

# Высоковольтный изолированный драйвер затвора IGBT-транзисторов

**В статье приведена краткая информация о структуре и основных характеристиках высоковольтного изолированного драйвера затвора IGBT-транзисторов со встроенным контроллером обратного DC/DC-преобразователя ADuM4138, выпускаемого компанией Analog Devices. Представлена типовая схема включения драйвера, а также даны общие сведения об оценочной плате для тестирования драйвера.**

**Владимир Макаренко,  
к. т. н.**

v.makarenko@vdm.ais.ua

ADuM4138 — это одноканальный драйвер затвора, оптимизированный для управления биполярными транзисторами с изолированным затвором (IGBT) или полевыми транзисторами [1]. Гальваническая развязка между входами и выходами драйвера выполнена по технологии компании Analog Devices iCoupler. Высококачественные трансформаторы, встроенные в чип, поддерживают надежную гальваническую развязку цепей (рис. 1).

В составе ИМС имеется контроллер изолированного обратного преобразователя, обеспечивающего питание на вторичной стороне драйвера.

Система обнаружения перегрузки по току и высокоскоростная двухуровневая система отключения, встроенные в ADuM4138, создают защиту IGBT при отсутствии насыщения или перегрузки по току.

Два вывода для подключения внешнего датчика температуры (TS1 и TS2) позволяют осуществлять контроль температуры системы с IGBT на вторич-

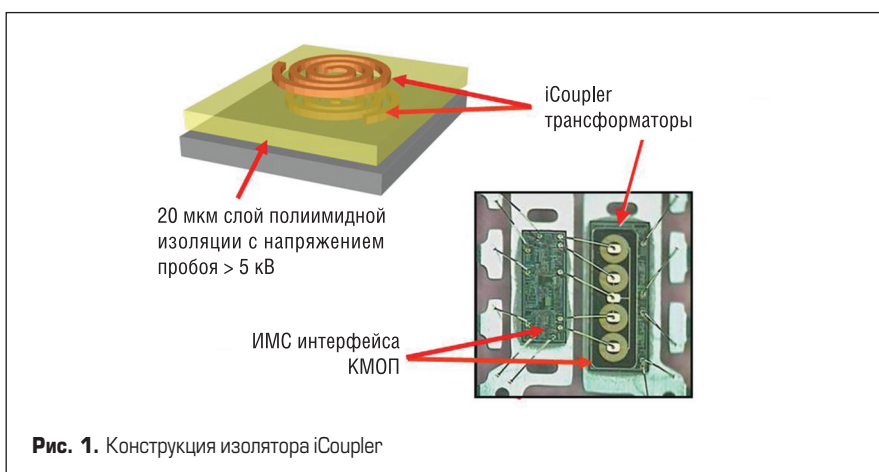
ной стороне. Блокировка минимального напряжения питания вторичной стороны  $V_{DD2}$  (UVLO) установлена на уровне 11,2 (типичное значение) в соответствии с пороговыми уровнями IGBT. Встроенная система ULVO удерживает выход драйвера на низком уровне до тех пор, пока напряжение питания не превысит необходимый порог, что предотвращает выход из строя управляемого транзистора.

Управление коэффициентами усиления усилителей и токов смещения для датчиков температуры осуществляется на первичной стороне через интерфейс SPI. Значения установленных параметров хранятся в электрически стираемой программируемой постоянной памяти (EEPROM), расположенной на вторичной стороне устройства. Кроме того, доступно программирование значения напряжения  $V_{DD2}$ , интервала времени между сеансами передачи сообщений о температуре и времени, когда произошло отключение по току.

ADuM4138 предоставляет отдельные отчеты для каждой из неисправностей: перегрузки по току, перегрева, блокировки работы IGBT при уменьшении напряжения питания на вторичной стороне (UVLO), отключения из-за перегрева (TSD) и обнаружения ненасыщенности IGBT.

Основные параметры ADuM4138 [1]:

- Пиковый ток управления затвором IGBT: 6 А (типичное значение).
- Защита от перегрузки по току.
- Защита от выхода транзистора из насыщения (DESAT).
- Интегрированный ключ активного ограничения эффекта Миллера.
- Встроенный контроллер изолированного DC/DC-преобразователя.



- Мониторинг напряжения питания на первичной и вторичной стороне (защита UVLO).
- Мониторинг сигналов ошибки.
- Изолированный выход сигнала ошибки.
- Длина пути утечки/электрического зазора (Creepage/Clearance) по корпусу и между выводами составляет 8,3 мм.
- Возможность подключения двух внешних датчиков температуры на вторичной стороне.
- Встроенный в ИМС датчик температуры.
- Время задержки распространения сигнала:
  - фронта: 95 нс (типовое значение);
  - спада: 100 нс (типовое значение).
- Минимальная длительность импульсов управления: 74 нс.
- Диапазон рабочих температур перехода:  $-40...+150\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- Напряжение питания вторичной стороны: 12–25 В, ток потребления 14 мА.
- Частота коммутации ключа обратноходового DC/DC-преобразователя: 200 кГц.
- Соответствие требованиям стандартов и сертификатов:
  - уведомление о принятии компонента CSA 5A;

- соответствует сертификатам безопасности на усиленную изоляцию и стандартам DIN V VDE V 0884-10 (VDE V 0884-10), UL 1577.
- Рабочее напряжение изоляции:  $V_{IORM} = 849\text{ В}$  (пиковое значение).
- Прочность изоляции: 5000 В (среднеквадратическое значение) в течение 1 мин.
- Сертифицирован для автомобильных приложений.

Функциональная схема ADuM4138 приведена на рис. 2. Установка значения пикового тока транзистора V1 обратноходового преобразователя осуществляется с помощью резистора  $R_S$ , подключенного к выводу ISENSE. Значение тока рассчитывается по формуле:

$$I_{PEAK} (\text{mA}) = 100 \text{ mB}/R_S$$

где  $I_{PEAK}$  — максимальное значение пикового тока, мА;  $R_S$  — сопротивление в Ом резистора, используемого для установки пикового тока.

Типовая схема включения драйвера показана на рис. 3. Рекомендуемое значение сопротивления резистора RCL (ограничения тока) составляет 20 кОм. В процессе работы уравнение для значения пикового тока имеет вид:

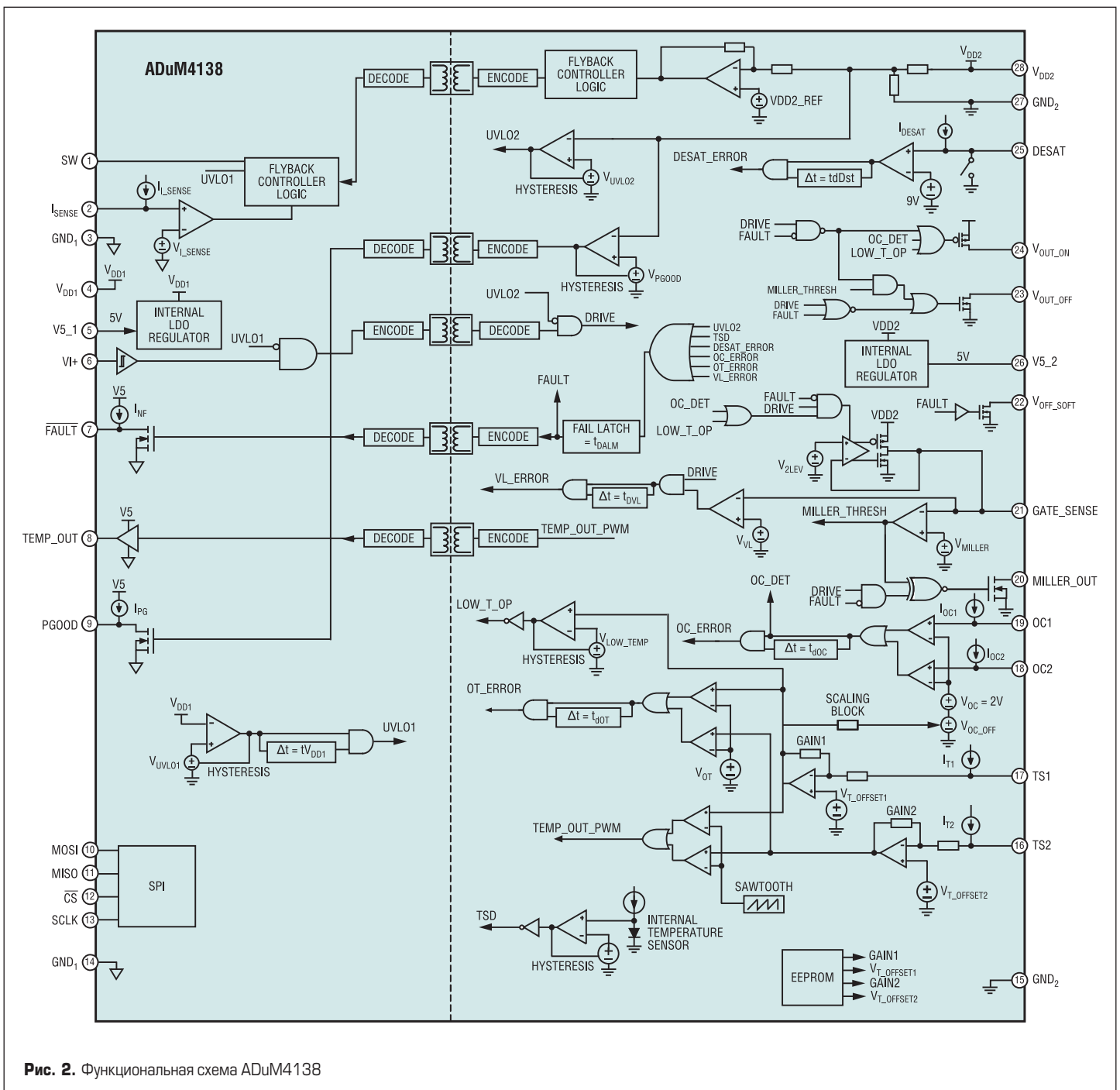


Рис. 2. Функциональная схема ADuM4138

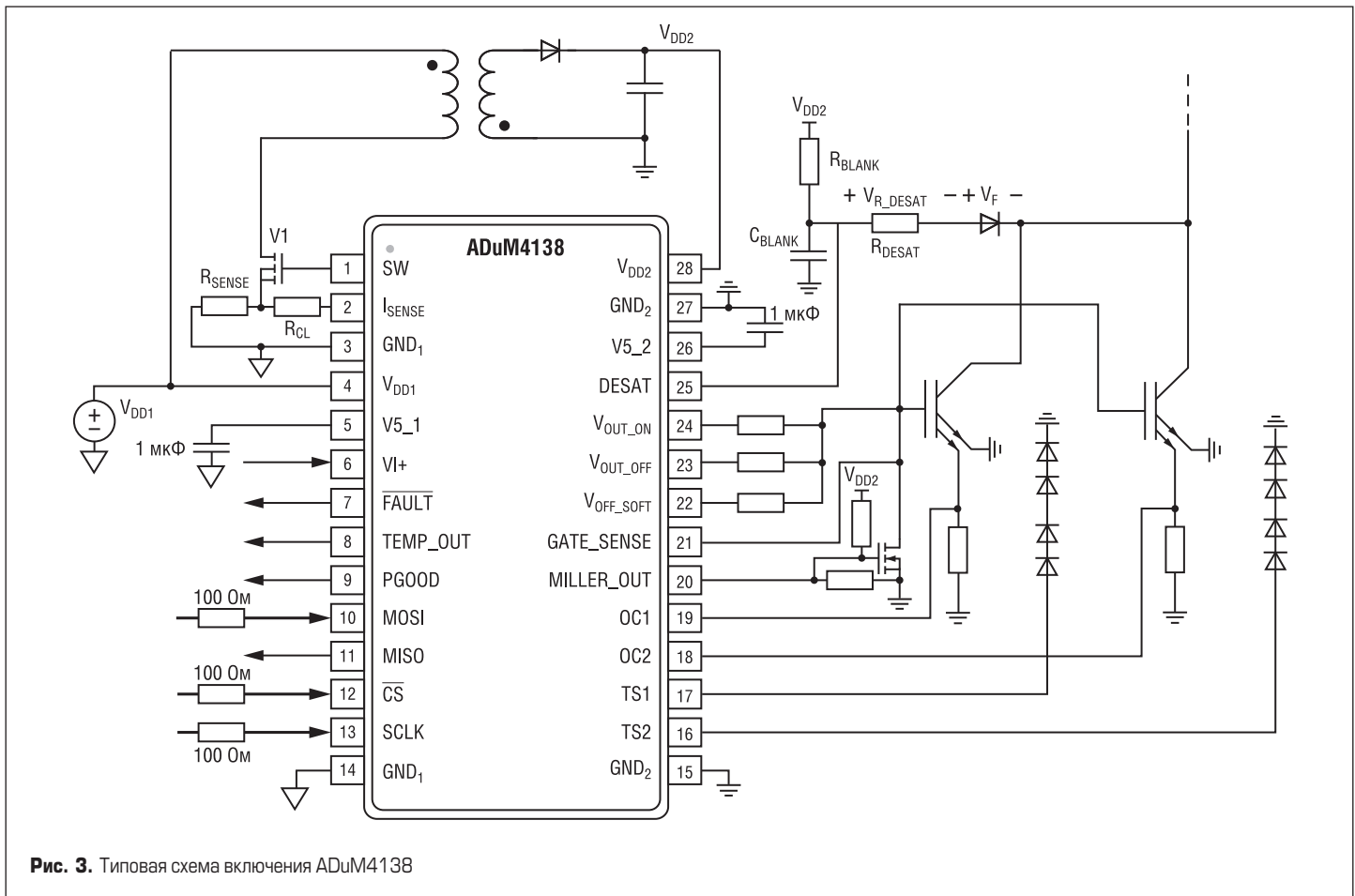


Рис. 3. Типовая схема включения ADuM4138

$$I_{PEAK} = (V_{L\_SENSE} - I_{L\_SENSE} \times R_{CL}) / R_S$$

где  $V_{L\_SENSE} = 500$  мВ (типическое значение);  $I_{L\_SENSE} = 20$  мкА (типическое значение);  $R_{CL} = 20$  кОм (рекомендуемое значение).

Управление параметрами драйвера ADuM4138 и программирование памяти EEPROM осуществляется через последовательный интерфейс SPI. Доступ к программированию памяти осуществляется установкой на выводе CS нулевого потенциала. Программирование по интерфейсу выполняется с использованием стандартного соглашения SPI. Временные диаграммы сигналов в режимах записи и считывания из памяти и рекомендации по программированию приведены в [1].

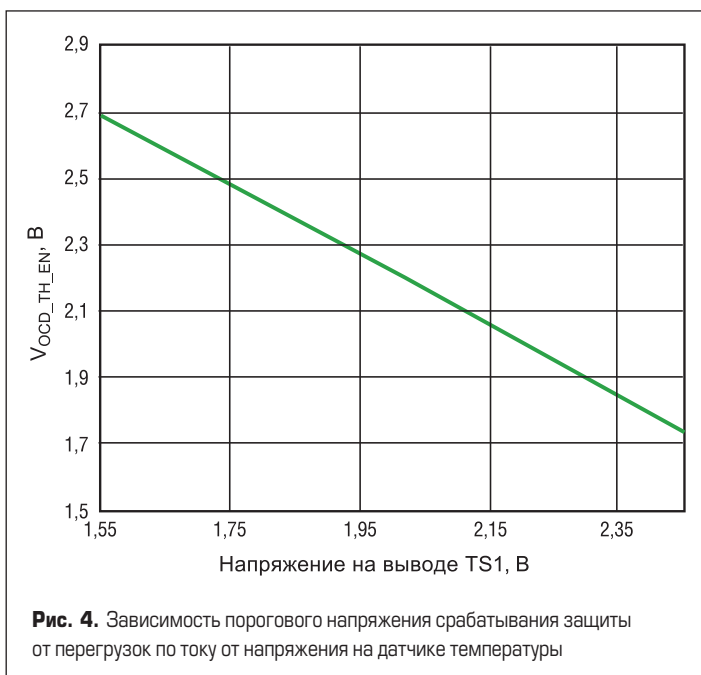


Рис. 4. Зависимость порогового напряжения срабатывания защиты от перегрузок по току от напряжения на датчике температуры

На время программирования отключаются выходы управления затвором IGBT. Сигналы управления затвором вновь начинают формироваться при установке на входе CS высокого потенциала.

Системы контроля напряжения питания ADuM4138 выполняют контроль как на первичной, так и на вторичной стороне. Если напряжение питания первичной стороны  $V_{DD1}$  падает ниже 4,13 В (типическое значение), передача сигналов на вторичную сторону прекращается, в результате устанавливается низкий уровень сигнала управления затвором IGBT. Рекомендуется, чтобы значение напряжения  $V_{DD1}$  было не менее 6 В.

Для контроля температуры используются цепочки из четырех последовательно соединенных диодов (рис. 3), подключенных к выводам TS1 и TS2. Ток через диоды равен 5 мА, а напряжение на этих выводах составляет 2,35–2,45 В.

### Обнаружение перегрузки по току

ADuM4138 предназначен для работы с IGBT с разделенными эмиттерами или с MOSFET с разделенными истоками. Используя резистор, включенный между эмиттером и общим проводом, можно контролировать ток, протекающий через транзистор. При перегрузке по току инициируется отключение транзистора. На первичной стороне формируется сообщение об ошибке через время  $t_{dOC}$  (типическое значение 920 нс) и запускается таймер сброса. Если перегрузка по току устраняется до начала процесса отключения транзистора, на выводе  $V_{OUT\_ON}$  формируется высокий уровень напряжения и таймер сброса прекращает свою работу.

Значение порогового напряжения перегрузки по току задается значением бита T\_RAMP\_OP регистра пользователя. Если бит T\_RAMP\_OP установлен в 1, пороговое значение максимального тока устанавливается равным 2 В (типическое значение) для всех условий работы. Если бит T\_RAMP\_OP установлен в 0, пороговое значение напряжения  $V_{OCD\_TH\_EN}$  устанавливается равным 2,69 В (типическое значение). При изменении напряжения на датчике температуры (вывод TS1) в пределах 1,55–1,75 В напряжение  $V_{OCD\_TH\_EN}$  изменяется по линейному закону (рис. 4).

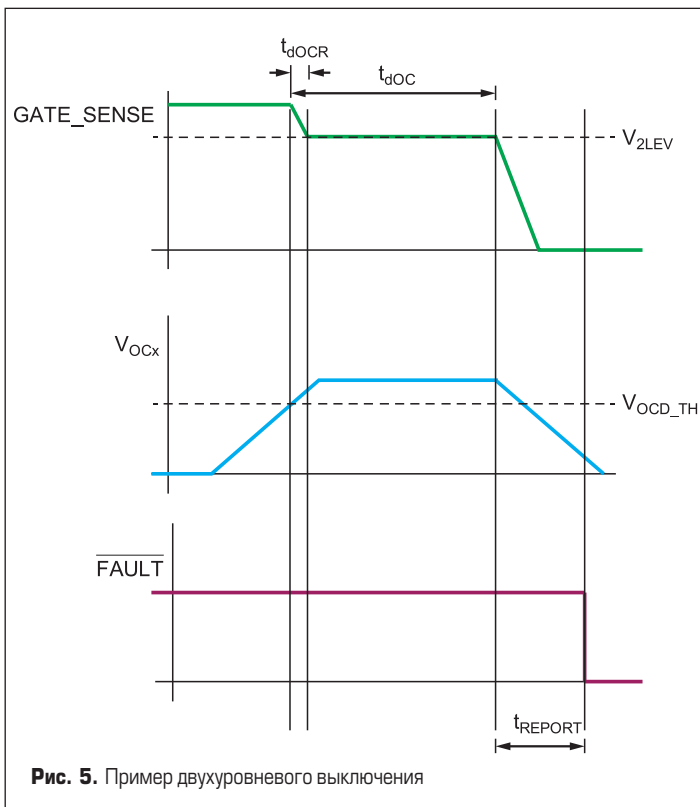


Рис. 5. Пример двухуровневого выключения

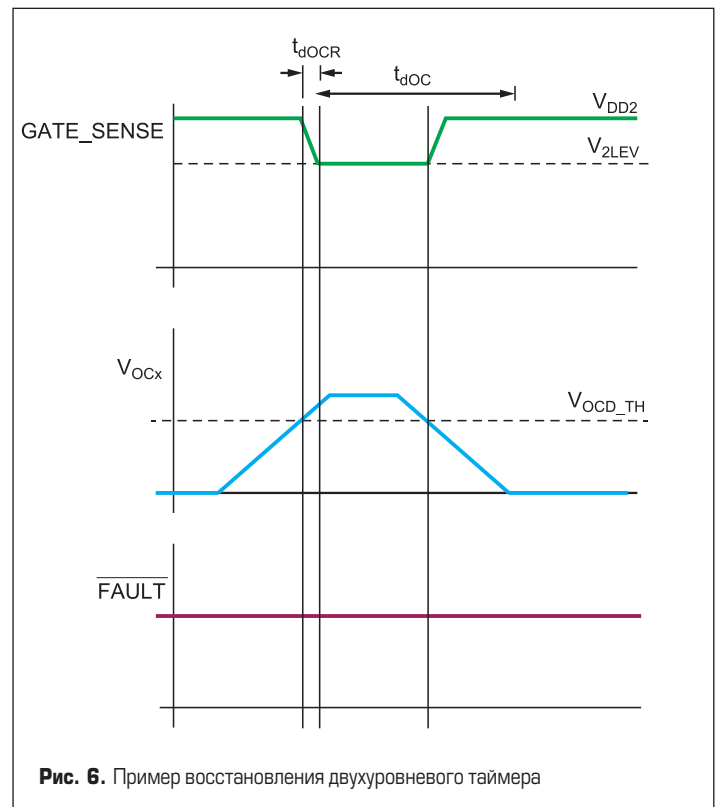


Рис. 6. Пример восстановления двухуровневого таймера

**Высокоскоростная система двухуровневого отключения**

Если напряжение на входах OC1 или OC2 превысит заданный порог (перегрузка по току), двухуровневая схема отключения установит низкий уровень напряжения на затворе IGBT. Внутренний полевой МОП-транзистор с *n*-каналом (рис. 2) открывается, и напряжение на выводе GATE\_SENSE уменьшается до 11,9 В (типичное значение). Время, необходимое выходному сигналу от момента обнаружения перегрузки по току до снижения напряжения до 11,9 В, обозначено как  $t_{dOCR}$  (рис. 5). По истечении времени обнаружения ( $t_{dOC}$ ) неисправность регистрируется, и сигнал об этом (FAULT) передается на первичную сторону (рис. 5).

Если за время  $t_{dOC}$  напряжение  $V_{OcX}$  упадет ниже порогового значения напряжения  $V_{OCD\_TH}$ , то внутренний МОП-транзистор с *p*-каналом (PMOS), сток которого подключен к источнику питания  $V_{DD2}$ , открывается и напряжение на затворе IGBT возрастает, а таймер сбрасывается (рис. 6) и сигнал FAULT не формируется.

**Компенсация влияния емкости Миллера**

ADuM4138 формирует управляющий сигнал на выводе MILLER\_OUT для уменьшения скачков напряжения на затворе IGBT из-за влияния емкости Миллера во время отключения IGBT. Когда входной стробирующий сигнал вызывает отключение IGBT (низкий уровень), сигнал MOSFET на выводе MILLER\_OUT отключается. Когда напряжение на выводе GATE\_SENSE падает ниже 2 В (типичное значение), схема управления открывает внутренний МОП-транзистор с каналом *p*-типа и вывод MILLER\_OUT соединяется с общим проводом вторичной стороны GND2, создавая второй путь для тока затвора IGBT. Уровень нуля на выводе MILLER\_OUT сохраняется до тех пор, пока входной сигнал не изменится с низкого на высокий. На рис. 7 показан пример формы сигнала на затворе IGBT-транзистора при различных значениях сигнала на входе драйвера ADuM4138.

**Отключение драйвера из-за перегрева**

Преобразователь ADuM4138 содержит две системы отключения при перегреве (TSD). Если внутренняя температура вторичной стороны ADuM4138 превышает +150 °С, ADuM4138 формирует сигнал ошибки TSD, и посредством мягкого отключения напряжение на затворе IGBT устанавливается равным нулю. Система TSD сохраняет

нулевое напряжение на затворе, пока температура кристалла не упадет до +130 °С.

Если температура первичной стороны превышает +154 °С, отключаются все узлы первичной стороны, обратногоходовой преобразователь и узлы вторичной стороны. Система TSD восстанавливает работоспособность драйвера при понижении внутренней температуры первичной стороны устройства до +135 °С.

Основной причиной перегрева является слишком большая нагрузка из-за высокой температуры окружающей среды, как правило, вторичной стороны драйвера.

**Рас рассеяние мощности**

При управлении затвором IGBT-драйвер рассеивает значительную мощность. Это может привести к перегреву. Затвор IGBT представляет собой емкостную нагрузку. Из-за емкости Миллера и других факторов обычно для практических расчетов входную емкость ( $C_{ISS}$ ) IGBT умножают на пять, чтобы получить приблизительное значение

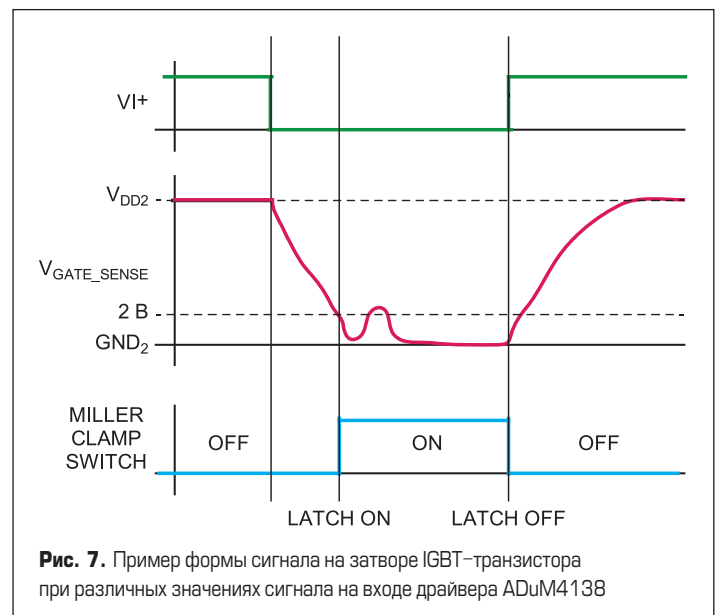
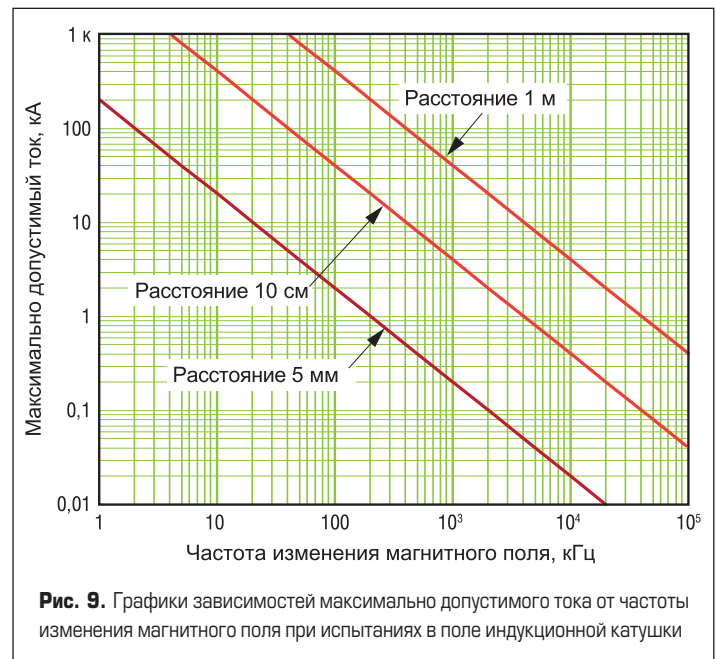
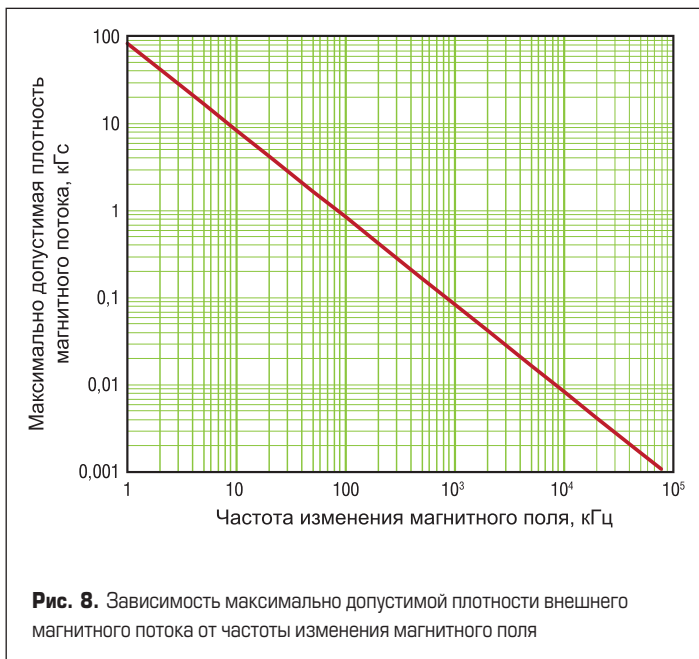


Рис. 7. Пример формы сигнала на затворе IGBT-транзистора при различных значениях сигнала на входе драйвера ADuM4138



для аппроксимации нагрузки драйвера. При этом значении общая расчетная рассеиваемая мощность ( $P_{DISS}$ ) в системе определяется уравнением:

$$P_{DISS} = C_{EST} \times (V_{DD2})^2 \times f_s$$

где  $C_{EST} = 5C_{ISS}$ ;  $V_{DD2}$  — напряжение питания вторичной стороны;  $f_s$  — частота переключения IGBT.

Рассеивается мощность на транзисторах внутренних ключей и на сопротивлении затвора  $R_{GON}$  и  $R_{GOFF}$ . Рассчитать рассеиваемую мощность можно по формуле:

$$P_{DISS\_ADuM4138} = P_{DISS} \times 0,5 \left[ \frac{R_{DSON\_P}}{R_{GON} + R_{DSON\_P}} + \frac{R_{DSON\_N}}{R_{GOFF} + R_{DSON\_N}} \right] + P_{QUIESCENT}$$

где  $P_{DISS\_ADuM4138}$  — рассеиваемая мощность ADuM4138;  $R_{GON}$  — сопротивление IGBT-затвора при включенном транзисторе;

$R_{GOFF}$  — сопротивление IGBT-затвора при выключенном транзисторе;  $P_{QUIESCENT}$  — мощность, потребляемая в режиме покоя.

Температуру кристалла можно рассчитать по формуле:

$$T_{ADuM4138} = \theta_{JA} \times P_{DISS\_ADuM4138} + T_{AMB}$$

где  $\theta_{JA} = 62,4$  (в корпусе RN-28-1 на четырех-слойной печатной плате);  $T_{AMB}$  — температура окружающей среды.

### Устойчивость к внешним магнитным полям

ADuM4138 устойчив к внешним магнитным полям. Ограничение помехоустойчивости магнитного поля ADuM4138 устанавливается условием, при котором индуцированное напряжение в приемной катушке трансформатора достаточно велико, чтобы привести к сбоям в работе драйвера. На рис. 8 приведен график зависимости максимально допустимой плотности внешнего магнитного потока от частоты изменения магнитного поля, а на рис. 9 — графики зависимостей максимально допустимого тока от частоты изменения магнитного поля при испытаниях в поле индукционной катушки.

Все изоляционные материалы в конечном итоге разрушаются при воздействии высокого напряжения в течение достаточно длительного времени. Скорость ухудшения параметров изоляции зависит от характеристик напряжения, приложенного к изоляции. В дополнение к испытаниям, проводимым регулирующими органами, компания Analog Devices, с целью

повышения надежности, проводит собственное ускоренное тестирование для определения срока службы изоляции в ADuM4138, используя уровни напряжения выше номинального постоянного рабочего напряжения.

Драйвер может найти применение в автомобильной, аэрокосмической, нефтедобывающей, энергетической и других отраслях, где требуется надежное преобразование энергии, а именно в интеллектуальных силовых модулях, электроприводах, инверторах, импульсных источниках питания и т. п.

Компания Analog Devices выпускает оценочную плату EVAL-ADuM4138EBZ [2] и программное обеспечение для работы с ней [3]. Внешний вид платы приведен на рис. 10.

### Использование SPI

Оценочная плата ADuM4138 соединяется с ПК с помощью кабеля USB-SDP-CABLEZ (рис. 11). В [2] приведены указания по установке перемычек в таком режиме работы.

В качестве альтернативы вместо ПК можно подключить любое другое устройство с интерфейсом SPI для программирования платы. Для этого предусмотрены штыри оценочной платы P18–P21, обозначение которых нанесено на плате. В [2] даны подробные рекомендации по работе с платой и ее программированию.

Подробнее ознакомиться с характеристиками изолированного драйвера затвора ADuM4138 и другими ИМС аналогичного назначения можно на сайте компании Analog Devices.

### Литература

1. [www.analog.com/media/jp/technical-documentation/data-sheets/ADuM4138\\_jp.pdf](http://www.analog.com/media/jp/technical-documentation/data-sheets/ADuM4138_jp.pdf) [www.analog.com/media/en/technical-documentation/user-guides/EVAL-ADuM4138EBZ-UG-1194.pdf](http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/user-guides/EVAL-ADuM4138EBZ-UG-1194.pdf)
2. [www.analog.com/media/en/evaluation-boards-kits/evaluation-software/ADuM4138\\_eval\\_program\\_01.zip](http://www.analog.com/media/en/evaluation-boards-kits/evaluation-software/ADuM4138_eval_program_01.zip)

