

# Новое поколение испытательного оборудования

## для силовых полупроводниковых приборов

**Повышенные требования, предъявляемые к качеству силовых полупроводниковых приборов (СПП) большой мощности, обеспечиваются только с применением высокоточного измерительного оборудования. Например, при параллельном включении мощных диодов или тиристоров удовлетворительное токораспределение можно получить при разбросе значений прямого импульсного напряжения (для тиристоров — импульсного напряжения в открытом состоянии) порядка  $\pm 0,01$  В. Такие требования по точности обеспечиваются на измерительном оборудовании с общей погрешностью измерений 1,0–1,5%, а не 5%, установленной стандартом [1].**

**Владимир Веревкин  
Виктор Костусяк  
Сергей Лютиков**

marketing@element.zp.ua

Требование стандарта [1] к погрешности определения повторяющегося и неповторяющегося напряжений при испытании высоковольтных СПП также является недостаточным. При погрешности измерений 10% абсолютная погрешность для СПП 40-го класса составляет  $\pm 400$  В, что не только не устраивает потребителей, но и не позволяет корректно задать режимы при измерении динамических параметров.

Основной составляющей погрешности измерений параметров СПП является низкая точность задания параметров испытательного воздействия (силовых импульсов). Силовые части измерительного оборудования традиционно выполняются на базе LC- или RC-контуров [1, 2, 3], особенно для измерения параметров мощных СПП. Построение формирователей на пассивных элементах не позволяет получить точность задания параметров испытательных импульсов выше, чем 5–10%.

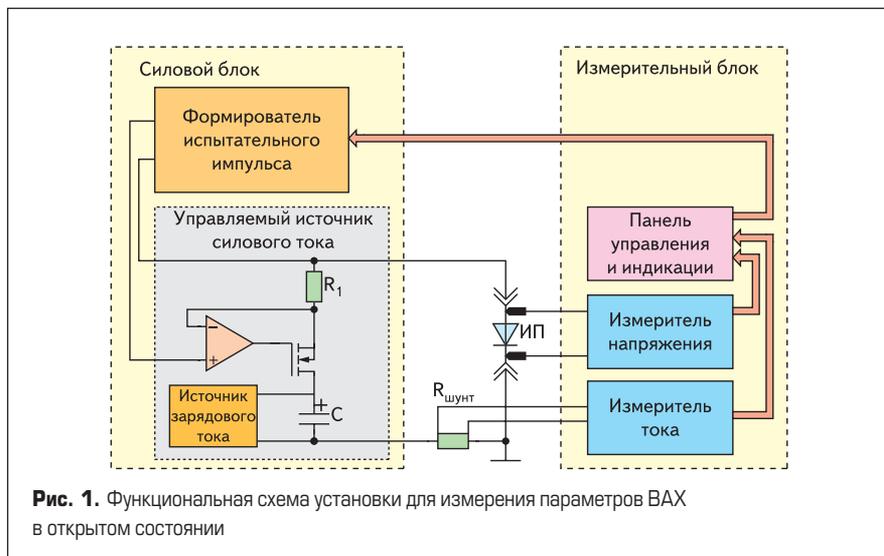
Кардинальным решением является построение силовых частей испытательного оборудования на базе активных формирователей — источников импульсного тока или напряжения, обеспечивающих стабилизацию параметров испытательного воздействия. Регулирующий элемент такого формирователя должен иметь высокое быстродействие, значительный коэффициент усиления и большую импульсную рассеиваемую мощность. Применение мощных IGBT не решает проблему, так как они предназначены, в основном, для применения в ключевом режиме, а в усилительном режиме работы имеют невысокие граничные частоты.

Предъявляемым требованиям в максимальной степени соответствуют современные полевые транзисторы. Большая мощность, малые потери в открытом состоянии, высокое быстродействие, устойчивая работа в усилительном режиме и большая крутизна усиления при больших токах делают MOSFET практически незаменимыми элементами для построения силовой части измерительного оборудования. Кроме того, MOSFET допускают параллельное соединение без дополнительных схемных затрат, что позволяет строить источники импульсного тока на 10–20 кА.

На ООО «Элемент-Преобразователь» (г. Запорожье, Украина) разработано новое поколение оборудования для измерений параметров СПП.

Для измерения параметров ВАХ СПП в открытом состоянии ( $U_{tm}$ ), порогового напряжения ( $U_o$ ) и динамического сопротивления ( $R_d$ ) — разработана установка УП-32. Функциональная схема установки представлена на рис. 1. Силовая часть установки выполнена по схеме источника тока и состоит из десяти одинаковых по схемному построению и конструкции блоков, соединенных параллельно.

Применение в качестве активного формирователя управляемого источника силового тока исключает



**Рис. 1.** Функциональная схема установки для измерения параметров ВАХ в открытом состоянии

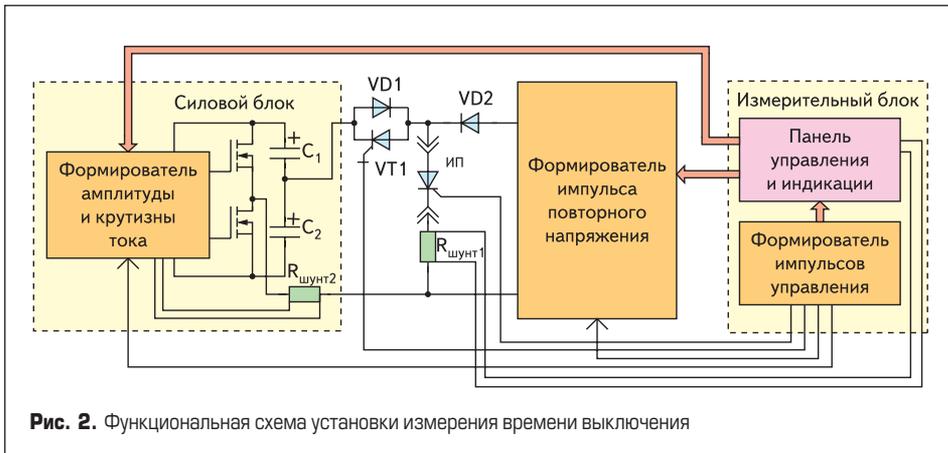


Рис. 2. Функциональная схема установки измерения времени выключения

ет зависимость амплитуды и формы испытательного импульса от изменений значений емкости накопительных конденсаторов и напряжения на них. Это позволило выполнить накопитель на малогабаритных электролитических конденсаторах, не потеряв при этом точность задания параметров формируемого импульса тока.

В ходе испытаний через испытуемый прибор пропускается однократный трехступенчатый импульс тока, что обеспечивает требование полного включения полупроводниковой структуры большой площади при минимальных энергетических затратах [4]. Длительность первой ступени составляет не менее 3,5 мс, амплитуда регулируется от 100 до 500 А. Длительности второй и третьей ступеней составляют не менее 300 мкс. Амплитуды этих ступеней регулируются от 200 до 12 500 А. На второй ступени измеряется значение импульсного напряжения, необходимое для определения порогового напряжения и динамического сопротивления, на третьей ступени измеряется значение  $U_{tm}$ .

Блок управления установки представляет собой мультипроцессорную систему на базе микропроцессоров Atmel. Измеритель мгновенных значений тока и напряжения выполнен на 12-разрядном АЦП Analog Devices. Форма испытательного воздействия задается 12-разрядным ЦАП. По окончании измерений на индикаторы выводятся четыре значения: амплитуда тока, при которой производилось измерение  $U_{tm}$ , значение  $U_{tm}$ ,  $U_0$  и  $R_d$ . Погрешность измерений напряжения и тока во всем диапазоне составляет не более 1%.

Для обеспечения измерений напряжения с точностью порядка  $\pm 10$  мВ необходимо исключить влияние на результат измерений электромагнитной составляющей, обусловленной протеканием в силовой цепи импульсов тока с амплитудой порядка 10 кА. С этой целью монтаж силовой части установки и ее подключение к испытуемому прибору выполнены в виде бифилярных линий с минимальной собственной индуктивностью.

По аналогичным схемотехническим и конструктивным решениям выполнены источники прямого и обратного импульсов тока установки для измерения времени выключения. Отличия обусловлены требованиями по более высокому быстродействию формировате-

ля. Функциональная схема установки приведена на рис. 2. Формирователь импульсов прямого и обратного токов представляет собой усилитель с двухтактным выходом, несимметричным (плюс 25 В и минус 100 В) напряжением питания и глубокой обратной связью по току. Развязка низковольтных источников тока от высоковольтного источника повторного напряжения осуществляется быстро восстанавливающимися диодами VD1 и VD2 и запираемым тиристором VT1.

Основные технические характеристики установки:

- амплитуда импульса прямого тока — от 200 до 2000 А;
- уровень ограничения обратного тока равен амплитуде импульса прямого тока;
- скорость спада прямого тока — от 5 до 200 А/мкс (минимальная длительность фронта спада тока составляет 10 мкс);
- скорость нарастания повторного напряжения — от 20 до 200 В/мкс;
- амплитуда импульса повторного напряжения — от 500 до 2000 В;
- диапазон измеряемых значений времени выключения — от 15 до 1000 мкс.

Все параметры регулируются независимо друг от друга.

Еще одной принципиальной особенностью установки является построение источника импульсов повторного напряжения. Источник состоит из восьми соединенных последовательно формирователей, каждый из которых формирует импульс напряжения трапецидальной формы с линейным передним фронтом. Выходной импульс источника, прикла-

дываемый к испытуемому прибору, имеет крутизну и амплитуду, пропорциональную количеству источников.

Схема формирователя напряжения представлена на рис. 3. Формирователь выполнен по схеме параметрического источника тока на MOSFET, работающего на емкостную нагрузку. Для исключения влияния изменения барьерной емкости испытуемого прибора на форму переднего фронта импульса напряжения обратная связь по току берется только с резистора R1, включенного последовательно с формирующим конденсатором C2. Амплитуда выходного импульса напряжения регулируется путем изменения напряжения на стоке транзистора.

Такой же формирователь импульсов напряжения является основой установки для определения критической скорости нарастания напряжения в закрытом состоянии  $(dU/dt)_{крит}$ .

Преимущество предложенного решения по построению источников импульсов напряжения заключается в следующем. Традиционно высоковольтные формирователи с регулируемой амплитудой и скоростью нарастания импульсов строятся либо на лампах, либо в виде последовательно включенных транзисторов, подключенных к источнику высокого напряжения. Пробой одного из транзисторов приводит к перегрузке и возможному выходу из строя остальных транзисторов устройства. При последовательном выключении функционально законченных формирователей импульсного напряжения пробой одного из транзисторов просто приводит к уменьшению выходного напряжения без перегрузки оставшихся элементов схемы.

Установка для определения  $(dU/dt)_{крит}$  обеспечивает измерение тиристорных классов от 5-го по 42-й (амплитуда выходного напряжения от 335 до 2814 В задается с погрешностью не более 5%) и имеет диапазон по регулированию скорости нарастания переднего фронта импульсов напряжения от 50 до 2500 В/мкс. Отклонение крутизны напряжения от заданного значения в диапазоне от 0,1 до 0,9 амплитуды — не более 5%. Высокая достоверность результатов измерений обусловлена и тем, что при включении испытуемого тиристора по превышению  $(dU/dt)$  формирователь обеспечивает протекание через него импульса тока с амплитудой около 10 А.

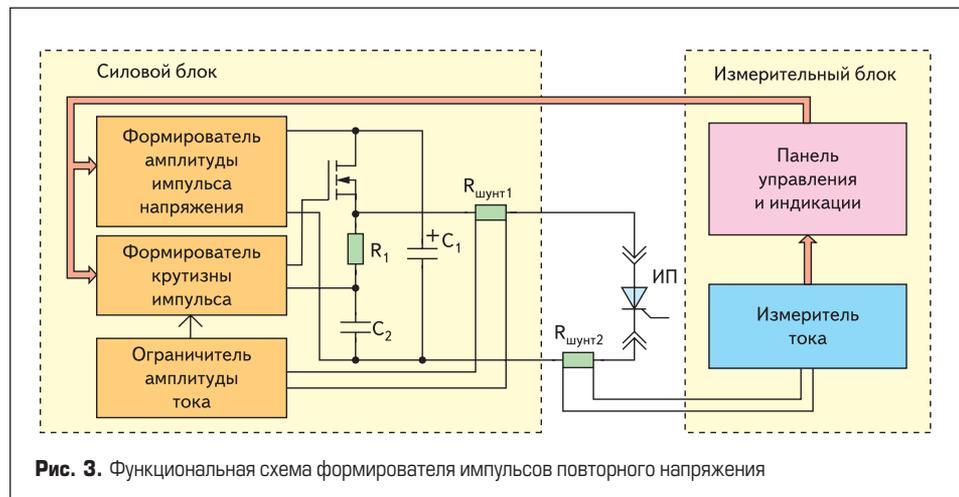


Рис. 3. Функциональная схема формирователя импульсов повторного напряжения

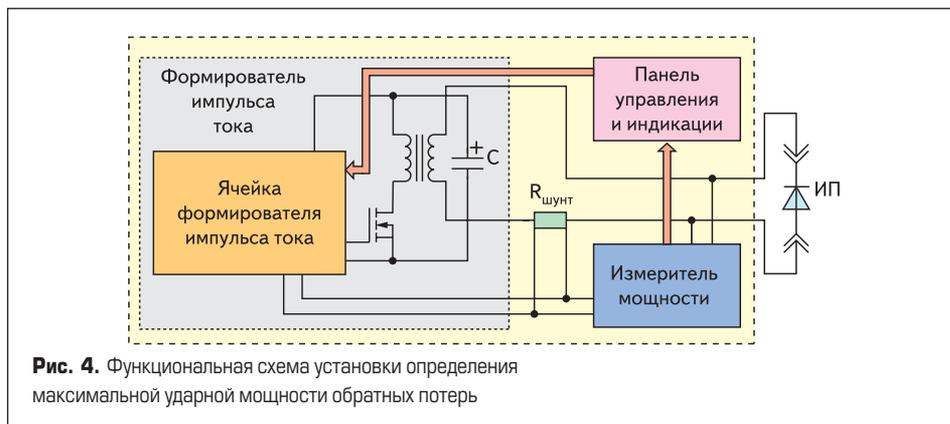


Рис. 4. Функциональная схема установки определения максимальной ударной мощности обратных потерь

Схемотехнические решения, положенные в основу силовой части установки для определения максимальной ударной мощности обратных потерь, несколько отличаются от рассмотренных выше. Источник импульсов полусинусоидальной формы [1] с напряжением до 7,5 кВ и максимальной импульсной мощностью более 40 кВт реализован в виде источника тока на MOSFET, работающего на импульсный трансформатор (рис. 4). Глубокая обратная связь по току с вторичной обмотки трансформатора позволяет обеспечить точность поддержания формы испытательного импульса и стабильность его амплитуды при нелинейном характере нагрузки.

Через испытуемый диод пропускается двухуровневый импульс тока. Вначале формирует-

ся импульс тока трапециевидальной формы с амплитудой 100 мА, предназначенный для вывода испытуемого диода на начало лавинного пробоя и измерения его напряжения. Затем ток увеличивается и на участке лавинного пробоя имеет полусинусоидальную форму с длительностью по уровню 0,5 от амплитудного значения 100 мкс. Амплитуда импульса регулируется от 100 мА до величины, ограниченной максимальной мощностью 40 кВт.

Метрологические характеристики установки дают возможность провести испытания лавинных диодов всех известных типов.

### Заключение

1. Новое поколение испытательного оборудования обеспечивает точность измере-

ний, удовлетворяющую любые требования потребителей по подбору параметров СПП.

2. Высокая точность измерений способствует обеспечению высокого качества СПП, которые выпускает ООО «Элемент-Преобразователь».
3. MOSFET сегодня не имеют альтернативы при разработке силовых блоков точного измерительного оборудования для СПП.
4. Применение активных формирователей дает возможность построения силовых частей испытательного оборудования из набора однотипных секций, что обеспечивает почти неограниченные возможности по расширению диапазонов по току и напряжению.

### Литература

1. ГОСТ 24461-80. Приборы полупроводниковые силовые. Методы измерений и испытаний.
2. Бардин В. М., Моисеев Л. Г., Сурочан Ж. Г., Чебовский О. Г. Аппаратура и методы контроля параметров силовых полупроводниковых вентилях. М.: «Энергия». 1971.
3. Лапте Р., Фишер Ф. Измерения в энергетической электронике. М.: Энергоатомиздат. 1986.
4. Бардин В. М., Цетлин В. П., Миков А. Г., Петров Б. И. Переносной прибор для измерения прямого падения напряжения на силовых полупроводниковых приборах // Измерительная техника. 1980. № 1.