

# Контроль тока нагрузки ШИМ при помощи высоковольтного токочувствительного усилителя

Маурицио Гавардони, Акшей Бхат (США), MAXIM integrated™

Перевод Андрея Данилова

**Микросхема MAX9918 позволяет контролировать рециркулирующий ток диодов и ток источника питания в схеме управления индуктивной нагрузкой.**

Точное измерение больших токов важно для автомобильных систем управления, таких как электроусилители рулевого управления (EPS, Electric Power Steering), автоматическое переключение передач, управление трансмиссией, впрыском топлива, тормозными клапанами и активной подвеской. Все эти приложения требуют точного регулирования тока через электродвигатель или соленоид. При помощи тока устанавливается момент двигателя и происходит управление электромагнитом. Можно разработать точный измерительный усилитель больших токов для контроля индуктивных токов нагрузки в широком диапазоне входных синфазных напряжений. Схема подходит для приложений, в которых входное синфазное напряжение становится отрицательным

из-за индуктивного скачка обратного напряжения, переплюсовки батареи или переходных процессов.

## ИЗМЕРЕНИЕ ТОКА В EPS

В отличие от стандартных усилителей рулевого управления, электрическая система не содержит гидравлического насоса или жидкости. Вместо этого она оснащена электродвигателем, который присоединён к зубчатой рейке рулевого механизма через редуктор. Когда водитель поворачивает руль, датчик рулевого механизма определяет положение руля и скорость вращения. Затем система передаёт эту информацию, вместе с входным сигналом от датчика момента рулевого механизма на валу привода, в модуль управления электроусилителем руля. Для определения необходимой

поддержки управления, в модуль также поступают сигналы от датчика скорости автомобиля, систем управления тягой и курсовой устойчивостью (см. рис. 1).

Интерфейс с модулем питания в данном случае позволяют модулю управления регулировать ток через электродвигатель. Увеличение тока через двигатель повышает усиление, и наоборот. Управление током электродвигателя осуществляется посредством напряжения ШИМ на клеммах двигателя при помощи H-моста (см. рис. 2). Фаза сигналов на четырёх затворах транзисторов определяет направление вращения и скорость электродвигателя. Соответствующая таблица истинности суммирует различные режимы работы для полной схемы H-моста (см. таблицу). Электродвигатель представляет собой индуктивную нагрузку. Для определения момента усредняется результирующий ток пульсаций. Этот ток даёт представление о результирующей поддержке рулевого усилия, которое схема предоставляет водителю.

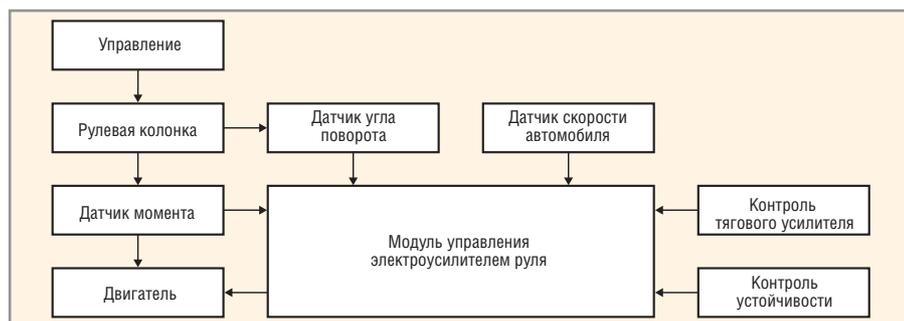


Рис. 1. Структурная схема электроусилителя руля автомобиля

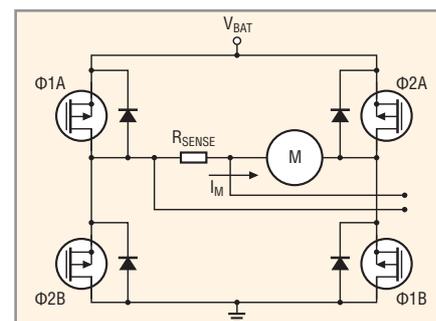


Рис. 2. Принципиальная схема H-моста

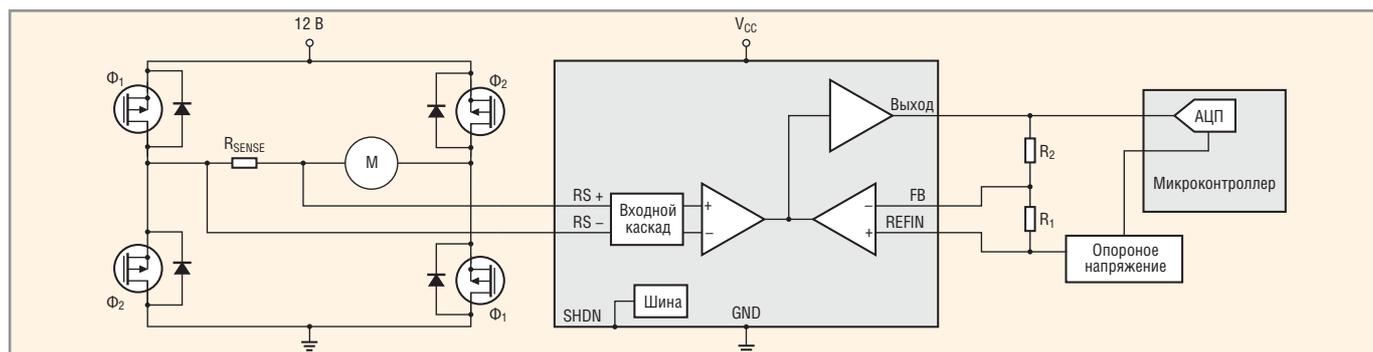


Рис. 3. Подключение электродвигателя в схему полного H-моста

При использовании устройства, измеряющего ток, для контроля тока через электродвигатель, обеспечивается обратная связь в реальном режиме времени с модулем управления. Этот модуль подстраивает коэффициент заполнения импульсов ШИМ, пока ток не достигает своего целевого значения. Требуется установить низкоомный резистор в цепь прохождения тока, чтобы обеспечить небольшое падение напряжения. Токочувствительный усилитель на таком дифференциальном напряжении показывает величину тока.

Существуют три метода измерения тока электродвигателя. Первый метод заключается в установке токочувствительного резистора между Н-мостом и землёй на нижней ветви шины постоянного тока. Во втором случае токочувствительный резистор устанавливается между плюсовой клеммой батареи и Н-мостом на верхней ветви шины постоянного тока. И, наконец, существует возможность выполнить измерение тока ШИМ на самом электродвигателе.

Любой из предложенных вариантов требует компромиссов. Первый метод является удобным, но добавляет нежелательное сопротивление в цепь заземления. В нём также отсутствует возможность диагностики короткого замыкания на землю. Ни первый, ни второй метод не позволяют постоянно отслеживать ток в демпферном диоде. Измерение тока ШИМ позволяет контролировать ток диода и избавляет от нежелательного сопротивления в цепи заземления.

Схема измерения тока ШИМ влечёт за собой значительные изменения характеристик. Необходимо обеспечить защиту от больших синфазных напряжений, которые изменяются во всём диапазоне от нуля (GND) до напряжения батареи. Следовательно, чтобы подавить синфазные колебания, схема должна иметь не только расширенный диапазон входного напряжения, соответствующий этому изменению, но и превосходный коэффициент ослабления синфазного сигнала (КОСС) на частоте коммутации и её гармониках.

Импульсные синфазные помехи и минимальный коэффициент заполнения для ШИМ-сигнала также предъявляют жёсткие требования на время установления токочувствительного усилителя. Для точного и линейного отклика схема измерения тока должна иметь большое усиление, высокую точность и низкое напряжение смещения. Поскольку руль водителя является

частью петли управления, линейность и точность исключительно важны. Любая нелинейность в схеме может оказаться критической при вождении, вызвав колебание или вибрацию. Это происходит в тот момент, когда автомобиль совершает чрезмерно крутые манёвры.

Подключение электродвигателя в схему полного Н-моста (см. рис. 3) позволяет реверсировать полярность прикладываемого к двигателю напряжения, что обеспечивает его вращение в любом направлении. Микросхема выдерживает синфазные напряжения в диапазоне  $-20...+75$  В, что делает её невосприимчивой к индуктивному обратному выбросу, переходным процессам в нагрузке и переполюсовке батареи. В микросхему встроен измерительный усилитель. Его непрягая архитектура с обратной связью по току обеспечивает точное измерение тока с максимальным входным напряжением смещения 400 мкВ и ошибкой усиления 0,6%. Внешнее опорное напряжение поддерживает двунаправленное измерение тока, для которого требуется полный Н-мост, и считывает однонаправленный ток при работе в полумостовой схеме. В двунаправленной системе выходное напряжение равно опорному напряжению при нулевом измеряемом токе. Модификации и с регулируемым, и с фиксированным усилением позволяют этому компоненту обеспечить максимальную гибкость во всём разнообразии приложений.

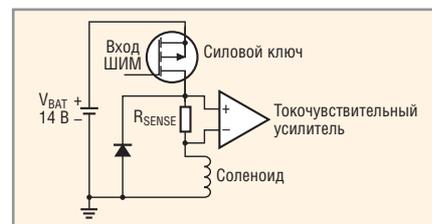


Рис. 4. Типичная схема управления соленоидом (выполнена на мощном ключе)

## ИЗМЕРЕНИЕ ТОКА В ПРИВОДЕ СОЛЕНОИДА

В автомобилях в качестве электромеханических переключателей широкого применения находят электромагниты. Соленоид стартера, например, передаёт большой электрический ток на электродвигатель стартера, который, в свою очередь, приводит двигатель в движение. Однако несколько систем управления в автомобиле используют электромагнитный привод для точного управления. Например, система дизельного двигателя для железных дорог полагается на соленоиды в качестве сложных электронно-управляемых клапанов. Они впрыскивают соответствующие количества топлива напрямую в цилиндры двигателя под высоким давлением. Чтобы гарантировать синхронизацию с дизельным двигателем, приходится точно управлять временной диаграммой этих клапанов при помощи блока управления двигателем. Результатом является относительно «зелёный» двигатель, который производит меньше шума, вредных выбросов и потребляет меньше топлива. Другие приложе-

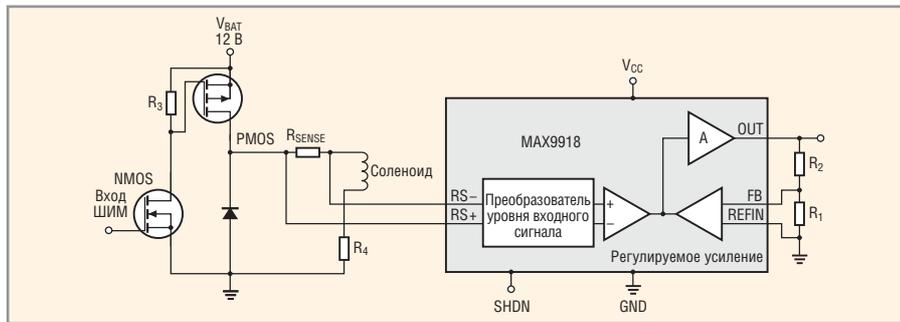


Рис. 5. Лабораторный макет схемы управления соленоидом

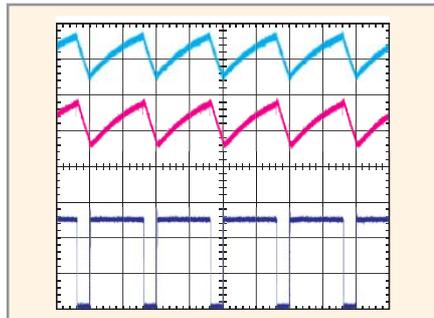


Рис. 6. Форма сигнала ШИМ с частотой 5 кГц с коэффициентом заполнения импульсов в 80% в точках схемы, приведённой на рис. 5

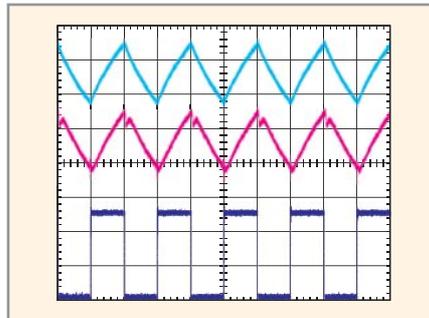


Рис. 7. Форма сигнала ШИМ с частотой 5 кГц с коэффициентом заполнения импульсов в 50% в точках схемы, приведённой на рис. 5

ния для управления соленоидом включают автоматическое переключение передач, управление трансмиссией, тормозами и активной подвеской.

Мощный ключ обычно является полевым транзистором, затвором которого удаётся управлять при помощи сигнала ШИМ (см. рис. 4). Когда полевой транзистор включён, он подсоединяет электромагнит к 14-вольтовому напряжению батареи, обеспечивая ток, который заряжает катушку соленоида. Когда полевой транзистор выключен, ток электромагнита разряжается через демпферный диод и шунтирующий резистор. Регулируя частоту ШИМ и коэффициент заполнения импульсов, можно определить результирующий средний ток пульсаций в соленоиде. Этот ток, в свою очередь, управляет усилием, которое система прилагает к исполнительному органу.

Проблемы измерения тока соленоида для регулирования частоты ШИМ и коэффициента заполнения импульсов сходны с проблемами, возникающими в

схеме H-моста. Синфазные напряжения на входе токочувствительного усилителя изменяются в диапазоне от напряжения батареи до небольшого отрицательного уровня падения напряжения на демпферном диоде. Типичным электромагнитам требуется ток в несколько ампер, поэтому демпферный диод, который принимает на себя такой ток, может развивать прямое напряжение свыше 1 В.

Для этого применения подходит токочувствительный усилитель с широким диапазоном синфазного напряжения и быстрым установлением в ответ на изменения синфазного сигнала. Главное отличие между этим приложением и H-мостом состоит в том, что ток соленоида всегда протекает в одном и том же направлении; следовательно, токочувствительный усилитель должен быть только однонаправленным. Микросхема MAX9918 становится однонаправленным токочувствительным усилителем только при подсоединении её опорного входа к земле.

Таблица истинности H-моста

Ф1А	Ф1В	Ф2А	Ф2В	Состояние
ВКЛ	ВКЛ	ВЫКЛ	ВЫКЛ	Электродвигатель подсоединён между напряжением батареи и землёй; его ток возрастает и протекает в направлении стрелки (см. рис. 2)
ВЫКЛ	ВКЛ	ВЫКЛ	ВКЛ	Ток протекает в направлении стрелки, но уменьшается и циркулирует через Ф1В, Ф2В и токочувствительный резистор
ВЫКЛ	ВЫКЛ	ВКЛ	ВКЛ	Электродвигатель подсоединён между напряжением батареи и землёй; его ток возрастает и протекает противоположно направлению стрелки
ВЫКЛ	ВКЛ	ВЫКЛ	ВКЛ	Ток протекает противоположно направлению стрелки, но уменьшается и циркулирует через транзисторы Ф2В, Ф1В и токочувствительный резистор

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Макет типичной схемы для электромагнитов можно изготовить в лаборатории (см. рис. 5). Соленоид эмулируется при помощи катушки с индуктивностью 2 мГн, имеющей низкое эквивалентное последовательное сопротивление (ESR) в 1,6 Ом. Номинал токочувствительного резистора равен 0,1 Ом, а номинал резистора R4 в 15 Ом, не присутствующего в реальной схеме соленоида, ограничивает максимальный ток соленоида, как показывает следующее выражение:

$$I_{\text{MAX}} = V_{\text{BAT}} / (R_{\text{SENSE}} + \text{ESR} + R_4) = 12 \text{ В} / (0,1 + 1,6 + 15) \text{ Ом} = 0,72 \text{ А}.$$

Максимальное значение тока является теоретическим пределом, которого схема достигает, когда индуктивность полностью заряжена. Номиналы резистора и катушки индуктивности устанавливают постоянную времени схемы примерно 0,12 мс, что эквивалентно 8,3 кГц. Можно установить усиление 80 В/В при помощи внешних резисторов R1 и R2, имеющих номиналы 1 и 79 кОм соответственно.

Форма сигнала ШИМ с частотой 5 кГц иллюстрирует работу схемы, приведённой на рисунке 5, с коэффициентом заполнения импульсов в 80 и 50% (см. рис. 6 и 7 соответственно). Верхняя диаграмма показывает напряжение на резисторе R4, которое пропорционально току, протекающему в катушке индуктивности. Средняя диаграмма иллюстрирует выходной сигнал токочувствительного усилителя, а нижняя диаграмма – форму сигнала ШИМ на стоке полевого транзистора. Увеличение коэффициента заполнения импульсов приводит к росту тока.

Таким образом, прецизионный, высоковольтный токочувствительный усилитель позволяет выполнять точные измерения при помощи резистивных датчиков меньших номиналов. Он обрабатывает двунаправленные токи электродвигателя, которые считываются с H-мостов, таких, как применяются в системах EPS, а также однонаправленные токи соленоидов в автоматических коробках передач, управлении трансмиссией, тормозами и активной подвеской.

## ЛИТЕРАТУРА

1. EDN, March 3, 2011. [www.edn-europe.com](http://www.edn-europe.com)
2. MAXIM integrated. [www.maximintegrated.com](http://www.maximintegrated.com)

