

Мощные MOSFET-транзисторы

с датчиком тока

Наличие встроенного датчика тока в ключевом MOSFET-транзисторе позволяет эффективно защищать выходные цепи устройств от перегрузок по току и коротких замыканий. При этом повышается надежность прибора и снижается его стоимость, так как отпадает необходимость в использовании мощных токовых шунтов. В данной статье будут рассмотрены ключевые MOSFET-транзисторы с датчиком тока производства Philips Semiconductors, а также различные методы измерения тока нагрузки.

Александр Борисов

bor-alex@gamma.spb.ru

МOSFET-ключи Philips Semiconductors, произведенные по технологии TrenchMOS, представляют собой матрицу из нескольких тысяч полевых транзисторов с изолированным затвором, размещенных на одном кристалле, каналы которых соединены параллельно. Так как элементы матрицы идентичны, ток, а значит и выделяемая тепловая энергия, равномерно распределяются по всему кристаллу. Параллельное соединение позволяет значительно уменьшить сопротивление открытого канала.

Кроме того, такая конфигурация позволяет изолировать соединенные истоки нескольких ячеек и вывести их с кристалла отдельным выводом. Такой прибор может быть представлен в виде двух MOSFET-транзисторов с объединенным стоком, затвором и раздельными истоками (рис. 1). В случае открытого канала ток нагрузки будет распределяться в отношении, пропорциональном сопротивлению каналов.

Ток истока датчика тока значительно меньше тока истока основного транзистора. При этом токи пропорциональны площадям, занимаемым элементами на кристалле, и их отношение обычно составляет $n = 500:1$ (отношение тока истока основного транзистора к току истока датчика тока). Это отношение называется «sense ratio», и оно определено для слу-

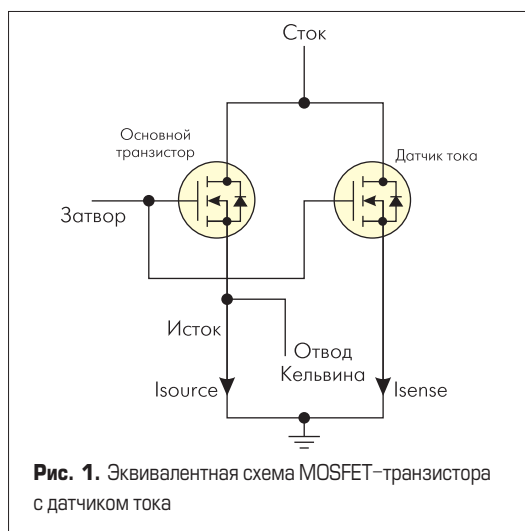


Рис. 1. Эквивалентная схема MOSFET-транзистора с датчиком тока

Таблица. Линейка MOSFET-транзисторов с датчиком тока производства Philips Semiconductors

Устройство	Максимальное сопротивление открытого канала $R_{ds(on)}$, мОм	sense ratio, n
BUK7105-40AIE	5	500:01:00
BUK7905-40AI	5	500:01:00
BUK7C06-40AITE	6	560:01:00
BUK7108-40AIE	8	500:01:00
BUK7107-55AIE	7	500:01:00
BUK7C08-55AITE	8	500:01:00
BUK7109-75AIE	9	500:01:00
BUK7C10-75AITE	10	500:01:00

чая, когда потенциалы истоков датчика тока и основного транзистора равны. Дополнительный отвод от области истока основного транзистора (отвод Кельвина) позволяет передать в анализирующую цепь точное значение потенциала.

В таблице приведены характеристики MOSFET-транзисторов с датчиком тока, выпускаемых Philips Semiconductors.

Схема измерения тока нагрузки с виртуальной землей

Схема с виртуальной землей дает наилучшие результаты относительно точности измерения и подавления шумов во всем диапазоне рабочих температур силового ключа. Типовая схема измерения тока с виртуальной землей представлена на рис. 2.

ОУ включен в схеме с токовой обратной связью, что обеспечивает равенство потенциалов отвода Кельвина и выхода датчика тока. Таким образом, выполняется условие, при котором отношение токов основного транзистора и датчика тока остается постоянным и равным заданному производителем sense ratio. Выходное напряжение схемы измерения тока составляет:

$$V_{sense} = \frac{-I_D R_{sense}}{n} \quad (1)$$

Типичная временная диаграмма напряжения на выходе схемы измерения тока нагрузки приведена на рис. 3. Из диаграммы видно, что форма напряжения полностью повторяет форму тока стока ключа во всем временном интервале.

Схема измерения тока нагрузки с резистивным шунтом

Включение резистивного шунта последовательно с выходом датчика тока представляет собой простейший способ мониторинга тока нагрузки (рис. 4, 5).

На рис. 5 представлена эквивалентная схема открытого ключа с включенным между выходом датчика тока и отводом Кельвина резистивным шунтом. Сопротивление открытого канала основного транзистора обозначено как $R_{mf(on)}$, сопротивление открытого канала транзистора датчика тока — как $R_{sf(on)}$. Сопротивление проводника, соединяющего исток основного транзистора с силовой землей, обозначено как R_{wire} .

Схема измерения тока нагрузки (рис. 4) представляет собой делитель напряжения, для которого справедливы следующие уравнения:

$$V_{out} = \left(\frac{R_2}{R_1}\right) R_{sense} I_{sf}; \quad (2)$$

$$V_{sense} = I_D R_{mf(on)} \frac{R_{sense}}{R_{sense} + R_{sf(on)}}. \quad (3)$$

Конечное сопротивление открытого канала датчика тока приводит к тому, что отношение основного тока к току датчика отличается от заданного производителем sense ratio и определяется уравнением:

$$n' = n \times \left(1 + \frac{R_{sense}}{R_{sf(on)}}\right). \quad (4)$$

В пределе максимальное падение напряжения на резистивном шунте соответствует его бесконечному сопротивлению (разомкнутая цепь). В этом случае напряжение на выходе датчика тока относительно истока основного транзистора составит:

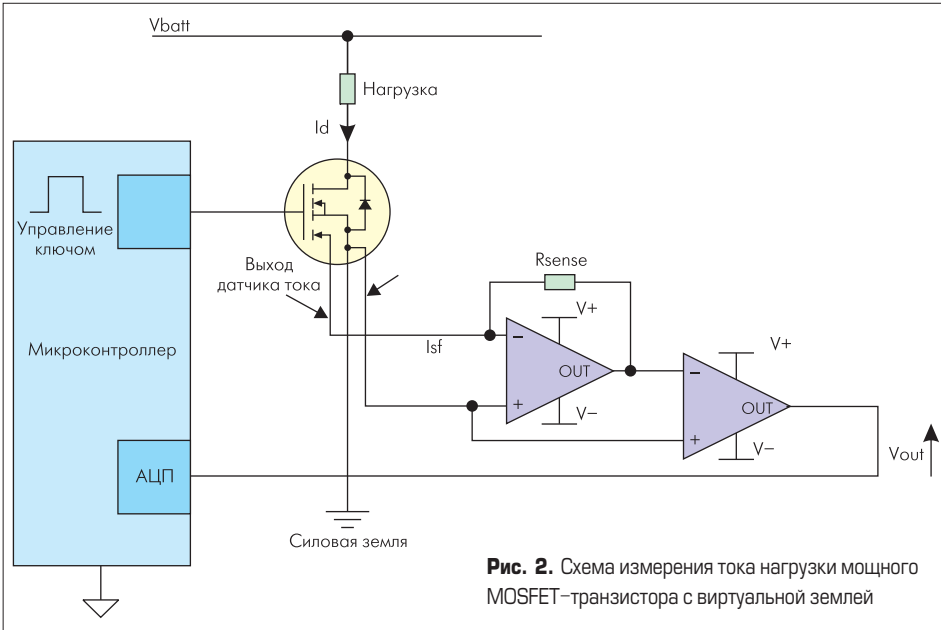


Рис. 2. Схема измерения тока нагрузки мощного MOSFET-транзистора с виртуальной землей

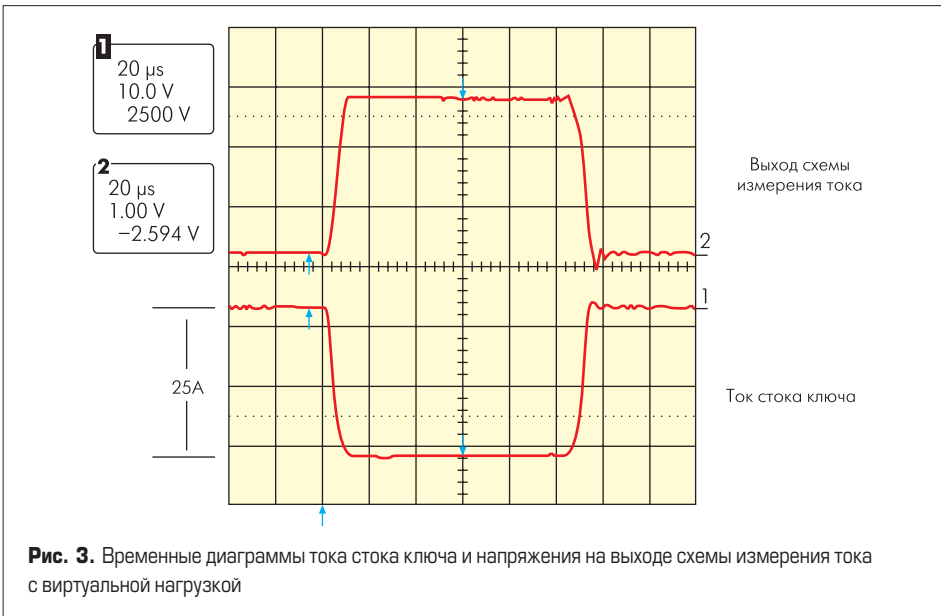


Рис. 3. Временные диаграммы тока стока ключа и напряжения на выходе схемы измерения тока с виртуальной нагрузкой

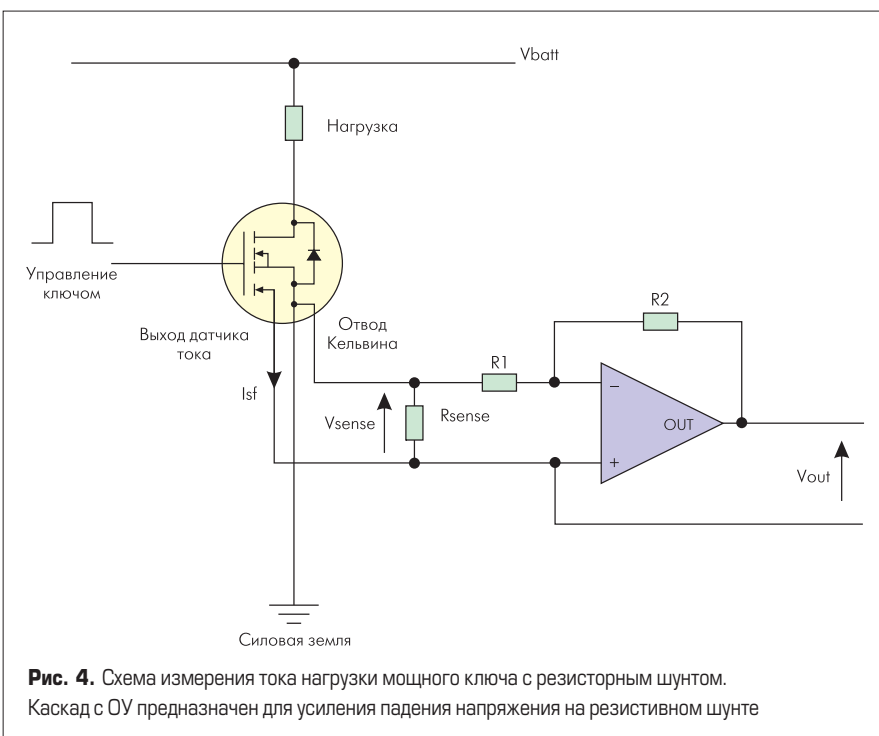


Рис. 4. Схема измерения тока нагрузки мощного ключа с резисторным шунтом. Каскад с ОУ предназначен для усиления падения напряжения на резистивном шунте

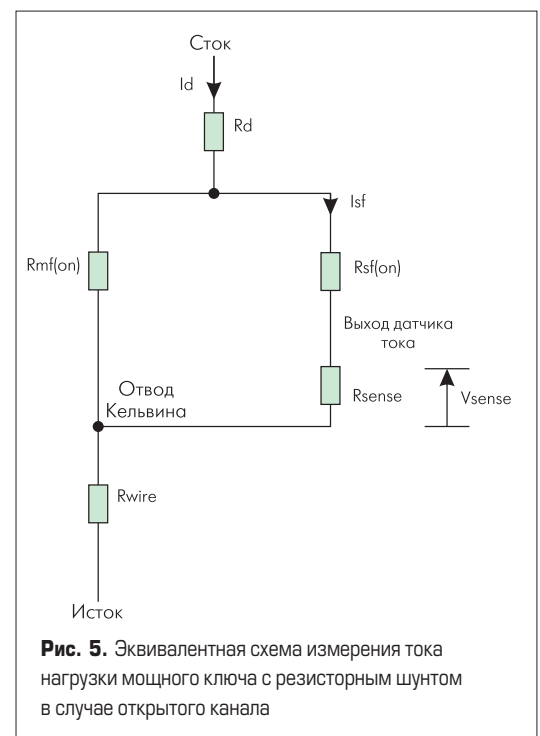
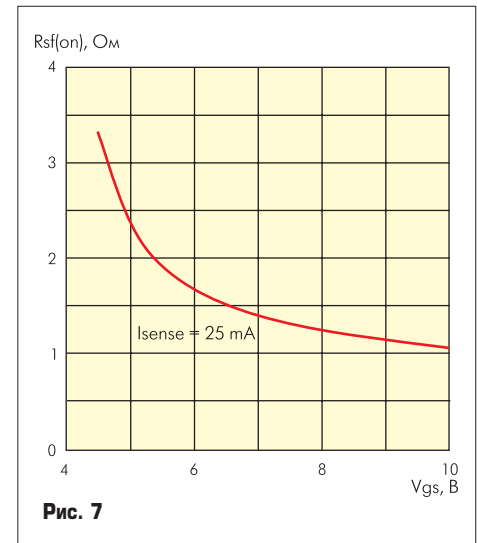
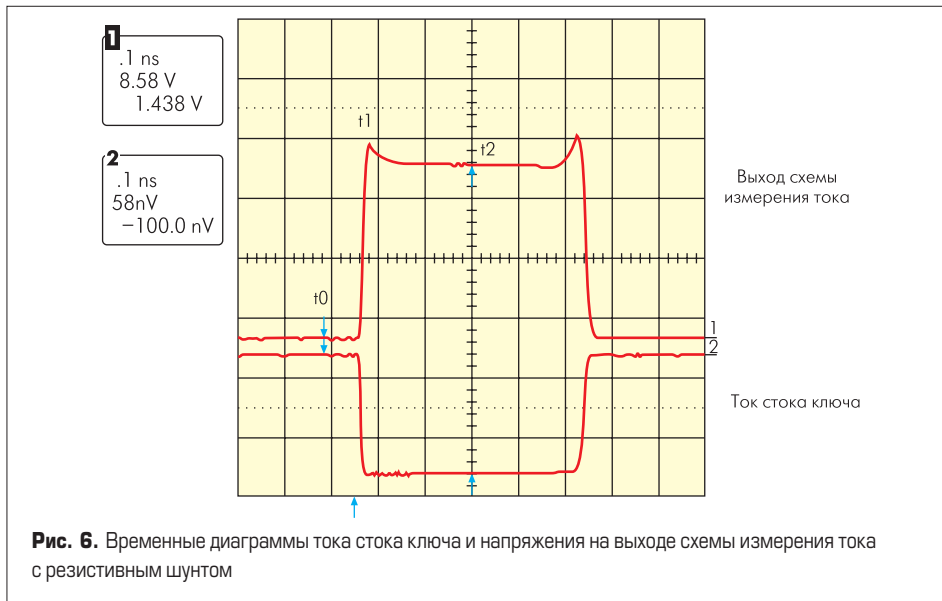


Рис. 5. Эквивалентная схема измерения тока нагрузки мощного ключа с резисторным шунтом в случае открытого канала



$$V_{sense} = \frac{V_{DS(on)} \times R_{mf(on)}}{(R_{mf(on)} + R_d)} \quad (5)$$

Для примера, силовой ключ с датчиком тока BUK7905-40AIE имеет сопротивление открытого канала основного транзистора $R_{mf(on)} = 3$ мОм, сопротивление открытого канала транзистора датчика тока $R_{sf(on)} = 1,1$ Ом, типовое отношение sense ratio — 500:1. Таким образом, если сопротивление резистивного шунта $R_{sense} = 1$ Ом, ток в нагрузке, равный 10 А, создаст падение напряжения на шунте $V_{sense} \approx 14$ мВ. Для усиления этого сигнала можно использовать усилительный каскад на ОУ с однополярным напряжением питания.

Отвод Кельвина необходимо использовать для передачи в анализирующую цепь точного потенциала истока основного транзистора. В противном случае ток через канал основного транзистора создаст падение напряжения на сопротивлении соединения истока и силовой земли R_{wire} , что может привести к значительной ошибке измерения. Ранее считалось, что так как сопротивление соединения значительно меньше сопротивления открытого канала основного транзистора, им можно пренебречь. Однако современные транзисторы обладают сопротивлением канала, сравнимым (или даже меньшим) с сопротивлением соединения, поэтому отказ от двухпроводной схемы измерения Кельвина может привести к критической ошибке.

Основным недостатком схемы измерения тока нагрузки с резистивным шунтом является

температурная зависимость выходного напряжения.

Представим, что сопротивление шунта $R_{sense} \rightarrow 0$. Тогда сопротивления каналов основного транзистора и транзистора датчика тока изменяются пропорционально с изменением температуры, и их отношение, а следовательно, и sense ratio, остается постоянным во всем диапазоне рабочих температур.

В случае, если $R_{sense} \rightarrow \infty$, согласно формуле (3) напряжение V_{sense} является функцией сопротивления открытого канала основного транзистора и составляет:

$$V_{sense} = I_D R_{mf(on)} \quad (6)$$

Так как $R_{mf(on)}$ является функцией температуры кристалла, то R_{sense} так же является функцией температуры. При изменении температуры кристалла в пределах от 25 до 175 °С (температура окружающей среды равна 25 °С), сопротивление $R_{mf(on)}$ может измениться вдвое, и следовательно погрешность измерения тока нагрузки может превысить 100%, что естественно, недопустимо. Таким образом, необходимо выбрать такое значение R_{sense} , при котором температурная погрешность измерения будет лежать в заданных пределах. Рекомендуется выбирать значение $R_{sense} \ll R_{sf(on)}$, а падение напряжения на шунте усиливать с помощью внешних компонентов.

Типичная временная диаграмма напряжения на выходе схемы измерения тока нагрузки с резистивным шунтом приведена на рис. 6.

Как видно из рис. 6, выходное напряжение схемы измерения практически повторяет фор-

му тока стока основного транзистора. Однако на диаграмме наблюдаются паразитные пики напряжения в момент включения и выключения транзистора. Это объясняется различными значениями sense ratio в различных режимах его работы: открытый канал, линейный режим, закрытый канал.

Согласно формуле (4), эффективное значение sense ratio является функцией отношения $R_{sense}/R_{sf(on)}$. Допустим, что $R_{sense} = 1$ Ом. В момент времени t_0 (рис. 6) напряжение на затвор не подается, и ток через канал основного транзистора равен нулю. В момент подачи напряжения на затвор канал открывается, и через него начинает течь ток, однако сопротивление канала еще велико. В этот момент времени $R_{sf(on)} \gg R_{sense}$ и отношение токов каналов основного транзистора и транзистора датчика тока определяется sense ratio, заданным производителем.

Максимальное падение напряжения на резистивном шунте R_{sense} наблюдается в момент времени t_1 . Так как в этот момент времени напряжение на затворе максимально, сопротивление канала датчика тока $R_{sf(on)}$ падает (рис. 7) и отношение $R_{sense}/R_{sf(on)}$ становится более значимым (см. формулу 4). Процесс уменьшения sense ratio продолжается до полного установления напряжения затвор-исток V_{gs} (момент времени t_2). Процесс выключения транзистора происходит в обратном порядке.

Таким образом, при использовании схемы измерения тока с резистивным шунтом, необходимо принимать во внимание выходное напряжение при полностью открытом основном транзисторе ключа.