

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ УСИЛИТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РУЛЕВОГО УПРАВЛЕНИЯ

А.И. Крюков, К.А. Палагута, Л.А. Широков

Разработана модель усилительной электромеханической системы рулевого управления легковым автомобилем, которая представлена блоками вентильно-индукторного привода, рулевого механизма и блоком информационных датчиков. Для анализа поведения автомобиля с электромеханической системой усилителя руля использованы трехмерные пространственные представления характеристик суммарного момента на цапфах управляемых колес и момента компенсации от скорости движения автомобиля и угла поворота рулевого вала.

Ключевые слова: электромеханический усилитель, рулевое управление, модель, характеристика.

Введение

Рулевое управление автомобиля (рис. 1) – это совокупность устройств, обеспечивающих поворот управляемых колес автомобиля при воздействии водителя на рулевое колесо. Оно состоит из рулевого механизма 3 и рулевого привода, включающего в себя рулевую колонку 1 и промежуточный вал 4. Для облегчения поворота колес в рулевой механизм или привод встраивается усилитель 2.

Усилитель рулевого управления 2 позволяет снижать усилие, возникающее на рулевом колесе автомобиля при низких скоростях движения, а также осуществлять поворот на месте без значительного усилия на рулевом колесе и при сменах типа дорожного покрытия. Указанные возможности усилителя повышают конкурентоспособность и комфортность автомобиля, уровень его технического оснащения и безопасность управления.

Существуют следующие виды усилителей рулевого управления:

- электромеханический усилитель;
- электрогидроусилитель;
- гидроусилитель;
- пневмоусилитель.

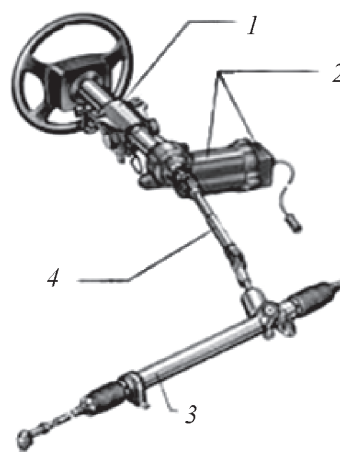


Рис. 1. Структура рулевого управления автомобиля:

1 – рулевая колонка; 2 – электроусилитель с червячной передачей и электронным блоком управления; 3 – реечный рулевой механизм; 4 – промежуточный вал

Электромеханический усилитель руля (ЭМУР) автомобиля имеет значительные преимущества перед пневмо- и гидравлическими усилителями. Основными из них являются снижение расхода топлива и компактность.

Электронные модули обеспечивают управление с высокой точностью всей системой, а также предоставляют возможность регулирования усиления в широких пределах в зависимости от скорости движения автомобиля.

В результате исследований, проведенных в Тольяттинском государственном университете, получены статические характеристики усилительной электромеханической системы рулевого управления автомобилем. Однако данные исследования не позволили накопить эффективную базу для проведения экспериментов на реальном автомобиле ввиду отсутствия пространственных представлений характеристик ЭМУР.

Целью данной работы явилось получение трехмерных характеристик усилительной электромеханической системы руля, которые дают возможность упростить анализ поведения автомобиля с ЭМУР.

Принцип работы системы ЭМУР

Структурная схема системы ЭМУР, а также ее связи с рулевым управлением автомобиля изображены на рис. 2.

Система электромеханического управления состоит из трех основных блоков:

- вентильно-индукторного привода ВИП;
- рулевого механизма РМ;
- информационных датчиков ДСА, ДЧВ, ДМ и ДТ.

В состав ВИП входят: датчик тока ДТ, вентильно-индукторный двигатель ВИД, коммутатор К, редуктор-расцепитель Р/Р и контроллер.

Универсальный контроллер предназначен для управления приводами переменного тока, в частности вентильными индукторными двигателями. Главная его функция – реализация прямого цифрового управления силовой частью привода через интерфейс контроллера с инвертором. Контроллер управляет двигателем, анализируя информацию с датчика момента ДМ в виде уровня напряжения U , датчика скорости автомобиля ДСА в виде скорости автомобиля $V_{авт}$, датчика частоты вращения ДЧВ в виде напряжения питания $U_{пит}$ и датчика тока ДТ.

Момент $M_{вод}$, прикладываемый водителем к рулевому колесу РК, вместе с моментом $M_{кол}$

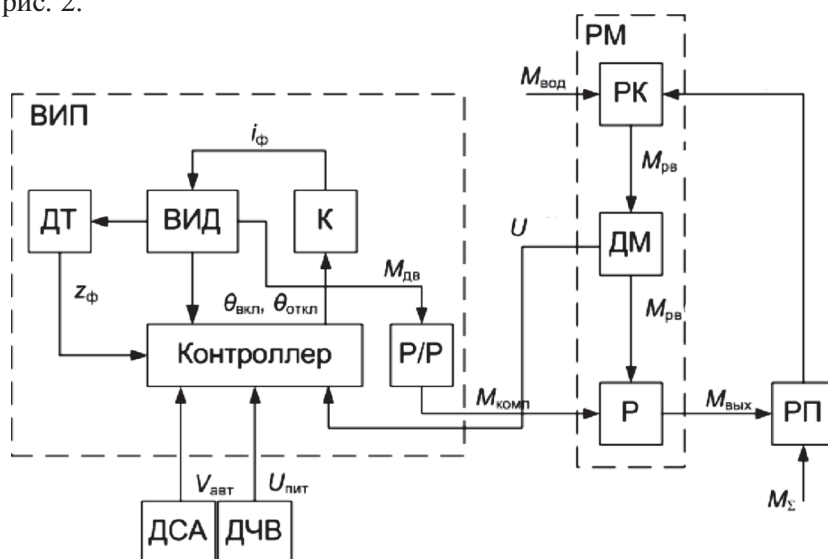


Рис. 2. Структурная схема системы электромеханического усилителя рулевого управления автомобилем:

ВИП – вентильно-индукторный привод; ДТ – датчик тока; ВИД – трехфазный вентильно-индукторный двигатель; К – коммутатор; Р/Р – редуктор-расцепитель; ДСА – датчик скорости автомобиля; ДЧВ – датчик частоты вращения; РМ – рулевой механизм; РК – рулевое колесо; ДМ – датчик момента; Р – редуктор; РП – рулевой привод; α – угол поворота рулевого колеса; i_ϕ – сила тока в фазной обмотке ВИД; z_ϕ – параметр, характеризующий текущее состояние фазы ВИП; $\theta_{вкл}$ и $\theta_{откл}$ – угловые координаты ротора в момент включения и отключения ВИД; $M_{дв}$ – момент, создаваемый ВИД; $M_{комп}$ – момент компенсации; $V_{авт}$ – скорость автомобиля; $U_{пит}$ – напряжение питания; $M_{вод}$ – момент, прикладываемый водителем к рулевому колесу; $M_{кол}$ – момент колеса, передаваемый от рулевого привода РП; $M_{рв}$ – момент рулевого вала; U – напряжение, определяемое датчиком момента; $M_{вых}$ – момент, создаваемый на рулевом приводе; M_Σ – суммарный момент на цапфах управляемых колес

колеса, передаваемым от рулевого привода РП, направляется через рулевой вал в виде момента рулевого вала $M_{рв}$ и датчик момента ДМ на редуктор Р, где, складываясь с моментом компенсации $M_{комп}$, развиваемым электроприводом ВИП, поступает через детали рулевого привода РП на управляемые колеса автомобиля.

Датчик скорости ДСА позволяет уменьшать воздействие момента компенсации $M_{комп}$ с увеличением скорости автомобиля $V_{авт}$, что соответствует требованиям безопасности.

Датчик тока ДТ сигнализирует о превышении допустимого значения силы тока i_{ϕ} в фазной обмотке ВИД.

Датчик частоты вращения ДЧВ двигателя автомобиля определяет работу всей системы ЭМУР. В случае, когда двигатель запущен, система производит инициализацию и начинает работать.

Целью работы ВИД является создание компенсирующего крутящего момента на рулевом вале, предназначенного для снижения усилия на рулевом колесе автомобиля при низких скоростях движения.

Закон управления ВИД можно представить в виде

$$U_c = F(N; V_{авт}; M_{рв}; z_{\phi})^T, \quad (1)$$

где U_c – напряжение фазы ВИД; $F(N; V_{авт}; M_{рв}; z_{\phi})^T$ – вектор входных сигналов контроллера; T – символ транспонирования; N – скорость вращения коленчатого вала двигателя с ДЧВ; z_{ϕ} – параметр, характеризующий текущее состояние фазы ВИД (для полумостового коммутатора напряжения определяется состоянием полупроводниковых вентилях).

При реализации управления ЭМУР в системе должен быть обеспечен вращающий момент на рулевом валу $M_{рв}$, не превышающий 1,5 Н·м. Для обеспечения указанного момента следует рассчитать силу электромеханического усилителя P_y , необходимую для поворота управляемых колес стоящего на горизонтальной поверхности автомобиля. Сила P_y находится как [1]

$$P_y = \frac{M_{\Sigma}}{l_y i_{ук}}, \quad (2)$$

где l_y – плечо силы усилителя P_y , зависящее от диаметра выходной шестерни усилителя; $i_{ук}$ – передаточное число между усилителем и управляемыми колесами, равное отношению угла поворота вала усилителя к углу поворота колес; M_{Σ} – суммарный момент на цапфах

управления колес, определяется суммарный момент по формуле

$$M_{\Sigma} = M_f + M_{\phi} + M_{\beta} + M_{\gamma}, \quad (3)$$

где M_f – момент сопротивления перекачиванию управляемых колес при их повороте вокруг шкворней; M_{ϕ} – момент сопротивления деформации шин и трения в контакте с опорной поверхностью вследствие проскальзывания шины; M_{β} и M_{γ} – моменты, обусловленные поперечным и продольным наклонами шкворней.

Достаточно близкое значение M_{Σ} по сравнению с полученным из выражения (3) дает формула [1]

$$M_{\Sigma} = \frac{10^{-3} \mu}{3} \sqrt{\frac{R_{zF}^3}{p_{ш}}}, \quad (4)$$

где μ – коэффициент трения шины о дорогу; R_{zF} – осевая нагрузка, передаваемая управляемыми колесами в виде силы взаимодействия оси с поверхностью дорожного полотна; $p_{ш}$ – давление в шине, определяемое манометром.

Алгоритм работы контроллера ЭМУР (рис. 3) включает в себя следующие режимы:

- инициализация – проверка работоспособности изделий всей системы электромеханического усилителя при включении и в процессе работы;
- ожидание – состояние системы при положительном результате режима «инициализация» и отсутствии момента на руле;
- компенсация – работа системы при появлении на рулевом валу момента, прикладываемого водителем; электромеханический усилитель руля компенсирует часть момента сопротивления повороту колес;
- стабилизация – состояние системы, соответствующее режиму «ожидание» при отсутствии момента, прикладываемого водителем, когда управляемые колеса автомобиля не находятся в центральном положении;
- ошибка – возникает в случае обнаружения неисправности изделий электромеханического усилителя руля при самотестировании, сопровождается механическим расцеплением системы от рулевого вала.

Среди различных режимов работы контроллера, приведенных в алгоритме на рис. 3, наибольший интерес представляет компенсация, поскольку именно этот режим является основным рабочим состоянием ЭМУР [2]. Контроллер переходит в этот режим при значении вращающего момента на рулевом валу больше

1,5 Н·м. Контроллер обеспечивает следящее силовое воздействие компенсирующего момента пропорционально моменту на рулевой колонке, возрастающему в зависимости от увеличения скорости движения автомобиля. При скорости автомобиля больше 110 км/ч контроллер подает сигнал на отключение всей системы от рулевого вала. Подключение системы к рулевому валу происходит при снижении скорости до 90 км/ч.

Моделирование работы ЭМУР

Очень часто при разработке различных устройств возникает необходимость экспериментальной проверки их работоспособности во взаимосвязи с внешними системами. Так, например, при разработке системы активной безопасности, отвечающей за контроль «слепой зоны» боковых зеркал автомобиля [3], требуется управлять уже существующей внешней системой – ЭМУР. В связи с этим необходимо провести экспериментальную проверку двух систем – разрабатываемой во взаимодействии с существующей. Исследования на реальном образце в данном случае могут быть весьма опасными и дорогостоящими, поэтому удобно поставить эксперимент сначала на модели и только затем на реальном образце.

Рассмотренная система ЭМУР является типовой практически для всех легковых автомобилей. Следовательно, для моделирования работы ЭМУР подходят любые автомобили, и в данном случае были выбраны автомобили семейства ВАЗ-1118 «Калина» и ВАЗ-2170. На основе экспериментальных характеристик рассмотренных семейств в среде MatLab [4] была построена математическая модель, представленная в виде функциональных блоков на рис. 4.

В состав математической модели входят (см. рис. 4):

- подмодель RK (рулевое колесо);
- подмодель VID (вентильно-индукторный двигатель);
- подмодель Controller (контроллер);
- подмодель P (редуктор-расцепитель);
- подмодель RP (рулевой привод);
- подмодель DM (датчик момента);
- Q – угол поворота руля (α);
- M_{rv} – момент на рулевом валу (M_{rv});
- U – напряжение, фиксируемое датчиком момента (U);

- V_{avt} – скорость движения автомобиля (V_{avt});
- $M_{kompens}$ – момент компенсации ($M_{kompens}$);
- M_{sum} – суммарный момент (M_{sum});
- $To workspace(i)$ – блок записи данных, где i – порядковый номер;
- Score – осциллограф.

На модели входными воздействиями системы являются угол поворота рулевого колеса α и скорость движения автомобиля V_{avt} .

Суммарный момент всех трех фаз ВИД $M_{\Sigma d}$,

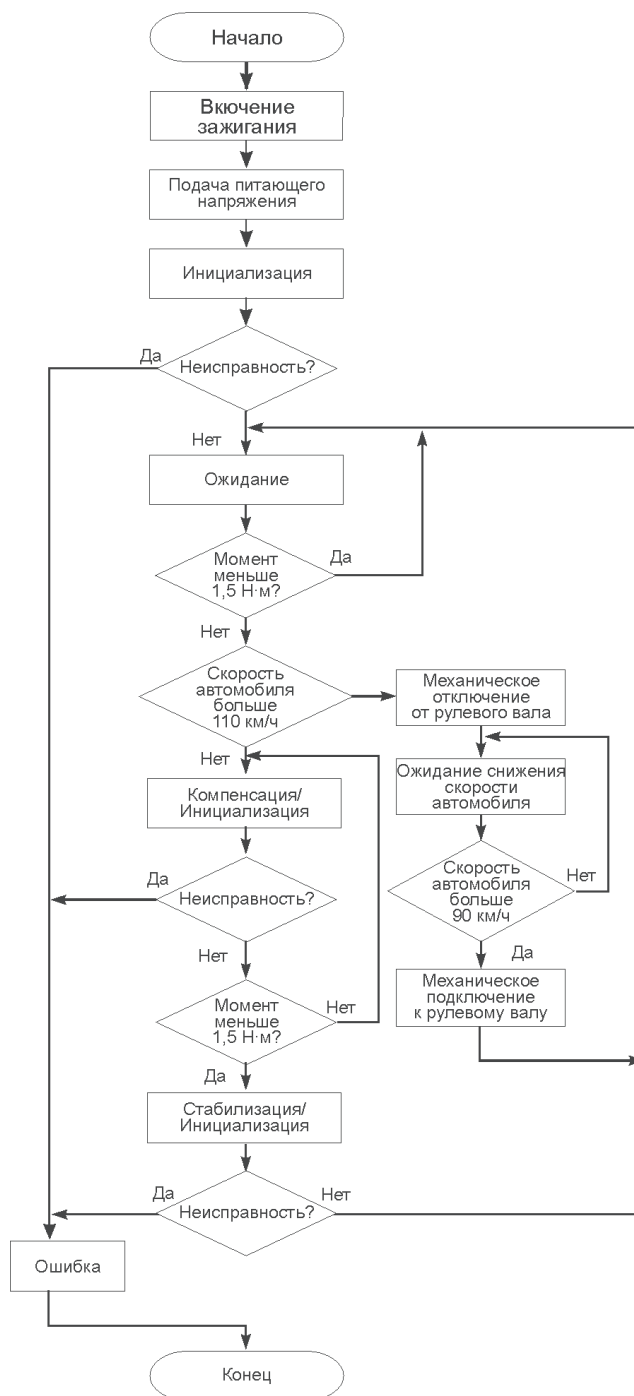


Рис. 3. Алгоритм работы контроллера

подмодель которого представлена на рис. 4, б, описывается уравнением [5]

$$M_{\Sigma d}(\theta)_n = \sum_{i=1}^3 M_{\text{фд}}(\theta)_{ni}, \quad (5)$$

$$\theta_{ni} = \theta_{n1} + \frac{2\pi}{3N}(i-1), \quad (6)$$

где i – число фаз двигателя ($i=1...3$); $M_{\text{фд}}$ – момент, создаваемый одной фазой двигателя; θ_{ni} – угол поворота, соответствующий

работающей в данный момент фазе; θ_n – угол поворота, соответствующий повороту ВИД; θ_{n1} – угол, соответствующий первой фазе; N – число зубцов ротора; n – шаг интегрирования, соответствующий точности вычислений.

Подмодель контроллера, представленная на рис. 4, в, описывает его работу в режиме компенсации, который обеспечивает компенсирующий момент и является основным режимом работы ЭМУР.

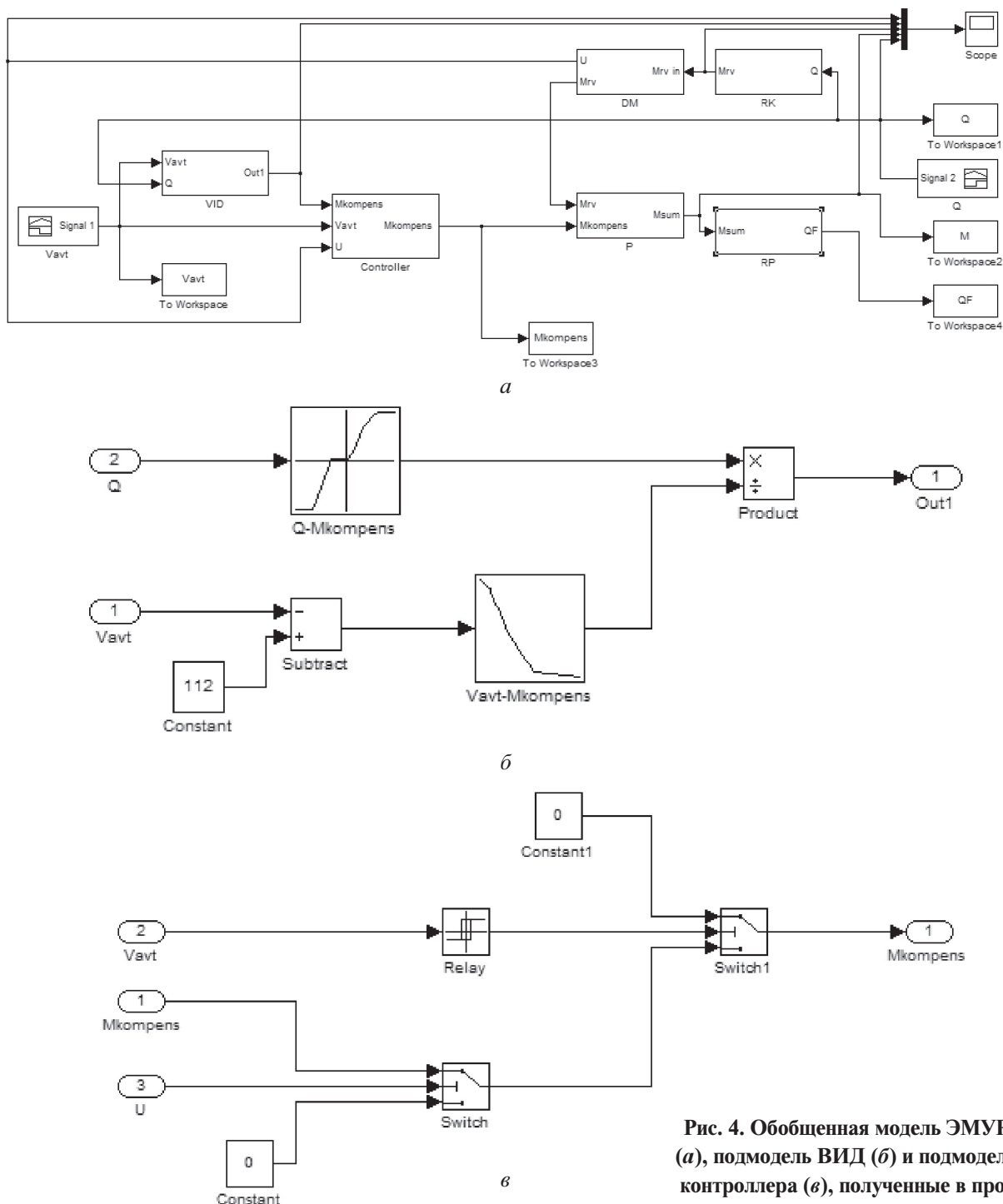


Рис. 4. Обобщенная модель ЭМУР (а), подмодель ВИД (б) и подмодель контроллера (в), полученные в программе MatLab

На рисунке 5 приведены подмодели редуктора/расцепителя, рулевого вала, рулевого привода и датчика момента.

Математическая модель датчика момента торсионного типа описывается следующим уравнением:

$$T \frac{dU}{dt} + U = K\alpha_c, \quad (7)$$

где T – постоянная времени; t – время; U – напряжение на выходе датчика; α_c – угол скручивания торсионного вала; K – коэффициент, определяющий характер зависимости напряжения на выходе датчика от угла скручивания.

На основе анализа ряда реальных характеристик [5] были сформированы модельные характеристики ЭМУР, включая зависимость момента на рулевом валу от угла поворота этого вала (рис. 6), характеристику датчика момента в виде зависимости выходного напряжения

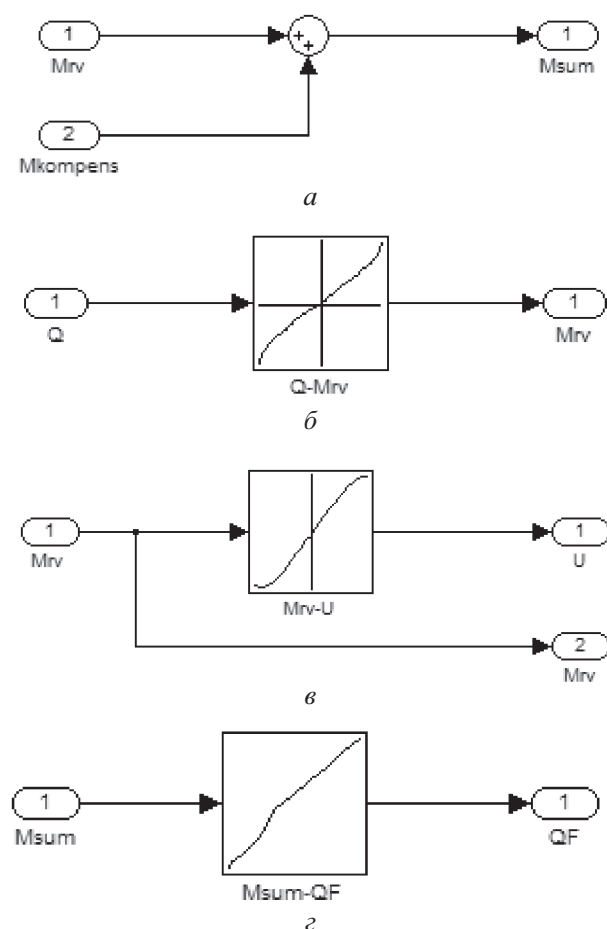


Рис. 5. Статические характеристики редуктора/расцепителя (а), рулевого вала (б), датчика момента (в) и рулевого привода (г)

этого датчика от момента на рулевом валу (рис. 7), зависимость момента компенсации от угла поворота рулевого вала (рис. 8) и зависимость момента компенсации от скорости автомобиля (рис. 9).

На основании приведенных на рис. 6–9 характеристик в среде MatLab было проведено моделирование зависимостей с целью формирования трехмерных пространственных представлений зависимостей суммарного момента (рис. 10) и момента компенсации (рис. 11) от угла поворота рулевого вала и скорости движения автомобиля:

$$M_{\Sigma} = F_{M_{\Sigma}}(\alpha, V_{авт}); \quad (8)$$

$$M_{комп} = F_{M_{комп}}(\alpha, V_{авт}) \quad (9)$$

для областей определения $R_{V_{авт}} \in (V_{авт\ min}; V_{авт\ max})$, где $V_{авт\ min} = 0$ км/ч, а $V_{авт\ max} = 120$ км/ч,

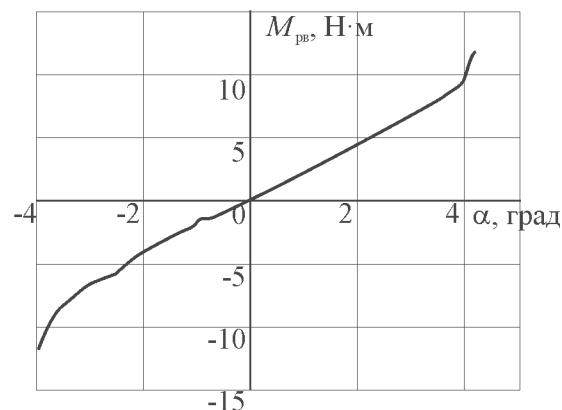


Рис. 6. Зависимость момента на рулевом валу M_{rv} от угла поворота α ведущего вала

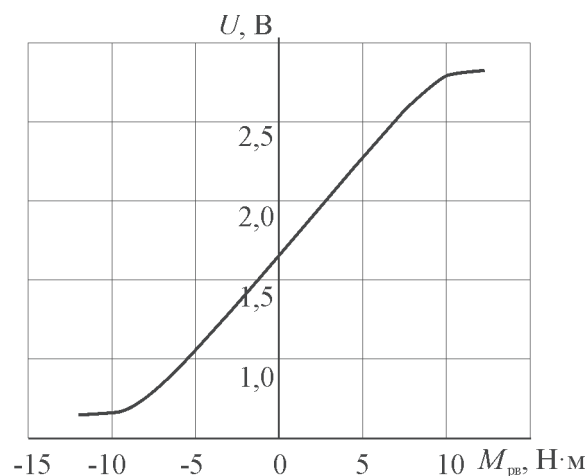


Рис. 7. Зависимость выходного напряжения датчика момента U от момента на рулевом валу M_{rv}

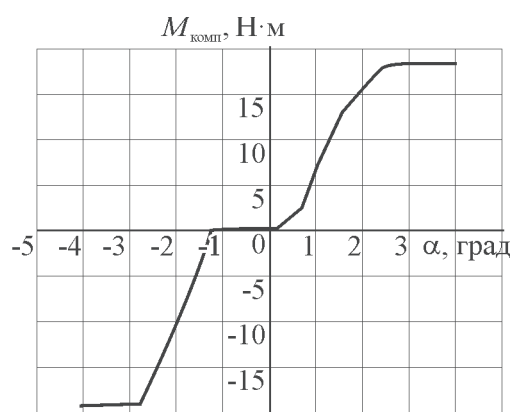


Рис. 8. Зависимость момента компенсации $M_{\text{комп}}$ от угла поворота α ведущего вала

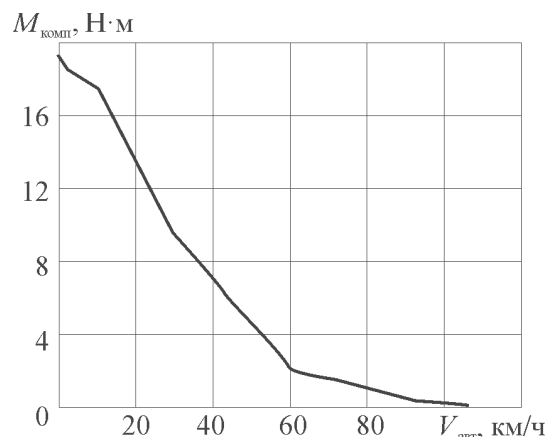


Рис. 9. Зависимость момента компенсации $M_{\text{комп}}$ от скорости автомобиля $V_{\text{авт}}$

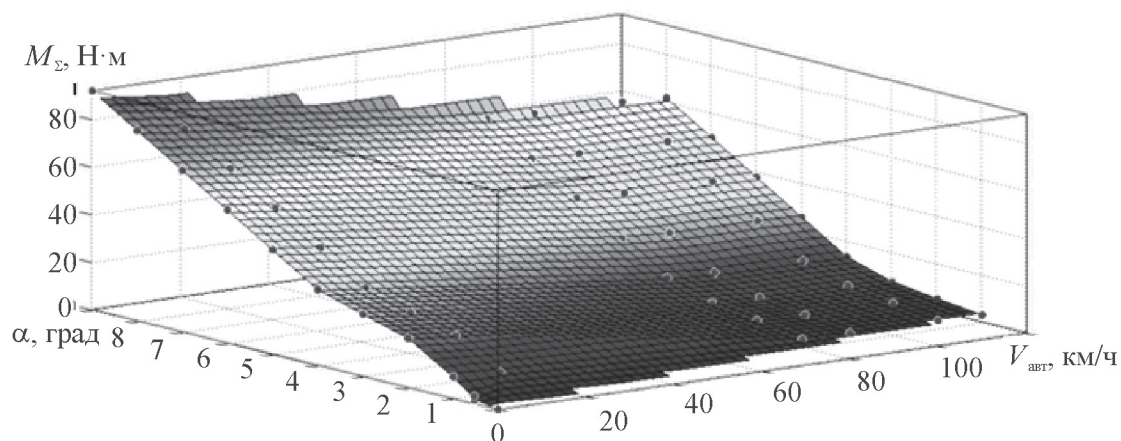


Рис. 10. Зависимость суммарного момента M_{Σ} от скорости движения автомобиля $V_{\text{авт}}$ и угла поворота α рулевого вала

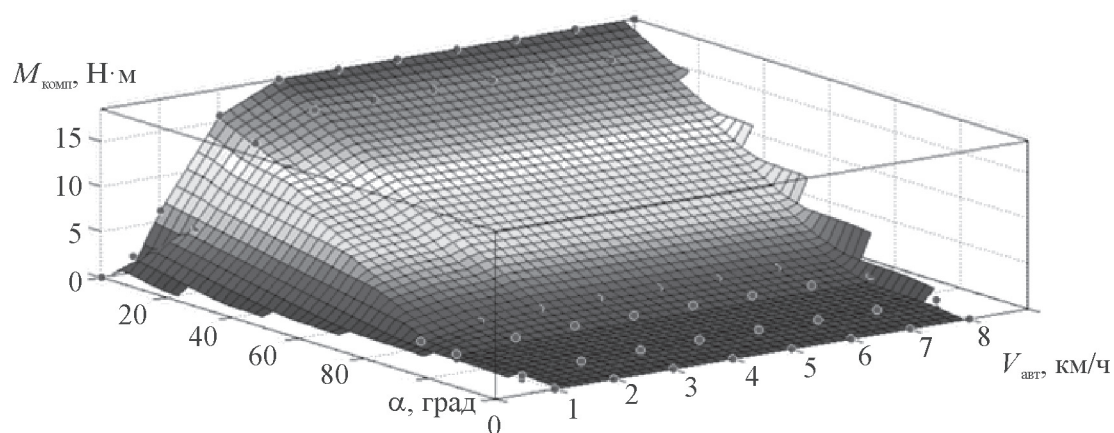


Рис. 11. Зависимость момента компенсации $M_{\text{комп}}$ от скорости движения автомобиля $V_{\text{авт}}$ и угла поворота α рулевого вала

и $R_\alpha \in (\alpha_{\min}; \alpha_{\max})$, где $\alpha_{\min} = 0^\circ$, а $\alpha_{\max} = 8^\circ$. ($R_{V_{\text{авт}}}$ – область определения скорости автомобиля; R_α – область определения угла поворота рулевого вала.)

Полученные трехмерные пространственные представления зависимостей наглядно показывают тенденции изменения моментов. Однако для удобства анализа момента компенсации $M_{\text{комп}}$ и его сопоставления с фактическими характеристиками была выполнена дискретизация поверхности, представленной на рис. 11, по координате $V_{\text{авт}} \in R_{V_{\text{авт}}}$. Изменяя шаг дискретизации по оси $V_{\text{авт}}$, можно получить любое требуемое количество сечений поверхности $M_{\text{комп}}$, используя следующую формулу:

$$M_{\text{комп}} = f_{M_{\text{комп}}}(\alpha; V_{\text{авт},j}), \quad j = \overline{1, k}. \quad (10)$$

При условии $k=7$, что достаточно представительно охватывает диапазон типовых скоростей [6], в среде MatLab были получены соответственно семь модельных характеристик, которые показаны на рис. 12. Из этого рисунка видно, что модельные зависимости стремятся к нулю при увеличении скорости движения автомобиля. Это соответствует работе реального ЭМУР, в котором момент компенсации уменьшается по мере роста скорости, а при превышении 110 км/ч редуктор-расцепитель отключает ЭМУР от рулевой колонки, и момент компенсации становится равным нулю.

Полученные модельные характеристики момента компенсации с дисперсией 0,016 Н·м² для ряда случайных выборок идентичны реаль-

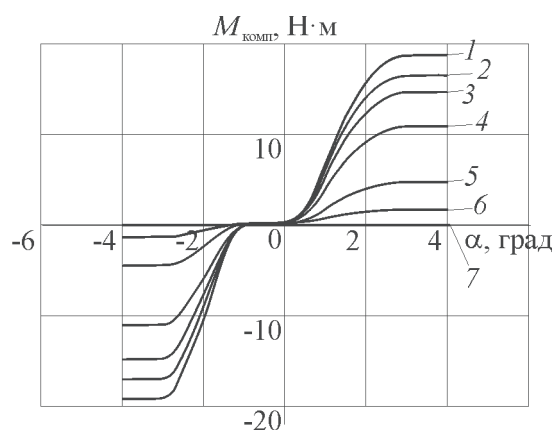


Рис. 12. Модельная зависимость момента компенсации $M_{\text{комп}}$ от угла поворота α ведущего вала при различных скоростях движения автомобиля $V_{\text{авт}}$: 1 – 0 км/ч; 2 – 10 км/ч; 3 – 20 км/ч; 4 – 40 км/ч; 5 – 60 км/ч; 6 – 90 км/ч; 7 – 110 км/ч

ным характеристикам момента компенсации ЭМУР. Это позволяет сделать вывод об аналогичности построенной математической модели и реального объекта.

Работа модели ЭМУР показана на рис. 13, где представлены суммарный момент, момент компенсации, момент на ведомом валу, уровень напряжения с датчика момента, угол поворота ведущего вала. Из рисунка видно, что суммарный момент является суммой момента компенсации и момента, прикладываемого к рулевому валу. Из этого следует, что работа модели адекватна работе реальной системы ЭМУР.

Заключение

Полученные результаты моделирования работы усилительной электромеханической системы рулевого управления свидетельствуют о возможности ее применения при проведении дальнейших исследований оценки усилий в рулевых механизмах и проектировании автомобилей.

Использование данной модели позволяет значительно упростить анализ поведения автомобиля с усилительной электромеханической системой рулевого управления при установке активной системы контроля «слепой» зоны автомобиля [7].

В результате комплексных исследований на модели в системе MatLab создается эффективная база для проведения экспериментов на реальном автомобиле в реальных условиях.

Список литературы

1. Лата В.Н. Моделирование управляемого движения автомобиля : учеб. пособие. – Тольятти, 2004. – 42 с.

M_Σ , Н·м; $M_{\text{комп}}$, Н·м; $M_{\text{рв}}$, Н·м; α , град; U , В

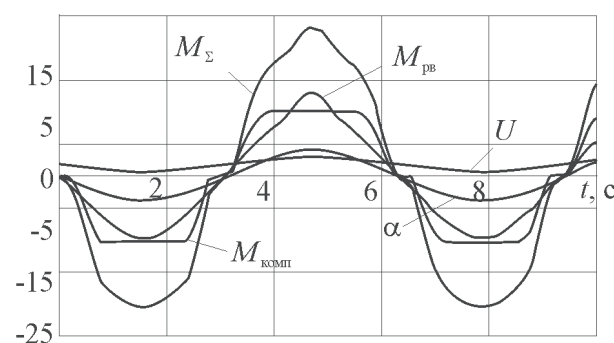


Рис. 13. Рабочие характеристики модели ЭМУР

2. Палагута К.А., Крюков А.И., Шубникова И.С. Разработка системы контроля «слепой зоны» боковых зеркал автомобиля // Электроника и электрооборудование транспорта. 2012. № 5–6. С. 21–26.
3. Крюков А.И. Система контроля «слепой зоны» как составляющая активной безопасности автомобиля // Естественные и технические наук. Спутник+. 2013. № 4 (66). С. 180–182.
4. Дьяков В.П. MatLab и Simulink для радиоинженеров. – М.: ДМК Пресс, 2011. – 976 с.
5. Королев В.В. Система электромеханического усилителя рулевого управления: дис. ... канд. техн. наук. Тольятти, 2005. 188 с.
6. О правилах дорожного движения : Постановление Правительства РФ от 23.10.1993 г. № 1090 (ред. от 23.07.2013). – Собр. законодательства. 2013. № 31. – Ст. 4218.
7. Пат. 96822 Российская Федерация, МПК U1 B60R1/02 Система контроля «мертвой зоны» боковых зеркал автомобиля / Крюков А.И., Палагута К.А.; опубл. 20.04.2010.

Материал поступил в редакцию 06.10.13

**КРЮКОВ
Андрей Игоревич**

E-mail: mr.krukov@mail.ru
Тел.: (926) 987-04-01

Заведующий лабораторией, ассистент кафедры «Автоматика, информатика и системы управления» Московского государственного индустриального университета (МГИУ). Сфера научных интересов – микропроцессорные системы управления и их применение в автомобильной электронике. Автор более 10 научных трудов и одного патента.

**ПАЛАГУТА
Константин
Алексеевич**

E-mail: palaguta@msiu.ru
Тел.: (909) 698-16-15

Кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Автоматика, информатика и системы управления» МГИУ. Сфера научных интересов – микропроцессорные системы контроля и управления, в том числе системы искусственного интеллекта; автомобильная электроника, автоматизация усталостных вибрационных испытаний. Автор более 100 научных трудов, 11 патентов и изобретений.

**ШИРОКОВ
Лев Алексеевич**

E-mail: eduarlev@gmail.com
Тел.: (962) 964-36-48

Доктор технических наук, профессор кафедры «Информационные технологии и системы в экономике и управлении» МГИУ, академик Международной академии информатизации, член-корреспондент Российской академии естественных наук, Изобретатель СССР. Сфера научных интересов – оптимальное управление, САПР, информационные технологии. Автор трех монографий, более 150 научных статей.