

# АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МОДУЛЕЙ БТИЗ И БВД

## AUTOMATED MEASUREMENT OF THE DYNAMIC PARAMETERS OF THE IGBT AND FRD SEMICONDUCTOR MODULES

**A. Drakin  
V. Zotin  
A. Shkolin**

*Summary.* The article devotes to automating the measurement of the dynamic parameters of power semiconductor modules based on bipolar transistors with insulated gate bipolar transistors (IGBT) and fast recovery diodes (FRD). The authors provide solutions to improve the accuracy of measuring dynamic parameters when developing a device for automated measurements. The circuitry of the main assemblies, technical characteristics and software of a meter designed to automate the monitoring of capacitive parameters of power modules based on transistors and diodes are considered. The results of experimental tests confirming the effectiveness of the proposed method of technical implementation are given. The implementation of the software and hardware complex is described and directions for its further improvement are proposed. The material of the article is of interest to the developers and users of the means of equipment for automated testing of electric parameters of semiconductor devices.

*Keywords:* automated test equipment, capacitive parameters, power semiconductor modules, IGBT, FRD, MatLab.

**Дракин Александр Юрьевич**

*К.т.н., с.н.с., Брянский государственный технический университет  
ada108@yandex.ru*

**Зотин Виталий Федорович**

*К.т.н., доцент, с.н.с., Брянский государственный технический университет  
v.f.zotin@gmail.com*

**Школин Алексей Николаевич**

*Н.с., Брянский государственный технический университет  
ixe@yandex.ru*

*Аннотация.* Статья посвящена автоматизации измерения динамических параметров силовых полупроводниковых модулей на базе биполярных транзисторов с изолированным затвором (БТИЗ) и быстро восстанавливающихся диодов (БВД). Приведены решения по повышению точности измерения динамических параметров при разработке прибора для автоматизированных измерений. Рассмотрены схемотехника основных узлов, технические характеристики и программное обеспечение измерителя, предназначенного для автоматизации контроля ёмкостных параметров силовых модулей на базе БТИЗ и БВД. Приведены результаты натуральных испытаний, подтверждающие эффективность предложенного метода технической реализации. Описана реализация программно-аппаратного комплекса и предложены направления его дальнейшего совершенствования. Материал статьи представляет интерес для разработчиков и пользователей средств автоматизированного контроля электрических параметров полупроводниковых приборов.

*Ключевые слова:* автоматизированное тестовое оборудование, ёмкостные параметры, силовые полупроводниковые модули, БТИЗ, БВД, MatLab.

## Введение

**Н**ациональным стандартом [1] и программными межоперационного и выходного контроля электрических параметров при производстве силовых полупроводниковых модулей на базе биполярных транзисторов с изолированным затвором (БТИЗ, IGBT) и быстро восстанавливающихся диодов (БВД, FRD) предусмотрено измерение их динамических параметров. На основе опыта [2–4], полученного авторами статьи в рамках работ по разработке автоматизированных систем для измерения динамических параметров силовых полупроводниковых модулей (в частности времени обратного восстановления, скорости нарастания напряжения), определенный интерес представляют вопросы, посвященные автома-

тизации измерения входной, выходной ёмкости IGBT и общей ёмкости FRD.

Необходимый диапазон измерения для упомянутых ёмкостей обычно составляет 50 пФ — 50 нФ, а частота тока, на которой проводится измерение, должна быть равна 1 МГц. Повышенная частота и широкий диапазон измерения создают существенные трудности при контроле ёмкостных параметров силовых модулей. Ситуация значительно ухудшается при автоматизации процесса контроля невозможностью непосредственного подключения тестируемого изделия к измерителю и необходимостью применения дополнительных контактирующих устройств для обеспечения возможности быстрой замены испытуемых модулей IGBT/FRD. Применение контактирующего устройства ведёт к значи-

тельному увеличению расстояния между контактами испытываемого модуля и измерителя. Соединительные проводники существенно снижают помехоустойчивость измерителя и искажают результаты измерения, а экранирование проводников вносит в измерительную цепь дополнительную паразитную ёмкость. Например, для коаксиального кабеля 50 Ом она характеризуется величиной около 100 пФ/м.

Получение результата измерения в общем случае возможно при учёте влияния паразитной ёмкости соединительных проводников, которая является аддитивной составляющей результата измерения и может быть устранена при калибровке, однако при этом трудно рассчитывать на высокую точность результата при измерении сравнительно небольших величин ёмкости. Таким образом, разработка метода «дистанционного» измерения ёмкостных параметров силовых модулей и его техническая реализация являются весьма актуальными задачами.

Второй группой вопросов, возникающих при создании автоматизированного тестового и измерительного оборудования, является круг задач, связанных с разработкой программного обеспечения (ПО), с помощью которого можно не только обеспечить удобство использования измерителя, но и получить высокие метрологические характеристики.

Разнообразие программных продуктов, сред разработки и математических методов обработки экспериментальных данных ставит разработчика перед выбором наиболее оптимальных инструментов для решения поставленной задачи. Основными критериями в нашем случае являются скорость разработки, наличие и поддержка стандартных аппаратных интерфейсов, развитый математический аппарат в виде набора готовых функций, реализующих методы статистической обработки, решения дифференциальных уравнений, возможность построения измерительной системы с разработанной аппаратурой и реализации дружественного пользовательского графического интерфейса. В соответствии с изложенными требованиями в качестве возможных альтернатив рассматривались следующие среды разработки: LabVIEW фирмы National Instruments, MatLab фирмы Mathworks, Test Executive And Development Studio — ATEasy фирмы Marvin Test Solutions, а также XperTest отечественной компании «Совтест Микро». После анализа перечисленных сред разработки с точки зрения решаемой задачи, предполагающей разработку оригинального открытого аппаратного обеспечения и ПО верхнего уровня для управления процессом тестирования был выбран MatLab, как продукт, лишённый недостатков потенциальных конкурентов, в рамках рассматриваемой прикладной измерительной задачи.

## Материалы и методы

Для устранения проблем, возникающих при «дистанционном» измерении ёмкостных параметров силовых модулей, предлагается метод, основанный на [5] и модифицированный в соответствии с решаемой задачей.

Суть предлагаемого подхода заключается в следующем. Испытуемый образец подключается к контактам измерителя отрезками коаксиального кабеля. При этом длина отрезков соответствует заданной «дистанции». Генератор синусоидального напряжения (ГСН) частотой 1 МГц со стабилизированной амплитудой подключается к одному из выводов испытываемого изделия посредством разделительного конденсатора, обеспечивающего передачу только переменной составляющей. Смещающий источник постоянного напряжения подключается к тому же выводу испытываемого изделия посредством блокировочного дросселя, что обеспечивает прохождение только постоянной составляющей токового сигнала в направлении данного источника. Синусоидальное напряжение ГСН создаёт ток, проходящий по разделительному конденсатору достаточно большой ёмкости, двум коаксиальным кабелям, испытываемому прибору, и образцовому конденсатору  $C_0$ , размещённому в цепи отрицательной обратной связи операционного усилителя (ОУ). При этом вход ОУ поддерживает потенциал инвертирующего входа и жилы одного кабеля близким к нулю, что практически исключает влияние собственной ёмкости этого кабеля на величину этого тока. Собственная ёмкость другого кабеля шунтируется весьма малым выходным сопротивлением генератора синусоидального напряжения и также не влияет на величину тока. Таким образом, амплитуда выходного напряжения ОУ пропорциональна произведению амплитуды напряжения ГСН и измеряемой ёмкости испытываемого образца и обратно пропорциональна ёмкости образцового конденсатора. При постоянной амплитуде напряжения ГСН диапазон измерения ёмкости устанавливается выбором конкретного номинала образцового конденсатора [4].

Для измерения входной ёмкости БТИЗ синусоидальное напряжение ГСН  $G_2$  создаёт ток во входной цепи транзистора (рис. 1). Источник постоянного напряжения  $G_1$  устанавливает требуемое постоянное напряжение коллектор-эмиттер, а разделительный конденсатор  $C_p$  соответствующей ёмкости замыкает выходную цепь транзистора по переменной составляющей тока, обеспечивая на частоте 1 МГц практически нулевой импеданс. При этом ёмкость кабеля  $W_1$  в цепи коллектора не влияет на измерительный сигнал, ёмкость кабеля  $W_3$  в цепи затвора зашунтирована весьма малым выходным сопротивлением генератора ГСН, а потенциал жилы кабеля  $W_2$  в цепи эмиттера близок к нулю за счёт ОУ ДА.

Предлагаемый метод измерения ёмкостных параметров IGBT и FRD реализован в разработанном авторами

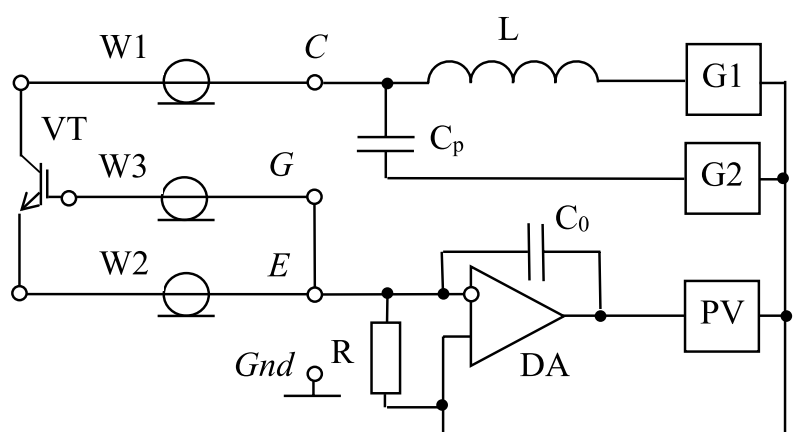


Рис. 1. Схема измерения входной ёмкости IGBT

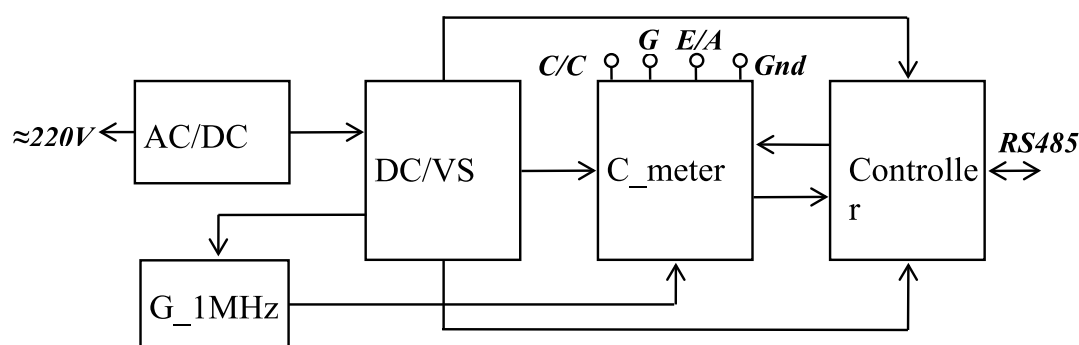


Рис. 2. Функциональная структура блока измерения ёмкостных параметров

блоке измерения ёмкостных параметров, функционирующем под управлением внешней ЭВМ, в составе установки автоматизированного контроля параметров силовых полупроводниковых модулей на базе IGBT и FRD.

Функциональная схема блока (рис. 2) содержит преобразователь сетевого переменного напряжения электропитания  $\approx 220V$  в промежуточное постоянное напряжение 12 В (AC/DC), ГСН частотой 1 МГц ( $G_{1MHz}$ ), формирователь постоянного испытательного напряжения 25 В с гальванической развязкой и напряжений электропитания  $\pm 5$  В и +5 В соответственно для аналоговых и цифровых устройств (DC/VS), измерительный преобразователь контролируемой ёмкости в аналоговый сигнал (C\_meter) и микропроцессорное устройство Controller, обеспечивающее режим и выбор поддиапазона измерений, формирование результата и обмен информацией с внешней ЭВМ (интерфейс RS485).

При измерении общей ёмкости FRD с помощью отрезков коаксиального кабеля подключается к контактам C/C (катод) и E/A (анод). На FRD подаётся обратное

смещающее напряжение, равное 25 В. Генератор создаёт высокочастотный синусоидальный ток, амплитуда которого пропорциональна ёмкости диода. В измерительном преобразователе происходит преобразование тока в напряжение, его детектирование и масштабирование. С помощью аналого-цифрового преобразователя в составе контроллера формируется результат измерения ёмкости.

При измерении входной или выходной ёмкости IGBT с помощью отрезков коаксиального кабеля подключается к контактам C/C (коллектор), G (затвор) и E/A (эмиттер).

Результат измерения ёмкостей транзистора формируется аналогично диоду.

Измерительный преобразователь C\_meter своей схемой реализует подход, изложенный выше, и содержит ОУ, набор образцовых конденсаторов, разделительный конденсатор, дроссель, преобразователь сигнала и ряд дополнительных элементов. Преобразователь сигнала

выполнен в виде прецизионного выпрямителя на ОУ с применением сигнальных диодов Шоттки, RC-фильтра нижних частот и нормирующего ОУ.

Предлагаемая схемотехника и применение интегральных качественных ОУ (например, ОРА656U) обеспечивают весьма низкий выходной импеданс генератора синусоидального напряжения и, следовательно, практически полную нейтрализацию ёмкости отрезков коаксиальных кабелей.

Основой контроллера блока измерения ёмкостных параметров является модуль STM32F4DISCOVERY с 32-разрядным микроконтроллером на архитектуре ARM. Формирование результата измерения ёмкости производится с помощью 12-разрядного АЦП в составе микроконтроллера.

Для обмена информацией с внешней ЭВМ контроллер содержит интерфейсный преобразователь «RS485/UART» с гальванической развязкой, реализованный на микросхеме ADM2483 (Analog Devices).

Для применения блока измерения ёмкостных параметров в составе установок автоматизированного контроля с организацией локальной информационной сети предусмотрена возможность задания индивидуального адреса контроллера.

Конструктивно измеритель ёмкостей выполнен в виде унифицированного устройства и содержит функциональные узлы согласно схемы на рис. 2 в виде печатных модулей.

Блок обеспечивает измерение ёмкости от 50 пФ до 50 нФ в трёх поддиапазонах: (50–500) пФ, (500–5000) пФ и (5–50) нФ. Выбор поддиапазона для формирования окончательного результата осуществляется автоматически. Основная погрешность измерения ёмкости  $S_x$  не превышает  $\pm (0,1S_x + 2 \text{ пФ})$ .

Постоянное напряжение «коллектор — эмиттер» или «катод — анод» при измерении входной и выходной ёмкости IGBT или общей ёмкости БВД (25 В) поддерживается с погрешностью не более  $\pm 0,7 \text{ В}$ .

Амплитуда переменной составляющей напряжения «коллектор — эмиттер» с частотой измерения (1 МГц) при измерении входной ёмкости IGBT не превышает 5 мВ.

При измерении выходной ёмкости IGBT затвор соединяется с эмиттером с помощью контакта реле так, что постоянное напряжение «затвор — эмиттер» не превышает величины 10 мВ.

Программа измерения ёмкостных параметров, выполняемая контроллером блока, запускается управляющей программой верхнего уровня, установленной на внешнем персональном компьютере. Управляющая программа реализована в системе MatLab, которая предоставляет достаточный набор средств для программирования и проектирования графического интерфейса, упрощает математическую обработку результатов измерений, позволяет запрограммировать взаимодействие с внешними устройствами через последовательный интерфейс с помощью протокола ModBus-RTU.

Программный цикл предусматривает измерение входной и выходной ёмкости независимо от объекта контроля (IGBT или FRD). Для FRD результат измерения входной ёмкости оказывается нулевым, а под выходной ёмкостью подразумевается его общая ёмкость.

Для компенсации случайной составляющей погрешности измерения управляющей программой предусмотрена возможность многократных измерений и статистической обработки полученных результатов.

Измеритель ёмкости работает под управлением верхнего уровня (ПО персонального компьютера). Для обмена информацией с компьютером на физическом уровне реализован последовательный интерфейс RS-485 с гальванической развязкой и питанием со стороны верхнего уровня, поддерживающий топологию «общая шина». Адресация и форматы передаваемой информации соответствуют стандарту ModBus-RTU.

В частном случае, при определении параметров полевых транзисторов используется национальный стандарт [6]. Согласно этому стандарту (п. 3.1) «Погрешность измерения параметров полевых транзисторов (при распределении составляющих погрешности по нормальному закону) определяют по формуле

$$\delta = \pm \sqrt{\delta_1^2 + (\alpha_U \delta_U)^2 + (\alpha_I \delta_I)^2 + (\alpha_f \delta_f)^2 + (\alpha_T \delta_T)^2 + \delta_L^2}, \quad (1)$$

где  $\delta_I$  — основная погрешность измерительной установки;  $\delta_I, \delta_U, \delta_f, \delta_T$  — соответственно погрешности задания режима: напряжения, тока, частоты измерения, температуры окружающей среды, определенные с доверительной вероятностью 0,997;  $\alpha_U, \alpha_I, \alpha_f, \alpha_T$  — коэффициенты влияния напряжения, тока, частоты и температуры на значение измеряемого параметра;  $\delta_L$  — составляющая погрешности, связанная с «дистанционными измерениями».

Данная формула даёт перечень основных факторов, определяющих режим измерения и оказывающих значимое влияние на результаты измерения.

Описанные выше технические решения позволяют получить показатели точности измерений ёмкостных параметров FRD и IGBT. Поскольку рассмотренное выше техническое решение обеспечивает приемлемую точность только за счёт компенсации одного вида составляющей погрешности измерений из нескольких, а именно — дистанционную составляющую в составе *инструментальной* погрешности, постольку имеется возможность дальнейшего повышения точности выполнения измерений за счёт:

- а) статистической обработки результатов измерений — минимизация *случайной* погрешности;
- б) учёта физических процессов в полупроводниковых приборах и влияния факторов окружающей среды — минимизация *дополнительной* погрешности;
- в) наличия и открытости программной модели и алгоритма выполнения измерений с возможностью их корректировки пользователем в условиях промышленной эксплуатации измерительного комплекса — минимизация *методической* погрешности;
- г) автоматизации выполнения измерений — устранение *субъективной* погрешности;
- д) автокалибровки и периодического контроля величины погрешности измерений — минимизация *систематической* погрешности.

Учёт и компенсация составляющих погрешности измерений (а – е) [7] в рамках рассматриваемой измерительной системы осуществляются с помощью программного обеспечения (ПО) на верхнем уровне — персонального компьютера и на нижнем — ПО микроконтроллера.

Рассмотрим проблемы, возникающие при реализации программного обеспечения измерительной системы, а также пути их решения.

Минимизация случайной погрешности осуществляется программой микроконтроллера при выполнении серии экспериментов (от 10 до 100) с каждым IGBT/FRD и их последующей обработкой путём отбрасывания минимальных и максимальных значений с последующим вычислением среднего значения оставшихся после отбрасывания результатов измерения.

Дополнительная и систематическая погрешности минимизируются за счёт использования поведенческой модели исследуемого полупроводникового прибора, разработанной авторами данной публикации на основе исследований мультифизических и SPICE-моделей силовых полупроводниковых приборов. Рассмотрение этих моделей выходит за рамки настоящей публикации, однако следует отметить, что их использование полностью

оправдано при комплексном подходе к повышению точности выполняемых измерений. Результаты измерений параметров технических объектов фактически используются для построения некоторой модели, которая адекватно отражает характеристики, свойства и функциональную структуру исследуемого объекта. Так в метрологии используется множество моделей объектов измерений, наиболее применимыми среди которых можно считать нормативную модель объекта, аналитические модели (идеальную и реалистическую) и экспериментальную модель объекта.

Нормативную модель разрабатывают в процессе проектирования и оформляют технической документацией (чертёж, техническое описание, технические условия включают в себя нормативные значения параметров изделия и т.д.). Она предназначена для создания и последующего контроля параметров объекта и содержит все необходимые для этого наборы описаний объекта. Если эта модель используется для измерительного контроля объекта, для разработки методики выполнения измерений параметров созданного объекта, то метрологическая нормативная модель объекта полностью соответствует общей нормативной модели. Реалистическую модель объекта получают в ходе аналитического исследования возможных внешних воздействий. Экспериментальная метрологическая модель строится на основе информации об экспериментально полученных значениях параметров контролируемого объекта. Таким образом, контроль характеристик любого технического объекта, в том числе и силовых полупроводниковых модулей IGBT/FRD в нашем случае обязательно предполагает построение экспериментальной модели и сопоставление её с нормативной моделью для принятия решения об их взаимном соответствии.

Перечисленные виды моделей находят своё отражение в использовании поведенческого подхода, который позволяет эффективно и с высокой степенью достоверности учитывать изменение характеристик контролируемых изделий в различных режимах при сокращении количества и номенклатуры моделей. При этом поведенческий подход позволяет строить модели, для которых требуются на порядки меньшие затраты вычислительных ресурсов относительно использования математического и схематехнического моделирования. Подробнее о поведенческом подходе см. [8].

## Результаты

Для подтверждения эффективности предложенного метода измерения ёмкостных параметров и его технической реализации проведены натурные испытания разработанного авторами блока.

Таблица 1. Результаты измерений

Выходная ёмкость, пФ		Входная ёмкость, пФ	
C/C — EA	На дистанции	G — EA	На дистанции
27,2	27,3	27,8	28,0

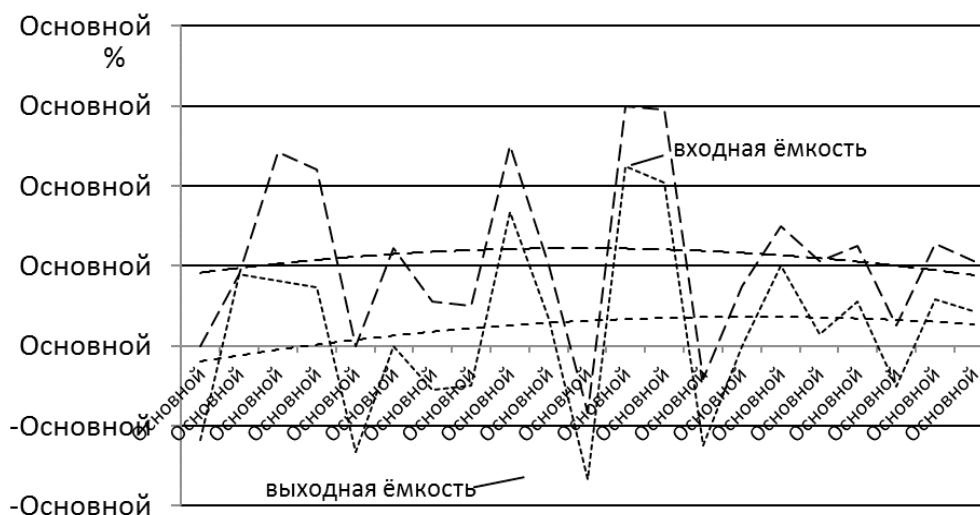


Рис. 3. Относительная погрешность измерений

Возможность дистанционного измерения малой ёмкости без компенсации доли ёмкости соединительных проводников, при обработке измерительного сигнала оценивалась измерением ёмкости конденсатора с номинальным значением 27 пФ, несмотря на то, что эта величина не входит в заданный диапазон. Результаты измерений, полученные с применением статистической обработки, приведены в табл. 1.

Испытание блока измерения ёмкостных параметров показало необходимость фазовой коррекции частотной характеристики ОУ ОРА656U в схеме измерительного преобразователя (DA, рис. 1–2) для обеспечения устойчивой работы в диапазонах измерения (500–5000) пФ и (5–50) нФ.

На рис. 3 приведены результаты эксперимента, характеризующие относительную погрешность в режимах измерения как входной, так и выходной ёмкости IGBT.

С помощью описанного измерителя ёмкостных параметров был проведен ряд экспериментов, включающих по 100 замеров ёмкости FRD, входной и выходной ёмкости IGBT, результаты которых представлены на рис. 4 – 6. Штриховой линией на этих рисунках показаны непосредственные результаты измерения ёмкости, а сплошной линией сглаженные значения с применением полинома 3-го порядка. Эксперименты проводились при

постоянной температуре окружающей среды эталонного силового IGBT-модуля с входящими в его состав FRD.

В схеме измерительного преобразователя (рис. 1) экспериментально выявлена необходимость реализации фазовой коррекции частотной характеристики ОУ для обеспечения устойчивой работы в поддиапазонах измерения (500 – 5000) пФ и (5 – 50) нФ. Экспериментальным путём установлена возможность такой коррекции включением последовательно с образцовым конденсатором C0 (рис. 1) резистора с малым сопротивлением. При этом полное сопротивление цепи на частоте 1 МГц практически не изменяется, что упрощает процесс калибровки измерителя.

Результат испытания, приведённый в табл. 1, свидетельствует об эффективности предложенного способа дистанционного измерения ёмкостных параметров IGBT/FRD, при малых значениях измеряемой ёмкости и относительно большого расстояния между измерителем и IGBT/FRD.

На рис. 3 представлены графики относительной погрешности измерителя, полученные после калибровки измерителя для центральных значений каждого из поддиапазонов в режиме измерения выходной ёмкости, что указывает на приемлемые метрологические характеристики измерительного тракта.

По результатам экспериментов установлено наличие нелинейной температурной зависимости результатов измерения емкости IGBT/FRD. В этой связи имеется потенциальная возможность повышения точности измерений емкостных параметров за счет учета влияния температуры окружающей среды с использованием поведенческой модели, связывающей изменения величин электрических параметров IGBT/FRD с режимом измерений согласно формуле (1): напряжение коллектор-эмиттер, ток коллектора, частота, температура. Данный подход основан на использовании результатов исследований, приведенных в работах [9–16].

Использование поведенческой модели температурной зависимости результатов измерений, построенной на основе экспериментальных данных, в рассматриваемом случае может позволить практически исключить влияние температурной составляющей погрешности на результаты измерений, поскольку такая зависимость носит функциональный характер и может быть легко аппроксимирована любыми средствами, например, с помощью аппарата нечеткой логики или нейронных сетей, как универсальных аппроксиматоров.

### Заключение

Предлагаемый метод дистанционного измерения емкостных параметров может применяться не только в системах автоматизации контроля параметров полупроводниковых приборов, но и в других областях, например, при разработке емкостных датчиков.

Полученные авторами результаты говорят о возможности практического использования поведенческих моделей, построенных на экспериментальных данных в автоматизированных тестовых системах, поскольку в опубликованных теоретических моделях уделено недостаточное внимание эффектам зависимости емкостных параметров от температуры.

Актуальность работы обусловлена широко распространенной задачей автоматизации контроля электрических параметров силовых полупроводниковых модулей при их производстве. Содержание статьи представляет практическую ценность для широкого круга разработчиков средств автоматизированного контроля изделий электронной техники.

### Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (проект № 8.1729.2017/4.6).

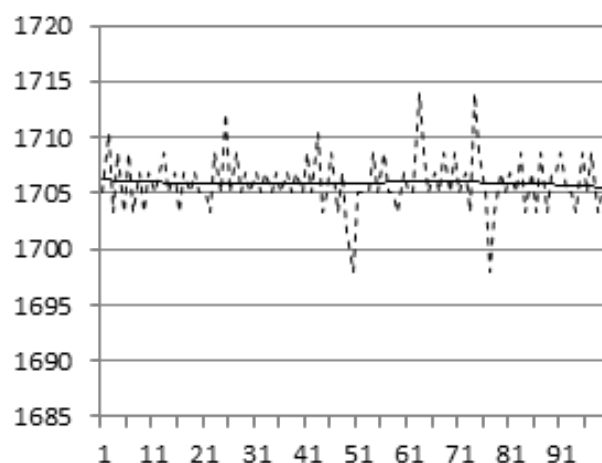


Рис. 4. Ёмкость FRD, пФ

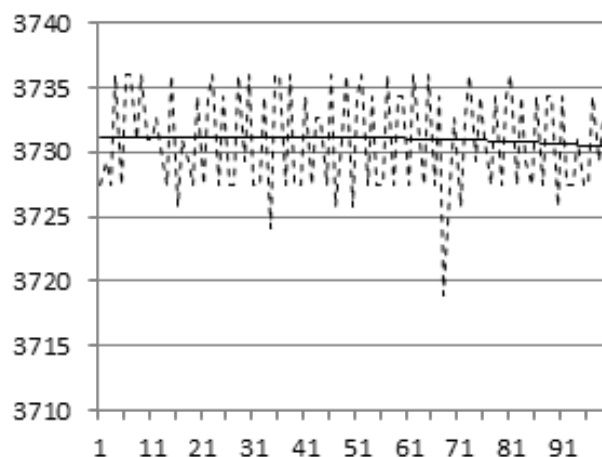


Рис. 5. Выходная ёмкость IGBT, пФ

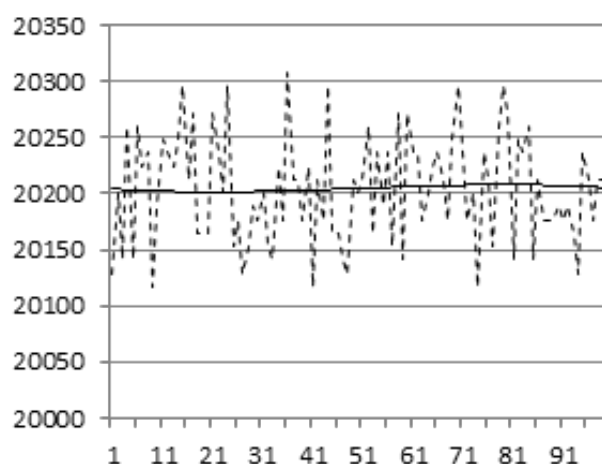


Рис. 6. Входная ёмкость IGBT, пФ

## ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 30617–98. Модули полупроводниковые силовые. Общие технические условия. Модули полупроводниковые силовые. Общие технические условия. Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2001. 39 с.
2. Патент RU176261U1. Устройство измерения времени обратного восстановления диодов/ Зотин В. Ф., Дракин А. Ю., Школин А. Н.; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО БГТУ (RU). — 176261U1; заявл. 10.04.2017; опубл. 15.01.2018. Бюл. № 2.
3. Патент RU188241. Устройство контроля стойкости диодов к скорости нарастания обратного напряжения/ Зотин В. Ф., Школин А. Н., Дракин А. Ю.; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО БГТУ (RU). — 188241U1; заявл. 25.09.2018; опубл. 04.04.2019 бюл. № 10.
4. Патент RU178673U1. Устройство измерения ёмкости диодов/ Зотин В. Ф., Дракин А. Ю., Школин А. Н.; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО БГТУ (RU). — № 178 673U1; заявл. 17.07.2017; Опубл. 17.04.2018. Бюл. № 11.
5. Левшина Е.С., Новицкий П. В. Электрические измерения физических величин: (Измерительные преобразователи): учеб. пос. для вузов. Энергоатомиздат. Ленингр. отд. Л., 1983. 320 с.
6. ГОСТ 20398.0–83. Транзисторы полевые. Общие требования при измерении электрических параметров. М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1986. 6 с.
7. Лифиц И. М. Стандартизация, метрология и подтверждение соответствия: учебник и практикум для прикладного бакалавриата. Изд. 12-е., перераб. и доп. М.: Юрайт, 2017. 314 с.
8. Polderman J.W., Willems J. C. Introduction to mathematical systems theory: a behavioral approach. 1998.
9. Hefner A.R. A dynamic electro-thermal model for the IGBT // IEEE Transactions on Industry Applications. 1994. Vol. 30, № 2. P. 394–405.
10. Tichenor J.L., Sudhoff S. D., Drewniak J. L. Behavioral IGBT modeling for pre-dicting high frequency effects in motor drives // IEEE Transactions on Power Electronics. 2000. Vol. 15, № 2. P. 354–360.
11. Palmer P.R. et al. Circuit simulator models for the diode and IGBT with full temperature dependent features // IEEE Transactions on Power Electronics. 2003. Vol. 18, № 5. P. 1220–1228.
12. Hefner A. R. Modeling buffer layer IGBTs for circuit simulation // IEEE Transactions on Power Electronics. 1995. Vol. 10, № 2. P. 111–123.
13. Kang X. et al. Parameter extraction for a power diode circuit simulator model including temperature dependent effects // Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2002. APEC2002. Seventeenth Annual IEEE. 2002. Vol. 1. P. 452–458.
14. Sigg J., Turkes P., Kraus R. Parameter extraction methodology and validation for an electro-thermal physics-based NPT IGBT model // Industry Applications Conference, 1997. Thirty-Second IAS Annual Meeting, IAS'97., Conference Record of the 1997 IEEE. 1997. Vol. 2. P. 1166–1173.
15. Patil N. et al. Precursor Parameter Identification for Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) Prognostics // IEEE Transactions on Reliability. 2009. Vol. 58, № 2. P. 271–276.
16. Reichl J. et al. Six-pack IGBT dynamic electro-thermal model: parameter extraction and validation // Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2004. APEC'04. Nineteenth Annual IEEE. 2004. Vol. 1. P. 246–251.

© Дракин Александр Юрьевич ( ada108@yandex.ru ), Зотин Виталий Федорович ( v.f.zotin@gmail.com ),

Школин Алексей Николаевич ( uxe@yandex.ru ).

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»