



Функции надёжности электромеханических усилителей рулевого управления



Илья ДЕНИСОВ
Ilya V. DENISOV

Алексей СМИРНОВ
Alexey A. SMIRNOV



Денисов Илья Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильного транспорта Владимирского государственного университета им. А. Г. и Н. Г. Столетовых, Владимир, Россия. Смирнов Алексей Александрович – магистрант кафедры автомобильного транспорта Владимирского государственного университета им. А. Г. и Н. Г. Столетовых, Владимир, Россия.

Reliability Functions of Electromechanical Power Steering

(текст статьи на англ. яз. – English text of the article – p. 65)

Подавляющее большинство новых автомобилей комплектуются электромеханическими усилителями (ЭМУ) рулевого управления ввиду их явных преимуществ по сравнению с гидравлическими и пневматическими устройствами. Вместе с тем ещё не до конца изучен вопрос о технической эксплуатации узла, сочетание в котором электронных и механических систем не позволяет в полной мере использовать существующие методы и средства контроля работоспособности автомашины, её фактического технического состояния. В связи с этим особо актуальны разработка нормативов управления техническим состоянием на основе диагностической информации, систематизация научных достижений в этой области, проблемы повышения надёжности рулевого ЭМУ в эксплуатации. Результаты проводимого исследования станут подспорьем в создании методики управления безотказностью узла.

Ключевые слова: автомобиль, рулевое управление, электромеханический усилитель, управление техническим состоянием, надёжность, эксплуатация.

В мировой автомобильной промышленности наблюдается растущая тенденция к использованию в конструкции автомобилей электромеханических систем различного назначения. Среди многообразия таких устройств наибольшее распространение получили антиблокировочная система тормозов, электромеханический тормоз, климат-контроль, стартёр-генератор, система регулировки положения зеркал, сидений, стёкол и т.д. [1].

ТИПОЛОГИЯ И ОБЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Итак, приоритет сегодня за электромеханическими усилителями (ЭМУ), основными задачами которых являются [2–4]:

– добавление компенсирующего момента M_k к рулевому валу при приложении к рулевому колесу входного момента $M_{вх}$ (в зависимости от скорости движения соотношение $M_k/M_{вх}$ может достигать 0,5–7);

– обеспечение оптимальных по эргономическим условиям нагрузочных и скоростных характеристик РУ;

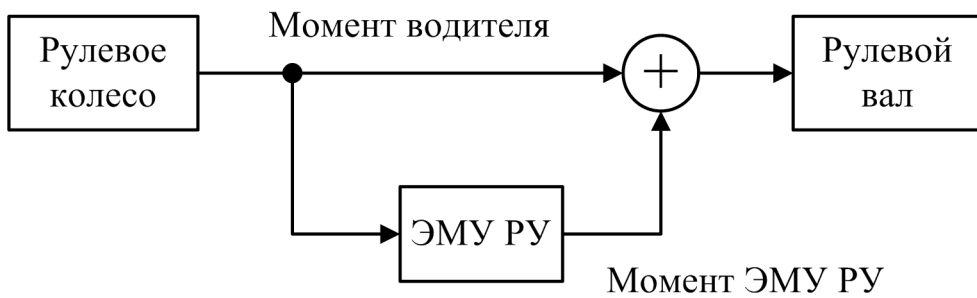


Рис. 1. Схема применения колоночного ЭМУ в конструкции рулевого управления.

- обеспечение прямолинейного движения автомобиля при повреждении шин или подвески;

- сохранение возможности управления автомобилем при отказе усилителя;

- сохранение стабилизации колёс (удержание их в нейтральном положении при воздействии различных возмущающих факторов);

- снижение энергетических затрат водителя и, как следствие, повышение комфортности управления автомобилем;

- уменьшение времени реакции и повышение безопасности дорожного движения.

Современные электромеханические усилители рулевого управления производят в различных компоновках, которые отличаются местом приложения вспомогательного усилия [2, 5]:

- усилие от электрического двигателя прикладывается к рулевому валу — это самый распространённый тип компоновки для автомобилей малого класса (Column Drive EPS);

- усилие от электрического двигателя передаётся на шестерню редуктора рулевого механизма — такая компоновка применяется для автомобилей среднего класса (Pinion Drive EPS);

- усилие от электрического двигателя через шариковую винтовую пару передаётся на рейку рулевого привода — эта компоновка применяется для крупных легковых автомобилей и для лёгких грузовиков (Rack Drive EPS);

- «управление по проводам», или следящая система с двумя согласованными электроприводами на рулевом колесе и рулевой рейке, не имеющими механического соединения (Steer-By-Wire).

При этом необходимо отметить, что наибольшее распространение получили усилители колоночного типа (Column Drive EPS), использование которых в серийном выпуске автомобилей ведётся уже более 10 лет такими мировыми автопроизводителями, как Renault, Citroen, Opel, Fiat, Toyota, Honda [6]. А первым массовым автомобилем, оснащённым электромеханическим усилителем руля, стал Suzuki Cervo в 1988 году [7].

В зависимости от конструкции электромеханического привода усилители колоночного типа можно разделить на редукторные и безредукторные.

В редукторном ЭМУ исполнительный электродвигатель через редуктор, представляющий собой червячную передачу, которая предназначена для преобразования вращательного движения червячного вала во вращательное движение рулевого вала [8], связан с рулевым механизмом. В таких конструкциях нужна значительная частота вращения ротора электродвигателя, но при этом снижаются требования к развиваемому усилию [9].

Безредукторный усилитель представляет собой систему на базе бесконтактного вентильного низкоскоростного высокомоментного электродвигателя прямого действия, имеет более простую конструкцию по сравнению с редукторным ЭМУ и, как следствие, обладает высокой надёжностью в дополнение к улучшенным динамическим качествам. Отсутствие редуктора даёт ряд преимуществ, в такой конструкции нет дополнительного трения в механической части, которое приводит к дополнительному переменному моменту сопротивления, что, в свою очередь, принуждает к реали-





Таблица 1

Технические характеристики ЭМУ руля, выпускаемых ОАО «Автоэлектроника»

Применяемость	Для автомобилей ВАЗ-2170 «Priora» с рулевой рейкой 4.1.	Для автомобилей ВАЗ-1118 «Kalina» и ВАЗ-2190 «Granta» с рулевой рейкой 4.1.	Для автомобилей ВАЗ-2170 «Priora» с рулевой рейкой 4.1.	Для автомобилей ВАЗ-1117 «Kalina» и ВАЗ-2190 «Granta» с рулевой рейкой 3.1.
Серийный номер производителя	121.3405010–05	122.3405010–02 А	121.3405010–04	122.3405010–02
Серийный номер ОАО «АвтоВАЗ»	2172–3450008–02	11186–3450008–02	2172–3450008–02	1117–3450008–02
Номинальное напряжение питания, В	13, 5			
Потребление тока, А	не более 55			
Компенсирующий момент при скорости вращения рулевого колеса 360°/с, Нм	28 ± 1	24,5	28 ± 1	28 ± 1
Габаритные размеры	440 x 203 x 162			
Масса, кг	не более 9,3			

зации более сложного алгоритма управления с компенсациями сухого и вязкого трения в редукторе. Скорость реакции безредукторного усилителя при смене направления вращения рулевого колеса, а также скорость поворота управляемых колёс могут значительно превышать те же показатели на редукторном электромеханическом усилителе. Однако основной проблемой при создании безредукторных ЭМУ руля остаётся использование электродвигателей специального исполнения, развивающих значительное усилие (момент) на низких скоростях вращения [2, 10].

Схематично [11] применение электромеханического усилителя руля колончатого типа в конструкции рулевого управления показано на рис. 1.

Представленная схема подчёркивает роль ЭМУ руля как вспомогательного механизма, не разрывающего связь водителя и дороги и не препятствующего управлению автомобилем в отключенном состоянии.

В отечественной автомобильной промышленности развитие получила концепция построения электромеханической системы рулевого управления типа Column Drive EPS, основным преимуществом которой является минимальное

изменение в конструкции рулевого устройства в целом.

Анализируя хронологию внедрения в производство российских усилителей рулевого управления [12, 13], следует отметить, что первые работы по проектированию и последующему запуску узла в серийный выпуск велись в Новосибирске в 1999 году [14], причём в отличие от зарубежных аналогов была выбрана безредукторная конструкция ЭМУ.

Одним из начальных разработчиков электромеханических усилителей редукторного типа являлось предприятие НПК «Энергия» (г. Воронеж). Однако узел, спроектированный там, существовал лишь на стадии опытных образцов до 2003 года и не был принят в серийное производство.

Созданием безредукторного ЭМУ для автомобилей Lada Kalina и Lada Priora в период с 2005 по 2007 год занималось ОАО «ДААЗ» (г. Димитровград), а затем (2008–2010 гг.) опытные образцы передали ПО «Север» (г. Новосибирск), но и здесь новый узел не был запущен в серийное производство.

Электромеханический усилитель производства ОАО «Авиаагрегат» (г. Махачкала) выпускался серийно с 2004 по 2009 год и устанавливался на автомобили Lada

Kalina. Конструктивное исполнение включало червячный редуктор с передаточным отношением 15, 5:1.

Современные разработки ЭМУ связаны с деятельностью «Концерн КЭМЗ» (г. Кизляр), который рассматривался в качестве альтернативного поставщика электромеханических усилителей для автомобилей Lada Priora. Но спроектированные там опытные образцы опять не пошли в серийное производство.

Сейчас в Калуге на предприятии ОАО «Автоэлектроника» выпускается целый модельный ряд ЭМУ, которые устанавливаются на автомобили Lada Kalina и Lada Priora, а с 2011 года на Lada Granta. В таблице 1 представлены технические характеристики производимых узлов [15].

Добавим, что альтернативным поставщиком ЭМУ ОАО «АвтоВАЗ» с 2008 года является производитель Mando Corporation (Корея). Узлы этого предприятия устанавливаются на автомобили Lada Kalina и Lada Granta. Конструктивное отличие от усилителей ОАО «Автоэлектроника» — червячный редуктор с передаточным отношением 15, 33:1.

ПРИНЦИП РАБОТЫ БЕЗРЕДУКТОРНОГО ЭМУ

Согласно [9, 16], питание безредукторного усилителя на всех режимах осуществляется от бортовой сети автомобиля по силовым проводам. Ток, потребляемый усилителем в режиме «компенсация», когда электродвигатель создаёт дополнительное усилие, может достигать значительной величины — 55 А. Поэтому на большинстве автомобилей работа ЭМУ на действующем двигателе невозможна или ограничена из-за угрозы чрезмерного разряда аккумуляторной батареи.

Работой усилителя управляет контроллер (электронный блок управления — ЭБУ). Поворот ключа в замке зажигания активирует ЭБУ, который, в свою очередь, запускает операции инициализации и поиска ошибок. Обнаружение на данном этапе каких-либо неисправностей влечёт за собой переход усилителя в режим «отказ», и помощь водителю в управлении автомобилем будет отсутствовать. После получения тахометрического сигнала, определяющего устойчивую работу

двигателя автомобиля, контроллер переключает усилитель в основной режим «компенсация».

В режиме «компенсация» при повороте рулевого колеса возникает момент на входном валу, происходит рассогласование между входным и выходным валами. Расположенный между ними упругий элемент — торсион скручивается на угол, пропорциональный величине входного момента. Значение угла определяется датчиком момента и, в свою очередь, передаётся в систему управления электродвигателем ЭМУ. Получая и обрабатывая сигналы, блок управления формирует информацию о величине и направлении прикладываемого водителем усилия (входного момента). При превышении величины момента на входном валу заданного минимального значения ЭБУ электродвигателем вырабатывается силовой управляющий сигнал для создания на рулевом механизме требуемого компенсирующего момента. При этом величина сигнала на обмотке статора электродвигателя формируется с учётом сигналов датчика положения ротора. Кроме того, в контроллер поступают сигналы от датчика скорости и датчика числа оборотов коленчатого вала двигателя.

Зависимость выходного компенсирующего момента от входного обычно задаётся таким образом, чтобы водителю достаточно было прикладывать усилие к рулевому колесу не более определённого комфортного минимума (5–7 Нм) независимо от типа дорожного покрытия.

С увеличением скорости движения автомобиля снижаются сцепные свойства между колёсами и дорожным покрытием, и, следовательно, необходимо уменьшить величину компенсирующего усилия для создания «тяжёлого руля» и обеспечения «чувства дороги». Выполнение этого требования осуществляется за счёт получения ЭБУ информации о скорости движения автомобиля через отдельный вход. С ростом скорости транспортного средства величина компенсирующего момента уменьшается. Зависимость эта не является линейной и в большинстве случаев определяется экспериментально для той или иной марки автомобиля [9].





СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ УСИЛИТЕЛЕЙ

Сделанный нами сравнительный анализ [4–5, 17–19] безредукторного ЭМУ с редукторными и гидравлическими усилителями (ГУР) позволяет выделить ряд достоинств и недостатков рассматриваемого узла.

Основные преимущества безредукторного ЭМУ перед гидравлическим усилителем рулевого управления:

- технологичность, адаптивность и компактность установки (усилитель монтируется на автомобиль одним узлом без вторжения в моторный отсек);
- простота конструкции и обслуживания;
- время установки – не более 1,5 ч;
- высокая надёжность (отсутствуют шланги, ремни, шкивы, сальники, жидкости);
- обеспечение пассивной безопасности при ударе;
- наличие встроенной системы самодиагностики;
- отсутствие трущихся деталей и, как следствие, износа;
- независимость от частоты вращения коленчатого вала двигателя;
- независимость от температурных перепадов;
- экологичность, экономичность и энергосберегаемость (ЭМУ потребляет мощность только при маневрировании, что заметно снижает затраты энергии и приводит к экономии топлива);
- информативность (возможность легко изменять степень помощи водителю при изменении скорости автомобиля);
- простота настройки в эксплуатации.

Недостатки безредукторного электро-механического усилителя рулевого управления по сравнению с ГУР:

- ограниченный диапазон значений компенсирующего момента (не более 28 Нм);
- низкий КПД;
- сложность и необходимость использования специального оборудования при техническом обслуживании;
- неремонтопригодность (в случае отказа меняется единым узлом, тем самым увеличивая стоимость технических воздействий на транспорт);

- возможность перегрева обмоток электродвигателя;
- необходимость усложнения программного обеспечения;
- применение специальных алгоритмов и блока управления ЭМУ;
- использование синхронного двигателя принуждает к применению в конструкции датчика положения ротора.

Основные преимущества безредукторного перед редукторным вариантом ЭМУ:

- надёжность (обеспечение прямой передачи момента, приложенного к РК, на вал рулевого механизма, в отличие от редукторного варианта, где присутствует зубчатая передача);
- быстрое действие (обеспечение высокой степени реакции со стороны управляемых колёс на изменение положения рулевого колеса);
- очень низкий уровень шума;
- отсутствие редуктора снимает необходимость компенсации сухого и вязкого трения, самовозврата в алгоритме управления ЭМУ, а также повышает безопасность системы рулевого управления, на рулевой колонке не возникает дополнительного момента сопротивления;
- компактные размеры.

Недостатки ЭМУ безредукторного типа по сравнению с редукторным:

- невозможность получения больших значений компенсирующего момента без значительных увеличений габаритных размеров узла;
- низкий КПД;
- наличие дополнительных датчиков (датчика положения ротора);
- большой нагрев электродвигателя.

Авторы работы [20], выполнившие сравнительный анализ влияния усилителей рулевого управления на потребительские характеристики автомобиля ВАЗ-2170 методом экспертного опроса, отмечают, что безредукторный усилитель превосходит гидравлический по большинству параметров, уступая ему лишь по вибрации на рулевом колесе и чувствительности на малых углах поворота. По суммарной экспертной оценке система усилителя с электро-механическим приводом опережает гидравлический привод на 13 %.

Таким образом, можно сделать вывод, что из представленных конструкций на-

и более эффективным является электро-механический усилитель безредукторного типа.

ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ЭМУ АВТОМОБИЛЕЙ КАТЕГОРИИ М1

Установлено [21], что основные требования, которым должна отвечать система рулевого управления, касаются:

- долговечности и безотказности узлов и агрегатов в течение всего срока эксплуатации автомобиля;

- правильности и точности поворота колёс;

- лёгкости управления и удобства в эксплуатации;

- способности рулевого колеса возвращаться в исходное положение и сохранять заданное направление движения автомобиля;

- минимальной передачи обратных ударов на рулевом колесе.

Поскольку электро-механический усилитель является одним из элементов рулевого управления, техническое состояние которого оказывает непосредственное влияние на безопасность дорожного движения, то его безотказное функционирование напрямую влияет не только на траекторную устойчивость и управляемость АТС, но и на надёжность всей системы, а также риск возникновения ДТП. Поэтому к ЭМУ предъявляются жёсткие требования по безопасности, комфортности и надёжности функционирования [1].

Анализ технических условий, сформулированных автомобильными заводами «ВАЗ», «ГАЗ», «УАЗ» для ЭМУ руля легковых автомобилей [22], и результатов исследований [23] позволяет обобщить требования, предъявляемые к усилителю, и определить круг задач, которые он должен решать:

- обеспечивать снижение управляющего усилия, прилагаемого водителем к рулевому колесу, до 5–7 Нм при частоте вращения рулевого колеса до 1 с^{-1} ;

- обеспечивать компенсирующий момент в пределах 0–28 Нм (при радиусе рулевого колеса $\approx 200 \text{ мм}$) для автомобиля, стоящего на ровной горизонтальной асфальтированной поверхности дороги с полной допустимой нагрузкой, при



- скорости вращения рулевого колеса от 0 до 360 градусов в секунду;

- обеспечивать плавное, без провалов, изменение усилия на руле в зависимости от его угла поворота;

- обеспечивать плавное изменение момента, прикладываемого водителем к рулю, в зависимости от скорости движения автомобиля;

- сохранить минимально возможный уровень колебаний на управляемых колёсах, связанных с переходными процессами в ЭМУ;

- при движении автомобиля, находящегося под действием динамической пассивной стабилизации, обеспечивать активный плавный возврат управляемых колёс и руля в центральное (соответствующее прямолинейному движению) положение при снятии управляющего воздействия;

- не допускать активного возврата рулевого колеса в центральное положение в стоящем на месте автомобиле;

- осуществлять активное демпфирование поступающих на его ведомый вал ударов и пульсаций, вызванных взаимодействием автомобильных колёс с неровностями дороги;

- обеспечивать «информированность» водителя в процессе управления автомобилем на высоких скоростях.

Однако, как отмечается в [24], система управления отдельных моделей ЭМУ редукторной компоновки выполнена без обратной связи, т.е. момент на выходном валу не измеряется и не контролируется. Этот недостаток является существенным и может послужить причиной возникно-



вения определённых проблем, в том числе:

- появлению статических ошибок;
- возникновению низкочастотных пульсаций момента, обусловленных особенностями электрического двигателя;
- потере «чувства дороги» у водителя из-за наличия сил трения редукторного механизма.

(Окончание в следующем номере).

ЛИТЕРАТУРА

1. Волокитин В. Н. Алгоритмизация управления электроприводом постоянного тока в системе «электромеханический усилитель руля – человек» / Автореф. дис... канд. техн. наук. – Воронеж, 2004. – 20 с.
2. Боченков Б. М., Тюрин М. В. Пути повышения динамической точности управления электромеханическим усилителем рулевого управления // Сборник научных трудов НГТУ. – 2006. – № 3. – С. 3–10.
3. Николаев П. А., Куклина А. В. Испытания электромеханического усилителя рулевого управления автомобиля к электромагнитному воздействию // Технологии электромагнитной совместимости. – 2015. – № 2. – С. 38–41.
4. Электромеханический усилитель рулевого управления [Электронный ресурс]: http://www.ae.ru/production/wide/48/jelektromehanicheskij_usilitel_rulevogo_upravlenija_jemuru.html. Доступ 18.04.2017.
5. Арефьев В. А. Математическая модель электроусилителя руля // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2005. – № 32. – С. 123–129.
6. Тюрин М. В. Повышение эффективности безредукторного электромеханического усилителя рулевого управления автомобиля / Дис... канд. техн. наук. – Новосибирск, 2009. – 167 с.
7. Шалаев Д. В. Алгоритм работы электроусилителя руля // Актуальные проблемы развития науки и образования: сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции. Часть I. – М.: АР-Консалт, 2014. – С. 101–103.
8. Кутепов П. А., Малеев Р. А., Коротков В. И. Тенденции и перспективы развития усилителя руля // Известия Московского государственного технического университета (МАМИ). – 2013. – № 2. – С. 97–101.
9. Байда А. С. Конструктивные особенности усилителей рулевого управления // Ориентированные фундаментальные и прикладные исследования – основа модернизации и инновационного развития архитектурно-строительного и дорожно-транспортного комплексов России: материалы Всероссийской научно-технической конференции. – Омск: СибАДИ, 2011. – Кн. 2. – С. 3–7.
10. Нестерин В. А., Спиридонов А. А. К вопросу выбора оптимальной толщины магнитов в безредукторном электромеханическом усилителе рулевого управления // Вестник Чувашского университета. – 2015. – № 3. – С. 81–85.
11. Никулин Г. Л., Французова Г. А. Расчёт ПД-регулятора для безредукторного электроусилителя рулевого управления автомобиля // Сборник научных трудов НГТУ. – 2007. – № 1. – С. 17–24.
12. Хидиров Р. В. Электроусилители руля автомобилей ВАЗ // Современное состояние и перспективы развития технических наук: Сборник статей Международной научно-практической конференции. – Уфа: Аэтерна, 2014. – С. 57–59.
13. Шалаев Д. В. Обзор УЭРУ, используемых на автомобилях производства ОАО «АвтоВАЗ» // Актуальные проблемы развития науки и образования: Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции. Часть I. – М.: АР-Консалт, 2014. – С. 103–105.
14. Печников А., Трубин В. Электромеханический безредукторный усилитель руля: принципы работы и применяемые электронные компоненты // Вестник Электронники. – 2011. – № 1. – С. 4–8.
15. ОАО «Автоэлектроника». Каталог продукции. [Электронный ресурс]: <http://www.ae.ru/production/11/produkcija.html>. Доступ 18.04.2016.
16. Черных Е. А. Калужский завод электронных изделий // Инновации в России и не только: еженедельный бюллетень об инновационной деятельности // Неделя. – 2011. – 7–13 ноября.
17. Арсенюк С. А. Электротидроусилитель и электроусилитель рулевого управления // Актуальные вопросы технических наук в современных условиях: сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции. – СПб., 2016. – № 3. – С. 33–37.
18. Емельянов В. В., Васильев В. И. Устройство для ускоренных испытаний на надёжность электромеханического усилителя рулевого управления автомобиля // Вестник Курганского государственного университета. Серия «Технические науки». – 2014. – № 2. – С. 75–76.
19. Козловский В. Н., Малеев Р. А. Анализ надёжности автомобильного электромеханического усилителя рулевого управления // Грузовик. – 2008. – № 12. – С. 37–38.
20. Ермаков В. В., Шлыков С. В., Воронцов А. В. Сравнительный анализ систем усилителя рулевого управления с различными типами приводов // Вектор науки ТГУ. – 2011. – № 1. – С. 53–56.
21. Насибуллин Р. Т., Сергеев В. А., Сунгатов И. З. Модель системы электромеханического усилителя рулевого управления // Новые задачи технических наук и пути их решения: сборник статей Международной научно-практической конференции. – Уфа: Аэтерна, 2015. – С. 67–69.
22. Доманов А. В., Доманов В. И., Сергеев А. В. Влияние случайных сигналов на работу электроусилителя рулевого управления // Электроснабжение и электрооборудование. – 2013. – № 4. – С. 22–25.
23. Монченко М. И. Микропроцессорная система управления рулевым механизмом автомобиля // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 1. – С. 155–163.
24. Жарков И. А. Электромеханический усилитель рулевого управления автомобиля с регулированием момента в замкнутом контуре / Дис... магистр. – Новосибирск, 2016. – 92 с. ●

Координаты авторов: **Денисов И. В.** – denisoviv@mail.ru, **Смирнов А. А.** – AlexiFoX@yandex.ru.

Статья поступила в редакцию 13.01.2017, актуализирована 18.04.2017, принята к публикации 21.04.2017.