ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р 71548— 2024

УСТРОЙСТВА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ НИТРИДА ГАЛЛИЯ

Методы оценки срока службы. Общие положения

Издание официальное

Москва
Российский институт стандартизации
2024

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

1 РАЗРАБОТАН Акционерным обществом «Научно-производственная фирма «Микран» (АО «НПФ «Микран»), Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ФГБОУ ВО «ТУСУР»), Федеральным бюджетным учреждением «Государственный региональный центр стандартизации, метрологии и испытаний в Томской области» (ФБУ «Томский ЦСМ»), Федеральным государственным бюджетным учреждением «Российский институт стандартизации» (ФГБУ «Институт стандартизации»)

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 328 «Сверхвысокочастотная и силовая электроника»

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 1 августа 2024 г. № 1015-ст

4 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

*Правила применения настоящего стандарта установлены в статье 26 Федерального закона от 29 июня 2015 г. № 162-ФЗ «О стандартизации в Российской Федерации». Информация об изменениях к настоящему стандарту публикуется в ежегодном (по состоянию на 1 января текущего года) информационном указателе «Национальные стандарты», а официальный текст изменений и поправок — в ежемесячном информационном указателе «Национальные стандарты». В случае пересмотра (замены) или отмены настоящего стандарта соответствующее уведомление будет опубликовано в ближайшем выпуске ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты». Соответствующая информация, уведомление и тексты размещаются также в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет (*gost.e-ecolog.ru

© Оформление. ФГБУ «Институт стандартизации», 2024

Настоящий стандарт не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

УСТРОЙСТВА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ НИТРИДА ГАЛЛИЯ

Методы оценки срока службы. Общие положения

Energy conversion devices based on gallium nitride. Methods for life assessment. General provisions

Дата введения — 2024—11—01

1 Область применения

Настоящий стандарт устанавливает руководящие указания по разработке методов оценки надежности и срока службы устройств преобразования энергии — силовых ключей на базе нитрида галлия и охватывает следующие аспекты:

а) подход с широким охватом области работы силового ключа, использующий кривую переключения для представления жестких режимов эксплуатации;

б) разработка моделей оценки срока службы силового ключа, основанных на кривой переключения;

в) подтверждение надежной работы силового ключа в реальных условиях применения.

2 Термины, определения, сокращения и обозначения

2.1 В настоящем стандарте применены следующие термины с соответствующими определениями:

2.1.1 **базовая ячейка:** Коммутационная ячейка на силовых ключах на базе нитрида галлия.

2.1.2 **жесткое переключение:** Метод переключения при высоком импульсном токе и напряжении сток—исток, в основном происходящего при коммутации активно-индуктивной нагрузки.

Примечания

1 В режиме жесткого переключения осуществляется перекрытие напряжения сток—исток и тока канала, при котором силовое устройство переключается либо из состояния «включено» в состояние «выключено», либо из состояния «выключено» в состояние «включено». Преобразователи с жестким переключением представляют собой повышающие преобразователи с коррекцией коэффициента мощности, понижающие преобразователи, инверторы управления двигателем и несимметричные обратноходовые цепи.

2 Во время включения и выключения на устройство подаются напряжение и ток. При жестком переключении ток стока и напряжение сток—исток резко изменяются, вызывая шумы переключения и потери. Жесткое переключение используется для простых переключателей, преобразователей частоты и импульсных преобразователей питания.

2.1.3 к**ривая переключения:** Траектория сигнала «ток стока — напряжение сток—исток» во время цикла переключения силового ключа.

2.1.4 **мягкое переключение:** Метод переключения силового ключа при пониженном (или нулевом) напряжении сток—исток и (или) токе стока.

Примечания

1 Режим мягкого переключения соответствует условию, при котором отсутствует перекрытие напряжения сток—исток и тока стока, коммутационный транзистор GaN переключается между состояниями «включено» и «выключено», перекрытие между кривыми напряжения сток—исток и тока стока может происходить из-за коммутационного тока, но этот ток не протекает через канал в состоянии мягкого переключения. Преобразователями с мягким переключением являются преобразователи с переключением при нулевом напряжении, преобразователи LLC, обратноходовые преобразователи с активным ключом и т. п.

Издание официальное

2 Мягкое переключение применяется в резонансном контуре LC для включения и выключения устройства при нулевом токе стока или напряжении сток—исток, или время переключения напряжения и ток контролируют, чтобы свести к минимуму их пересечение. При мягком переключении уменьшаются коммутационный шум и потери, так как переключающие устройства включаются и выключаются при нулевом или почти нулевом напряжении сток — исток или токе стока.

3 Мягкое переключение имеет дополнительное преимущество перед жестким переключением с точки зрения безопасной рабочей зоны.

2.1.5 **резистивное переключение:** Метод переключения силового ключа при резистивной нагрузке.

2.1.6 **паразитные параметры:** Параметры, которые не относятся непосредственно к испытуемым силовым ключам, например, емкость, индуктивность и сопротивление печатных плат или других соединительных элементов, на которые устанавливаются силовые ключи при испытаниях.

2.2 В настоящем стандарте применены следующие сокращения и обозначения:

МОП — металл-окисел-полупроводник;

СК — силовой ключ на базе нитрида галлия;

AF — коэффициент ускорения нагрузки;

D — коэффициент загрузки;

E_A — энергия активации;

$f_{пер}$ — частота переключения;

f_u, f_i, f_T — функции ускорения для фактора нагрузки;

GaN — нитрид галлия;

$i_{С.пер}$ — ток стока силового ключа, изменяющийся во времени;

$K1, K2, K3, K4$ — константы в эмпирических моделях ускорения;

$I_С$ — ток стока силового ключа во включенном состоянии;

$I_{С.пер}$ — параметр тока стока для представления напряжения переключения;

$MTTF$ — среднее время до отказа для набора факторов нагрузки;

R — сопротивление;

$R_{СИ.отк}$ — сопротивление стока силового ключа во включенном состоянии;

$T_К$ — температура корпуса силового ключа;

t_f — время спада $U_{СИ}$ при переключении;

$T_{ПП}$ — температура полупроводникового перехода силового ключа;

t_r — время нарастания $U_{СИ}$ при переключении;

ttf — время до отказа;

$U_{СИ.пер}$ — параметр напряжения на стоке для представления нагрузки переключения;

$u_{СИ}$ — напряжение сток—исток, изменяющееся во времени;

$U_{СИ}$ — напряжение сток—исток силового ключа;

$U_{ЗИ.пор}$ — пороговое напряжение.

3 Методы и требования к испытаниям

3.1 Виды испытаний СК в предельно допустимых режимах

В настоящем стандарте рассмотрены два метода испытаний СК в предельно допустимых режимах: ускоренное испытание для оценки срока службы СК при переключении и испытание для оценки динамического срока службы СК при высоких температурах.

Для ускоренного испытания на оценку срока службы условия нагрузки СК выбирают таким образом, чтобы в течение периода испытаний происходили отказы из-за износа. Далее строят графики распределения отказов, например, Вейбулла и т. п. Модели износа, полученные с использованием этих распределений, позволяют рассчитать срок службы СК для конкретных условий эксплуатации.

Испытания для оценки динамического срока службы СК при высоких температурах условия нагрузки следует выбирать таким образом, чтобы соответствовать наиболее строгому профилю задачи испытаний и охватывать все варианты применения СК. Условия испытаний для оценки динамического срока службы при высоких температурах следует выбирать не с целью создания нагрузки СК до полного износа, а с условием отсутствия отклонений или отказов СК на периоде испытаний. Например, лучшим условием для испытаний является нагрузка при 80 % номинальной мощности (или абсолютном

максимальном напряжении) или при 100 % от максимального рекомендуемого напряжения (если указано) и максимальной рекомендуемой температуре в течение 1000 ч.

3.2 Технологические ограничения и ограничения на изделия

Технологические СК на основе GaN подходят для ускоренных испытаний на оценку срока службы и получения моделей износа. В случаях, когда другие компоненты составляют основную часть схемы коммутатора, весь коммутатор выбирают в качестве объекта испытаний для проверки того, что соответствующие процессы износа и отказов для всего коммутатора ускоряются для определения срока службы СК.

Испытания для оценки срока службы СК сопряжены с высокими нагрузками. Следует выбирать СК, имеющие только режимы отказов, присущие технологической платформе GaN. Размер кристалла СК должен быть достаточно большим (например, активная площадь более 1 мм^2), чтобы обеспечить устранение как повышения температуры из-за самонагрева, так и неравномерности переключения.

Технические условия на СК должны содержать основные аспекты компоновки СК, необходимые при проектировании законченных изделий на их базе. Следует указывать либо размеры активной области кристалла GaN, либо $R_{СИ.отк}$, например, 190 мОм, 130 мОм и т. п.

В целях воспроизводства эффектов взаимодействия множества факторов и упаковки при испытаниях для оценки динамического срока службы при высоких температурах СК представляют в виде конечного изделия. Функциональные возможности СК не ограничиваются дискретным устройством GaN, так же могут представлять собой интегрированный модуль с каскодным управлением, интегрированный интеллектуальный ключ на базе GaN.

3.3 Факторы нагрузки и факторы, влияющие на срок службы СК

Для исследования и анализа коммутационных устройств на базе GaN СК определены следующие факторы нагрузки:

- приложенное к СК напряжение $U_{СИ}$, $u_{СИ}$;
- ток, протекающий через СК, I_C, $i_{С.пер}$;
- температура полупроводникового перехода СК во время переключения $T_{ПП}$;
- частота переключения СК $f_{пер}$;
- коэффициент загрузки СК D;
- время или скорость нарастания напряжения сток—исток;
- время или скорость нарастания тока стока.

Основными факторами, влияющими на срок службы СК, являются напряжение $U_{СИ}$, ток I_C и температура полупроводникового перехода $T_{ПП}$. Другие факторы следует учитывать, так как они потенциально могут повлиять на срок службы СК.

3.4 Требования к испытательным стендам

Макетный испытательный стенд представляет собой схему с соответствующими компонентами и компоновкой для воздействия на СК одного или нескольких строго определенных режимов нагрузки. Макетный испытательный стенд может быть предпочтительнее, поскольку фактическая сложность СК может маскировать внутренние механизмы отказа.

Испытательный стенд для ускоренных испытаний для оценки срока службы должен быть сконструирован таким образом, чтобы подвергать СК воздействию большего напряжения, тока и температуры, которые СК испытывал бы при номинальных условиях эксплуатации. Для испытаний на износ следует применять соответствующие режимы нагрузки СК без введения посторонних режимов отказа.

Испытательный стенд для предсерийных изделий представляет собой более сложную схему, ориентированную на реальное применение, чем макетный испытательный стенд. Примером испытательного стенда может быть плата оценки клиентского устройства, печатная плата конечного изделия. Из-за дополнительной сложности указанные стенды обеспечивают дополнительное взаимодействие с другими компонентами и режимами переключения и позволяют тестировать схемы на базе GaN СК в контексте конкретного устройства.

Тестовый стенд для контроля серийных изделий может не подходить для ускоренных испытаний, поскольку другие компоненты на плате могут быть не в состоянии поддерживать более высокое напряжение или ток, в противном случае может быть не предусмотрен надлежащий контроль температуры полупроводникового перехода. Таким образом, платы для стендов предназначены для испытаний для оценки динамического срока службы при высоких температурах.

Влияние паразитных параметров печатной платы на режимы переключения СК, а именно индуктивности контура и паразитных емкостей, может повлиять на нагрузку СК при испытаниях. Эти параметры следует учитывать при проведении испытаний, их влияние может быть получено в результате прямых измерений и/или моделирования.

Чтобы определить напряжение, приложенное к СК, формы сигналов переключения должны быть как можно более репрезентативными для напряжения и тока, приложенных к самому СК. Соединители следует применять типовые, используемые в обычных изделиях.

Стенды для испытаний СК в жестких режимах используют для проверки набора параметров до отказа для ускоренных испытаний на оценку срока службы или для проверки набора параметров для заданных условий эксплуатации при испытаниях на оценку динамического срока службы при высоких температурах. Они представляют собой кластеры ячеек СК, состоящих либо из макетных стендов, либо из тестовых стендов для серийных изделий с соответствующим оборудованием для мониторинга/управления и программным обеспечением. Их характеристики приведены в таблице 1.

Таблица 1 — Характеристики двух типов стендов для нагрузочных испытаний

Стенд для нагрузочных испытаний	Тип СК	Режим отказа	Контроль условий	Пригодность для ускорения	Цель
Макетный испытательный стенд	Технология	Технология	Простой	Высокая	Модель ускоренных испытаний для оценки срока службы
Испытательный стенд для предсерийных изделий	Изделие	Система	Сложный	Низкая	Испытания для оценки динамического срока службы при высоких температурах на системном уровне

3.5 Требования к составу испытательных стендов

Стенды для испытаний в жестких режимах должны включать в себя средства для измерений температуры СК, средства измерений контролируемых параметров. Например, температуры отдельных блоков, коэффициента полезного действия или $R_{СИ.отк}$, температуру корпуса СК $T_К$, рассеиваемую СК мощность. Ситуативные параметры также могут включать эффективное значение $R_{СИ.отк}$, представляющее эффективное сопротивление включенного СК, с указанием метода расчета. При расчете коэффициента полезного действия следует учитывать другие факторы ухудшения параметров СК.

Измерения указанных параметров проводят в соответствии с техническими условиями на СК.

Стенды для испытаний СК в жестких режимах должны быть сконструированы таким образом, чтобы гарантировать отсутствие превышения температуры СК свыше установленных условий эксплуатации, осуществлять мониторинг и регистрацию отказов в работе СК в соответствии с указанными параметрами.

3.6 Размер выборки СК

Для ускоренных испытаний для оценки срока службы размер выборки СК устанавливают с условием обеспечения достоверности экстраполированных результатов графиков распределения отказов, и он зависит от количества определенных механизмов отказа.

Например, для ухудшения параметров горячих носителей заряда в N-канальных МОП-транзисторах указывают размер выборки не менее пяти для каждого состояния жестких режимов испытаний с минимум тремя контролируемыми параметрами.

Этого может быть достаточно для СК, выходящих из строя из-за одного механизма износа, для более сложных комбинаций износа требуется больший размер выборки СК.

Для испытаний для оценки динамического срока службы при высоких температурах следует в каждой из трех различных производственных партий предполагаемого квалификационного семейства СК выбрать не менее восьми базовых ячеек.

3.7 Критерии отказа СК

Отказ СК обнаруживают непосредственно во время нагрузки либо путем измерения ключевых параметров СК до и после нагрузки. Из-за сложной структуры стендов для нагрузочных испытаний проблематично измерить все параметры, которые указаны в технических условиях на СК.

Типичные критерии для определения отказа СК:

- мониторинг на месте: коэффициент полезного действия СК, динамическое снижение $R_{СИ.отк}$, снижение эффективного $R_{СИ.отк}$, катастрофический отказ СК, приводящий к короткому замыканию (СК не может выключиться) или разрыву цепи (СК не может включиться);

- параметрическое испытание: ключевые параметры СК, такие как $U_{ЗИ.пор}$, $R_{СИ.отк}$, утечка тока затвора $I_{ЗИ.ут}$, начальный ток стока $I_{С.нач}$, должны быть измерены в начале и конце нагрузочных испытаний.

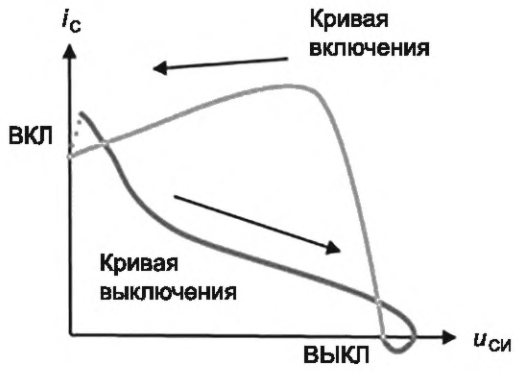
Для ускоренных испытаний на оценку срока службы выбирают определенные интервалы для измерения параметров СК. Отказ определяют, когда параметр СК выходит за минимальные/максимальные значения, установленные в технических условиях на СК.

При выполнении испытаний следует обратить внимание на используемые критерии отказа и параметры, выбранные для определения отказа СК.

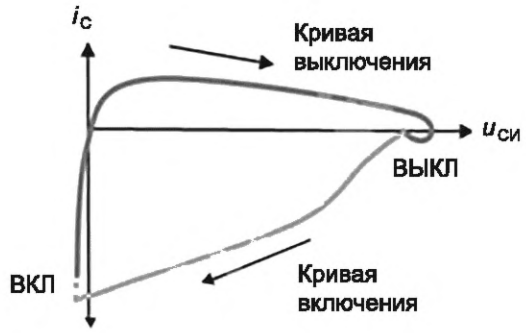
4 Кривая переключения и ее использование

4.1 Кривая переключения

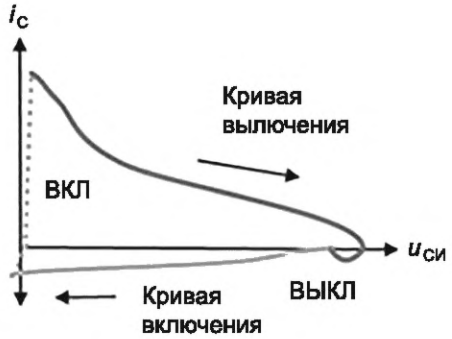
Кривую переключения строят регистрацией сигналов $i_С$ и $u_{СИ}$ в течение периода переключения СК и отображения $i_С$ в зависимости от $u_{СИ}$. Три распространенных типа переключения, возникающих во время коммутационных переходов: жесткое, мягкое и резистивное, приведены на рисунке 1.



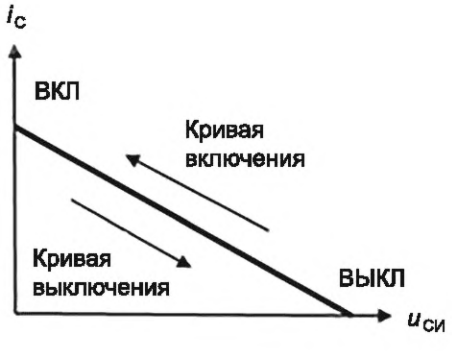
а) Включение и выключение с жестким переключением, например, высокочастотный СК в понижающем преобразователе с индуктивным запоминающим элементом



б) Переходы включения и выключения с плавной коммутацией, например, СК с низким уровнем шума в понижающем преобразователе с индуктивным запоминающим элементом



в) Переключение в резонансной топологии с плавной коммутацией переходов включения и выключения с жесткой коммутацией



г) Переключение резистивной нагрузки. Добавление конденсатора параллельно с резистором изменит форму кривой переключения

Рисунок 1 — Упрощенные примеры графиков переключения для работы СК в цепях

Кривую переключения используют для определения уровня и типа нагрузки переключения, приложенной к СК.

Форма и направление включения/выключения дают информацию о типе нагрузки СК. Таким образом, кривая может быть использована для классификации режимов переключения, которые вызывают различные уровни или типы деградации СК. Например, переход с жесткой коммутацией при включении приводит к росту тока канала и инжекции горячих носителей заряда, в то время как канал выключен во время перехода при выключении, и $u_{СИ}$ увеличивается в результате зарядки выходной емкости СК током i_C.

Аналогично переходы с плавным переключением СК приводят к изменению $u_{СИ}$ в результате зарядки или разрядки выходной и других емкостей в узле стока, когда СК выключен. В этом случае «переход включения» и «переход выключения» включают в себя как переходы от высокого напряжения сток—исток к низкому, так и низкого напряжения к высокому напряжению сток—исток с выключением, а также событие включения или выключения СК соответственно.

Режимы отказа СК зависят от типа нагрузки, поэтому кривые переключения позволяют классифицировать варианты использования СК по типам нагрузки. Такая связь режимов переключения с режимами отказа обеспечивает широкий охват оценки надежности СК. Это позволяет прикладывать соответствующие нагрузки к схемам, более подходящим для испытания на надежность и ускорения желаемых режимов отказа СК.

Из-за различных видов нагрузки не следует выполнять сопоставление между различными типами кривых переключения. Зоны переключения также не содержат информации о времени перехода или скорости нарастания, которую необходимо предоставить для количественной оценки износа СК из-за приложенной нагрузки.

4.2 Обеспечение широкого охвата оценки надежности диапазона режимов переключения

Широким охватом оценки надежности диапазонов переключения является высокотемпературная выдержка при одновременном приложении обратного напряжения, приведенная на рисунке 2. Этот режим представляет собой один из примеров испытания при более высоком напряжении, чем диапазон реальных режимов переключения при эксплуатации средства контроля, охватывающего диапазон более мягких условий эксплуатации СК.

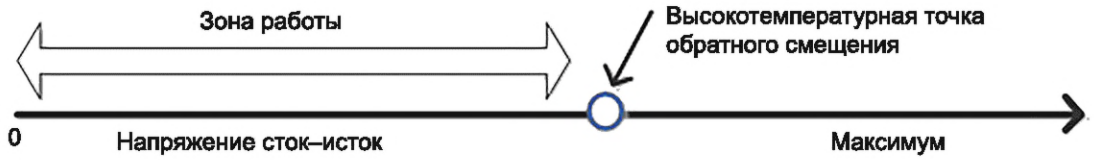


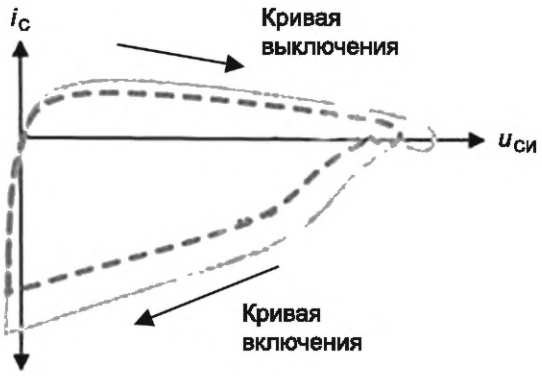
Рисунок 2 — Высокотемпературная выдержка при одновременном приложении обратного напряжения

Испытание в более жестких условиях переключения СК представлено на рисунке 3. Сплошные линии, показанные в кривых переключения, представляют собой более жесткие условия по сравнению с условиями, показанными пунктирными линиями, при заданной скорости нарастания нагрузки.

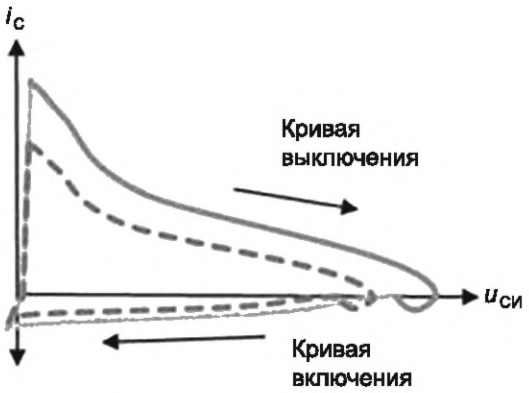
Кривая с менее жесткими условиями переключения имеет меньшую величину i_C для данного $u_{СИ}$. Если проверку надежности выполняют в условиях, которые соответствуют сплошным линиям, то рассматривают менее жесткие условия, что позволяет повторно не проводить испытания на оценку надежности СК в этих условиях.



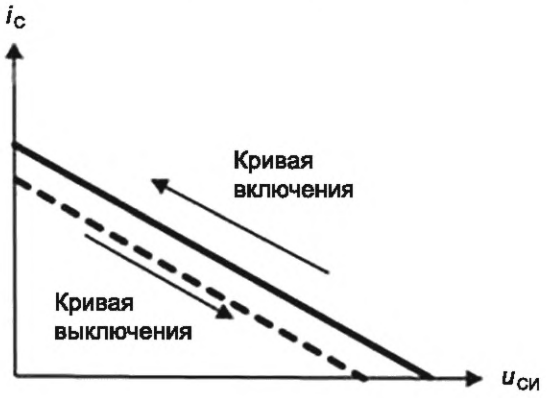
а) Включение и выключение с жестким переключением, например, высокочастотный СК в понижающем преобразователе с индуктивным запоминающим элементом



б) Переходы включения и выключения на нулевом токе с плавной коммутацией, например, СК с низким уровнем шума в понижающем преобразователе с индуктивным запоминающим элементом



в) Переключение в резонансной топологии с плавной коммутацией на нулевом токе переходов включения и выключения с жесткой коммутацией



г) Переключение резистивной нагрузки. Добавление конденсатора параллельно с резистором изменит форму кривой переключения

Рисунок 3 — Испытания в более жестких условиях переключения

При разработке испытания в предельно допустимых режимах следует выбирать кривые переключения, которые охватывают наибольший набор целевых применений СК.

5 Разработка моделей срока службы СК при переключении напряжения

Для получения модели с длительным сроком службы СК необходимо подвергать нагрузке до отказа с использованием увеличенной нагрузки на соответствующем стенде для испытаний в предельно допустимых режимах, без введения дополнительных режимов отказа.

План испытаний для определения среднего времени безотказной работы должен включать следующее:

- выбирают СК согласно 3.2;
- определяют условия для испытаний в предельно допустимых режимах на основе областей применения, которые должны быть охвачены технологической платформой GaN и выбирают подходящее средство испытаний согласно 3.4, раздел 4;
- создают тестовый испытательный стенд и проверяют получение желаемых характеристик СК;
- определяют функцию, вызывающую нагрузку, например, с помощью ступенчатого напряжения (приведено в приложении А);

- проектируют и создают испытательный стенд на основе размеров образцов, подлежащих испытанию согласно 3.4, 3.5;

- проводят эксперименты по времени до отказа СК в пространстве фактора нагрузки и получают желаемое время до отказа (приложение Б).

5.1 Метод определения влияния фактора нагрузки

Метод определения влияния фактора нагрузки заключается в запуске нескольких СК в одном режиме нагрузки и получении времени отказа. Остальные факторы оставляют неизменными. Размер выборки определяют в соответствии с 3.6. Среднее (или другая желаемая доля) время до отказа может быть получено для каждого фактора нагрузки путем построения графиков распределения отказов, например, Вейбулла и т. п., и использования наклона для экстраполяции на желаемую долю отказов. Рекомендуется получить время до отказа по крайней мере для трех значений фактора нагрузки и предоставить графики распределения отказов. Затем время до отказа сопоставляют с моделью, связывающей время до отказа с фактором нагрузки.

Этот процесс повторяют для всех интересующих факторов нагрузки. Метод приведен на рисунке 4, пример последовательности испытаний приведен в приложении Б.

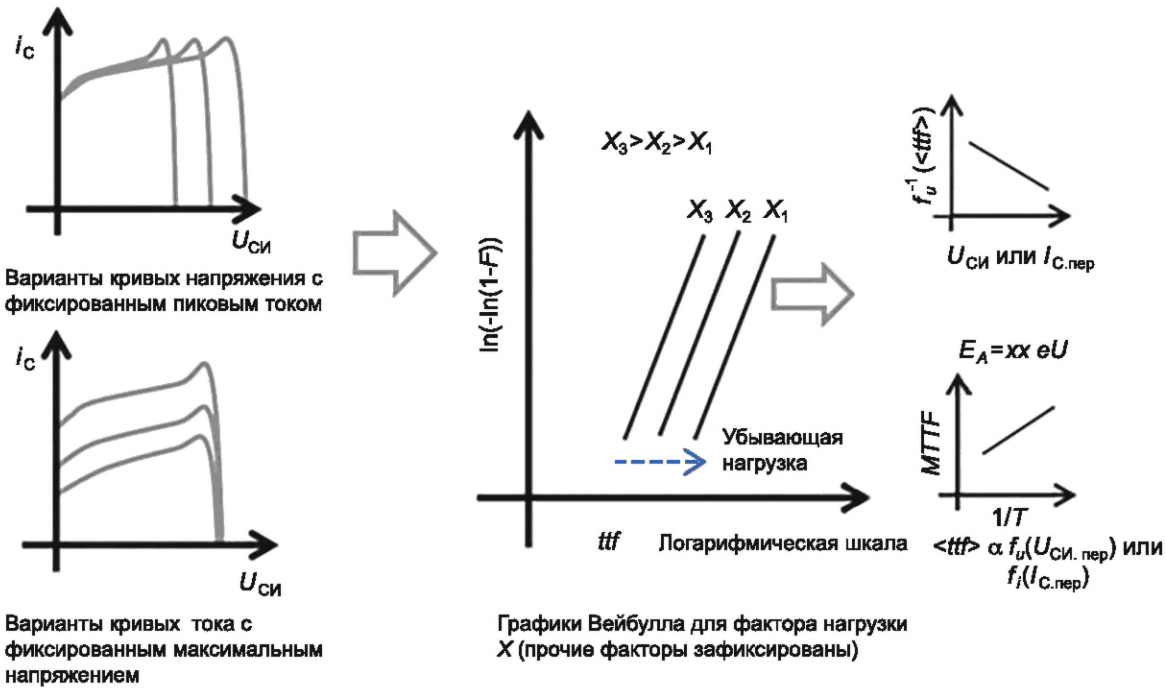


Рисунок 4 — Краткое описание метода получения моделей износа

Предполагая, что износ СК, вызванный каждым фактором нагрузки, независим, модели ускорения для температуры, напряжения и тока получают на основе ускоренного времени до отказа — $U_{СИ.пер}$ и $I_{С.пер}$ — это соответственно параметры напряжения и тока, соответствующие кривым переключения, например, пиковое напряжение сток—исток и ток стока. Параметры определяют, например, как функции напряжения сток—исток СК и тока катушки индуктивности.

При проведении испытаний СК проводят проверку факторов нагрузки на взаимную независимость/ортогональность путем выбора условий испытаний, сочетающих в себе несколько факторов нагрузки. Это может быть сделано путем проверки модели с использованием жестких условий, которых нет в наборах, используемых для построения модели. Рекомендуемая последовательность испытаний для получения моделей времени до отказа и срока службы приведена в приложении Б.

5.2 Модель оценки срока службы СК

Модели оценки срока службы СК из-за износа предполагают, что износ, вызванный каждым фактором нагрузки, не зависит от других факторов, т.е. нет взаимодействия износа из-за различных факторов, и износ из-за каждого фактора создает дефекты, которые накапливаются до выхода устройства из строя.

В этом случае получают модель продолжительности жизни СК для каждого фактора независимо и модель продолжительности жизни СК, обусловленную всеми факторами, как произведение выражений для продолжительности жизни для каждого фактора.

Эту модель используют для прогнозирования срока службы СК в типичных условиях эксплуатации. Общее уравнение показано в терминах эмпирических выражений для множества факторов, которые также могут быть выражены в терминах коэффициентов ускорения AF:

$$MTTF = fMTTF\ (U_{СИ.пер},\ I_{С.пер},\ T,\ f_{пер},\ D,\ t_r,\ t_f), \tag{1}$$

$$MTTF = K1 \cdot f_u(U_{СИ}) \cdot f_i(I_{С.пер}) \cdot f_T(T) \cdot f(f_{пер},\ D,\ t_r,\ t_f), \tag{2}$$

$$MTTF = K2 \cdot AF_u \cdot AF_i \cdot AF_T \cdot AF(f_{пер},\ D,\ t_r,\ t_f). \tag{3}$$

Факторная независимость позволяет разрабатывать модель с использованием подмножества факторов, сохраняя неизменными немодулируемые факторы. В таких случаях рекомендуется указывать значения немодулированных коэффициентов.

5.3 Выбор модели оценки срока службы

Существует несколько видов моделей оценки срока службы: для высокого износа диэлектрика, деградация от горячих носителей заряда, инжекции горячих носителей заряда, ускорения по температуре и т. п.

В случае применения нескольких моделей выбирают наиболее консервативную модель для предполагаемого режима применения СК, т. е. ту, которая обеспечивает наименьший срок службы СК.

5.4 Прогнозирование срока службы силового ключа

После получения выражения для времени безотказной работы для различных факторов нагрузки и связанных с ними факторов прогнозируют срок службы СК при типичном использовании. Получают время до отказа для различных режимов работы СК и используют либо минимальный ресурс, либо срок службы для каждого профиля работы в качестве показателя надежности СК. Эти показатели дополнительно подтверждают экспериментами испытаний для оценки динамического срока службы при высоких температурах с несколькими массивами базовых ячеек.

6 Испытание на оценку динамического срока службы при высоких температурах

Испытание направлено на испытания СК в предельно допустимых режимах на системном уровне в одном или нескольких экстремальных условиях эксплуатации для соответствующих целевых применений.

Выбор СК осуществляют согласно 4.2.

Выбор испытательного стенда осуществляют согласно 4.4, 4.5.

Испытание выполняют частью плана квалификационных испытаний предполагаемого изделия или семейства изделий, которые будут выпущены.

Рекомендации по применению испытаний на динамический срок службы при высоких температурах представлены в таблице 2.

Таблица 2 — Рекомендации по испытаниям на оценку динамического срока службы при высоких температурах

Фактор нагрузки	Условия	Требования	
		Количество лотов/единиц в лоте	Продолжительность/принятие
Оценка динамического срока службы при высоких температурах	Максимально рекомендуемые условия переключения[1] (см. таблицу 3)	Три партии $X \geq 8$ испытательных стендов с переключающими базовыми ячейками	1000 ч[1] / 0 отказов
[1] Условия испытаний могут превышать максимально рекомендуемые, чтобы увеличить эквивалентное время выполнения в условиях использования СК.			

6.1 Условия нагрузки

При наличии модели на весь срок службы жесткие условия рассчитывают в соответствии с наиболее строгим профилем плана испытаний, способным охватить все варианты применения СК. Зона переключения должна охватывать вариант использования СК, как показано на рисунке 5. Рекомендуемые условия применения испытаний на оценку динамического срока службы при высоких температурах указаны в таблице 3.

Допустимы условия, обеспечивающие более высокое ускорение нагрузки СК. Должны быть указаны напряжение $U_{СИ}$, ток I_C, частота $f_{пер}$, температура перехода $T_{ПП}$ (корпуса $T_К$), коэффициент загрузки D и скорости нарастания $u_{СИ}$, а также указана зона переключения, как показано на рисунке 5.

Жесткие условия испытаний СК отражают с помощью одного или нескольких графиков, показывающих режимы переключения, включая список соответствующих состояний факторов нагрузки СК.

Таблица 3 — Условия применения испытаний СК на оценку динамического срока службы при высоких температурах

Параметр нагрузки	Условия	Пример
Напряжение питания постоянного тока	Максимально рекомендуемое $U_{СИ}$ или 80 % от абсолютного максимального $U_{СИ}$ в спецификации	480 В (600 В абс. макс.)
Рабочая температура	Температура в наихудшем случае $T_К$, в рабочих пределах, указанных в спецификации	80 °C ≤ $T_К$ ≤ 125 °C представляет собой типичный ожидаемый температурный диапазон при применении. В случае подтверждающих данных $T_К$ должен быть установлен как наихудший вариант для данной технологии
Пиковый ток	Соответствует условию максимальной мощности	Зависит от технологии/изделия. Зависит от испытательной камеры (в частности, ограничено охлаждение)
Частота переключения	Максимально допустимая для желаемой рабочей температуры соединения	Например, 100 кГц для применения в режимах с жестким переключением
Характеристики сигнала управления на затворе	Как рекомендовано производителем в техническом описании и примечании к применению	Зависит от технологии/изделия



Примечание — Необходимо контролировать: частоту, скорость нарастания напряжения, скважность, температуру, выходную мощность.

1 — кривая испытаний на динамический срок службы при высоких температурах

Рисунок 5 — Пример кривой жесткого переключения при испытаниях на оценку динамического срока службы при высоких температурах

При испытаниях на системном уровне необходимо соблюдать осторожность, поскольку ускоренные условия нагрузки СК могут привести к выходу из строя других компонентов или их неправильному функционированию, например, к временным нарушениям целостности сигнала, пробоям, шуму, неисправностям и т. п.

Приложение А
(справочное)

Пространство параметров для ускоренного испытания СК на срок жизни (см. раздел 5 настоящего стандарта)

На износ СК во время нагрузки влияют несколько факторов. Во время испытаний СК следует подвергать различным типам нагрузок. Для оценки надежности диапазона режимов переключения выбирают такие условия, при которых максимальное ухудшение происходит из-за нагрузки СК в переходном состоянии.

В таблице А.1 приведены некоторые основные рекомендации, которые помогут проводить эксперименты в предельно допустимых режимах в реалистичном пространстве нагрузки.

Таблица А.1 — Параметры и условия нагрузки

Параметр нагрузки	Условия	Пример
Время нарастания и спада напряжения сток—исток	Избегать чрезмерного звона или деградации горячих носителей заряда из-за чрезвычайно высокой или низкой скорости нарастания	(5—20) нс
Частота переключения	В пределах рабочего диапазона текущих версий СК GaN	Подходит для тестовой схемы, выбранной для непрерывного переключения
Коэффициент загрузки	В пределах рабочего диапазона текущих версий СК GaN	Подходит для тестовой схемы, выбранной для непрерывного переключения
Температура	В пределах рабочего диапазона текущих версий СК GaN	85 °С — 150 °С
Диапазон напряжения стока при напряжении переключения	Может быть выбран для ускорения выхода СК из строя, чтобы получить разумное время испытаний	Отказ через 10—1000 ч, $U_{СИ}$ может быть оценено по ступенчатому напряжению
Диапазон тока стока при напряжении переключения	Может быть выбран для ускорения выхода СК из строя, чтобы получить разумное время испытаний	Отказ через 10—1000 ч, I_C может быть оценен по ступенчатому напряжению

Приложение Б
(справочное)

Последовательности экспериментов для получения моделей времени до отказа и срока службы (см. раздел 5 настоящего стандарта)

Для получения эмпирических выражений для оценки времени до отказа изменяют только один фактор нагрузки, оставляя остальные постоянными.

Б.1 Ускорение нагрузки по температуре

Б.1.1 Ток стока во включенном состоянии СК или напряжение в выключенном состоянии поддерживают на их максимальных заданных значениях (при необходимости их увеличивают, если *ttf* очень велико) и фиксируют другие факторы нагрузки СК.

Б.1.2 Эксперименты по определению нагрузки до разрушения СК проводят минимум при трех различных температурах.

Б.1.3 Строят графики Вейбулла времени до отказа СК для каждой температуры.

Б.1.4 Строят график зависимости ln <*ttf*> от 1/*T* для получения эффективной энергии активации для процесса износа СК.

Б.2 Ускорение нагрузки по напряжению

Б.2.1 Ток в рабочем состоянии поддерживают на его максимальном заданном значении, температуру корпуса СК поддерживают на подходящем фиксированном значении для условий эксплуатации, фиксируют прочие факторы.

Б.2.2 Эксперименты по проверке нагрузки СК на отказ проводят при трех или более различных напряжениях сток—исток.

Б.2.3 Строят графики времени выхода СК из строя по Вейбуллу для каждого напряжения сток—исток для получения желаемого времени выхода СК из строя.

Б.2.4 Строят график f_u^{-1}<*ttf*> в зависимости от $U_{\text{СИ.пер}}$ для получения соответствующей модели износа по напряжению сток—исток, см. рисунок 4.

Б.3 Ускорение нагрузки по току

Б.3.1 Поддерживают напряжение сток—исток в выключенном состоянии на его максимальном заданном значении, температуру полупроводникового перехода на подходящем фиксированном значении для условий эксплуатации, фиксируют другие факторы.

Б.3.2 Проводят эксперименты по нагрузке СК до отказа при трех или более различных токах включения.

Б.3.3 Строят графики Вейбулла времени до отказа для каждого $I_{\text{С.пер}}$ для получения желаемого времени до отказа.

Б.3.4 Строят график зависимости fi^{-1}<*ttf*> от $I_{\text{С.пер}}$ для получения соответствующей модели износа для текущего значения тока нагрузки, см. рисунок 4.

Б.4 Проверка независимости/ортогональности факторов нагрузки

Проверка ортогональности может быть выполнена путем выбора одного или нескольких жестких условий, отсутствующих в исходных наборах образцов, использованных для получения модели ускорения. На рисунке Б.1 показан пример для двух факторов нагрузки. Модели ускорения для факторов нагрузки *s*1 и *s*2 сначала получают использованием наборов *S1* и *S2* соответственно, где *S*1 = {(*s*11,*s*21), (*s*12, *s*21), (*s*13,*s*21)} и S2 = {(*s*11,*s*21), (*s*11, *s*22), (*s*11,*s*23)}. Затем модель ускорения проверяют для одного или нескольких условий испытаний, которых нет в наборах тестов для получения моделей износа. Модель, представляющая собой произведение двух моделей ускорения для *s*1 и *s*2, должна быть способна предсказывать время отказа, полученное для новых условий испытаний.

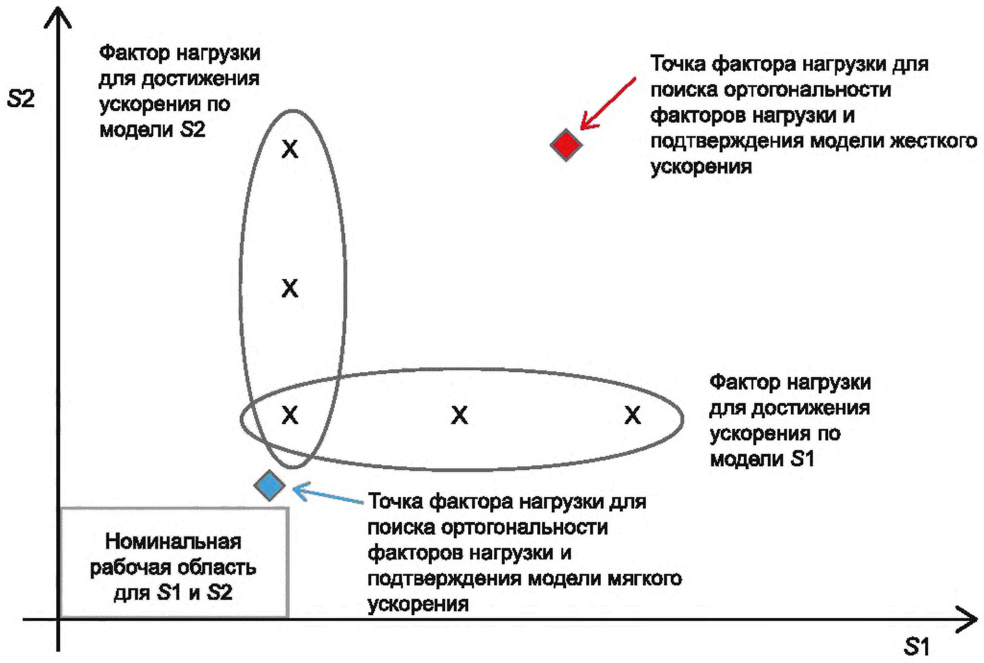


Рисунок Б.1 — Независимость факторов нагрузки от отказов

Сначала для получения моделей ускорения используют два набора факторов нагрузки, а затем одно или несколько различных условий нагрузки используют для проверки модели.

УДК 621.3:006.354 ОКС 29.100

Ключевые слова: устройства преобразования, нитрид галлия, силовой ключ, метод переключения, испытательный стенд, кривая переключения, срок службы, модель износа

Редактор *Л.В. Коретникова*
Технический редактор *В.Н. Прусакова*
Корректор *М.И. Першина*
Компьютерная верстка *А.Н. Золотаревой*

Сдано в набор 05.08.2024. Подписано в печать 13.08.2024. Формат 60×84⅛. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 1,86. Уч.-изд. л. 1,48.

Подготовлено на основе электронной версии, предоставленной разработчиком стандарта

Создано в единичном исполнении в ФГБУ «Институт стандартизации» для комплектования Федерального информационного фонда стандартов, 117418 Москва, Нахимовский пр-т, д. 31, к. 2.

gost.e-ecolog.ru gost.e-ecolog.ru

gost.e-ecolog.ru