

# Параметры и характеристики планарных NPT+ IGBT

## с повышенной инжекцией на напряжение 1700 В

**В статье представлены результаты разработки отечественных кристаллов NPT+ IGBT с рабочей площадью 185 мм<sup>2</sup> на ток 100 А и напряжение 1700 В для применения в силовых модулях с коммутируемой мощностью 0,15–4 МВт. Приведены параметры и характеристики единичных кристаллов IGBT, измеренных с учетом реальных условий эксплуатации в инверторах напряжения на индуктивную нагрузку. Дается сравнение с зарубежными аналогами.**

**Павел Машевич, к. т. н.**

mashevich@angstrem.ru

**Валентин Мартыненко**

martin@moris.ru

**Татьяна Крицкая**

kritskaya@angstrem.ru

**Вячеслав Мускатиньев**

sl\_167@rambler.ru

**Алексей Бормотов**

**Михаил Тогаев**

support-nicpp@saransk-com.ru

### Введение

Силовые модули на основе биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT) и частотных диодов (FRD) являются сегодня доминирующими электронными компонентами в преобразователях электрической энергии различного назначения. Данные приборы выпускаются с рабочим напряжением 600–6500 В. В мультисборках, при использовании параллельных соединений, рабочие токи модулей могут достигать несколько тысяч ампер. Эти напряжения и токи закрывают практически все области применения IGBT — от бытовой техники до мощных тяговых приводов и энергетического оборудования для передачи и компенсации электрической энергии.

Важными элементами в указанном диапазоне напряжений являются IGBT-модули с напряжением 1700 В. Они широко используются в высоковольтных сетях переменного и постоянного тока с напряжением соответственно 800–1250 В, в тяговых приводах городского транспорта (метро, троллейбусы, трамваи), системах электродвижения надводных и подводных судов, железнодорожных и большегрузных автомобильных транспортных средствах, преобразователях солнечных и ветровых станций, источниках бесперебойного питания, резонансных инверторах, в электросварке и других применениях.

Многим российским разработчикам этого оборудования (в том числе и специального) требуются высоконадежные IGBT-модули на напряжение 1700 В с отечественной комплектацией. Это позволяет иметь гарантированные поставки электронных компонентов, не зависящие от мировой конъюнктуры и не отягощенные таможенными расходами. При поддержке Минпромторга РФ компании «Ангстрем» и «Электровыпрямитель», в рамках соглашения между предприятиями о стратегическом сотрудничестве в сфере силовой электроники и системотехники, проводят работы по разработке и созданию производства конкурентоспособных IGBT- и FRD-кристаллов и силовых модулей на их основе. В рабо-

те [1] представлены результаты разработки первых IGBT-модулей на напряжение 1200 В, изготовленных полностью на российских кристаллах IGBT и FRD. В данной статье представлены основные параметры и характеристики нового IGBT с большой площадью кристалла с напряжением 1700 В разработки «Ангстрем». Полученные результаты демонстрируют возможность дальнейшего увеличения рабочего напряжения и улучшения характеристик отечественных IGBT-модулей за счет оптимизации структуры транзисторов и использования прецизионной ДМОП-технологии.

### Технология изготовления

При изготовлении кристаллов IGBT с напряжением 1700 В использовались тонкие пластины из однородного радиационно легированного кремния, на которых с помощью имплантации акцепторных и донорных примесей формировались биполярные и полевые области транзисторов. Для производства IGBT была выбрана технология NPT+ с планарными MOS-управляемыми микроячейками, как наиболее простая, обеспечивающая необходимые статические и динамические характеристики, прямоугольную SOA, высокую устойчивость к лавинным перегрузкам и коротким замыканиям, низкий уровень электромагнитных помех.

Для снижения статических потерь в концепции NPT+ используется дополнительный *n*-слой вблизи каждой MOS-ячейки, который вызывает накопление положительно заряженных носителей вблизи *p*-слоя и увеличение концентрации носителей со стороны эмиттера [2]. Это приводит к повышенной инжекции электронов, улучшению модуляции проводимости высокоомной *n*-базы и к снижению напряжения насыщения  $V_{CEon}$ .

На рис. 1а показано поперечное сечение кристалла NPT+ IGBT со стандартными размерами транзисторных микроячеек и кольцевым *n*-слоем. Для снижения входной емкости была локально увеличена толщина подзатворного окисла.

На рис. 16 показан единственный кристалл NPT+ IGBT на ток 100 А, напряжение 1700 В. Сверху расположены девять эмиттерных секций, объединяющих более 150 тысяч транзисторных микроячеек. В правом верхнем углу расположена металлизированная площадка для контакта с затвором. С обратной стороны расположен p-коллектор. В структуру IGBT-кристалла между металлизацией и поликремневым затвором интегрирован входной резистор с сопротивлением 5 Ом для уменьшения высокочастотных осцилляций, связанных с несинхронным переключением параллельно соединенных кристаллов IGBT в мультисборках.

**Сборка в модули**

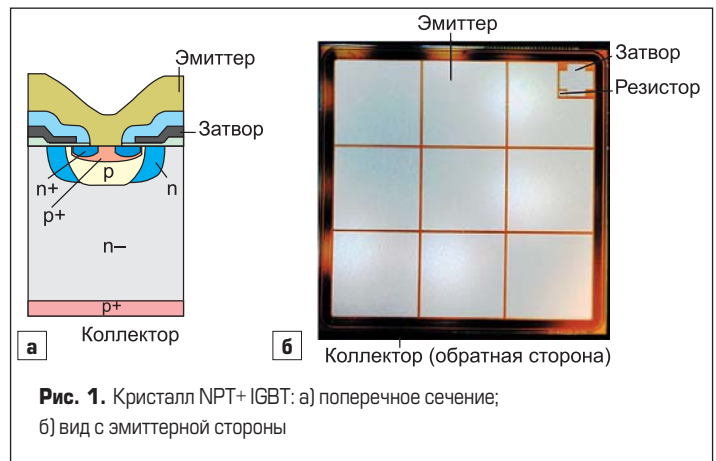
Сборка исследуемых кристаллов в модули осуществлялась по стандартному технологическому процессу на производственной линии ОАО «Электровыпрямитель». Для максимального приближения условий испытаний исследуемых образцов IGBT к реальным режимам работы на индуктивную нагрузку, которые обычно имеют место в инверторах напряжения, IGBT-модули изготавливались по схеме полумоста. С этой целью был использован унифицированный корпус М13 размером 94×34×30 мм, в котором располагались два кристалла NPT+ IGBT и два кристалла FRD на 1700 В, включенные относительно друг друга антипараллельно, по одной паре в каждом ключе. Кристаллы NPT+ IGBT разработаны на ток 100 А, поэтому в данной конструкции модулей реализуется система параметров 2×100 А/1700 В.

Зарубежный аналог собран в корпусе М14 размером 106×62×31 мм по схеме полумоста. В сборке использовались имеющиеся в наличии кристаллы NPT IGBT одного из европейских лидеров силовой электроники на ток 50 А, напряжение 1700 В. Для обеспечения системы параметров 2×100 А/1700 В в каждом ключе размещались по два кристалла в параллель. Суммарная рабочая площадь двух кристаллов аналога составляла 205 мм<sup>2</sup>.

**Статические параметры**

Для проверки коммутационной способности разработанных кристаллов NPT+ IGBT 100 А/1700 В и оценки их соответствия требованиям высоковольтных приводов были проведены измерения статических и динамических параметров, устойчивость к включению и выключению двойного тока (RBSOA), к току короткого замыкания при переключении с высокого напряжения (SCSOA). Были измерены входные, выходные и передаточные характеристики IGBT-модулей. Измерения и исследования параметров и характеристик NPT+ IGBT производились на внешних выводах силовых модулей. Измерения учитывали падение напряжения на кристаллах, металлизации керамических плат, алюминиевой проволоке, медных перемычках и силовых выводах. При измерениях использовалось оборудование компаний LEMSYS и «Электровыпрямитель», методы испытаний соответствовали международному стандарту IEC 60747-9. Исследования статических и динамических параметров кристаллов в IGBT-модулях проводились в предельных режимах при комнатной и повышенных температурах.

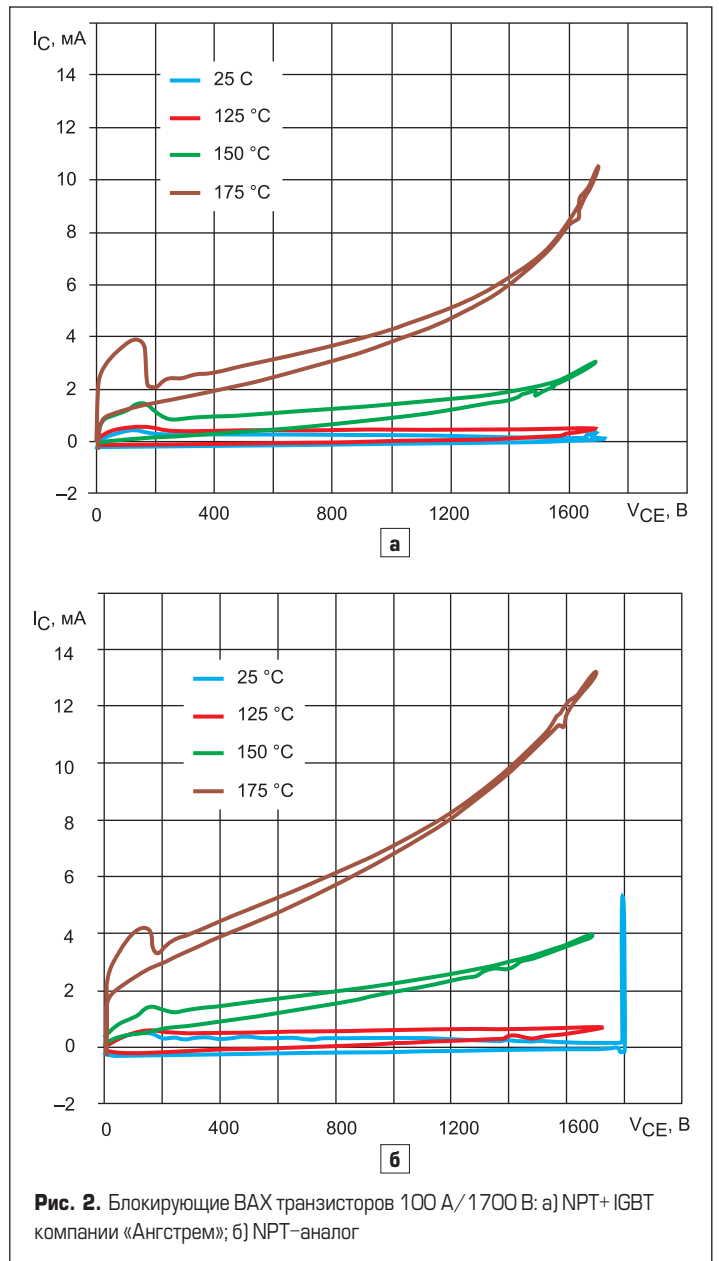
Одним из главных требований, предъявляемых к IGBT, является его способность блокировать напряжение в широком диапазоне температур с низкими и стабильными токами утечек. Возможность блокировать номинальное напряжение при высоких температурах определяет к тому же и нагрузочную способность IGBT-модуля. То есть, чем выше максимально допустимая температура, при которой модуль сохраняет свои запирающие свойства, тем большим током можно «нагрузить» прибор или же, не увеличивая ток, упростить систему охлаждения. Параметры и характеристики современных высоковольтных IGBT-модулей с напряжением 1700 В специфицируются при максимально-допустимой температуре +125 °С. Для некоторых применений, где предъявляются жесткие требования к габаритам и условиям охлаждения, максимальная температур кристалла может быть увеличена до +150 °С и выше. В связи с этим была проверена температурная зависимость блокирующих вольт-амперных характеристик (ВАХ) кристаллов NPT+ IGBT в диапазоне +25...+175 °С. На рис. 2а показаны типичные блокирующие ВАХ кристаллов NPT+ IGBT компании «Ангстрем», а на рис. 2б — кристаллов NPT-аналога при температурах +25, +125, +150 и +175 °С. По рис. 2 видно, что кристаллы IGBT



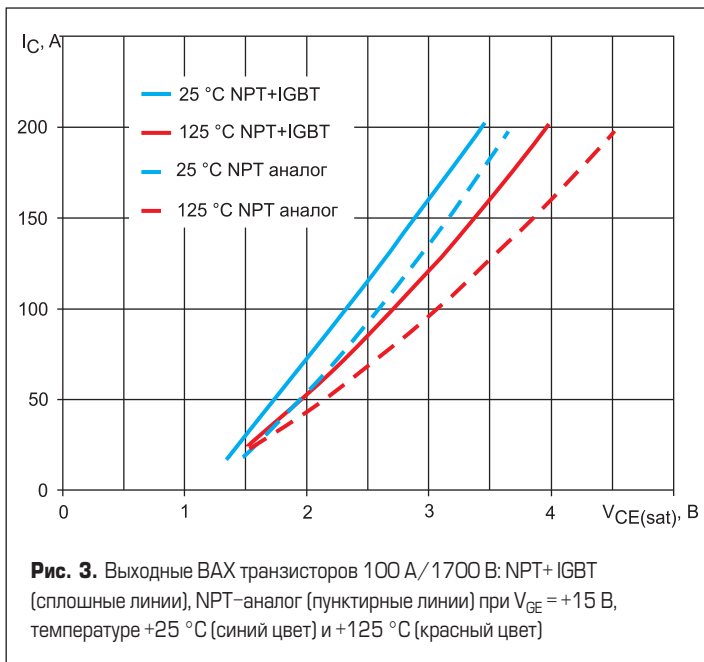
**Рис. 1.** Кристалл NPT+ IGBT: а) поперечное сечение; б) вид с эмиттерной стороны

«Ангстрем» и аналога сохраняют свои запирающие свойства вплоть до температуры +175 °С.

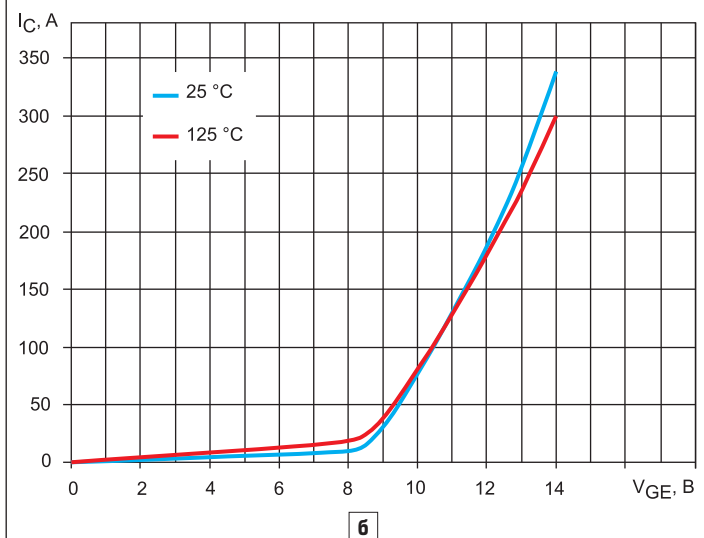
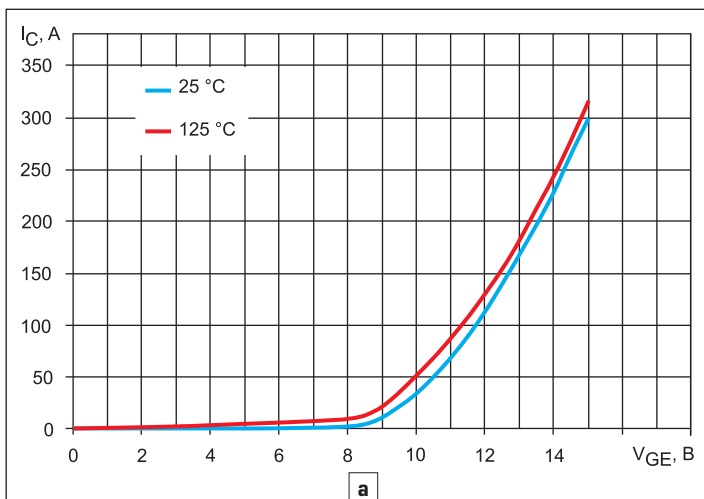
Следует отметить, что IGBT поддерживает высокое напряжение, когда напряжение на затворе  $V_{GE}$  ниже порогового напряжения  $V_{GE(th)}$ . При напряжении на затворе, превышающем пороговое напряжение, канал MOSFET открывается, а IGBT переходит в режим насыщения. В этом режиме транзистор способен пропускать большие по плотности токи с малым падением, причем прямые падения на-



**Рис. 2.** Блокирующие ВАХ транзисторов 100 А/1700 В: а) NPT+ IGBT компании «Ангстрем»; б) NPT-аналог



**Рис. 3.** Выходные ВАХ транзисторов 100 А/1700 В: NPT+ IGBT (сплошные линии), NPT-аналог (пунктирные линии) при  $V_{GE} = +15$  В, температуре +25 °С (синий цвет) и +125 °С (красный цвет)



**Рис. 4.** Передаточные характеристики транзисторов 100 А/1700 В: а) NPT+ IGBT компании «Ангстрем»; б) NPT-аналог (режим испытаний:  $V_{CE} = 50$  В,  $t_p = 10$  мкс,  $R_G = 15$  Ом)

при  $V_{GE} = 15$  В. На этом участке определяются параметрические значения тока коллектора и напряжения насыщения транзистора  $V_{CE(sat)}$ .

На рис. 3 представлены прямые ВАХ транзисторов NPT+ IGBT компании «Ангстрем» и NPT-аналога при  $V_{GE} = 15$  В и температурах +25 и +125 °С. По рис. 3 видно, что NPT+ IGBT, также как и NPT-аналог, имеют положительный температурный коэффициент напряжения насыщения в диапазоне токов 10–200 А. Это делает возможным легкое параллельное соединение, как кристаллов NPT+ IGBT, так и модулей на их основе без специального подбора IGBT. Из полученных результатов следует также, что NPT-аналог имеет более высокие напряжения насыщения в сравнении с новым NPT+ IGBT (например при токе 100 А — на 0,4 В).

На рис. 4 приведена передаточная характеристика IGBT компании «Ангстрем» и аналога. Она характеризует изменение тока коллектора транзистора при изменении напряжения на затворе и величину прямой транспроводимости  $g_{fs}$ , которая определяется, как производная функции  $I_C = f(V_{GE})$  при специфицированном коллекторном токе. При токе коллектора 100 А величины  $g_{fs}$  у транзисторов NPT+ IGBT и у NPT-аналога одинаковы и, в соответствии с приведенными на рис. 4 графиками, равны приблизительно 50 См.

Результаты измерений статических параметров транзисторов 100 А/1700 В NPT+ IGBT и NPT-аналога, собранных в IGBT-модули по схеме полумоста, представлены в таблице 1.

По рис. 2–4 и таблице 1 видно, что основные статические параметры IGBT-модулей, изготовленных на основе 1700-В кристаллов NPT+ IGBT компании «Ангстрем», практически совпадают с зарубежным NPT-аналогом, а по параметрам  $V_{CE(sat)}$  значительно превосходят его.

Улучшение  $V_{CE(sat)}$  было получено за счет повышения концентрации плазмы под эмиттерными ячейками путем введения в структуре NPT+ IGBT дополнительного *n*-слоя (рис. 1а). Он создает встроенный диффузионный потенциал (дырочный барьер), который значительно снижает дырочный ток перед входом в *p*-область. Это повышает эффективность эмиттера у всей верхней стороны структуры ячейки, которая включает в себя *p*-область, *n*-канал и обогащенный *n*-слой и образует эффективный *n*-эмиттер. Следствием этого является повышенная инжекция носителей в дрейфовую *n*-область, сильная модуляция проводимости *n*-области и низкие напряжения насыщения.

### Динамические параметры

Для измерений динамических параметров новых IGBT и их аналогов были использованы типовые методы и испытательное устройство, описанные в работе [1]. В данной схеме измерений при коммутации тока присутствовало взаимодействие между IGBT и соответствующим оппозитным диодом — так же, как и в реальных применениях, вследствие индуктивной нагрузки. В качестве оппозитного диода использовался FRD с мягкими характеристиками обратного восстановления, предназначенный для IGBT-модулей с напряжением 1700 В, изготовленный по известной технологии EmCon. Величина индуктивности рассеяния в измерителе динамических параметров с учетом внутренней индуктивности испытуемых IGBT-модулей составляла примерно 220 нГн. В этой же схеме измерений проводились испытания транзисторов на воздействие двойного тока, а также исследовались характеристики короткого замыкания.

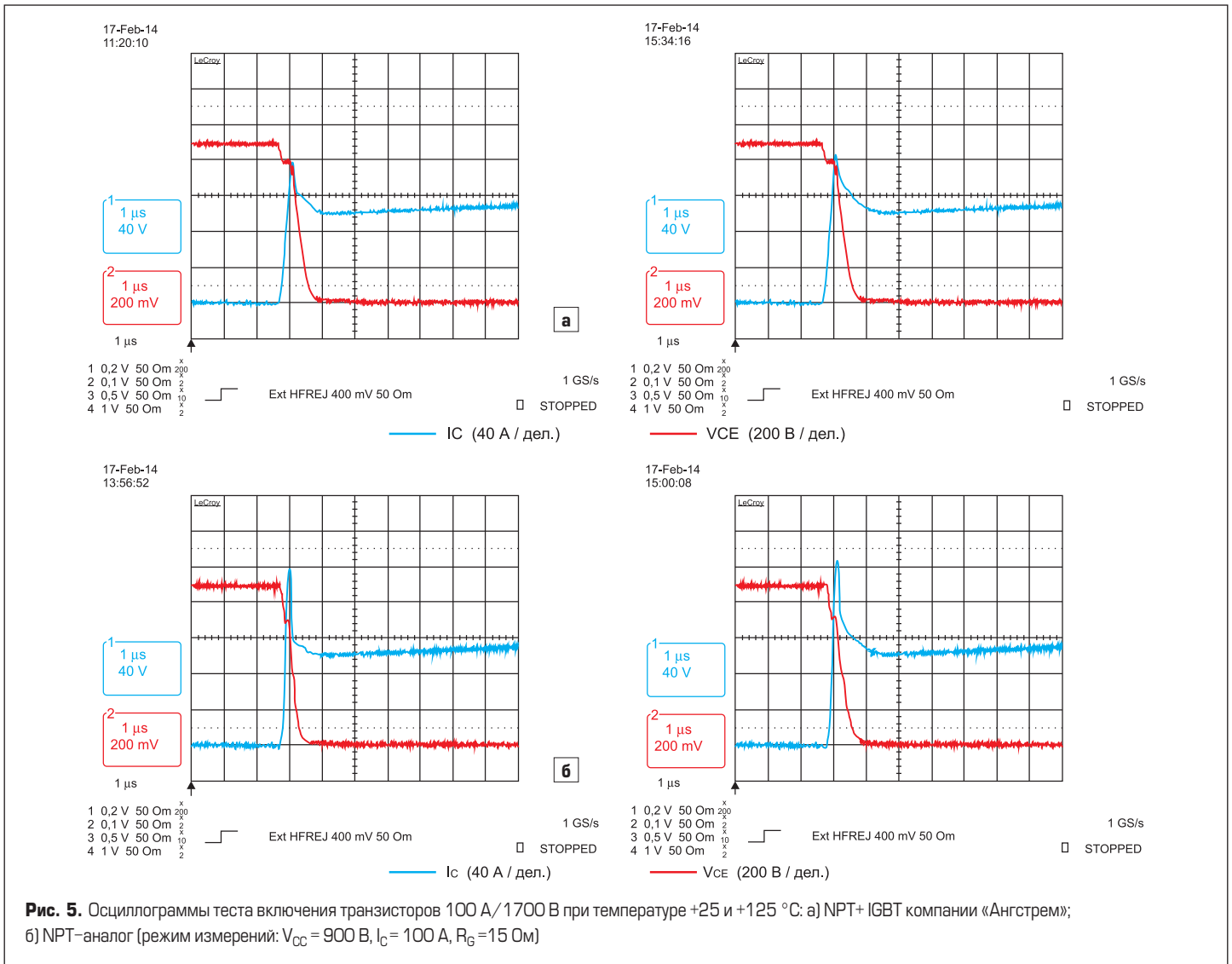
Были измерены переходные характеристики переключения модулей при напряжении шины постоянного тока 900 В, токе коллектора 100 А и температурах +25 и +125 °С. Величина сопротивления внешнего резистора  $R_G$  во всех опытах была равной 15 Ом.

Характеристики включения транзисторов 100 А/1700 В NPT+ IGBT и NPT-аналога при  $R_G = 15$  Ом и температурах +25 и +125 °С представлены на рис. 5.

Из характеристик включения, представленных на рис. 5, видно, что NPT-аналог из-за более высоких скоростей нарастания тока имеет бо-

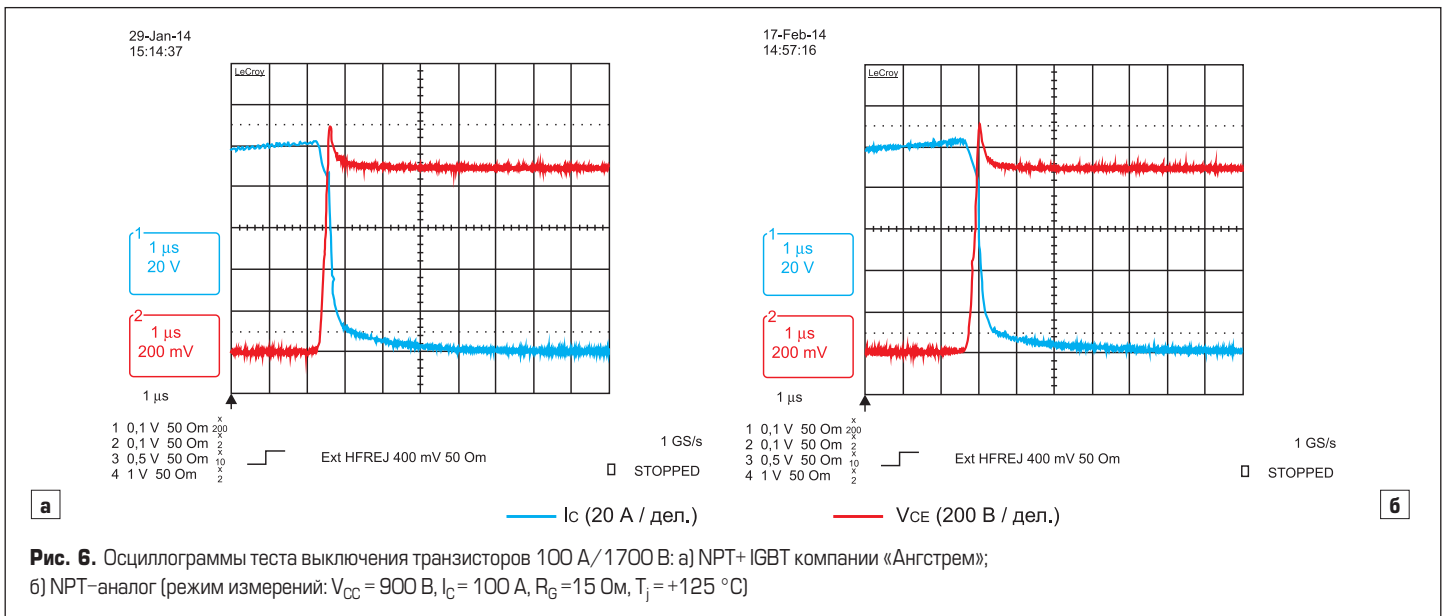
**Таблица 1.** Статические параметры IGBT 100 А/1700 В (типичные значения)

Тип IGBT	$V_{CES}$ , В		$V_{CE(sat)}$ , В		$I_{CES}$ , мА			$V_{GE(th)}$ , В		$C_{iss}$ , нФ	$g_{fs}$ , См	
	Температура, °С											
	+25	+125	+25	+125	+25	+125	+150	+170	+25	+25		
NPT+ IGBT	1700	1700	2,3	2,64	<0,01	0,5	3,0	10,0	5,8	8,0	50	
NPT-аналог	1700	1700	2,6	3,05	0,02	0,8	4,0	13,0	5,5	7,2	50	

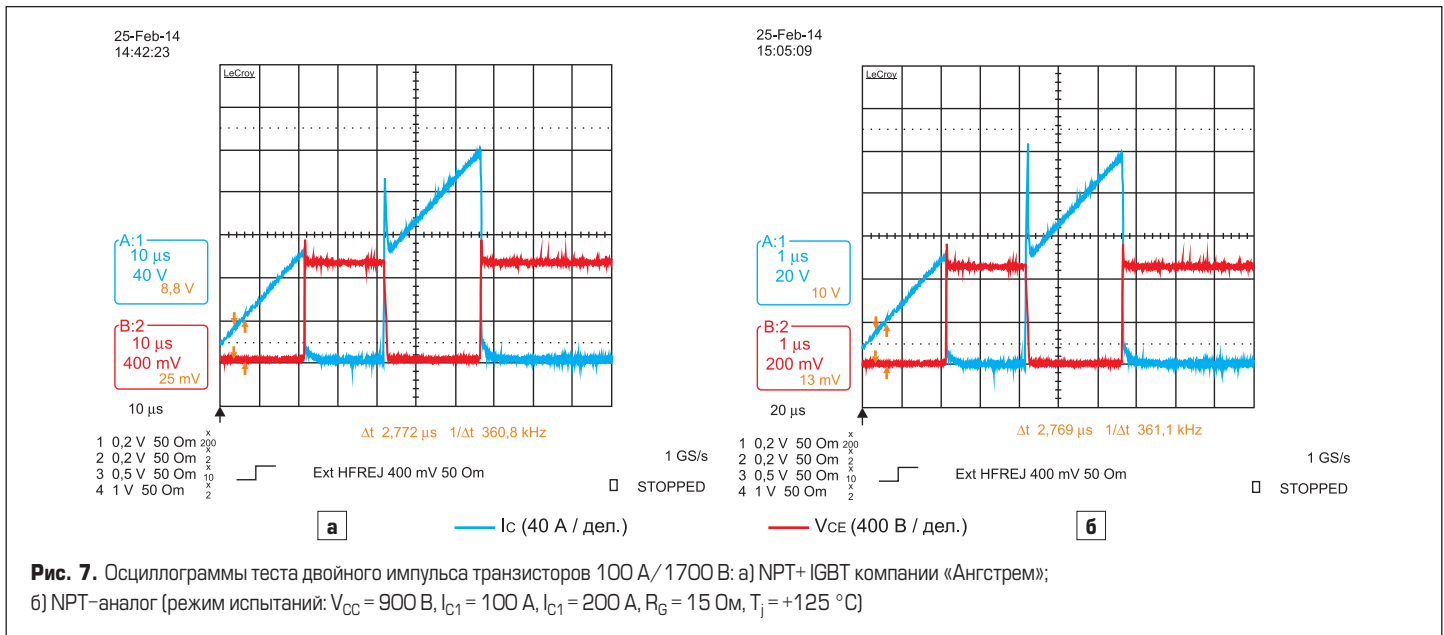


лее высокие по сравнению с NPT+ IGBT максимальные пики тока коллектора  $I_{Cmax}$ , обусловленные обратным восстановлением оппозитного диода. Вследствие этого на кривой спада напряжения NPT-аналога при температуре +25 °С появляются высокочастотные осцилляции. Эти осцилляции исчезают при температуре +125 °С, однако значение  $I_{Cmax}$  у NPT-аналога остается в два раза выше по сравнению с  $I_{Cmax}$  у NPT+ IGBT.

Процесс выключения исследуемых транзисторов показан на рис. 6. Испытания проводились при температуре +125 °С, токе коллектора 100 А, напряжении питания 900 В, сопротивлении входного резистора 15 Ом. Видно, что характеристики выключения NPT+ IGBT и NPT-аналога практически одинаковые. Транзисторы характеризуются мягким выключением с небольшими индуктивными выбросами напряжения (не более 200 В), без высокочастотных шумов.







**Таблица 2.** Динамические параметры IGBT 100 А/1700 В (типичные значения)

Тип IGBT	Тест включения IGBT					Тест выключения IGBT			$E_{SW}$ , мДж
	$t_{d(on)}$ , мкс	$t_r$ , мкс	$I_{peak}$ , А	$E_{on}$ , мДж	$di/dt$ , А/мкс	$t_{d(off)}$ , мкс	$t_f$ , мкс	$E_{off}$ , мДж	
NPT+ IGBT	0,4	0,19	170	53	405	0,46	0,8	31	84
NPT-аналог	0,5	0,12	200	51	650	0,68	0,65	32	83

По результатам измерения характеристик переключения были определены основные динамические параметры NPT+ IGBT и NPT-аналога, которые обычно указываются в информационных материалах и документации изготовителя: время задержки включения  $t_{d(on)}$ , время нарастания тока  $t_r$ , время задержки выключения  $t_{d(off)}$ , время спада тока  $t_f$ . Была также определена суммарная энергии потерь, генерируемая внутри IGBT во время включения и выключения тока коллектора (одиночный импульс):

$$E_{SW} = E_{on} + E_{off}$$

Динамические параметры IGBT, измеренные в режиме  $V_{CC} = 900$  В,  $I_C = 100$  А,  $R_G = 15$  Ом,  $T_j = +125$  °С, представлены в таблице 2.

Видно, что динамические параметры и энергия потерь при включении и выключении транзисторов NPT+ IGBT и NPT-аналога практически одинаковы. Тем не менее, нужно отметить, что у версии NPT+ IGBT имеется хорошая возможность, при необходимости, снизить динамические потери при выключении  $E_{off}$  с помощью радиационного облучения готовых структур. При этом напряжение насыщения у NPT+ IGBT можно сделать такими же как у NPT-аналога, то есть повысить с 2,64 до 3,05 В (таблица 1).

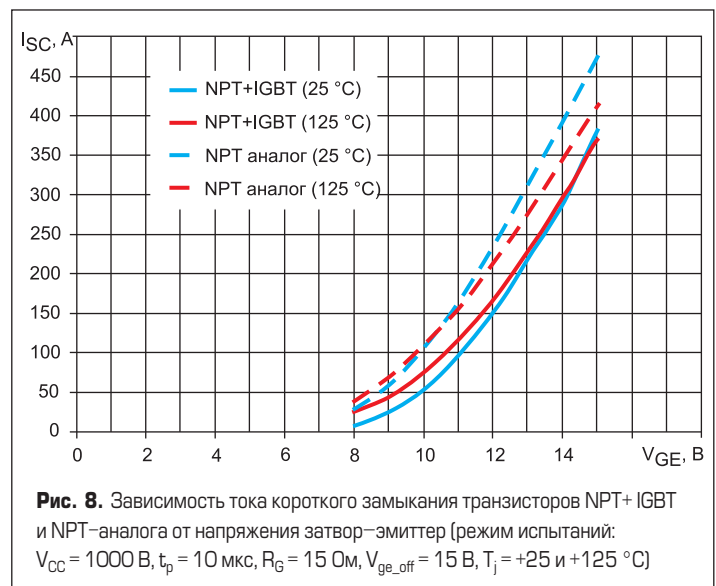
### Устойчивость к токовым перегрузкам и короткому замыканию

Как упоминалось выше, устойчивость IGBT к воздействию двойного тока и характеристики короткого замыкания проверяются в полумостовой схеме на индуктивную нагрузку.

Испытания на воздействие двойного тока проводят с целью проверки способности IGBT выключить ток перегрузки, значение которого вдвое превышает номинальное (классификационное) значение. При этом транзистор должен выдерживать возникающие при резком спаде коллекторного тока перенапряжения и высокие  $dv/dt$ , которые могут достигать значений до 10 кВ/мкс. Он не должен также генерировать высокочастотные осцилляции (шумы), которые могут появиться на последнем этапе спада тока коллектора. Данные испытания входят в состав 100% приемо-сдаточных испытаний IGBT-модулей, проводимых компанией «Электровыпрямитель», так же как и всеми другими зарубежными электронными компаниями. Они позволяют выявить потенциально ненадежные IGBT со скрытыми дефектами, которые не обнаруживаются при других видах испытаний.

Испытания двойным током проводят при напряжении на шине постоянного тока 900 В и максимально допустимой температуре. В качестве примера на рис. 7 показан процесс испытаний двойным током NPT+ IGBT и NPT-аналога. Это происходит следующим образом: транзистор включают, и импульс тока линейно нарастает до номинального значения (в нашем случае до 100 А). Затем он выключается и через 10–20 мкс (время, необходимое для завершения всех переходных процессов) включается вновь на номинальный ток, который продолжает нарастать до 200 А. В момент достижения двойного тока IGBT выключается. В данном опыте транзисторы успешно выдержали эти испытания. Перенапряжения, вызванные резким изменением токов при выключении двойного тока коллектора, не превышали 200 В ( $V_{CEmax} < 1100$  В).

Устойчивость IGBT-модулей к короткому замыканию (КЗ) играет решающую роль при работе в схемах электропривода. Характеристики КЗ исследуемых IGBT проверялись также в полумостовой испытательной схеме в режиме КЗ первого рода. Этот режим имеет место в случае, когда КЗ уже присутствует в схеме, то есть ток через IGBT нарастает сразу после включения с нулевого значения до тока КЗ. Он реализуется путем пря-



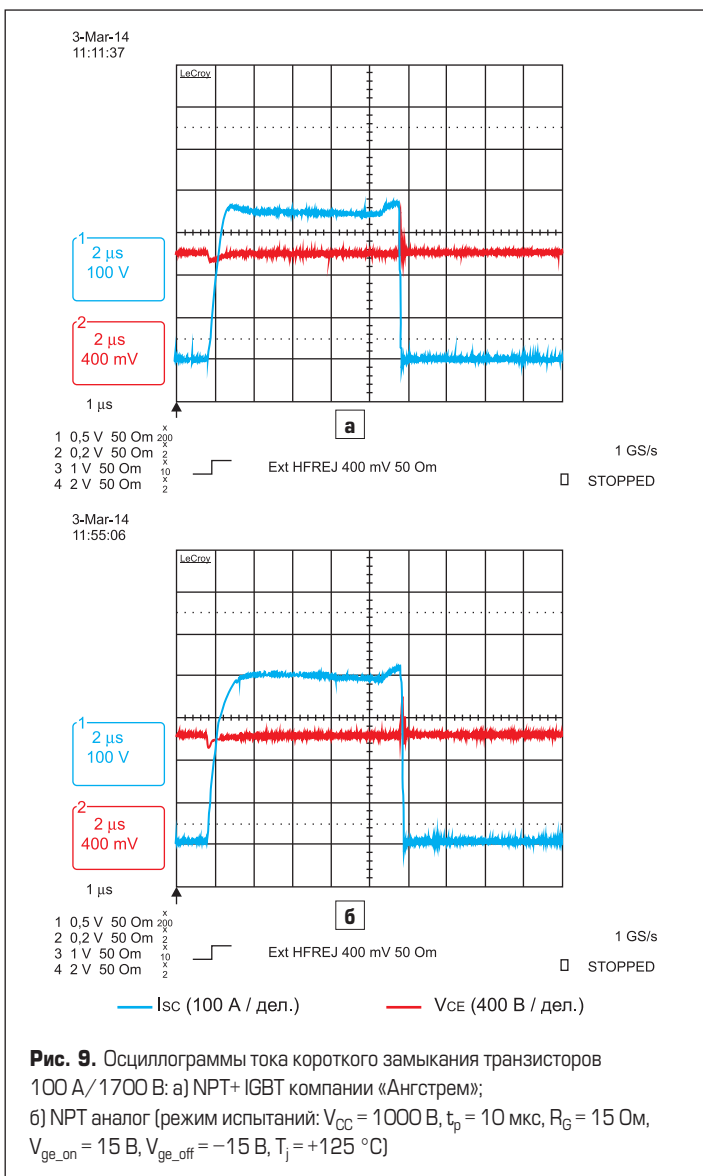
мого подключения заряженной емкости фильтра питания к коллектору и эмиттеру и последующего включения IGBT на заданное время.

Характеристики КЗ зависят от следующих факторов: напряжение на затворе  $V_{GE}$ , напряжение шины постоянного тока  $V_{CC}$ , время короткого замыкания  $t_{SC}$ , температура перехода  $T_{vj}$ . Характеристики КЗ обычно специфицируются при напряжении затвора  $V_{GE} = 15$  В. В зависимости от передаточной характеристики, то есть зависимости тока коллектора от приложенного напряжения затвора, рост или уменьшение напряжения на затворе вызывает соответственно рост или уменьшение тока КЗ  $I_{SC}$ .

Увеличение температуры IGBT приводит к снижению тока КЗ из-за роста напряжения насыщения. На рис. 8 показаны зависимости тока КЗ транзисторов NPT+ IGBT компании «Ангстрем» и NPT-аналога от напряжения на затворе, измеренные при комнатной и максимально допустимой температуре.

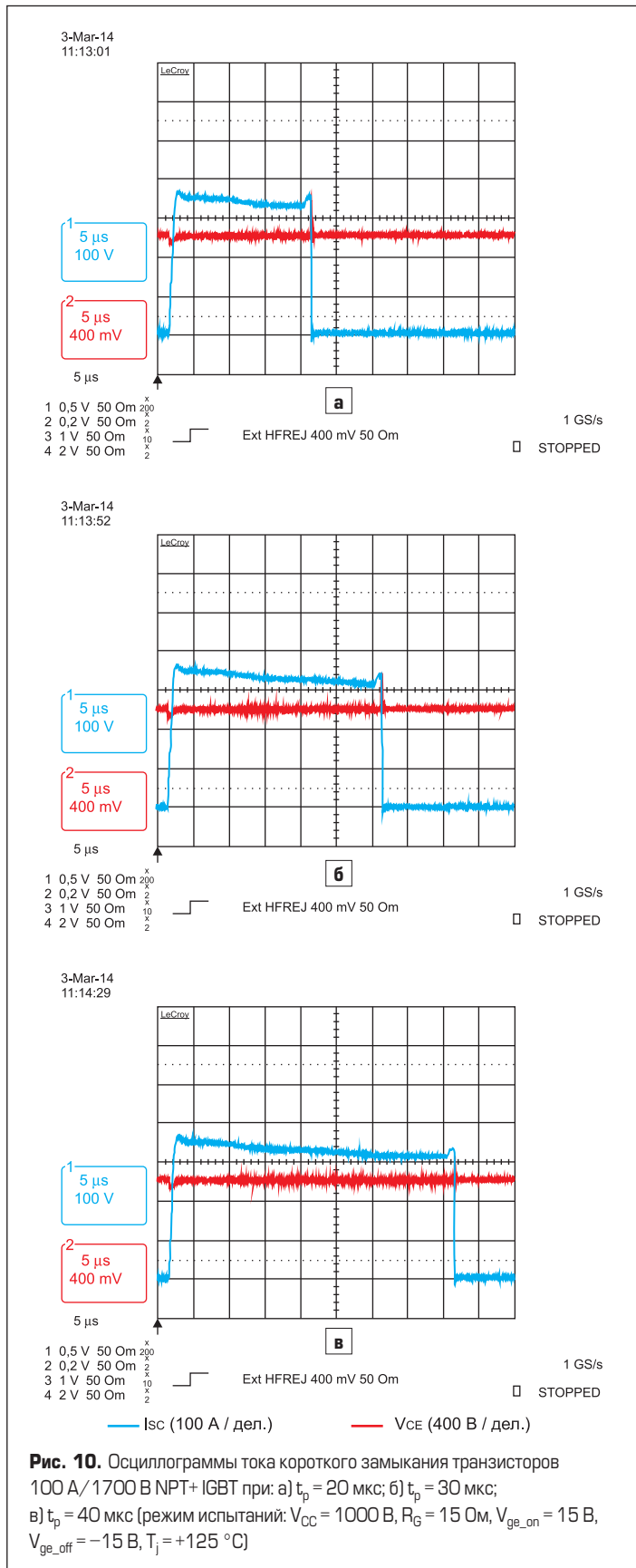
Видно, что точка инверсии у аналога расположена на кривой зависимости  $I_{SC} = f(V_{GE})$  при токе 130 А, а у транзистора NPT+ IGBT — при токе 300 А. Вследствие этого в рабочем режиме, при  $T_{vj} = +125$  °С, значения токов короткого замыкания у транзистора NPT+ IGBT и NPT-аналога отличаются не более, чем на 50 А.

На рис. 9 представлены осциллограммы токов и напряжений при коротком замыкании транзисторов NPT+ IGBT и NPT-аналога в течение специфицированного времени 10 мкс в режиме  $V_{CC} = 1000$  В,  $R_G = 15$  Ом,  $V_{GE} = \pm 15$  В,  $T_{vj} = +125$  °С. Видно, что транзисторы успешно выдержали этот режим короткого замыкания. Ток короткого замыкания NPT-аналога немного больше, чем транзистора NPT+ IGBT. Это связано, вероятно, с тем, что рабочая площадь кристаллов NPT-аналога на 10% больше рабочей площади NPT+ IGBT. Одновременно с воздействием



тока КЗ транзисторы находились под высоким напряжением амплитудой 1400 В (с учетом индуктивного пика при выключении).

На рис. 10 изображены формы импульсов токов и напряжений при длительностях тока короткого замыкания NPT+ IGBT свыше 10 мкс. Испытания показали, что эти приборы ограничивают ток короткого замыкания на уровне четырехкратного номинального тока. Была проведена серия последовательных испытаний NPT+ IGBT при  $V_{CC} = 1000$  В,  $V_{GE} = \pm 15$  В и  $T_j = +125$  °С с длительностью импульсов тока короткого замыкания  $t_{SC} = 10, 20, 30$  и 40 мкс.



При протекании тока короткого замыкания в транзисторе выделяется большая мощность (~500 кВт в импульсе). Она разогревает кристалл IGBT в течение времени протекания импульса тока до температур +200 °C и более. Рост температуры кристалла увеличивает падение напряжения на транзисторе, что автоматически приводит к ограничению тока короткого замыкания. Это ограничение хорошо иллюстрирует спад тока на «полке» импульса  $I_{SC}$  от начала до окончания импульса тока (рис. 10).

Транзисторы 100 А/1700 В NPT+ IGBT успешно выдержали испытания SCSOA, продемонстрировав высокую устойчивость к КЗ при повышенных напряжениях и температуре, при длительностях тока, вчетверо превышающих предельно допустимые значения без ухудшения характеристик.

**Заключение**


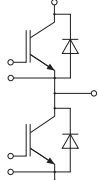
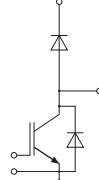
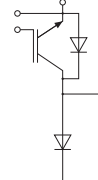

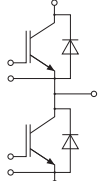
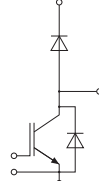
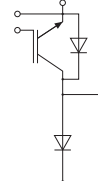

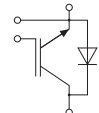

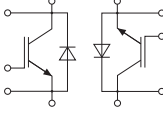
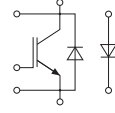

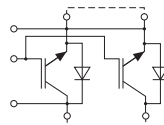

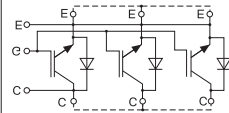

Компанией «Ангстрем» разработана базовая технология и конструкция современных NPT+ IGBT с площадью кристалла 185 мм<sup>2</sup> на ток 100 А, напряжение 1700 В. Новые приборы имеют низкие статические и динамические потери, высокую устойчивость к токам перегрузки и короткому замыканию, сохраняют блокирующие напряжения в области температур, значительно превышающих рабочие температуры.

С разработкой новых кристаллов NPT+ IGBT компания «Электровыпрямитель» получила возможность серийно выпускать силовые IGBT-модули большой мощности на токи до 2400 А, напряжение 1700 В не только с импортной, но и с отечественной комплектацией. Типы и схемы модулей, которые уже сегодня могут быть предложены потребителям, представлены в таблице 3. Следует отметить, что габаритные размеры и дизайн кристаллов NPT+ IGBT были выполнены компанией «Ангстрем» с учетом общепринятых международных требований. Это позволяет использовать их в конструкциях модулей, ранее разработанных и освоенных в производстве ОАО «Электровыпрямитель» с импортной комплектацией.

**Литература**

1. Машевич П. Р., Мартыненко В. А., Мускатиньев В. Г., Крицкая Т. Б. и др. Исследования параметров и характеристик обогащено-планарных IGBT с малыми потерями на напряжение 1200 В // Силовая электроника. 2013. № 4.
2. Lutz J., Schlangenotto H., Scheuermann U., De Doncker R. Semiconductor Power Devices. Physics, Characteristics, Reliability. Springer, 2011.

**Таблица 3.** Силовые IGBT-модули на токи 100–2400 А, напряжение 1700 В производства ОАО «Электровыпрямитель», комплектуемые транзисторами NPT+ IGBT «Ангстрем»

Модуль	Корпус	Схема подключения			
		Полумост	Чоппер		Одиночный ключ
		М2ТКИ	МДТКИ	МТКИД	МТКИ
 100 А/1700 В	М13, 34×94 мм				
 200 А/1700 В	М14, 62×106 мм				
 400 А/1700 В	М15, 62×106 мм				
 800 А/1700 В	М16, 130×140 мм				
 1600 А/1700 В	М17, 130×140 мм				
 2400 А/1700 В	М18, 140×190 мм				
 600 А/1700 В	М12 (в разработке), 89×172 мм				