



лельными диодами D1 и D2. Этот полумост подает ток в нагрузку – трансформаторы или электромашин. Нагрузка получает питание от источника в шине постоянного тока, когда транзистор T1 верхнего плеча находится во включенном состоянии (см. рис. 2а). Если T1 выключен, ток нагрузки поступает в нижнее плечо полумостовой схемы, и диод D2 проводит ток нагрузки (см. рис. 2б). Паразитные элементы показаны только в нижней части коммутационного тракта. Схожие паразитные индуктивности физических присутствуют и в верхнем плече.

Очевидно, что на элементах  $L_{OC}$ ,  $L_{OE}$  и шунте  $R_{SH}$  падает напряжение переходного процесса. Возникает также эффект прямого восстановления на диоде D2. В результате на выводе VS драйвера затвора появляется отрицательное напряжение. Поскольку его амплитуда может достигать нескольких десятков вольт, от ИС драйвера требуется высокая устойчивость к такому воздействию. Кроме того необходимо, чтобы эта микросхема была надежно защищена от отрицательного напряжения на других выводах, например на сигнальных входах LIN и HIN, когда напряжение на затворе становится меньше потенциала земли. Длительность таких переходных процессов зависит от времени, которое требуется на то, чтобы ток через IGBT T1 в верхнем плече стал протекать через диод D2. Как правило, эти отрицательные напряжения в переходном процессе быстро исчезают спустя это время.

Мы обсудим результаты исследования полумостовых драйверов для управления затвором, изготовленных разными производителями. Основные рабочие параметры этих ИС представлены в таблице 1. Главное отличие между ними в том, что одна из протестированных микросхем изготовлена на основе технологии КНИ, а остальные две созданы по технологии объемного кремния (bulk silicon).

Из таблицы 1 видно, что каждое из устройств защищено от импульсов отрицательного напряжения разных амплитуд и длительности. Задокументированные результаты этих испытаний позволяют установить предельные значения параметров этих микросхем и возможные отклонения от нормальной работы драйверов затворов под воздействием статических и динамических (импульсных) отрицательных напряжений.

СТАТИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ

Восприимчивость драйверов для управления затвором к отрицательным

Таблица 1. Параметры протестированных полумостовых драйверов

	2EDL05N06PF от Infineon [1]	Устройство 1	Устройство 2
Технология	КНИ	объемный кремний	объемный кремний
уровень изоляции	600 В		
метод изоляции	схема сдвига уровня		
$V_{s\_tran}$ ( $t < 500$ нс), В	-50	нет данных*	
$V_{static}$ , В	-0,5	-0,3	
бутстрепная цепь	собственный диод	собственные FET	внешний диод
$I_{Opk+}$ , А	0,36	0,4	0,35 (мин. – 0,25)
$I_{Opk-}$ , А	0,70	0,65	0,65 (мин. – 0,5)

\* Данные отсутствуют в соответствующих технических описаниях.

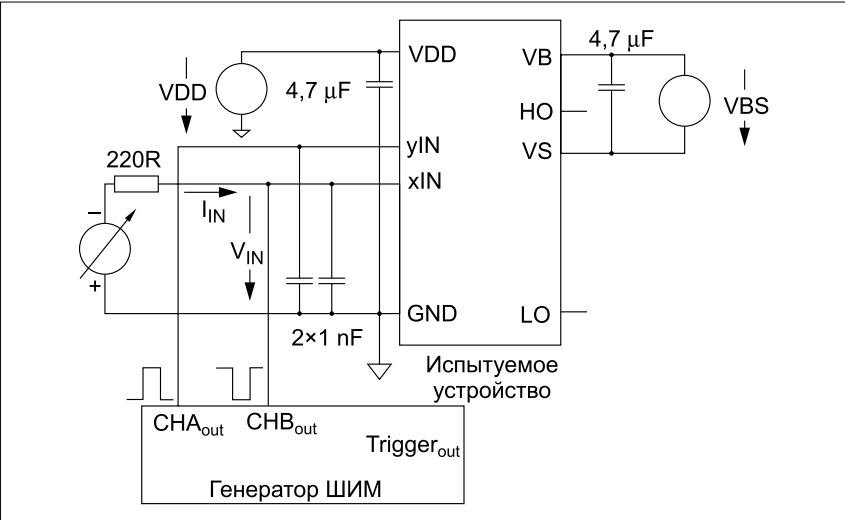


Рис. 3. Упрощенная схема для статических испытаний

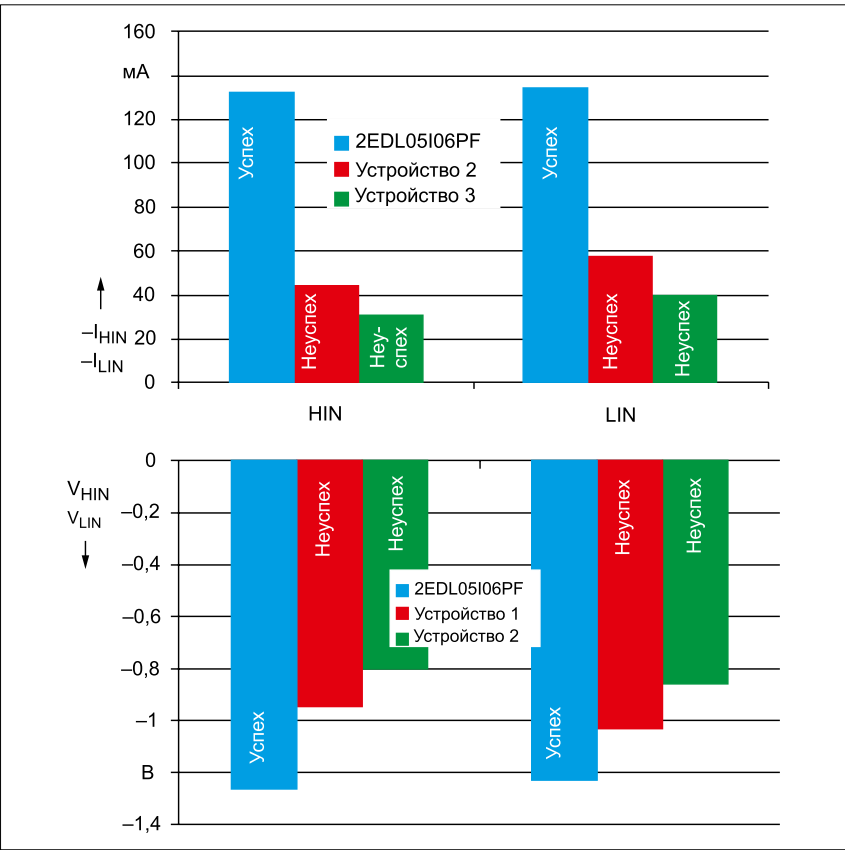


Рис. 4. Результаты испытаний ИС отрицательным напряжением в статическом режиме

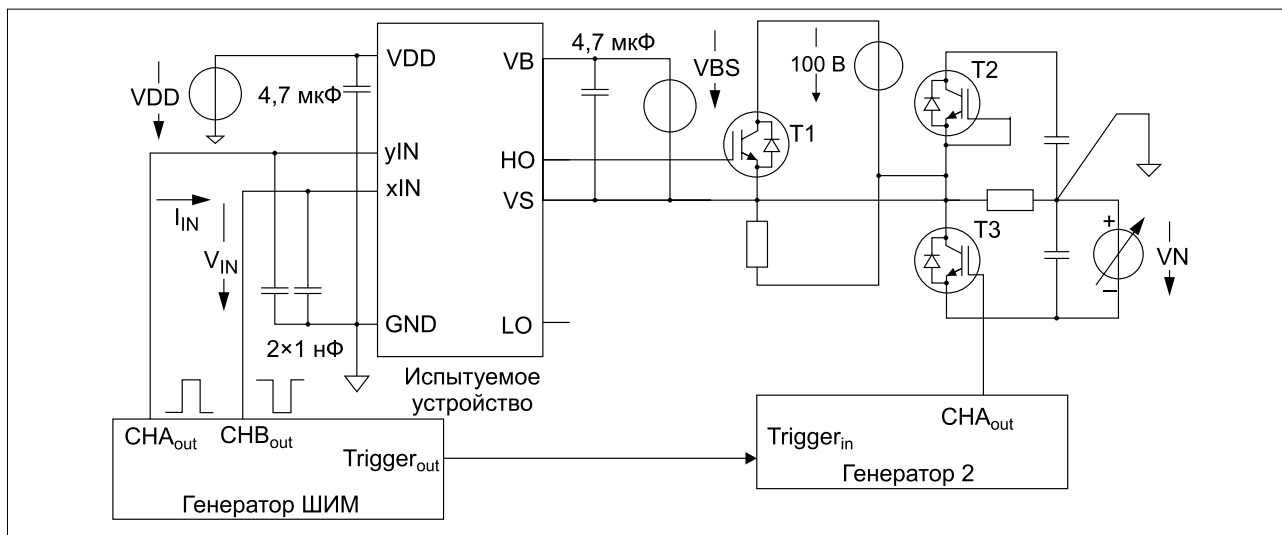


Рис. 5. Упрощенная схема для динамических испытаний

напряжениям изучалась с помощью статических и динамических испытаний, чтобы смоделировать все возможные случаи, происходящие на практике. Микросхемы могут подвергнуться воздействию статического напряжения в случае неисправного функционирования других цепей. Кроме того, на ИС драйверов периодически воздействуют последовательности коротких импульсов отрицательных напряжений переходных процессов. Напряжение может достигать большой амплитуды в несколько десятков вольт, а длительность импульсов, как правило, составляет несколько сотен наносекунд. Появление повторяющихся последовательностей таких импульсов на выводе VS драйвера затвора в нормальном режиме работы схемы связано с наличием паразитных элементов (см. рис. 2). Чтобы предотвратить повреждение силовых устройств, ИС драйверов должны работать в нормальном режиме без сбоев.

#### Испытательная схема

На рисунке 3 показана схема, с помощью которой проводились статические

испытания. Питание ИС осуществлялось от 15-В источника. Критерием прохождения этого теста являлась бесперебойная передача непрерывно поступающих ШИМ-сигналов на соответствующий вывод. Возникновение состояния защелкивания на любом выводе свидетельствовало о непрохождении испытания.

#### Результаты испытаний

В процессе статического испытания отрицательное напряжение подавалось на выводы для входных сигналов устройства (см. рис. 3), и отслеживалось поведение выводов HO и LO. Отрицательное напряжение открывает цепь между землей и входными выводами либо с помощью прямосмещенных *p-n*-переходов при использовании технологии объемного кремния, либо с помощью дискретных ограничительных диодов в случае использования ИС на основе КНИ.

На рисунке 4 показаны условия непрохождения испытания. Единственным устройством, которое прошло это испытание, стала микросхема 2EDL05I06PF. На выводы HIN и LIN этого устройства подавалось напряжение

$V_{IN} = -1,25$  В, а входной ток  $I_{IN}$  превысил значение  $-130$  мА. Испытание было остановлено во избежание перегрева ограничительного диода.

У устройства 2 произошел отказ, как только напряжение  $V_{IN}$  достигло  $-1,0$  В. Режим отказа возникал в виде произвольного защелкивания. Более того, защелкивался даже нетестируемый канал: вывод HO защелкивался, когда испытывался вывод LIN, и наоборот.

Устройство 3 тоже вело себя нестабильно при напряжении  $V_{IN} = -0,8$  В. Входной ток составил всего  $-40$  мА. В результате выход вел себя так же, как при испытании устройства 2.

#### ДИНАМИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ

##### Испытательная схема

Динамические испытания выполнялись с использованием схемы, показанной на рисунке 5. Импульсы отрицательного напряжения высокой амплитуды и малой длительности подавались непосредственно на вывод VS испытываемого устройства. На вход этого устройства поступали сигналы от ШИМ-генератора. Питание микросхемы осуществлялось от двух 15-В источников VDD и VBS, обеспечивавших нормальную работу схемы. Второго источника питания (VBS) понадобился потому, что нижний ключ при такой схеме испытания невозможно использовать для бутстрепной цепи и на работу ИС он не влияет.

Вместо нижнего ключа использовался подтягивающий резистор, с помощью которого на вывод VS подавалось отрицательное напряжение в те интервалы времени, когда нижний ключ находился в замкнутом состоянии. ШИМ-генератор запускался вручную на подачу последовательности девяти импульсов. Пятый импульс в этой последовательности запускал второй

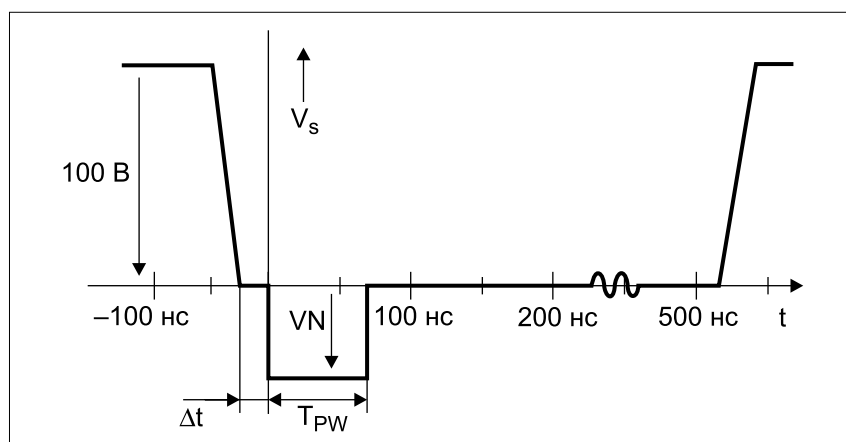


Рис. 6. Конфигурация тестовых импульсов отрицательного напряжения при разомкнутом верхнем ключе

генератор для управления отрицательным напряжением. Эта синхронизация выполнялась таким образом, чтобы генерация отрицательных импульсов осуществлялась при разомкнутом верхнем ключе. Во включенном состоянии IGBT-транзистора T1 (см. рис. 5) напряжение VS ограничивалось напряжением 100 В шины постоянного тока. Таким образом, величина отрицательного напряжения была ограничена. Амплитудой отрицательных импульсов, которая изменялась в диапазоне  $-10 \dots -60$  В, управлял источник напряжения VN, а их длительностью (50–600 нс) – генератор импульсов.

Конфигурация тестовых импульсов отрицательного напряжения показана на рисунке 6. Импульс отрицательного напряжения подавался сразу же после размыкания верхнего ключа. Такая конфигурация в наибольшей мере соответствует случаю, когда импульсы отрицательного напряжения поступают на вывод VS в указанный момент времени в результате коммутации силовых устройств и эффектов демпфирования. Задержка  $\Delta t$ , а также ширина отрицательного импульса  $T_{PW}$  (см. рис. 6) изменяются в широком диа-

Таблица 2. Результаты испытаний устройства 2EDL05I06PF

PW, нс Vs, В	50	100	200	300	400	500	600
-10							
-20							
-30	+	+	+	+	+	+	+
-40							
-50							
-60							

Таблица 3. Результаты испытаний устройства 2

PW, нс Vs, В	50	100	200	300	400	500	600
-10	+	+	+	+	+	+	+
-20	+	+	+	+	+	отказ	отказ
-30	отказ	отказ	отказ	отказ	отказ		
-40	отказ	отказ	отказ				
-50	отказ	отказ					
-60	отказ						

пазоне, когда испытуемое устройство подвергается воздействию отрицательных импульсов уже в отсутствие переходных процессов. Такой диапазон был выбран для того, чтобы смоделировать поведение устройства

в тех условиях, когда отрицательные импульсы генерируются в достаточно удаленных участках силовой цепи, например в цепи других фаз.

Условием прохождения всех испытаний считалась бесперебойная пере-

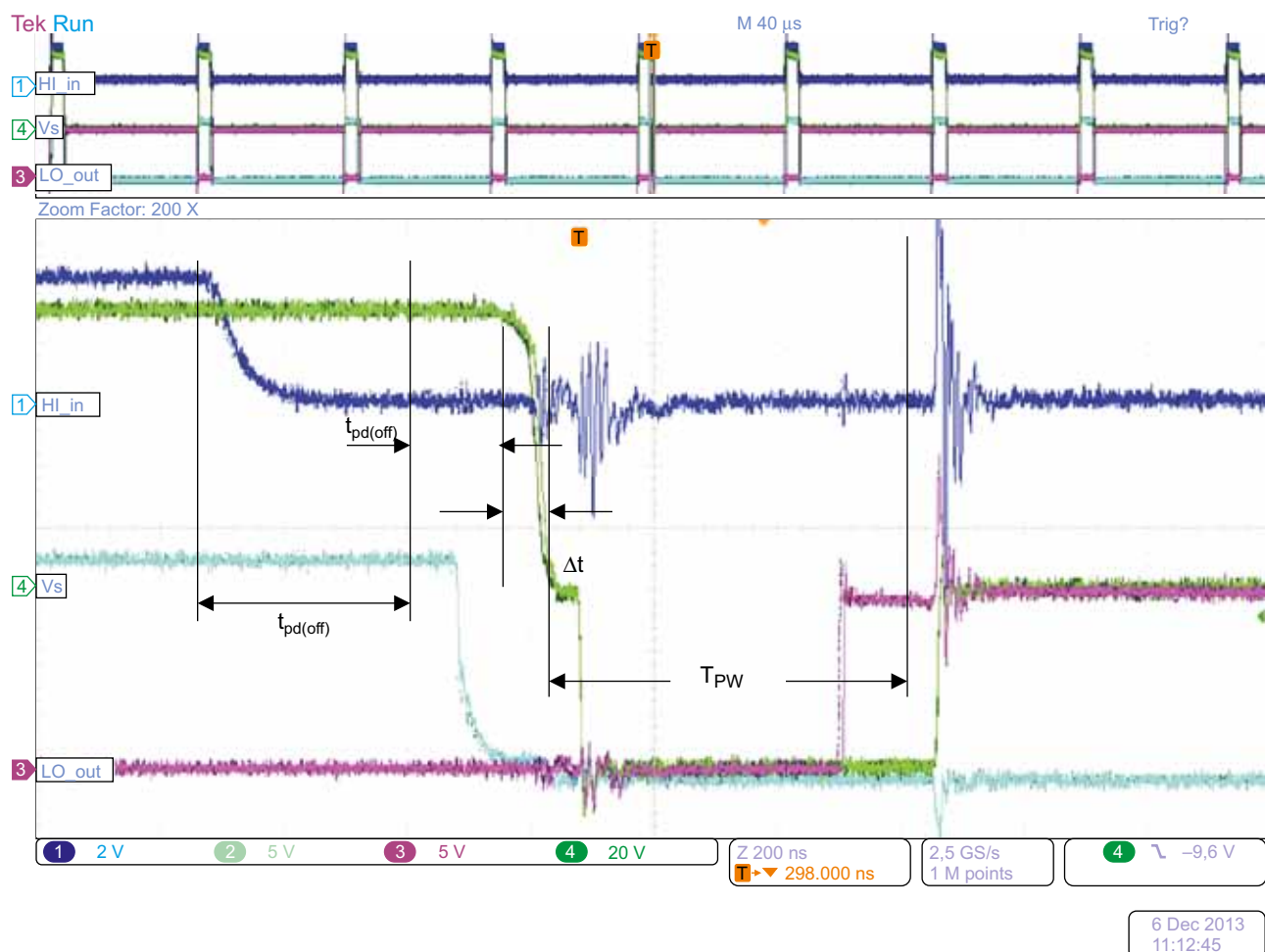


Рис. 7. Импульс отрицательного напряжения  $-30$  В длительностью  $50$  нс (вверху). Кривая синего цвета –  $V_{in}$ ; бирюзового цвета –  $V_{HO}$ ; красного –  $V_{LO}$ ; зеленого –  $V_{VS}$

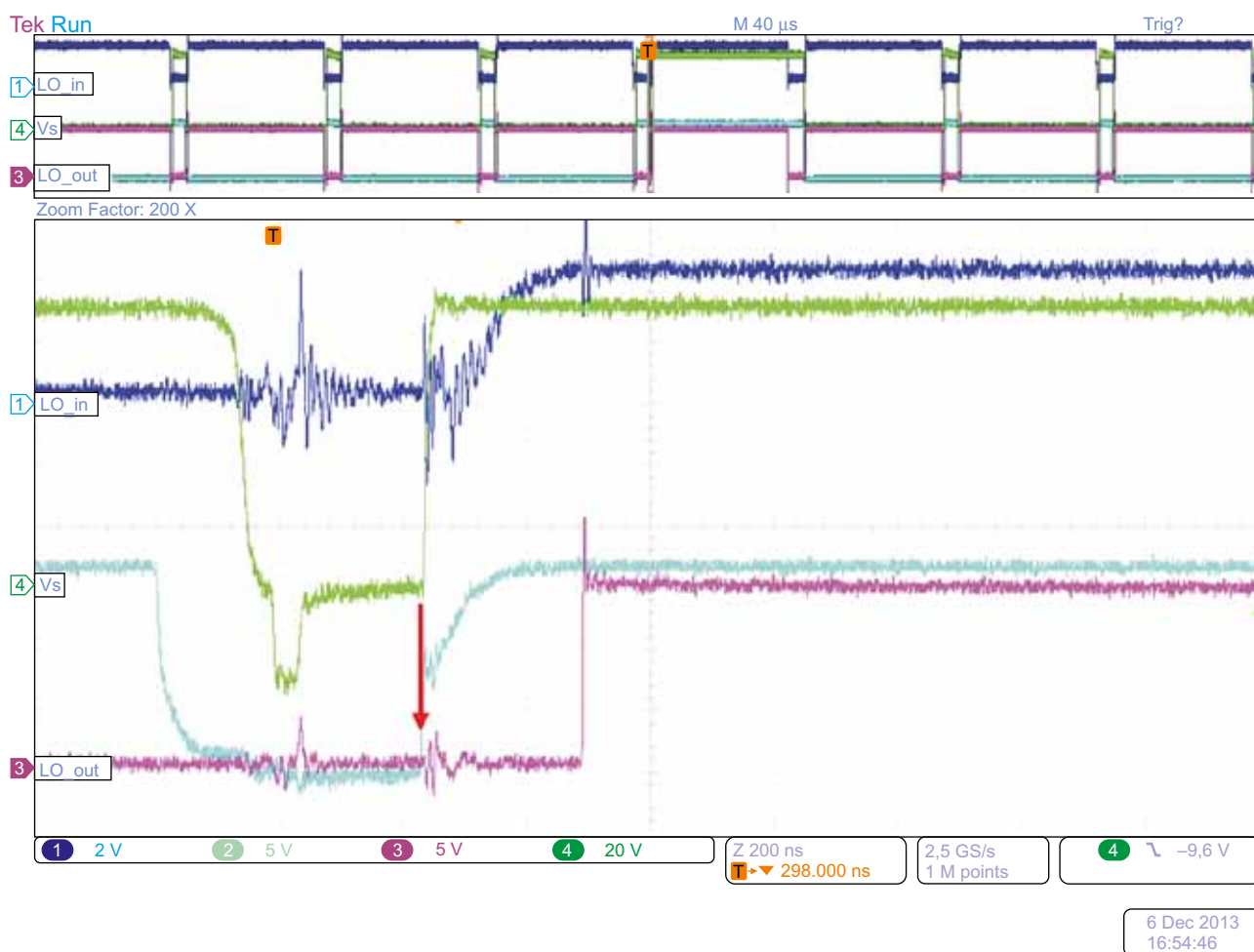


Рис. 8. Сигналы, полученные при воздействии импульсов отрицательного напряжения с амплитудой  $-30$  В и длительностью  $50$  нс (вверху). Кривая синего цвета –  $V_{LIN}$ , бирюзового –  $V_{НО}$ , красного –  $V_{LO}$ , зеленого –  $V_{VS}$

Таблица 4. Результаты испытаний устройства 3

$V_s$ , В	PW, нс	50	100	200	300	400	500	600
-10		+	+	+	+	+	+	+
-20		+	+	+	+	+	+	+
-30		+	+	+	+	+	+	+
-40		+	+	+	+	+	+	+
-50		+	+	+	+	+	+	отказ
-60		+	+	+	+	+	отказ	отказ

дача входного ШИМ-сигнала с входных выводов LIN и HIN на выходы LO и NO, соответственно.

#### Результаты испытаний

Устройство 2EDL05I06PF прошло все испытания без видимых трудностей. Результаты этих испытаний представлены в таблице 2.

Выходной сигнал в верхнем плече появлялся после задержки на прохождение  $trp$  (off) вслед за выключением ИС. При этом напряжение на эмиттере уменьшалось из-за подтягивающего резистора, подключенного к эмиттеру транзистора T1 (см. рис. 5). Импульс отрицательного напряжения длительностью  $TPW$  появлялся спустя время  $\Delta t$

сразу после выключения транзистора T1. В работе этого драйвера не было обнаружено отказов. На рисунке 7 представлена последовательность отрицательных импульсов амплитудой  $-30$  В и длительностью  $50$  нс.

Устройство 2 вело себя вполне предсказуемо при отрицательных импульсах с амплитудой более  $-20$  В и длительностью менее  $400$  нс (см. табл. 3). При меньших амплитудах и большей длительности логическое состояние выхода НО менялось с низкого на высокое, даже если этого не требовал входной сигнал (см. рис. 8).

Отказы в работе драйвера устройства 3 наблюдались, когда величина импульсов отрицательного напряжения стала

меньше  $-50$  В, а длительность импульсов превысила  $500$  нс (см. табл. 4). При этом сигналы имели вид, схожий с сигналами на рисунке 8. Таким образом, можно сделать вывод о том, что эта ИС драйвера надежнее в эксплуатации, чем устройство 2, но она проигрывает в сравнении с микросхемой 2EDL05I06PF.

#### ВЫВОДЫ

Мы сравнили результаты испытаний трех микросхем полумостовых драйверов со сдвигом уровня. Эти ИС трех разных производителей подвергались воздействию отрицательного напряжения в статическом и динамическом режимах, чтобы смоделировать разные практические случаи. Результаты показали, что ИС 2EDL05I06PF драйвера для управления затвором, созданная на основе технологии КНИ, превзошла микросхемы на базе технологии объемного кремния по устойчивости к воздействию отрицательных напряжений. 

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Infineon Technologies. 2EDL05N06PF. Datasheet. Infineon Technologies.