

**БЕСПАЛОВ Н. Н., ГОРЯЧКИН Ю. В., ПАНЬКИН К. Ю.
РАЗРАБОТКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРА
ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ ИМПУЛЬСОВ ПРЯМОГО ТОКА
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СИЛОВЫХ ДИОДОВ**

Аннотация. В статье представлены результаты моделирования схемотехнического решения генератора импульсов прямого тока для испытания полупроводниковых приборов и программа генерации управляющего напряжения полусинусоидальной формы испытательного импульса в виде 12-разрядного двоичного кода на языке VHDL. Описан алгоритм работы генератора полусинусоидальных импульсов тока.

Ключевые слова: моделирование, генератор, ПЛИС, VHDL, управляемый источник тока, прямой импульс тока, ЦАП.

**BESPALOV N. N., GORYACHKIN YU. V., PANKIN K. YU.
DEVELOPMENT AND SIMULATION OF
FORWARD CURRENT TEST PULSE GENERATOR
FOR STUDYING POWER DIODES**

Abstract. The article presents the results of the simulation of a circuit design solution for a direct current pulse generator for testing semiconductor devices and a program for generating a control voltage of a half-sine waveform of a test pulse in the form of a 12-bit binary code in the VHDL language. The operation algorithm of the generator of half-sinusoidal current pulses is described.

Keywords: simulation, generator, FPGA, VHDL, controlled current source, direct current pulse, DAC.

При экспериментальном исследовании вольт-амперных характеристик (ВАХ) и тепловых характеристик (ТХ) силовых полупроводниковых приборов (СПП) в состоянии высокой проводимости (СВП) в совокупности с высокоточной измерительной аппаратурой используются различные управляемые источники тока (УИТ) [1; 2; 3; 4]. Результаты проведённых испытаний позволяют оценивать качество изготовления СПП и выявлять потенциально ненадёжные приборы [5].

Согласно ГОСТ 24461—80 [6] испытание силовых диодов (СД) и силовых тиристоров (СТ) в СВП осуществляются путём пропускания через них одиночных испытательных импульсов тока $i_{F(T)}$ (прямой ток i_F для СД и ток в открытом состоянии i_T для СТ) однополупериодной синусоидальной формы длительностью до 10 мс [2] и измерения падения импульсного прямого напряжения $u_{F(T)}$. При этом для исследования СПП в

различных электрических и тепловых режимах используются иные формы испытательных импульсов тока $i_{F(T)}$. На рисунке 1 приведены некоторые формы этих испытательных импульсов тока.

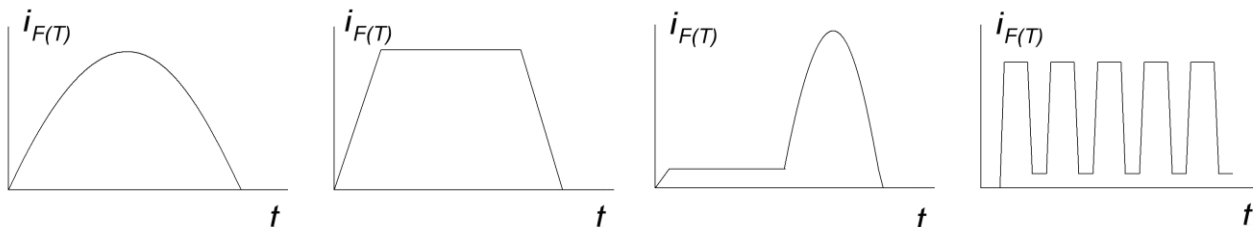


Рис. 1. Некоторые типовые формы испытательных импульсов токов $i_{F(T)}$.

Для исследования ВАХ и ТХ СПП в СВП нами разработано схемотехническое решение управляемого генератора испытательных импульсов тока (генератор), которое позволяет создавать импульсы тока различных форм. На рисунке 2 приведена разработанная структурная схема генератора испытательных импульсов тока.

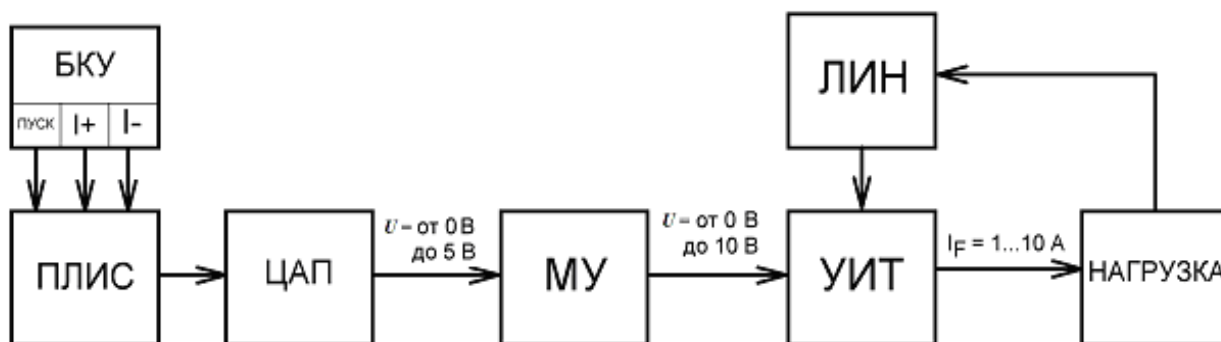


Рис. 2. Структурная схема генератора испытательных импульсов тока.

Структурная схема генератора состоит из следующих блоков.

- БКУ — блок кнопок управления, где с помощью кнопки ПУСК запускается работа генератора испытательных импульсов, а с помощью кнопок +I и -I регулируется амплитуда испытательного импульса тока.
- ПЛИС — программируемая логическая интегральная схема.
- ЦАП — цифро-аналоговый преобразователь.
- МУ — масштабирующий усилитель.
- УИТ — управляемый источник тока.
- НАГРУЗКА — исследуемый полупроводниковый прибор.
- ЛИН — линейный источник напряжения.

Рассмотрим алгоритм работы разработанной структурной схемы генератора при формировании в НАГРУЗКЕ импульсов тока полусинусоидальной формы.

При нажатии кнопки ПУСК БКУ запускается работа программы в ПЛИС. При этом на выходах ПЛИС генерируются сигналы напряжения, соответствующие параллельному 12-ти разрядному двоичному код, которые поступают на ЦАП. На выходе ЦАП формируются импульсы напряжения в диапазоне от 0 В до 5 В полусинусоидальной формы, который через МУ формирует во времени на входе УИТ управляющие импульсы напряжения полусинусоидальной формы в диапазоне значений от 0 до 10 В. УИТ, который питается от ЛИН, формирует в нагрузке испытательные импульсы тока с заданной амплитудой. В настоящее время рассматривается формирование импульсов тока полусинусоидальной формы (см. рис. 1) с амплитудой до 10 А при изменении входного управляющего сигнала с амплитудой до 10 В.

Проверка работоспособности разработанного схемотехнического решения генератора была проведена путём моделирования основных блоков в программной среде Multisim (рисунок 3). При этом выделенный блок генератора импульсов напряжения (ГИН) эмитирует работу блоков БКУ, ПЛИС и ЦАП структурной схемы. Остальные выделенные блоки выполняют функции соответствующих блоков, представленных на структурной схеме. В качестве нагрузки был выбран диод $D1$ MSRF1560 рассчитанный на максимальный постоянный ток $I_F = 15$ А и пиковое повторяющееся обратное напряжение $U_{RRM} = 600$ В. С целью минимизации электрических потерь в силовой выходной цепи УИТ напряжение источника питания (ЛИН) было выбрано равным 5 В, что достаточно для формирования испытательного импульса тока с амплитудой до 10 А [7].

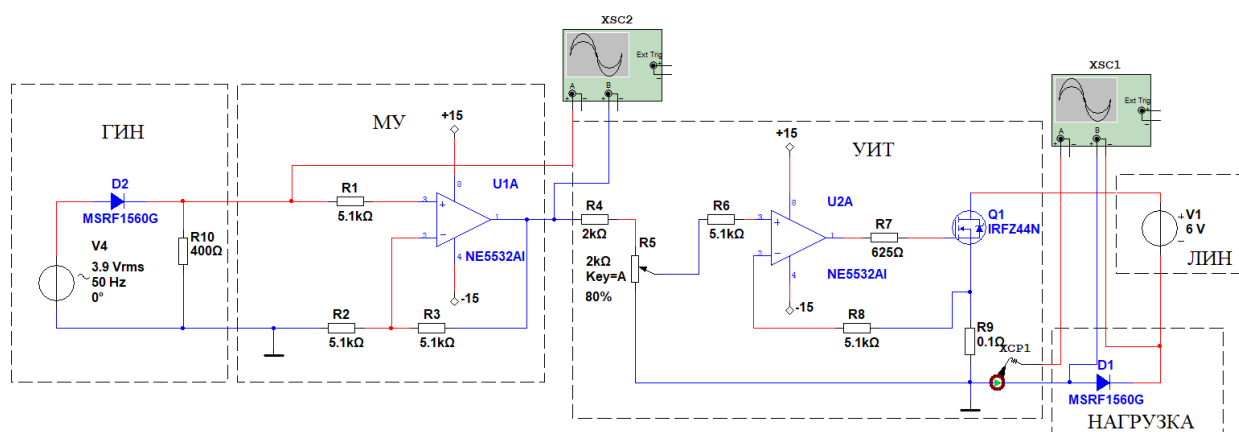
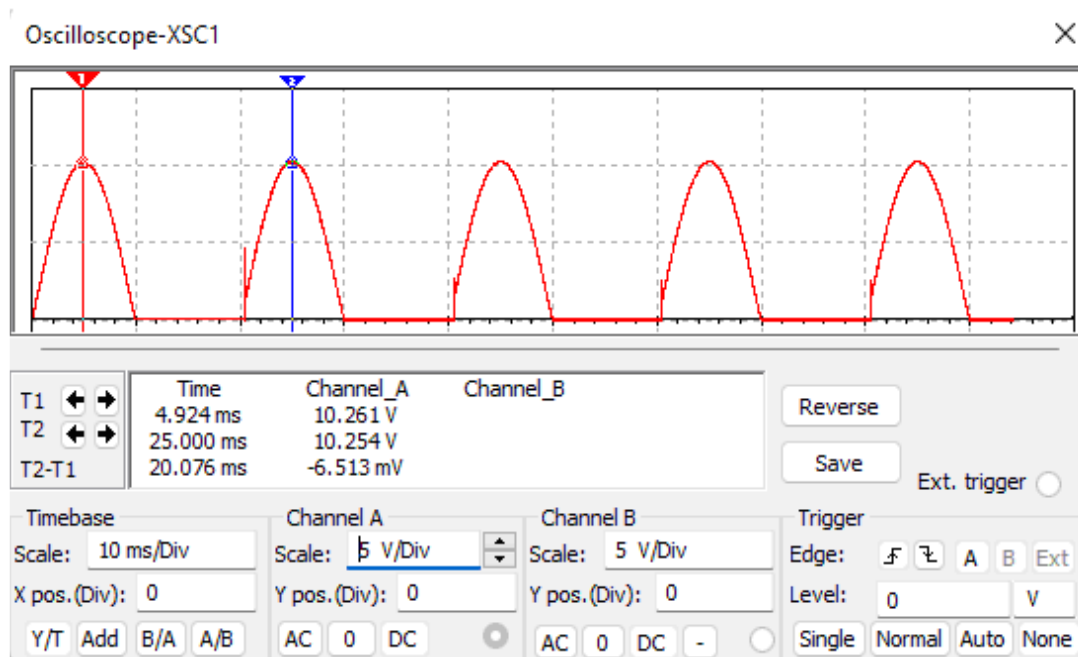


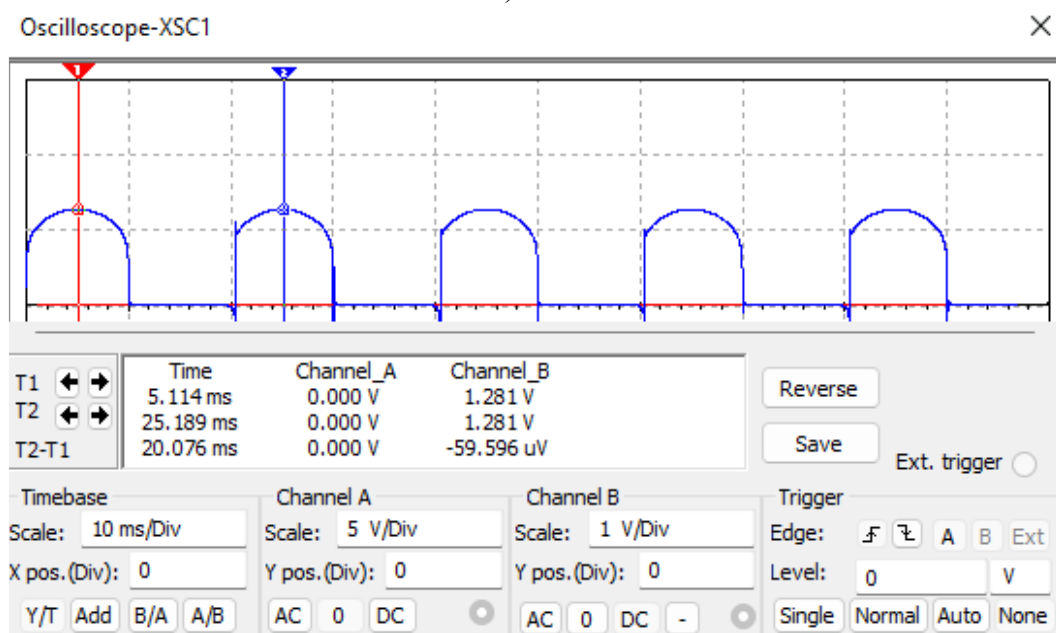
Рис. 3. Визуализация модели генератора испытательных импульсов тока в программе Multisim.

С помощью виртуальных приборов «Осциллограф» в программе Multisim были получены осциллограммы испытательных импульсов тока, пропускаемых через диод $D1$ и

падения напряжения на диоде $D1$. На рисунке 4 приведены полученные осциллограммы.



a)



б)

Рис. 4. Осциллограммы испытательных импульсов тока $i_{F(T)}$ (а) и импульсного падения напряжения $u_{F(T)}$ на диоде $D1$ (б).

На рисунке 4, а показано, что разработанная визуальная модель генератора испытательных импульсов генерирует импульсы тока амплитудой до 10 А. На рисунке 4, б показано, что при пропускании через диод $D1$ импульсов тока амплитудой 10 А значение падения напряжения на диоде составляет 1,28 В. На рисунке 5 приведены осциллограммы управляющих импульсов напряжения на входе МУ и выходе МУ.



Рис. 5. Осциллограммы управляющих импульсов напряжения на входе МУ (линии красного цвета) и выходе МУ (линии синего цвета).

Для реализации приведённых на рисунках 1 и 4 испытательных импульсов тока нами была разработана программа генератора испытательных импульсов различной формы на ПЛИС [8]. В качестве генератора формы испытательного импульса была выбрана ПЛИС фирмы Altera семейства cyclone EP4CE22F17C6N. Для данной ПЛИС в программной среде Quartus на языке описания аппаратуры интегральных схем VHDL была написана программа генерации 12-ти разрядного двоичного кода. Полученная программа приведена на рисунке 6.

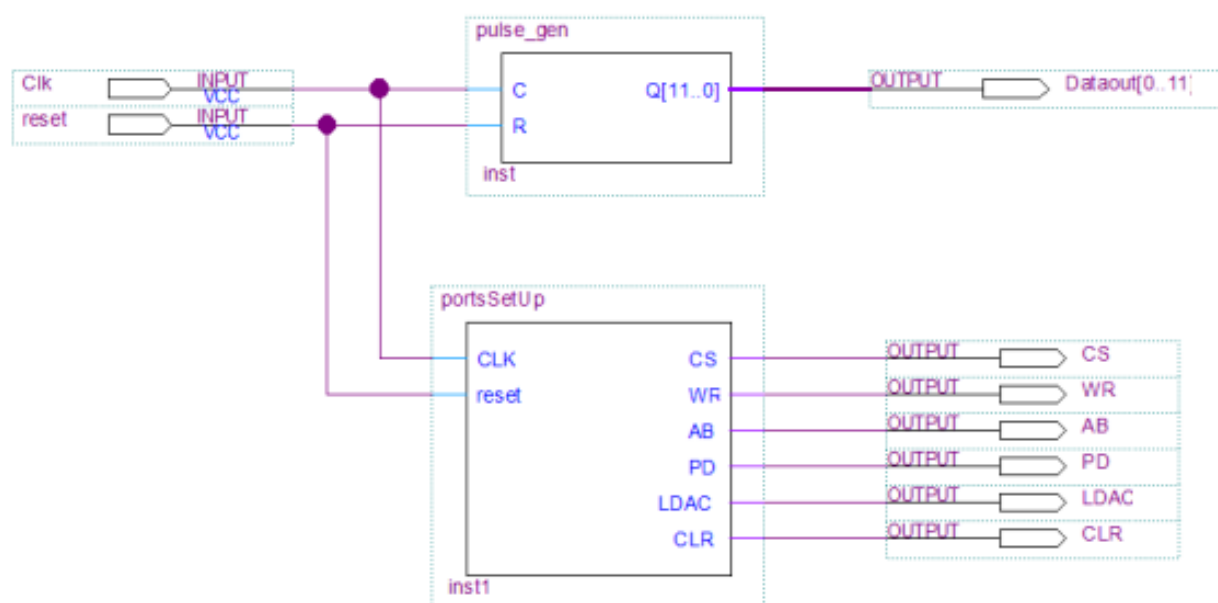


Рис. 6. Программа формирования 12-ти разрядного двоичного кода на языке VHDL.

Программа состоит из следующих блоков, написанных на языке VHDL:

- pulse_gen — это блок, с помощью которого генерируется параллельный 12 разрядный двоичный код;
- portsSetUp — это блок управления и настройка работы ЦАП;
- порты ввода C, R;
- порты вывода Dataout[0..11], CS, WR, AB, PD, LDAC, CLR.

Программа работает по следующему алгоритму. С порта ввода clk поступают тактирующие импульсы напряжения частотой 50 МГц на входной порт C блока pulse_gen и на входной порт CLK блока portsSetUp. Внутренний делитель частоты блока pulse_gen осуществляет деление таким образом, чтобы за период времени 5 мс количество таких импульсов составляло 4 096 (12 разрядов двоичного кода). Вывод полученного кода происходит с помощью порта вывода Q[0..11].

Разработанная программа для ПЛИС была промоделирована в программе ModelSim. На рисунке 7 приведены временные диаграммы выходных сигналов ПЛИС.

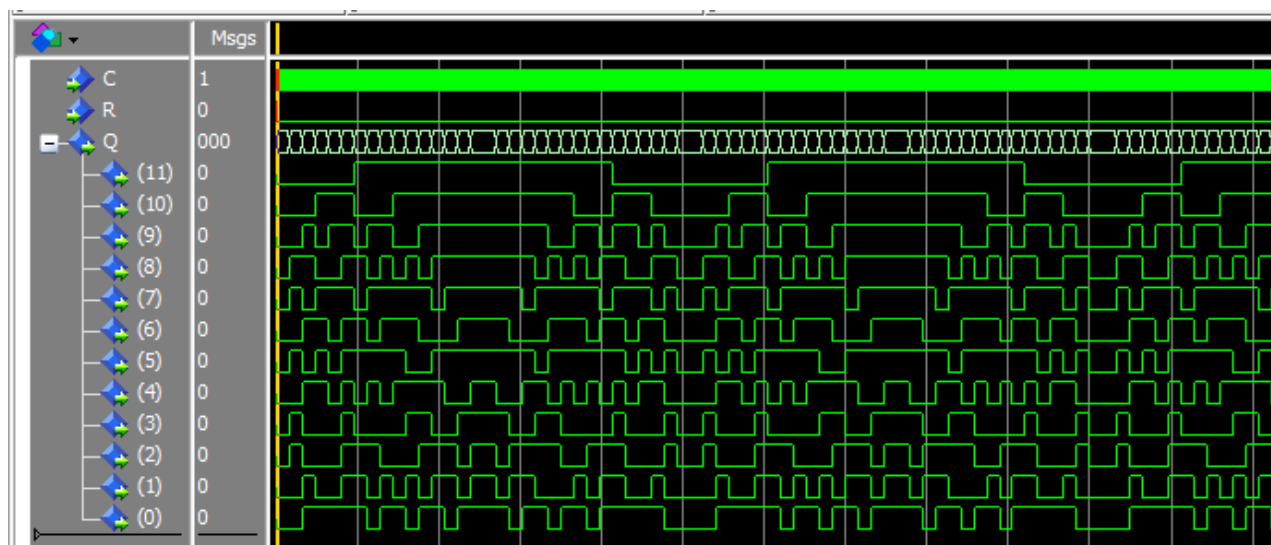


Рис. 7. Временные диаграммы работы программы блока pulse_gen.

В результате проделанной работы получены следующие результаты:

- разработана программа для формирования импульсов напряжения на языке VHDL в программном продукте Quartus для создания управляющих сигналов УИТ полусинусоидальной формы;
- разработано схемотехническое решение генератора испытательных импульсов прямого тока для определения параметров и характеристик СПП в СВП.

Полученные результаты моделирования в дальнейшем будут использованы при

разработке экспресс-метода и аппаратуры для определения ряда электрических и тепловых характеристик и параметров СПП в СВП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беспалов Н. Н., Горячкин Ю. В., Панькин К. Ю., Бектяшкин И. О. Определение вольт-амперной характеристики силового диода с помощью программно-определяемого функционального источника тока // XXIV Научно-практическая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов: в 3 ч.: Технические науки. – Саранск: Мордов. гос. ун-т, 2021. – С. 133–137.
2. Беспалов Н. Н., Горячкин Ю. В., Панькин К. Ю., Бектяшкин И. О. Моделирование и исследование параметров прямых вольт-амперных характеристик и температурного коэффициента напряжения диода Д242 // Научно-технический вестник Поволжья. – 2021. – Вып. 5. – С. 60–63.
3. Беспалов Н. Н., Горячкин Ю. В., Панькин К. Ю., Кондрашин Д. С. Моделирование и исследование процесса нагрева диода штыревой конструкции Д242 прямым током // Научно-технический вестник Поволжья. – 2021. – Вып. 5. – С. 75–78.
4. Беспалов Н. Н., Мускатиньев А. В. Особенности измерения прямого падения напряжения на силовых тиристорах и диодах // Научно-технический вестник Поволжья. – 2018. – Вып. 5. – С. 116–118.
5. Мускатиньев А. В. Генераторы импульсного тока для подбора силовых тиристорov и диодов при параллельном включении // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. Научно-методический журнал. – Пенза: Пенз. гос. технол. ун-т. – 2017. – № 04(38). – С. 86–91.
6. ГОСТ 24461-80 (СТ СЭВ 1656-79) Группа Е69. Государственный стандарт Союза ССР.
7. Беспалов Н. Н., Горячкин Ю. В., Панькин К. Ю. Моделирование и исследование режимов работы источника тока для испытания полупроводниковых приборов // Научно-технический вестник Поволжья. – 2022. – Вып. 5. – С. 24–27.
8. Свидетельство 2022660984. Программа генерации цифрового кода на входах цифро-аналогового преобразователя, на выходе которого формируется полусинусоидальный сигнал напряжения: программа для ЭВМ / Беспалов Н. Н., Горячкин Ю. В., Панькин К. Ю. (RU); правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва». № 2022619708; заявл. 27.05.2022; опубл. 14.06.2022.