

Анализатор динамических характеристик силовых полупроводниковых приборов

М. Циммерман¹, Р. Такеда², Б. Хользингер³, М. Хоуз⁴

УДК 621.37 | ВАК 05.11.01

Обсуждаются важные аспекты проектирования стандартной системы двухимпульсного тестирования (DPT), используемой для корреляции результатов между несколькими системами тестирования.

При разработке импульсного преобразователя очень важно правильно подобрать силовые транзисторы. В идеале технические описания от поставщиков силовых полупроводниковых приборов должны предоставлять достоверные данные, позволяющие инженерам сравнивать динамические характеристики. Но для динамических импульсных характеристик транзисторов не все так просто. Стандартная система тестирования, предназначенная для измерения параметров силовых транзисторов с широкой запрещенной зоной (WBG), должна обладать низкими значениями паразитных параметров, причем эти значения должны быть постоянны между системами.

В принципе, схема двухимпульсного тестирования (DPT) довольно проста (рис. 1). Инженеры-испытатели часто упрощают эту систему, заменяя транзистор верхнего ключа на диод. Однако после более внимательно изучения и принятия во внимание постоянно увеличивающиеся скорости переключения силовых транзисторов с широкой запрещенной зоной выясняется, что дополнительно имеется множество внешних паразитных компонентов, которые необходимо учитывать в системе (рис. 2).

Многие внешние паразитные компоненты, особенно в трех главных цепях – в цепи питания, цепи затвора и цепи постоянного тока – в основном рассматриваются из-за того, что они вносят «звон» в сигналы. Этот эффект подробно обсуждался в предыдущих статьях. Тем не менее, паразитные компоненты также оказывают значительное влияние на измеряемые параметры ключевого режима. На скорость переключения силового полупроводникового прибора влияют такие внешние факторы, как общая индуктивность цепи

питания и цепи затвора ($L_{инд}$), внешнее сопротивление цепи затвора (R_3), внешняя индуктивность цепи затвора (L_3), а также индуктивность нагрузки. Эти паразитные компоненты влияют на скорость переключения транзистора. Кроме того, на измеренную энергию, затрачиваемую на переключение, влияют паразитная емкость индуктивности нагрузки ($C_{инд}$) и паразитная индуктивность ($L_{шунт}$) шунта.

Ширина полосы пропускания шунта оказывает значительное влияние на энергию, затрачиваемую на переключение. Паразитный компонент $L_{шунт}$ приводит к более высокому измеренному пику тока во время включения и усиливает все высокочастотные компоненты измеряемого сигнала тока. Определение характеристик шунта, используемого для измерений, помогает в значительной степени минимизировать влияние $L_{шунт}$, так что его можно не учитывать во время сравнения показателей при правильной компенсации.

В технических описаниях силовых транзисторов содержится мало информации о методе DPT, используемом для определения параметров ключевого режима. В дополнение к параметрам испытаний (например, $V_{си}$, $I_{си}$, $V_{зи}$) обычно указываются только R_3 и $L_{инд}$. Все эти параметры можно легко контролировать и изменять в системе.

В некоторых технических описаниях также указана паразитная емкость ($C_{инд}$) индуктивности нагрузки и общая индуктивность цепи питания. $C_{инд}$ является важным параметром, поскольку он вводит дополнительную емкость параллельно транзистору в верхнем плече. Во время включения эта дополнительная емкость вызывает более высокие измеренные пиковые токи, чем фактический обратный ток восстановления транзистора, и, следовательно, увеличивает энергию, затрачиваемую на включение.

Конструкция оснастки сама по себе вносит паразитные емкости, которые никогда не указываются, но оказывают аналогичное влияние. Этот эффект виден на рис. 3, где показаны осциллограммы включения

¹ Keysight, инженер-проектировщик.

² Keysight, разработчик архитектуры решений.

³ Keysight, разработчик технической архитектуры.

⁴ Keysight, консультант по решениям Keysight в области силовой электроники.

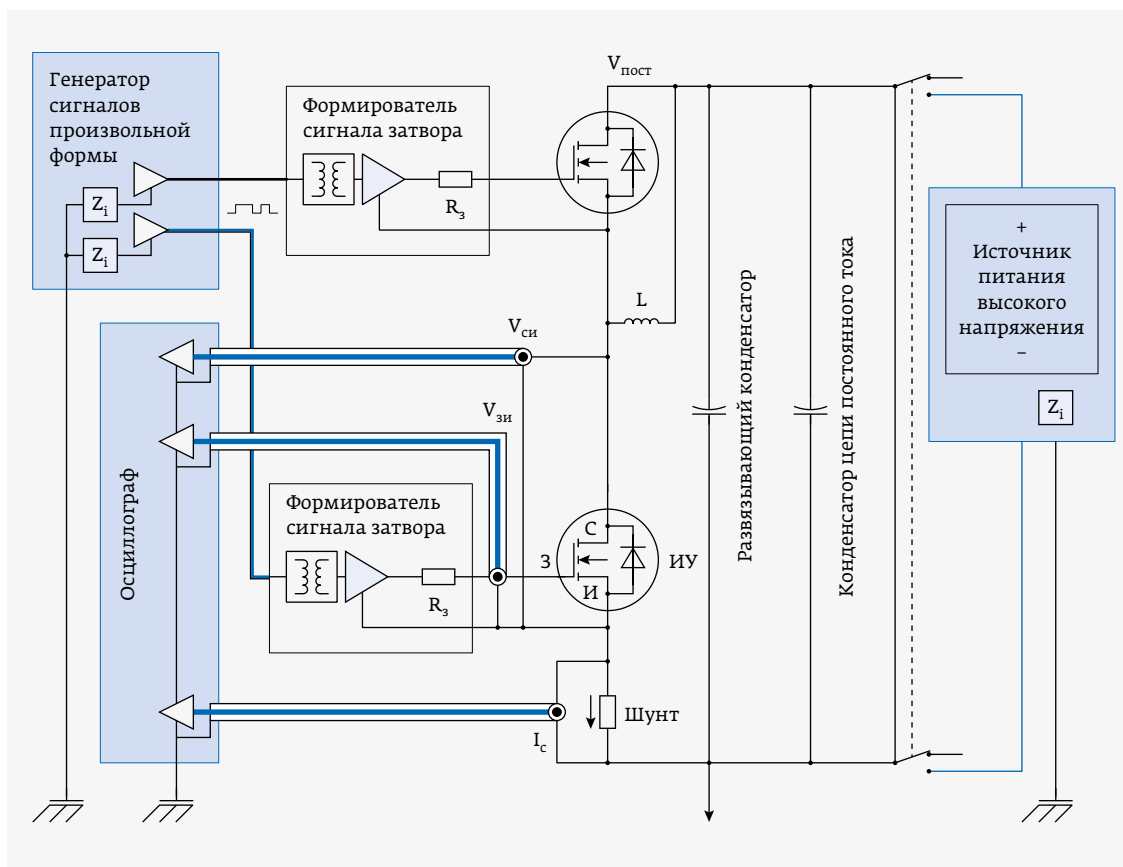


Рис. 1. Упрощенная схема DPT

для $V_{си} = 100$ В и $I_{си} = 20$ А. Измерение индуктивности с более высоким значением $C_{инд}$ показывает более высокий ток несколько большей длительности с задержкой спада $V_{си}$. Это приводит к увеличению на 4,5% энергии, затрачиваемой на переключение. Поэтому важно, чтобы $C_{инд}$ и внесенная паразитная емкость оснастки были минимальными.

Суммарная индуктивность цепи питания имеет важное значение, поскольку она вызывает падение напряжения $V_{си}$ во время броска тока i_c в соответствии с формулой:

$$V_{си} = L_{пит} \cdot di_c / dt. \quad [1]$$

Это падение напряжения становится существенным для быстро переключающихся транзисторов с большой крутизной кривой тока и должно учитываться при расчете времени нарастания. Важно разделить индуктивность цепи питания

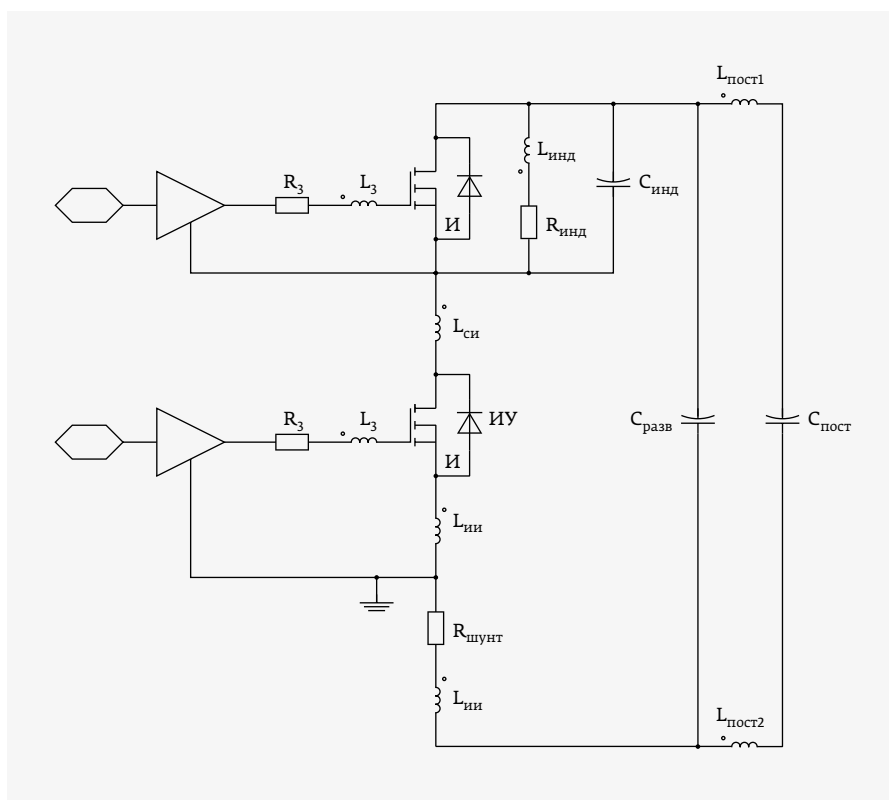


Рис. 2. Схема DPT с основными внешними паразитными компонентами

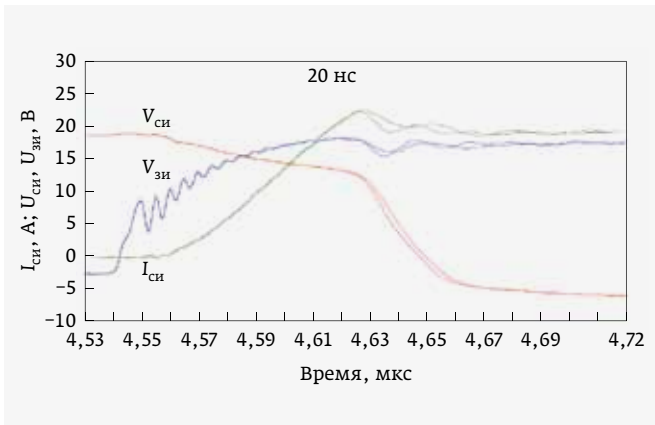


Рис. 3. Сравнение осциллограмм включения для двух индуктивностей с разной $C_{инд}$

на компоненты $L_{ин}$ и $L_{си}$, поскольку они оказывают разное влияние на систему и результаты измерений. $L_{ин}$ способствует уменьшению скорости переключения, так как создает отрицательную обратную связь в цепи затвора. Это уменьшает крутизну кривой выходного тока как при включении, так и при выключении. Меньшая крутизна кривой тока также уменьшает «звон». И напротив, $L_{си}$ является основным источником «звона» всех сигналов ($V_{си}$, $I_{си}$, $V_{зи}$), но практически не влияет на скорость переключения. Важно знать значения и $L_{ин}$, и $L_{си}$, потому что они оказывают противоположное влияние.

Временной сдвиг сигнала влияет на измерение параметров, зависящих от двух разных сигналов, таких как энергия, затрачиваемая на переключение, и время задержки. Для этих параметров важно учитывать положение пробника. Пробники можно размещать как близко, так и далеко от исследуемого устройства (ИУ), тем самым изменяя длину линии до пробника. Это приводит к дополнительному временному сдвигу в системе из-за задержки распространения сигнала. Простой тест показал, что изменение положения при измерении $V_{зи}$ на несколько сантиметров приводит к изменению времени задержки на 0,5 нс (рис. 4). Для более медленных коммутирующих устройств с временем задержки >50 нс это может быть несущественным. Однако новые, более быстродействующие устройства показывают время задержки 5 нс или менее, что соответствует ошибке 10% или более.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМ ДВУХИМПУЛЬСНОГО ТЕСТИРОВАНИЯ (DPT) ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ СОПОСТАВИМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

В настоящее время производители полупроводниковых приборов используют системы двухимпульсного тестирования собственного изготовления для получения

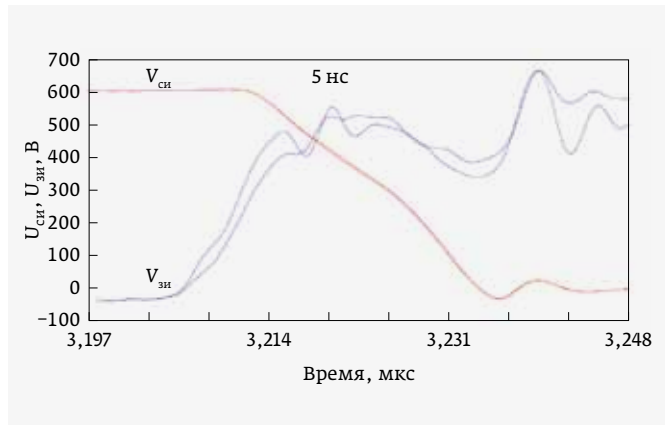


Рис. 4. Наложенные осциллограммы включения с разными положениями пробника при измерении $V_{зи}$ (синяя кривая)

параметров ключевого режима. При этом во многих случаях невозможно соотнести результаты измерений, выполненных разными системами.

Существует два подхода к получению сопоставимых результатов от нескольких систем, тестирующих силовые транзисторы с широкой запрещенной полосой.

Первый подход заключается в том, что производители измеряют паразитные параметры своей системы DPT и указывают их вместе с измеренными характеристиками транзисторов. Однако довольно сложно найти и совместно использовать информацию о всех паразитных компонентах (вносимых топологией, индуктивностью соединений и т. д.). Измерить некоторые из этих паразитных компонентов с высокой точностью не просто или даже невозможно. Даже если бы все условия были известны и сформулированы с высокой точностью, все равно было бы очень сложно количественно оценить точное влияние каждого из этих паразитных компонентов на результат.

Упрощенный пример того, насколько сложно сравнивать результаты измерений, полученные на двух разных системах двухимпульсного тестирования, показано в табл. 1. В примере показаны только некоторые из условий тестирования. В реальной таблице, показывающей все необходимые условия испытаний, будет перечислено гораздо больше параметров. Оба транзистора были измерены при одинаковом испытательном напряжении, токе и с одинаковым значением сопротивления $R_з$, но разными системами двухимпульсного тестирования. Транзистор А явно показывает более медленное включение и более высокую энергию переключения по сравнению с транзистором Б. Однако, как мы упоминали ранее, одним из основных факторов, влияющих на скорость переключения и энергию, является $L_{ин}$. Система тестирования, используемая для

Таблица 1. Упрощенный пример, показывающий сложность сопоставления данных, полученных на разных системах тестирования

Параметры	Транзистор А	Транзистор Б
V/I, В/А	600/20	600/20
R _з , Ом	0	0
t _{зад.вкл.} , нс	43	39
t _{нараст.} , нс	34	32
E _{вкл.} , мкДж	563	547
L _{си} , нГн	10	15
L _{ии} , нГн	10	5

измерений транзистора А, имеет значительно более высокое значение L_{ии} по сравнению с системой тестирования транзистора Б. Без моделирования и подробного анализа транзисторы трудно сравнить и узнать, какой из них более быстродействующий и потребляет меньше энергии на переключение в целевом применении.

Из-за трудностей с измерением всех паразитных компонентов и сравнением их влияния на полученный результат измерения необходимо искать другой подход для достижения нашей цели.

Второй подход к получению сопоставимых результатов состоит в том, чтобы поддерживать постоянство параметров паразитных компонентов системы двухимпульсного тестирования. Следовательно, нужна стандартная система тестирования. С правильно спроектированной и простой в использовании системой двухимпульсного тестирования, которая сводит к минимуму потенциальные ошибки, вызванные человеческим фактором, все параметры паразитных компонентов и другие влияющие факторы остаются относительно постоянными. Использование такого стандартного инструмента для получения характеристик нескольких транзисторов явно упрощает сравнение транзисторов разных производителей.

Необходимо решить несколько проблем, чтобы параметры паразитных компонентов оставались постоянными, а система тестирования была надежной и гибкой. При рассмотрении интерфейса подключения ИУ и формирователя сигнала затвора наиболее надежным методом является их пайка на печатной плате. Однако при этом теряется гибкость. Если потребуется поменять ИУ или резистор затвора, то необходимо выпаять старый элемент и впаять новый. После нескольких замен печатная плата может быть повреждена

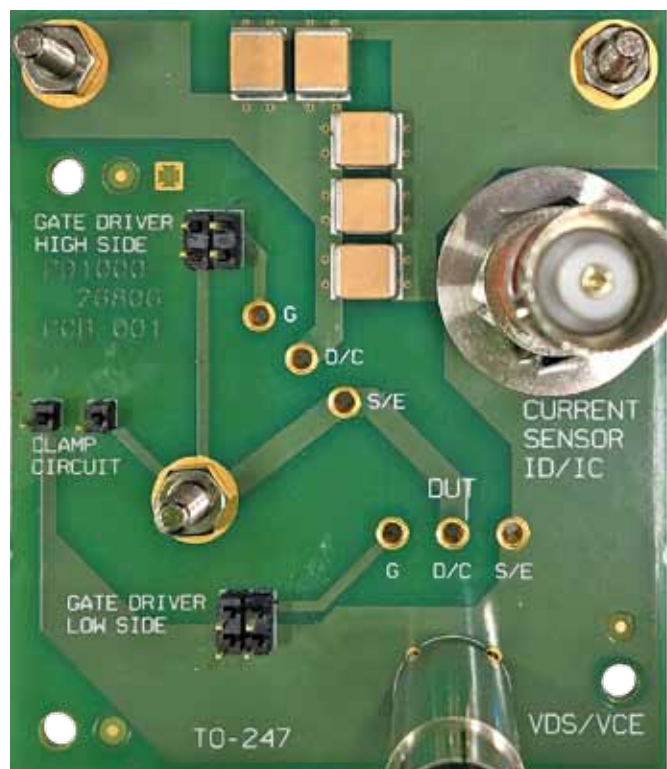


Рис. 5. Стандартная плата для тестирования транзисторов в корпусе TO247 обеспечивает гибкость при смене исследуемого устройства и формирователя сигнала затвора

и полученные результаты измерений больше не будут сравнимыми. Специально разработанные интерфейсные платы ИУ с плотными разъемами розеточного типа позволяют легко заменять транзисторы (например, в корпусе TO247) без необходимости пайки. Следовательно, одну плату ИУ можно использовать для тысяч подключений.

Простой способ повысить гибкость выбора формирователя сигнала затвора – иметь отдельную сменную плату (с разными значениями R_з), которую можно подключать к одной той же плате ИУ. Плата формирователя сигнала затвора обеспечивает многократное и устойчивое соединение с платой ИУ.

Идеальный сценарий изменения сопротивления R_з – иметь либо одну плату формирователя сигнала затвора с переключаемыми резисторами, либо сменные резисторы. Введение переключателей в цепь затвора добавляет паразитную индуктивность затвора и поэтому нежелательно. То же самое верно и для сменных резисторов с проволочными выводами, поскольку их паразитная индуктивность намного выше, чем у резисторов для поверхностного монтажа. Кроме того, при замене их легко перепутать, что приведет к ошибкам в документировании результатов тестирования.

Единственный практический способ правильно поддерживать небольшие и постоянные значения паразитных компонентов в цепях затвора и питания – это иметь стандартную конструкцию платы ИУ со сменными стандартными платами формирователя сигнала затвора. Это позволяет получить сопоставимые результаты между несколькими системами.

Минимизация паразитной индуктивности $L_{\text{пост1}}$ и $L_{\text{пост2}}$ между конденсаторами цепи постоянного тока и ИУ требует компромисса. Конденсаторы большой емкости имеют большие размеры и их неудобно устанавливать на плате ИУ. Лучше разместить их на отдельной конденсаторной плате, чтобы обеспечить лучшую гибкость для различных плат ИУ (ТО247-4, D2PAK-7 и т. д.). Однако это увеличивает значения $L_{\text{пост1}}$ и $L_{\text{пост2}}$. Вместо этого на каждой плате ИУ установлены развязывающие конденсаторы, чтобы минимизировать влияние цепи питания, не теряя при этом гибкости. Развязывающие конденсаторы с правильно рассчитанным номиналом компенсируют влияние больших значений $L_{\text{пост}}$.

После того, как паразитные индуктивности цепей затвора и питания станут постоянными, наиболее нестабильным компонентом будет катушка индуктивности L . Существует несколько факторов, которые необходимо учитывать в отношении этой индуктивности.

- Расположение относительно других компонентов и конструкция катушки индуктивности явно влияют на ее сопротивление по постоянному току и паразитную емкость. Для получения сопоставимых результатов рекомендуется использовать одну и ту же топологию и конструкцию для каждой системы.
- Катушка индуктивности генерирует вокруг себя магнитное поле. Изменение положения катушки индуктивности в системе может привести к различным взаимодействиям с магнитным полем, наводимым на систему. Поэтому важно

иметь фиксированное положение катушки индуктивности.

- Длина кабеля и его расположение относительно катушки индуктивности также увеличивают паразитные эффекты. Чем длиннее кабель, тем они больше. Следовательно, надежная система требует фиксированного позиционирования и подключения катушки.

Предпочтительно, чтобы пользователю не нужно было выполнять какие-либо изменения для переключения между различными значениями индуктивности и между обычным двухимпульсным тестированием или измерением времени обратного восстановления. Таким образом, достигается максимальная сопоставимость измерений в разных системах.

Международная электротехническая комиссия (IEC) и Объединенный совет по электронным приборам (JEDEC) десятилетиями работали над разработкой испытаний и стандартов тестирования. С появлением более быстродействующих транзисторов на основе полупроводников с широкой запрещенной зоной разрабатывать стандарты на испытания стало еще труднее. Пользователи ищут способы сравнить характеристики транзисторов разных производителей, чтобы выбрать лучший вариант для своего применения. Но только недавно JEDEC учредила комитет по электронным силовым преобразователям на полупроводниках с широкой запрещенной зоной JС-70 с целью разработки стандартов для быстродействующих силовых транзисторов.

Анализатор динамических характеристик силовых полупроводниковых приборов (система двухимпульсного тестирования) PD1500A производства Keysight отличается минимальным и стабильным уровнем паразитных составляющих, возможностью автоматического тестирования для минимизации ошибок, вызванных человеческим фактором, воспроизводимостью и сравнимостью результатов измерений между системами. Модульная но высокоинтегрированная конструкция дает возможность тестировать устройства в различных корпусах – ТО247-3, D2PAK-7 и скоро в ТО247-4 – на различных скоростях переключения с минимальными изменениями в системе.

Чтобы узнать больше об анализаторе динамических характеристик силовых полупроводниковых приборов PD1500A, посетите веб-страницу www.keysight.com/find/PD1500A и посмотрите видеоролик с демонстрацией его работы (<https://www.youtube.com/watch?v=CiBjBhCZFAM&t=46s>). Авторы продолжают публикацию статей о воспроизводимых и надежных измерениях с помощью системы двухимпульсного тестирования.

ООО СМП ИНТЕРНЕТ-МАГАЗИН
www.SMD.ru
 электронные компоненты
для поверхностного монтажа
 НОВОЕ В ПРОГРАММЕ ПОСТАВОК
 • Керамические конденсаторы до 100 мкФ
 • Синфазные дроссели на ток 10 А
 Москва, Ленинградский пр., 80 к. 32, e-mail: sales@smd.ru
 Тел.: (499) 158-7356, (495) 948-6244, (499) 943-8780

Testing&Control

27–29 октября 2020
Москва, Крокус Экспо

17-я Международная выставка
испытательного и контрольно-
измерительного оборудования



testing-control.ru



Измерительное
и метрологическое
оборудование



Оборудование
для лабораторного
контроля



Испытательное
оборудование



Оборудование
для неразрушающего
контроля и технической
диагностики



Производственный
контроль и машинное
зрение



Системы диагностики
и мониторинга

Получите бесплатный
электронный билет по промокоду
technosphera20

Организатор



Международная
Выставочная
Компания

+7 (495) 252 11 07
control@mvk.ru