



Электромеханический безредукторный усилитель руля: принципы работы и применяемые электронные компоненты

Андрей Печников, Виталий Трубин, ООО «КБ Автоматики», г. Новосибирск

В статье приведено описание структурной схемы и основных принципов работы электромеханического усилителя руля производства ОАО «Автоэлектроника» (г. Калуга). Кроме того, рассмотрены основные электронные компоненты, применяемые в блоке управления усилителя.

Любому водителю хорошо известно: для того чтобы повернуть колеса стоящего автомобиля, требуется приложить к рулю достаточно большое усилие, порядка 40 Н·м. Не всякому человеку такое дается легко. Практикой установлено, что для большинства людей комфортное управление автомобилем достигается при рулевом усилии, не превышающем 10 Н·м. Задача формирования оставшихся 30 Н·м возлагается на усилитель руля.

Разработка электромеханического усилителя руля в Новосибирске началась в 1999 г. Причем в отличие от большинства зарубежных аналогов был выбран путь безредукторного ЭМУР на базе разработок Новосибирского государственного технического университета (НГТУ). Это решение связано, прежде всего,

с более высокой технологичностью и простотой изготовления такого усилителя. В 2006 г. стартовало серийное производство данного варианта ЭМУР для автомобилей ВАЗ-2110 на базе ОАО «Автоэлектроника», и с тех пор выпущено уже более 350 000 комплектов этих изделий.

За время, прошедшее после начала серийной эксплуатации, накопилось и получило широкое распространение в Интернете множество мифов и претензий к работе ЭМУР. Некоторые можно признать обоснованными, однако большая их часть базируется

Пора развеять мифы

До сих пор наиболее распространенным типом усилителя руля является гидравлический. Однако сегодня наблюдается процесс массового перехода к электромеханическому усилителю руля (ЭМУР). По данным зарубежных аналитиков, к 2015 г. каждый четвер-



Рис. 1. Электромеханический усилитель руля производства ОАО «Автоэлектроника»

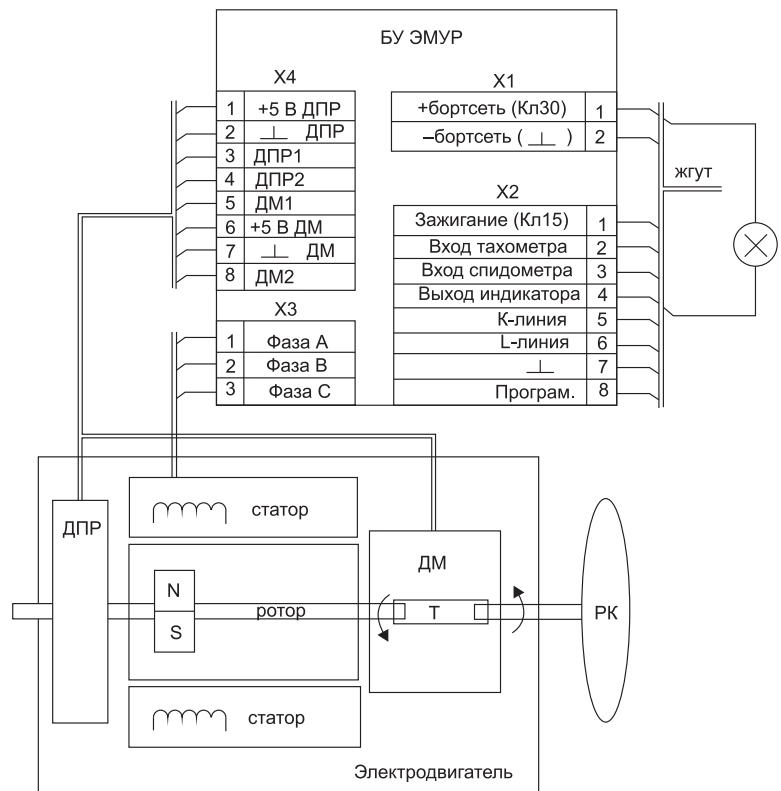


Рис. 2. Структурная схема ЭМУР

на отсутствии доступной информации о принципах действия данного изделия. Чтобы компенсировать данный пробел, в статье рассмотрены различные аспекты работы ЭМУР, способ его построения и примененные электронные компоненты. Отметим, что речь идет исключительно об устройстве производства ОАО «Автоэлектроника», которое является единственным безредукторным усилителем руля, серийно применяемым на автомобилях ОАО «АвтоВАЗ».

Структурная схема ЭМУР

Рассматриваемый электромеханический усилитель руля имеет в своем составе следующие основные составляющие (см. рис. 1 и 2):

- электродвигатель;
- блок управления;
- элементы крепления и регулировки положения усилителя в месте его установки (далее не рассматриваются).

Для создания достаточного вспомогательного усилия, обеспечивающего комфортное управление, в безредукторном электромеханическом усилителе руля применяется специализированный низкооборотистый высокомоментный синхронный электродвигатель с ротором на постоянных магнитах.

Тип и условия применения электродвигателя определяют наличие в его составе датчика положения ротора (ДПР), представляющего собой пару датчиков Холла, установленных так, что поле от постоянных магнитов ротора наводится в них со сдвигом на 90° . При номинальном питающем напряжении ДПР, составляющем 5 В (контакт

X4:1 относительно X4:2), форма выходных сигналов датчика соответствует кривой, представленной на рис. 3. На графике по оси абсцисс отложено угловое смещение рулевого колеса (РК), а по оси ординат — напряжение сигналов ДПР (контакты X4:3 и X4:4). Количество периодов колебания этих сигналов на полный оборот руля равно восьми и соответствует количеству пар полюсов ротора. Фазы сигналов датчика однозначно связаны с положением ротора относительно статорных обмоток и служат входной информацией для системы управления электродвигателем. Дополнительно отметим, что по сигналам ДПР невозможно определить абсолютное положение руля.

Одним из главных элементов ЭМУР является датчик момента (ДМ), который дает возможность блоку управления (БУ) определять величину и направление усилия, прикладываемого водителем к рулю. ДМ состоит из торсиона (Т), установленного в разрез рулевого вала и ротора электродвигателя (совмещенного с выходным валом), и датчика углового смещения валов (в статье рассматривается бесконтактный датчик Valeo). Конструкция валов допускает упругое скручивание торсиона в обе стороны в пределах нескольких градусов. Превышение же этого предела приводит к их жесткому сцеплению.

При номинальном питающем напряжении ДМ, составляющем 5 В (контакт X4:6 относительно X4:7), и отсутствии приложенного к рулю усилия напряжение обоих сигналов ДМ (контакт X4:5 и X4:8) составляет 2,5 В. В случае наличия усилия на руле сигналы изменяют-

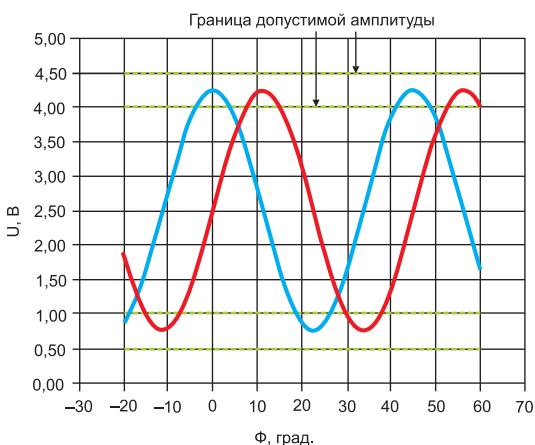
ся дифференциально в соответствии с графиком на рис. 4.

Питание устройства осуществляется от бортсети автомобиля с номинальным значением напряжения 13,5 В (рабочий диапазон 10,8...15,0 В) через силовые провода, подключенные к разъему X1. На разъем X2 заводятся следующие сигналы:

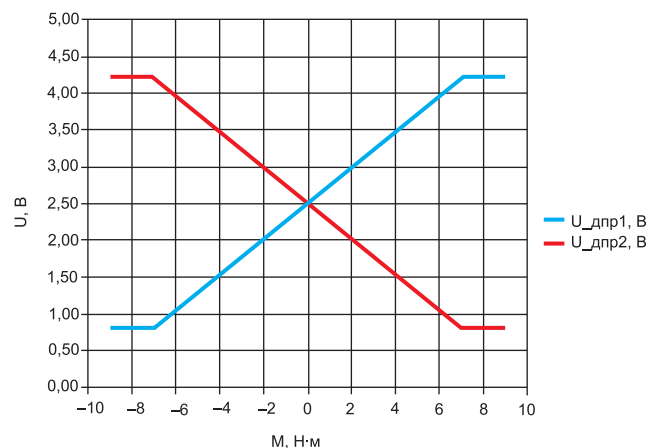
- сигнал зажигания (активный уровень соответствует напряжению бортсети);
- сигнал тахометра (2 импульса на оборот коленвала);
- сигнал спидометра (6 импульсов на метр пройденного пути);
- выход индикатора (открытый сток);
- К-линия — двунаправленная линия связи с диагностическим оборудованием;
- L-линия — линия перевода БУ ЭМУР в режим отображения кодов неисправностей;
- «земля»;
- вход программирования (используется при производстве).

Блок управления

Структурная схема БУ ЭМУР представлена на рис. 5. Центральным элементом, реализующим при поддержке других компонентов измерительные (в том числе оцифровка аналоговых сигналов), алгоритмические и управляющие функции, является микроконтроллер (МК). Его питание, а также питание энергонезависимой памяти (FRAM — Ferroelectric RAM) осуществляется посредством каскадно-включенных линейных источников питания ИП_+5В (выход 5,5 В) и ИП_МК (выход 3,3 В). Питание внешних по отношению к БУ



● Рис. 3. График сигналов датчика положения ротора



● Рис. 4. График сигналов датчика момента

датчиков положения ротора и момента обеспечивают отдельные линейные источники питания — ИП_ДПР и ИП_ДМ соответственно.

Управление электродвигателем осуществляется следующим образом: МК на основании поступающей от датчиков информации формирует на своих выходах необходимые ШИМ-сигналы, драйвер согласует их с входами силового модуля, представляющего собой трехфазный транзисторный мост, к которому и подключается электродвигатель.

Блок управления содержит два дополнительных внутренних датчика — тока потребления (ДТ_PWR) и температуры (ТД). Это позволяет расширить список контролируемых факторов, а также диагностировать, например, такие события, как перегрев БУ и короткое замыкание в силовых цепях.

Вся диагностическая информация, а также конфигурационные параметры содержатся в энергонезависимой памяти FRAM и доступны внешнему тестовому оборудованию через диагностический интерфейс стандарта ISO9141 (ДИ).

Для обеспечения низкого тока утечки по цепи питания в неработающем состоянии и разрыва значительного (до 60 А) рабочего тока в аварийной ситуации используется силовое реле (Кл2). Параллельно реле установлен транзисторный ключ (Кл1), который совместно с токоограничивающим резистором обеспечивает контролируемый заряд электролитических конденсаторов перед включением реле. Другой транзисторный ключ (Кл3) позволяет разомкнуть цепь измерения напряжения борсети и тем самым исключить

разряд аккумулятора по этой цепи в выключенном состоянии ЭМУР.

Источник питания внутренней Flash-памяти МК (ИП_Flash) имеет на выходе напряжение 5 В и делает доступным перепрограммирование микроконтроллера подачей активного уровня по линии программирования (X2:8).

Логическая схема ИЛИ предназначена для реализации механизма самоподдержки питания, который позволяет БУ ЭМУР после выключения зажигания автомобиля сохранить в энергонезависимую память актуальную диагностическую информацию и корректно завершить свою работу.

Рабочие режимы

Электрохимический усилитель руля в процессе своей работы находится в одном из следующих основных режи-

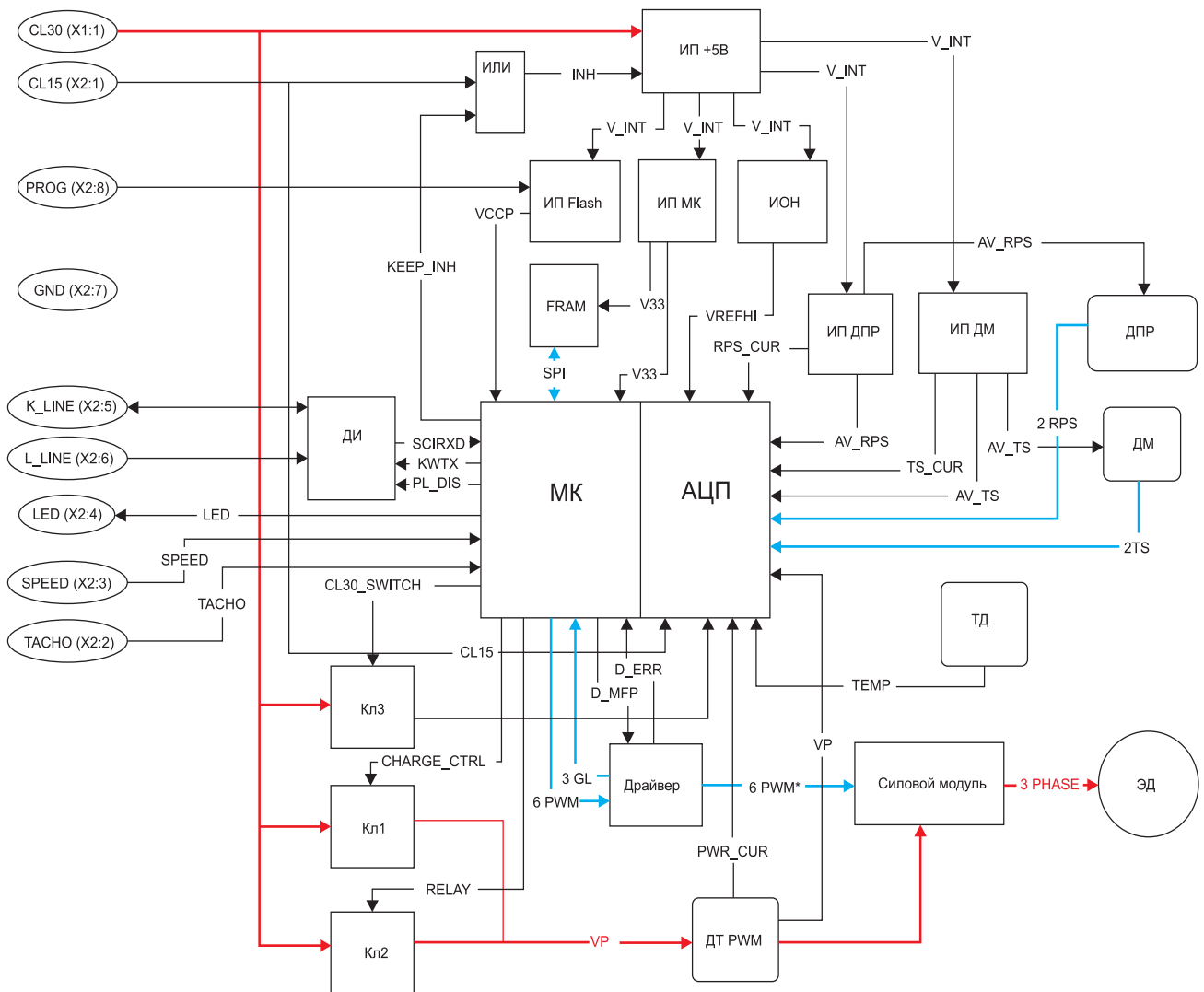


Рис. 5. Структурная схема БУ ЭМУР

мов: «Готовность», «Компенсация» или «Отказ».

В режиме «Компенсация» ЭМУР выполняет свою основную функцию, а именно создает вспомогательный момент, компенсирующий часть усилия, которое требуется прикладывать водителю в процессе управления автомобилем. Ток потребления усилителя при формировании компенсирующего момента может достигать значений десятков ампер. Естественно, что отбор такого тока от аккумуляторной батареи достаточно быстро приведет к ее чрезмерному разряду. Для предотвращения этого пребывание ЭМУР в режиме «Компенсация» возможно только при нормальной работе электрогенератора, которая определяется БУ по наличию допустимого напряжения бортсети (10,8...15,0 В) и превышению частоты вращения коленвала двигателя значения, характеризующего его устойчивый пуск (~650 об./мин.). Кроме того, необходимым условием нахождения ЭМУР в режиме «Компенсация» является отсутствие каких-либо неисправностей. Индикатор состояния в данном режиме выключен.

Выход напряжения бортсети за рабочий диапазон или недостаточная частота вращения коленвала (что предполагает нештатную работу генератора) являются признаками отсутствия нормального питания устройства и, как следствие, невозможности формирования требуемого компенсирующего момента. Данное состояние ЭМУР соответствует режиму «Готовность» и сопровождается непрерывным свечением индикатора.

На протяжении всего времени работы усилителя руля производится контроль множества параметров и диагностика различных подсистем. При фиксации выхода контролируемых параметров за допустимые пределы или обнаружении неисправностей в работе устройства ЭМУР переходит в режим «Отказ». В данном режиме выполняются действия, направленные на исключение влияния ЭМУР на процесс управления автомобилем. Режим «Отказ» сопровождается непрерывным свечением индикатора.

Принцип работы ЭМУР

При включении замка зажигания активный уровень сигнала зажигания

поступает на вход блока управления ЭМУР и активирует его работу. Начальным действием БУ является инициализация всех элементов системы, то есть перевод аппаратных и программных средств в исходное состояние и включение самоподдержки питания. На следующем этапе выполняется начальная диагностика, по завершении которой в случае обнаружения неисправностей устройство переходит в режим «Отказ»; загорается индикатор. При этом силовое реле размыкается и исключает потенциальную возможность ЭМУР создавать активное воздействие на процесс управления автомобилем. Другим основанием, приводящим после запуска автомобиля ЭМУР в режим «Отказ» с частичной компенсацией (компенсирующий момент формируется из расчета скорости автомобиля, составляющей 60 км/ч), является пропадание сигнала спидометра в предыдущем цикле движения и его отсутствие в текущем цикле. Переход ЭМУР из режима «Отказ» с частичной компенсацией в режим «Компенсация» выполняется автоматически после появления сигнала скорости автомобиля. Выход из режима «Отказ», связанный с наличием неисправностей, возможен только после отключения и последующего включения зажигания.

В случае нормального прохождения этапа начальной диагностики ЭМУР переходит в режим «Готовность» и, контролируя напряжение бортсети и частоту вращения коленвала, ожидает завершения пуска ДВС и, тем самым, появления условий для питания устройства от электрогенератора. Далее ЭМУР переходит в основной рабочий режим — «Компенсация», в котором на основании информации о величине и направлении прикладываемого водителем усилия, поступающей от датчика момента, формирует силовой трехфазный сигнал. Он подается в обмотки электродвигателя и создает необходимое вспомогательное усилие. Алгоритм формирования компенсирующего момента является многофакторным и зависит не только от величины момента, прикладываемого водителем к рулю, но и от таких параметров, как скорость автомобиля, угловая скорость вращения руля, зна-

чение питающего напряжения, температура блока управления. Так, зависимость величины вспомогательного усилия от скорости автомобиля введена для компенсации изменения чувствительности рулевого управления, связанного со снижением на больших скоростях сцепления колес с дорогой. Учет других факторов при формировании компенсирующего усилия позволяет расширить условия штатной работы ЭМУР.

Выключение зажигания из-за наличия самоподдержки питания не приводит к отключению ЭМУР в то же время. Наличие самоподдержки питания позволяет контролируемо уменьшить компенсирующий момент до нуля, сохранить в энергонезависимую память, актуальную диагностическую информацию и другие конфигурационные параметры и, наконец, отключиться. Временная задержка выключения ЭМУР позволяет водителю при заглушенном двигателе предсказуемо управлять автомобилем при завершении движения, например съехать на обочину.

Конструкция продиктована безопасностью

С учетом того, что рулевое управление — одна из важнейших систем автомобиля, а усилитель руля является элементом этой системы, к ЭМУР предъявляются жесткие требования по безопасности. В связи с этим необходимо отметить наличие некоторого преимущества безредукторного усилителя руля над редукторным, достигаемого за счет его конструктивных особенностей. Безредукторный усилитель руля не содержит в своем составе механических компонентов, которые могли бы препятствовать управлению автомобилем в случае его отключения. Учитывая то, что безопасность управления должна превалировать над вспомогательной функцией электроусилителя руля, ЭМУР реализует следующий принцип: при детектировании признаков каких-либо неисправностей устройство переходит в режим «Отказ» и исключает возможность формирования мешающего усилия. Тип неисправности, количество возникновений, а также контекст, в котором она появилась, фиксируются в энергонезависи-

мой памяти. Анализ этой информации на станциях техобслуживания позволяет понять, являлась ли неисправность случайной или устойчивой. При наличии повторяющихся неисправностей ЭМУР должен быть отремонтирован или заменен.

Использованные компоненты

Для реализации электромеханического усилителя руля, удовлетворяющего современным требованиям как по техническим, так и по экономическим параметрам, были использованы передовые (на время разработки) электронные компоненты. Ниже приводятся типы компонентов, отмечаются положительные и отрицательные стороны их применения, справедливые на текущий момент времени.

1. Силовой модуль. В качестве силового модуля, формирующего трехфазный сигнал управления электродвигателем, применен интегральный транзисторный мост GWM160-0055X1 компании IXYS. Использование данного компонента позволило уменьшить габариты изделия и упростить разводку печатной платы. Кроме того, конструкция модуля с единым радиатором достаточно большой площади способствовала упрощению организации теплоотвода. Следует отметить, что величина сопротивления открытого канала транзисторов данного силового модуля теперь не является сколько-нибудь впечатляющей (типичное значение составляет 2,7 мОм). Сейчас существует множество дискретных силовых MOSFET-транзисторов различных производителей, обеспечивающих сопротивление открытого канала на уровне 1,0...1,5 мОм. Применение таких транзисторов позволяет заметно снизить статические потери, уменьшить площадь теплоотводящей поверхности и как следствие — габариты изделия.

2. Драйвер силового модуля. Для согласования слаботочных и низковольтных ШИМ-сигналов микроконтроллера с входами силового модуля (затворами MOSFET-транзисторов) применен драйвер TLE6289 компании Infineon. Данное устройство предназначено для управления трехфазным мостом и дополнительно содержит:

- функцию защиты от неверного ШИМ-сигнала, исключающую сквозные токи;
- схему аппаратного задания «мертвого времени» (deadtime) ШИМ-сигналов;
- схемы контроля короткого замыкания, падения напряжения питания ниже допустимого уровня и перегрева.

Недостатком драйвера является ограничение глубины ШИМ-модуляции значением 95%, что не позволяет при формировании вспомогательного момента усилителя руля полностью использовать энергетические возможности источника питания.

3. Микроконтроллер. В качестве краеугольного элемента БУ ЭМУР применен микроконтроллер TMS320LF2406 компании Texas Instruments. Он имеет широкий набор периферийных модулей (ШИМ, АЦП, последовательные интерфейсы и др.), что способствует минимизации количества использованных в устройстве компонентов. Имеющиеся у микроконтроллера объем памяти и величина тактовой частоты позволили реализовать многофакторные алгоритмы управления, а также непрерывный контроль работы устройства для своевременного обнаружения и реакции на возможное появление неисправностей.

4. Схема диагностического интерфейса. Доступ к диагностической информации ЭМУР осуществляется по протоколу Keyword Protocol 2000 (стандарт ISO 14230), физический уровень которого совместим с интерфейсом стандарта ISO 4191. В качестве компонента, реализующего этот интерфейс в ЭМУР, используется микросхема L9637D от компании STMicroelectronics. Данный компонент выполнен в удобном для разводки корпусе SO-8 и в отличие от аналогов обладает большим запасом по напряжению питания и рабочей температуре.

5. Вторичные источники питания. Для питания различных компонентов изделия применена каскадная схема включения линейных стабилизаторов напряжения с получением на выходе первого каскада напряжения 5,5 В. Такое значение выбрано с учетом наличия падения напряжения на втором каскаде преобразователей и требо-

вания получить напряжение питания 5 В для ДПР и ДМ. Так как величина 5,5 В не входит в стандартный ряд, реализуемый преобразователями с фиксированными выходами, в разработке использован линейный регулятор напряжения с подстраиваемым выходом TLE4276 компании Infineon. Данное устройство имеет вход разрешения/запрещения работы, позволяющий в неработающем состоянии отключать цепи питания ЭМУР от бортовой сети и минимизировать разряд аккумулятора. Питание датчиков и Flash-памяти микроконтроллера в режиме программирования осуществляется от линейных регуляторов TPS76050 компании Texas Instruments с фиксированным напряжением 5 В. Другой линейный регулятор Texas Instruments с фиксированным выходом 3,3 В — TPS77533 — служит источником питания для микроконтроллера и энергонезависимой памяти FRAM.

6. Разъемы. Так как электромеханический усилитель руля является автомобильным устройством, используемые разъемы должны удовлетворять повышенным требованиям по надежности и вибростойкости. Кроме того, на силовые разъемы накладывается дополнительное требование малого сопротивления контактов. Примененные соединители 42820-3212, 43045-1000 компании Molex, AMP-74049-2 компании Tyco Electronics и ГЛЦИ.434427.011 удовлетворяют указанным выше требованиям.

7. Операционные усилители. В блоке управления ЭМУР измерение тока потребления датчиков положения ротора и момента, а также устройства в целом выполняется по падению напряжения на шунтах. Компонентами, фиксирующими это падение напряжения, а затем усиливающими его для согласования с входным диапазоном АЦП микроконтроллера, являются операционные усилители (ОУ). В нашем случае использованы ОУ ОРА335 компании Texas Instruments (измерение тока потребления БУ ЭМУР) и аналогичный спаренный ОУ ОРА2335. Низкое значение напряжения смещения нуля и его температурного дрейфа выбранных компонентов позволяет измерять ток с достаточной точностью без компенсации смещения нуля. ■