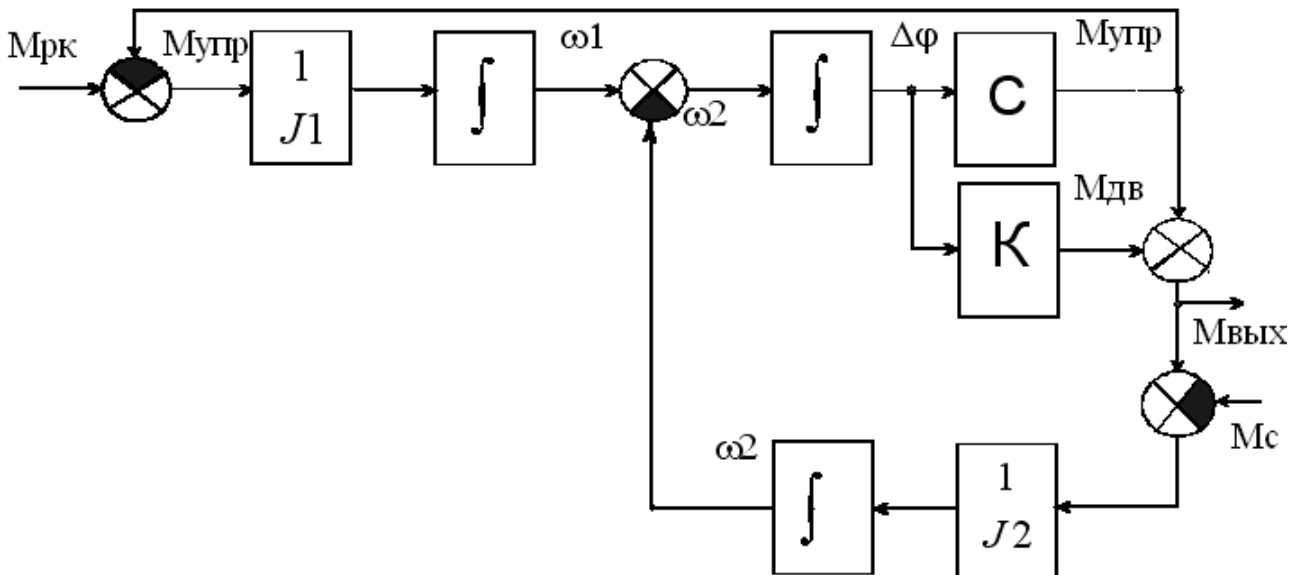


Рис. 3. Структурная схема алгоритма, отвечающего условию  $M_{дв} = k \cdot \Delta\varphi$

Натурные испытания ЭМУР с таким алгоритмом наряду с высокими моментными показателями выявили ряд недостатков, таких как появление посторонних пульсаций на рулевом колесе и ухудшение самовозврата колес в исходное положение при выходе из поворота.

Для определения природы выявленных недостатков проведен анализ динамических свойств системы.

Для анализа динамических свойств системы было проведено моделирование исходной структурной схемы с использованием пакета Simulink в структуре MathLab. Моделирование было проведено при характерных частотах по управляющему и возмущающему воздействию.

Из проведенных предварительных расчетов приняты следующие значения моментов инерции рулевого колеса, двигателя и жесткости торсиона:  $J_1=0,006 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ ;  $J_2=0,000756 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ ;  $C=95 \text{ Н/м}$ .

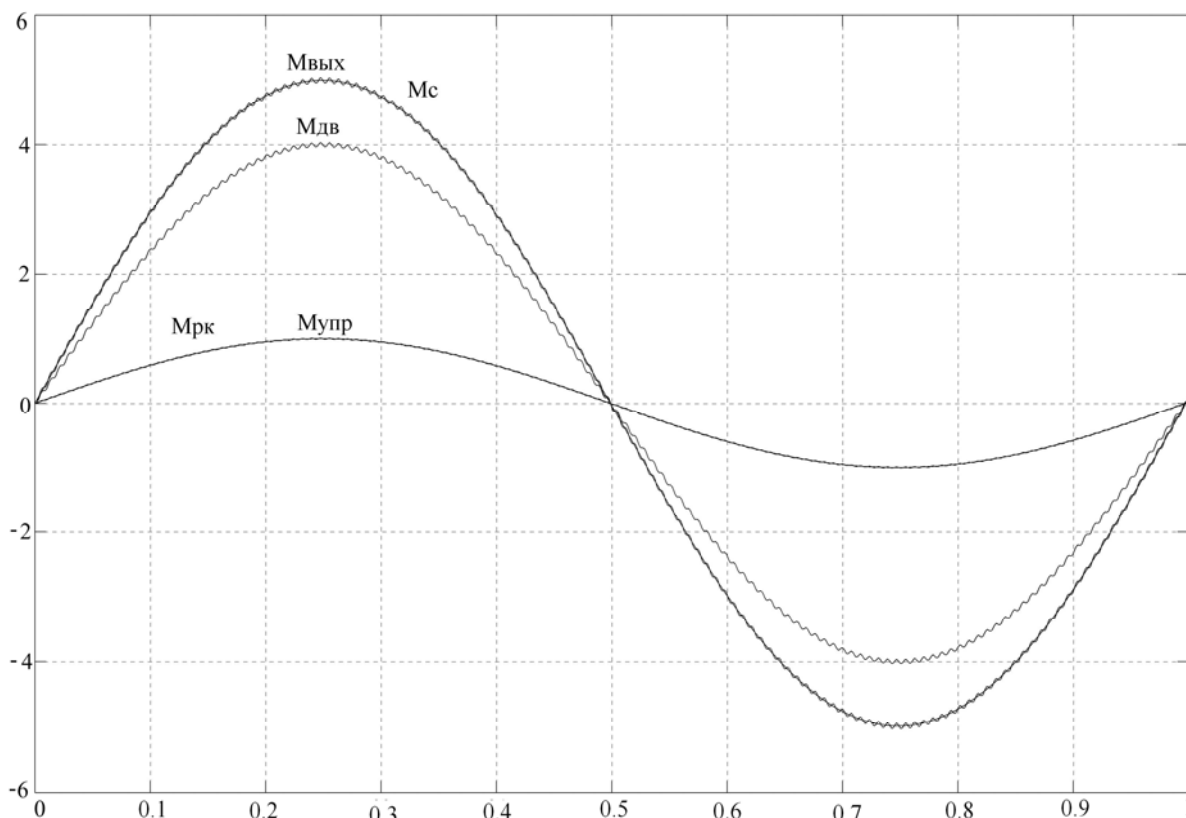


Рис. 4. Процессы, проходящие в системе при гармоническом управляющем воздействии с частотой 1 Гц, алгоритм соответствующий

$$\text{условию } M_{дв} = k \cdot \Delta\varphi$$

По виду переходных процессов были сделаны следующие выводы:

В соответствии с существующим алгоритмом формирования сигнала на выработку выходного момента ЭМУР, выходной момент  $M_{вых}$  представляет собой сумму момента вырабатываемого ЭМУР -  $M_{дв}$  и момента упругого -  $M_{упр}$ . При этом пропорциональность момента на рулевом колесе и момента на выходном валу ЭМУР нарушается с увеличением частоты задающего сигнала. Особенно характерно это проявляется в верхнем диапазоне рабочих частот. Так при частоте в 20 Гц погрешность в требуемой пропорциональности составляет 20%.

Кроме того, данный алгоритм негативно показал себя при анализе системы по возмущающему воздействию, когда водитель не прикладывает к рулевому колесу усилия, что, в частном случае, может происходить при

самовозврате колес в исходное центральное положение при выходе из поворота. В этом случае вырабатываемый двигателем момент препятствует самовозврату. На рис. 5 представлено, что момент двигателя  $M_{дв}$  – пропорционален моменту упругому (в данном примере с коэффициентом 4). В результате ЭМУР гасит  $4/5$  момента самовозврата  $M_c$ , и на выходе остается только  $1/5$  его часть  $M_{вых}$ .

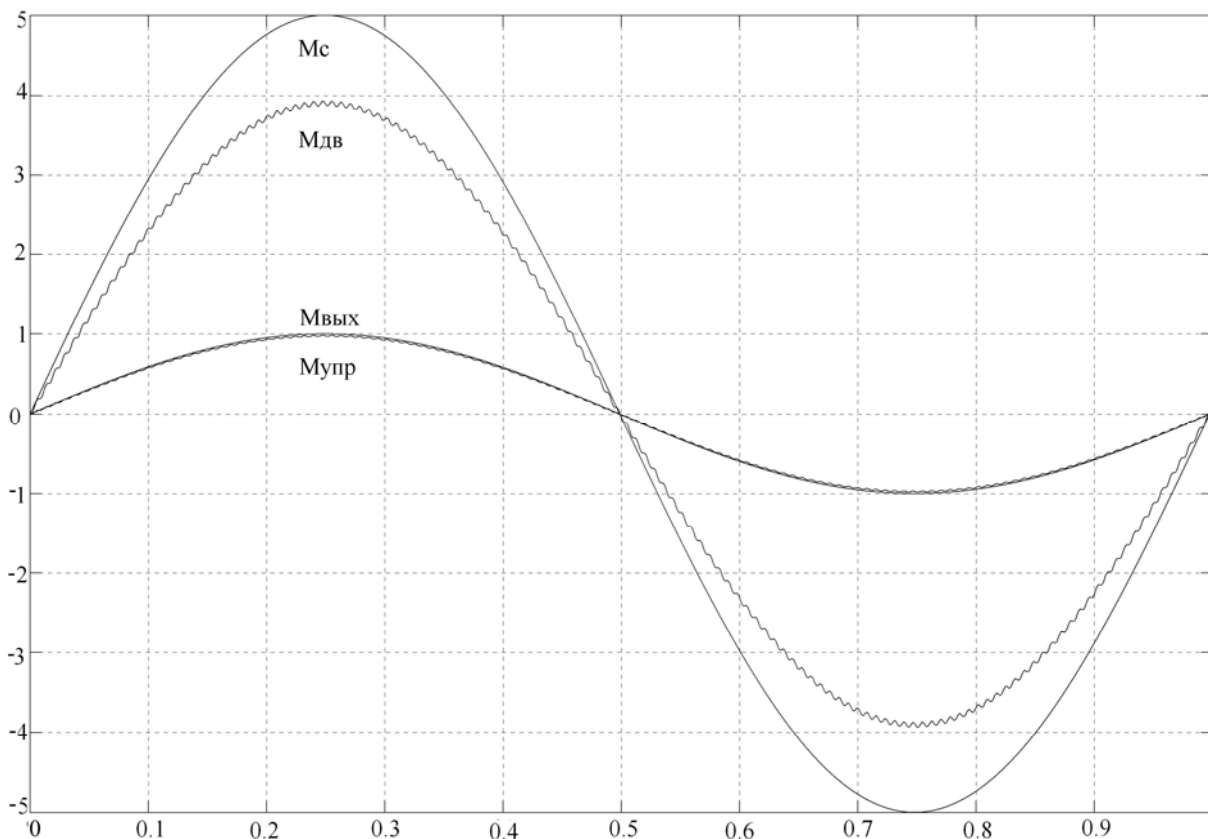


Рис. 5. Процессы, проходящие в системе при гармоническом возмущающем воздействии с частотой 1 Гц, алгоритм соответствующий условию  $M_{дв} = k \cdot \Delta\varphi$

В режимах, когда водитель не прикладывает к рулевому колесу усилий, например, при выходе автомобиля из поворота, вал рулевой колонки, тем не менее, испытывает механическую нагрузку от стабилизирующего момента, и датчик момента выдает соответствующий сигнал, воспринимаемый системой управления, как сигнал на выработку момента электродвигателем ЭМУР. И происходит это при данном алгоритме в любом случае, вне зависимости от того, какую жесткость имеет скручивающийся элемент датчика момента.

Проведенный анализ показал, что для обеспечения высокой динамической точности управления и сохранения самовозврата за счет свойств подвески необходимо внести корректировки в алгоритм формирования задания на выработку выходного момента ЭМУР.

**В четвертой главе** выявлено влияние на выходной момент изменения соотношений между моментами инерции рулевого колеса и самого ЭМУР.

Также выявлено влияние жесткости торсиона на точность воспроизведения выходного момента при управляющем и возмущающем воздействии. Предложен алгоритм формирования сигнала на выработку выходного момента ЭМУР и реализующая его структура, позволяющие обеспечить высокую статическую и динамическую точность.

Для обеспечения пропорциональности между моментом, прикладываемым к рулевому колесу водителем, и моментом вырабатываемым электродвигателем ЭМУР, необходимо косвенным путем получить оценку момента, прикладываемого к рулевому колесу водителем  $M_{рк}^*$ , которая отличается от момента упругого  $M_{упр}$ , измеряемого датчиком момента на величину динамического момента рулевого колеса  $J_1 d^2\varphi_1/dt^2$ . Этому соответствуют уравнения (3) и (4):

$$M_{рк}^* = M_{упр} + J_1 d^2\varphi_1/dt^2, \quad (3)$$

$$M_{дв} = K \cdot (M_{упр} + J_1 d^2\varphi_1/dt^2), \quad (4)$$

где  $M_{рк}^*$  - оценка момента, прикладываемого водителем к рулевому колесу,  $K$  – коэффициент усиления, задаваемый формирователем тока на выработку момента электродвигателя.

Для реализации данного алгоритма, помимо информации об угле скручивания торсиона  $\Delta\varphi$ , получаемой с датчика момента, необходимо использовать информацию об угле поворота выходного вала ЭМУР  $\varphi_2$ , которая соответствует информации об угле положения ротора, измеряемого датчиками Холла для нужд системы управления электродвигателем ЭМУР. По уравнениям, (3) и (4), и с учетом того, что  $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ , составлена структура алгоритма, обеспечивающего пропорциональность между моментом, прикладываемым к рулевому колесу водителем и моментом, создаваемым электродвигателем (рис. 6).

Из данной структурной схемы (рис. 6) видно, что на двигатель приходит оценка момента непосредственно прикладываемого к рулевому колесу водителем, а не момент упругий как было в исходной структурной схеме.

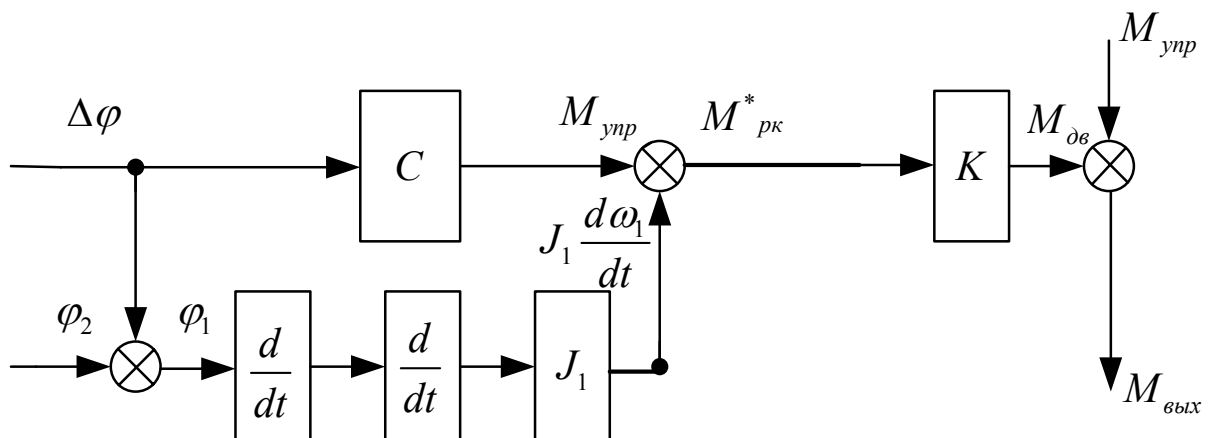


Рис. 6. Структурная схема алгоритма управления, обеспечивающего пропорциональность момента электродвигателя ЭМУР с моментом на рулевом колесе  $M_{дв} = k \cdot M_{рк}$

Данный алгоритм показал высокую динамическую точность при анализе по управляющему воздействию, как при заданных параметрах моментов инерции рулевого колеса и самого ЭМУР, так и при их вариации.

Анализ полученных результатов моделирования по возмущающему воздействию показал, что дополнительный момент инерции, привносимый самим ЭМУР, в динамических режимах воспринимается системой управления как часть нагрузки со стороны дороги, которая подлежит компенсации. В результате чего, в режиме самовозврата руля, когда водитель не прикладывает к рулевому колесу никакого усилия, динамический момент самого ЭМУР препятствует самовозврату руля.

Для устранения выявленных недостатков предложен алгоритм формирования сигнала на выработку выходного момента электродвигателя с компенсацией динамического момента ЭМУР. Компенсационная добавка динамического момента, складываясь с восстановленной оценкой момента, приложенного к рулевому колесу водителем, формирует, требуемый для обеспечения пропорциональности между моментом на рулевом колесе и на выходном валу ЭМУР, момент электродвигателя:

$$M_{ДВ} = K(M_{ПК}^* + \frac{1}{K} J_2 \frac{d^2 \varphi_2}{dt^2}). \quad (5)$$

Таким образом, в режиме самовозврата, когда водитель не прикладывает момента к рулевому колесу  $M_{ПК}=0$ , двигатель будет вырабатывать момент равный динамическому моменту ЭМУР, что сохраняет естественный самовозврат руля и повышает динамическую точность управления.

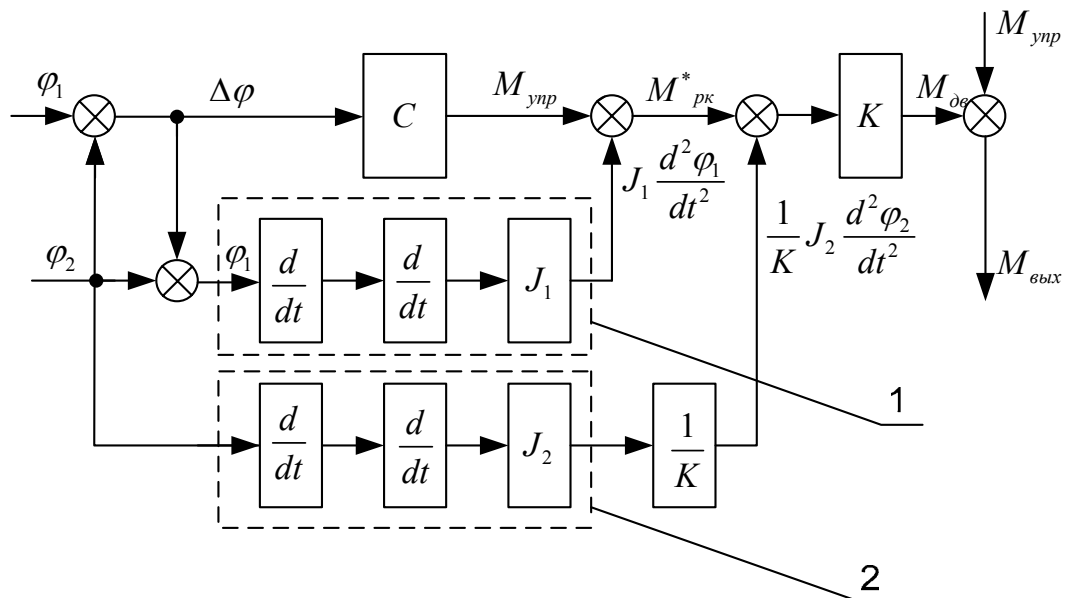


Рис. 7. Структурная схема формирования сигнала на выработку выходного

момента ЭМУР, отвечающего условию  $M_{ДВ} = K(M_{ПК}^* + \frac{1}{K} J_2 \frac{d^2 \varphi_2}{dt^2})$

На рис. 7 приведена структурная схема, показывающая реализацию алгоритма формирования сигнала на выработку выходного момента ЭМУР соответствующую уравнению (5), где цифрой 1 обозначен идеализированный наблюдатель динамического момента рулевого колеса, а цифрой 2 - идеализированный наблюдатель динамического момента электродвигателя.

Количественная оценка результатов моделирования всех трех алгоритмов при изменении соотношения между моментами инерции рулевого колеса и ротора электродвигателя ЭМУР, при изменении жесткости торсиона и при изменении частоты управляющего и возмущающего воздействия сведены в сравнительные таблицы. Сокращенный вариант одной из этих таблиц, отражающий погрешность выходного момента ЭМУР в процентном отношении от требуемого значения при возмущающем воздействии с частотой 10 Гц представлен в виде таблицы 2. За требуемое значение принят эталонный выходной момент, соответствующий полной пропорциональности момента, прикладываемого к рулевому колесу водителем, и выходного момента ЭМУР при заданном коэффициенте усиления.

Таблица 2 демонстрирует, что динамическая погрешность при известном алгоритме ( $M_{дв} = k \cdot \Delta\varphi$ ) составляет 80%, что подтверждается соответствующим ухудшением самовозврата. Усовершенствованный алгоритм ( $M_{дв} = k \cdot M_{рк}$ ) позволяет снизить эту погрешность до 12 %, но при увеличении момента инерции ротора двигателя эта погрешность возрастает. При алгоритме с компенсацией динамического момента погрешность находится в пределах 0,5% при расчетном значении момента инерции ротора (для применяемого в настоящий момент электродвигателя в составе безредукторного ЭМУР) и в пределах 2% при увеличении момента инерции ротора электродвигателя в 10 раз.

Таблица 2

Количественная оценка результатов моделирования

	момент инерции ротора	расчетный J2			увеличенный в 10 раз J2		
		М дв = k*Мупр	М дв = k*Мрк	С комп. Мдин2	М дв = k*Мупр	М дв = k*Мрк	С комп. Мдин2
частота	Алгоритм						
	тип датчика						
10 Гц	Торсион.	80,50%	12,40%	0,50%	84,50%	56,00%	2,00%
	Магнитоупр.	80,00%	11,80%	0,45%	84,03%	51,00%	1,50%



Также в четвертой главе приведены результаты моделирования структурной схемы системы рулевого управления (рис.2.) с известным и предложенными алгоритмами формирования сигнала на выработку выходного момента ЭМУР, подтверждающие обоснованность проведенной декомпозиции (выделения ЭМУР в отдельную подсистему).

На основании проведенного анализа, можно сделать следующие выводы:

1. Предложен алгоритм формирования сигнала на выработку выходного момента ЭМУР, который позволяет на основе имеющейся информации обеспечить высокую динамическую точность управления во всем диапазоне рабочих частот.
2. Для обеспечения пропорциональности между моментом, прикладываемым к рулевому колесу водителем, и моментом на выходном валу ЭМУР помимо восстановления достоверной информации о моменте на рулевом колесе необходимо обеспечивать компенсацию динамического момента самого ЭМУР.
3. Исследование предложенных алгоритмов формирования сигнала на выработку выходного момента ЭМУР позволило выявить, что увеличение жесткости торсиона позволяет повысить динамическую точность управления. Этот факт, в свою очередь, говорит о том, что усовершенствование измерительной системы ЭМУР, в частности, разработка и адаптация для данной системы датчика момента, обладающего высокой жесткостью, является актуальным направлением повышения эффективности функционирования электромеханического усилителя рулевого управления автомобиля.

**В пятой главе** предложены пути повышения качества управления и упрощения алгоритма формирования сигнала на выработку выходного момента ЭМУР за счет усовершенствования измерительной системы; разработаны датчик момента и датчик углового ускорения, работающие на принципе «эффекта Виллари»; представлены результаты экспериментальных исследований разработанного датчика момента.

Конструкция и внешний вид разработанного датчика момента представлены на рис. 8.

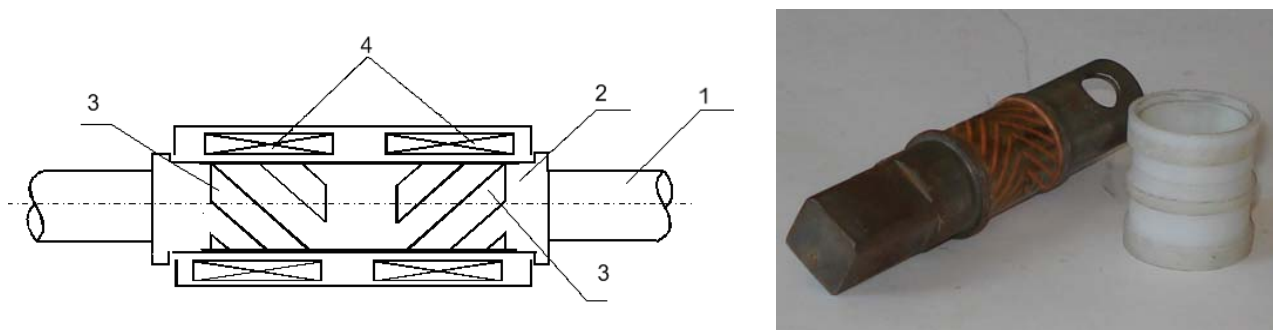


Рис. 8. Конструкция и внешний вид магнитоупругого датчика момента

На рис. 8. приняты следующие обозначения: 1 – вал рулевой колонки, 2- медная подложка, 3 – чувствительная пленка, 4- измерительные катушки.

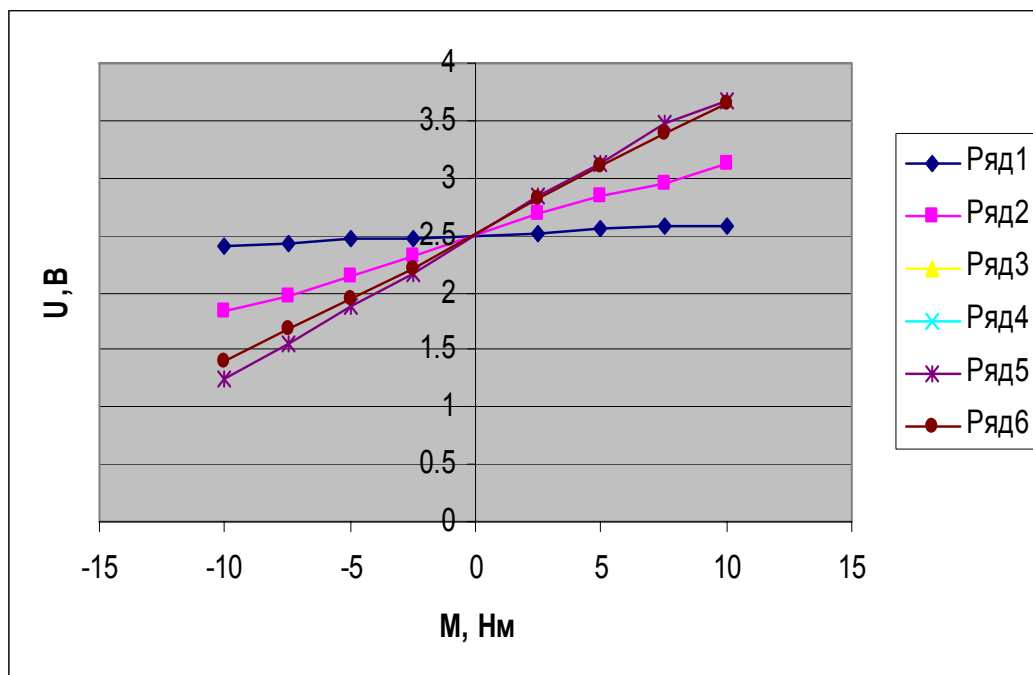


Рис. 9. Характеристика  $U = f_1(M)$

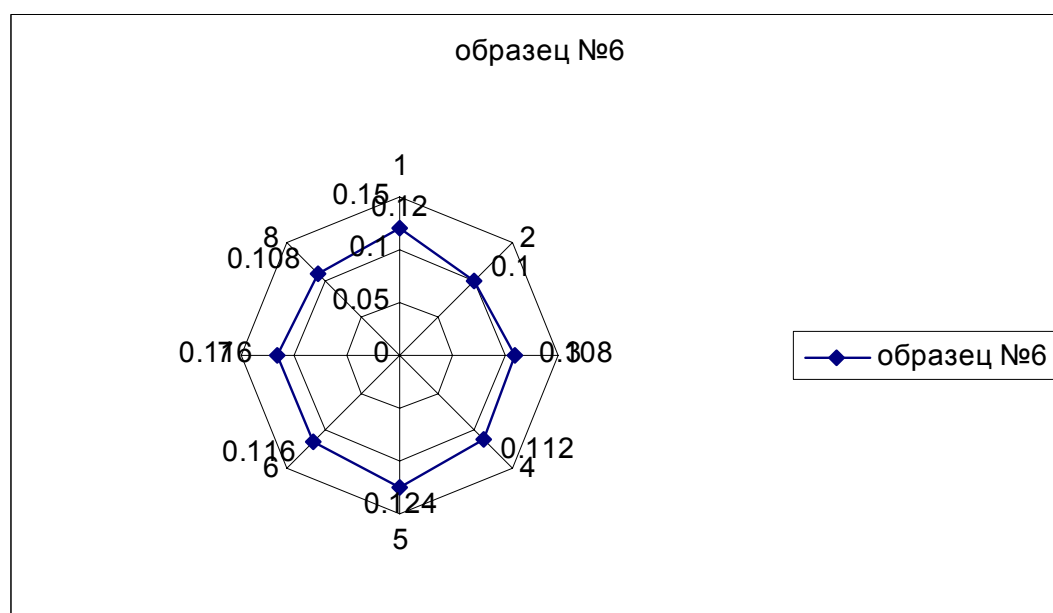


Рис. 10. Лепестковая диаграмма чувствительности образца №6

Проведенные испытания макетных образцов магнитоупругих датчиков крутящего момента показали соответствие их характеристик основным техническим требованиям.

Разработанный датчик обеспечивают высокую чувствительность, высокую стабильность, низкий уровень пульсаций выходного сигнала при вращении вала, низкую чувствительность к деформациям изгиба и сжатия,

высокую механическую жёсткость кинематической цепи, в которой производится измерение момента, простоту и невысокую стоимость изготовления.

Всё это позволяет сделать вывод о целесообразности продолжения работ, направленных на создание электромеханического усилителя руля с бесторсионным датчиком крутящего момента.

Разрез безредукторного ЭМУР с датчиком момента на основе магнитоупругого эффекта представлен на рис. 11.

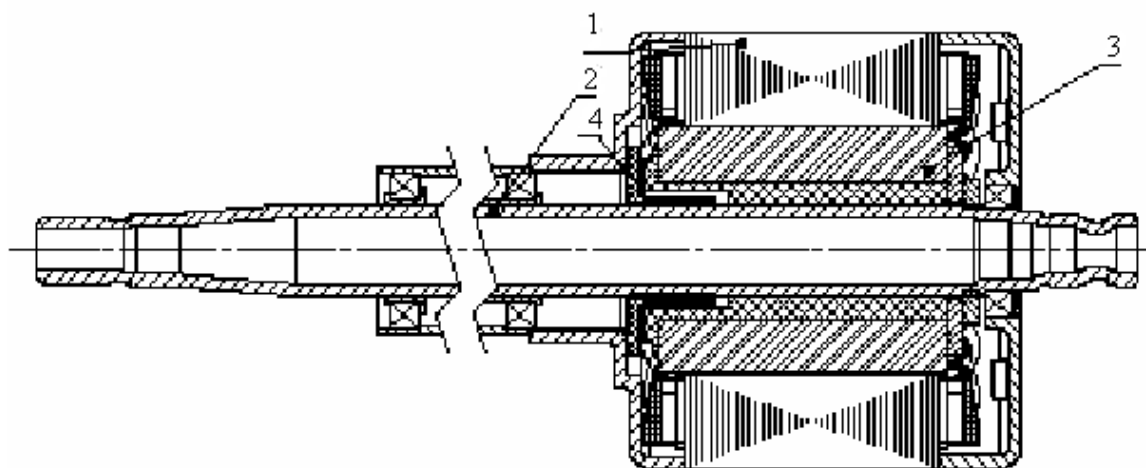


Рис. 11. Разрез безредукторного ЭМУР

На рис. 11. приняты следующие обозначения: 1 - статор, являющийся корпусом, 2- цельный вал, 3 – закрепленный на нем ротор, 4- датчик крутящего момента.

Анализ динамических режимов работы ЭМУР с датчиком момента на основе магнитоупругого эффекта показал, что изменение конструкции, содержащей упругий элемент на конструкцию с цельным жестким валом, не исключает необходимость корректировки компенсирующего момента, вырабатываемого электродвигателем, на величину динамического момента электропривода. Так как измерению подлежит только угол поворота, а для корректной компенсации необходимо иметь информацию об ускорении рулевого колеса, то в алгоритме формирования сигнала на выработку выходного момента ЭМУР, будет необходимым введение описанного выше наблюдателя динамического момента, который содержит два последовательно соединенных дифференцирующих звена. Данная процедура представляет собой определенную сложность, так как операция дифференцирования неизбежно приводит к усилению помех, и сопряжена с поиском компромисса заключающегося в подборе коэффициентов передаточной функции наблюдателя. Подбор коэффициентов должен обеспечить подавление помех при сохранении требуемого быстродействия.

Устранить данный недостаток позволяет применение разработанного датчика углового ускорения, основанного также на магнитоупругом эффекте.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований в работе получены следующие основные результаты:

1. Предложена математическая модель системы рулевого управления автомобиля с ЭМУР, позволяющая провести декомпозицию, выделив ЭМУР в подсистему, не влияющую на динамические свойства системы рулевого управления. Проведен анализ динамических свойств системы рулевого управления по предложенной математической модели. Выявлены причины, ухудшающие динамическую точность управления и препятствующие самовозврату руля.
2. Сформулировано требование к выходному моменту ЭМУР, являющееся уточненной задачей управления, заключающееся в обеспечении пропорциональности между моментом, приложенным к рулевому колесу водителем, и моментом на выходном валу ЭМУР во всем диапазоне рабочих частот. Выполнение этого требования допускает проведение синтеза алгоритма формирования сигнала на выработку выходного момента ЭМУР по математической модели непосредственно самого ЭМУР.
3. Предложен алгоритм формирования сигнала на выработку выходного момента ЭМУР, который, на основе имеющейся информации из существующей измерительной системы, позволяет получить высокую статическую и динамическую точность управления.
4. Определен критерий оценки качества ЭМУР при проведении сравнительных испытаний, основой которого является динамическая погрешность в заданном диапазоне частот. Предложенный критерий дает возможность провести сравнительные оценки на этапе исследования новых типов ЭМУР и их алгоритмов. На основе этого критерия проведен сравнительный анализ предложенного алгоритма формирования сигнала на выработку выходного момента с известными алгоритмами.
5. Проведена разработка и исследование датчика момента на основе магнитоупругого эффекта. Предложена конструкция ЭМУР с датчиком момента на основе магнитоупругого эффекта, в результате применения которого повышается точность измерения момента, приложенного к рулевому колесу водителем, и повышается точность воспроизведения выходного момента ЭМУР.
6. Предложена конструкция датчика углового ускорения, позволяющая упростить реализацию алгоритма формирования сигнала на выработку выходного момента ЭМУР.

### **Основные публикации по теме диссертации:**

1. Тюрин М.В. Разработка и исследование алгоритмов управления электромеханическим усилителем руля / Б.М. Боченков, М.В. Тюрин // Электроприводы переменного тока: Материалы международной научно-технической конференции, Екатеринбург: УГТУ, 2005. С. 215-219.
2. Тюрин М.В. Способы формирования сигнала на выработку компенсирующего момента электромеханического усилителя руля автомобиля / Б.М. Боченков, М.В. Тюрин // Мехатроника, автоматизация, управление. - 2006. - № 10. - С. 31-35.

3. Тюрин М.В. Пути повышения динамической точности управления электромеханическим усилителем руля автомобиля. / Б.М. Боченков, М.В. Тюрин // Сборник научных трудов НГТУ.-2006.-№3(45). С.3-10.
4. Maksim Tyurin. To a question about ways of forming a signal for producing additional torque of electric power steering system /Boris Bochenkov, Maksim Tyurin, Vasiliy Krinichnyi. //IFOST 2006. Uslan. P. 272-273. [К вопросам о способах формирования компенсирующего момента системы рулевого управления с электромеханическим усилителем].
5. Тюрин М.В. Классификация систем управления синхронными двигателями магнитоэлектрического возбуждения / Б.М. Боченков, М.В. Тюрин // Автоматизированные электромеханические системы: сб. научных трудов; под общ. ред. В.Н. Аносова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. - С. 46-55.
6. Тюрин М.В., Анализ динамических свойств мехатронного безредукторного усилителя рулевого управления / Б.М. Боченков, М.В. Тюрин, А.Г.Судак, В.Т. Сысенко // Автоматизированные электромеханические системы: сб. научных трудов; под общ. ред. В.Н. Аносова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. - С. 168-179.

Отпечатано в типографии

Новосибирского государственного технического университета

630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

тел./факс (383) 346-08-57

Формат 60 X 84/16, объем 1.0 п.л., тираж 100 экз.

заказ № 1587, подписано в печать 12.11.09 г.