МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

(ФГБОУ ВО «ВГУ»)

Физический факультет

Кафедра электроники

**ОЧЕНЬ ЕМКОЕ НАЗВАНИЕ РАБОТЫ МОЕЙ РАБОТЫ**

Научно-исследовательская работа

03.04.03 «Радиофизика»

Системы телекоммуникаций и радиоэлектронной борьбы

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Зав. кафедрой | \_\_\_\_\_\_\_ | д.ф.-м.н., доцент | Г.К. Усков \_\_\_.\_\_\_.20\_\_\_г. |
| Обучающийся | \_\_\_\_\_\_\_ |  | А.С. Величкина |
| Руководитель | \_\_\_\_\_\_\_ | д.ф.-м.н., доцент | Г. К. Усков |

Воронеж2023

Содержание

[Введение 3](#_Toc137731525)

[Основная часть 4](#_Toc137731526)

[ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР!! 4](#_Toc137731527)

[Схема генератора СКИ с двумя ВЧ полевыми транзисторами 4](#_Toc137731528)

[Модель устройства и изучение запускающего каскада 6](#_Toc137731529)

[Эксперимент 8](#_Toc137731530)

[Эксперимент с длительностями 11](#_Toc137731531)

[Оценка импульсов 15](#_Toc137731532)

[Заключение 18](#_Toc137731533)

[Литература 19](#_Toc137731534)

# Введение

Квазигауссовские электрические импульсы пикосекундного диапазона длительностей (порядка 10-9-10-12 с) представляют большой интерес для науки и техники. Практические приложения таких импульсов включают высокоточную, подземную и ближнюю радиолокацию [1-3], высокоскоростные системы связи, медицинские исследования [4-5, 7] и высокоточные измерения [1]. Использование подобных сигналов перспективно также в исследованиях в области ядерной физики, физики высоких энергий [8] и физики твердого тела [10, 11]. Основной задачей при формировании пикосекундных импульсов является достижение максимально возможной амплитуды при минимально возможной длительности. От амплитуды импульса зависит дальность его распространения в пространстве, и, следовательно, дальность действия коммуникационных и локационных систем. От длительности импульса зависит ширина его спектра, которая влияет на разрешающую способность локационных систем и пропускная способность систем связи. Одним из широко распространённых вариантов.

Одним из вариантов проектирования генераторов сверхширокополосных квазигауссовских импульсов, позволяющих достичь оптимального отношения длительности импульса к его амплитуде, являются схемы, основанные на использовании токоразмыкающих элементов с быстрым переключением, таких как диоды с накоплением заряда (ДНЗ) [6].

ЗАКОНЧИТЬ

# Основная часть

# Схема генератора СКИ с двумя ВЧ полевыми транзисторами

Как известно [ссыль], различные диоды с накоплением заряда, даже выпущенные в одной серии, имеют некоторый разброс параметров, который влияет на переходные процессы в полупроводниковой структуре и, следовательно, на время переключения. Такой разброс может составлять порядка 10%, что существенно влияет на скорости работы диодов.

При последовательном соединении ДНЗ в схемах генерации различное время переключение негативно сказывается на результирующем импульсе. Показано [ссыль], что чем больше разница во временах переключения диодов, тем медленнее спадает задний фронт СКИ, что приводит к увеличению общей длительности импульса и ухудшению его спектральных характеристик. Существуют различные подходы к изменению скорости переходных процессов в ДНЗ в схемах с последовательным включением, включающие измерение переходных характеристик и индивидуальный подбор диодов для каждых генераторов [ссыль на статью Рязанцева], использование дополнительных емкостей и резистивных соединений с регулируемым сопротивлением [поискать ссылки подтверждающие эти гениальные идеи ГК].

В данной работе рассматривается методика изменения времен переключения ДНЗ за счет изменения параметров запускающих импульсов. Предлагается регулировать длительности обоих импульсов и времена задержки между ними. Длительности импульсов регулируют количество накопленного заряда, а задержки между импульсами отвечают за начало и конец переходных процессов.

Чтобы получить возможность управления процессами накопления и рассасывания заряда в структуре ДНЗ за счет параметров запускающего импульса, была разработана схема генератора с двумя полевыми транзисторами (ПТ), предназначенными для работы с высокочастотными сигналами и сигналами с широкой полосой. Принципиальная электрическая схема разработанного устройства приведена на рис. ???.

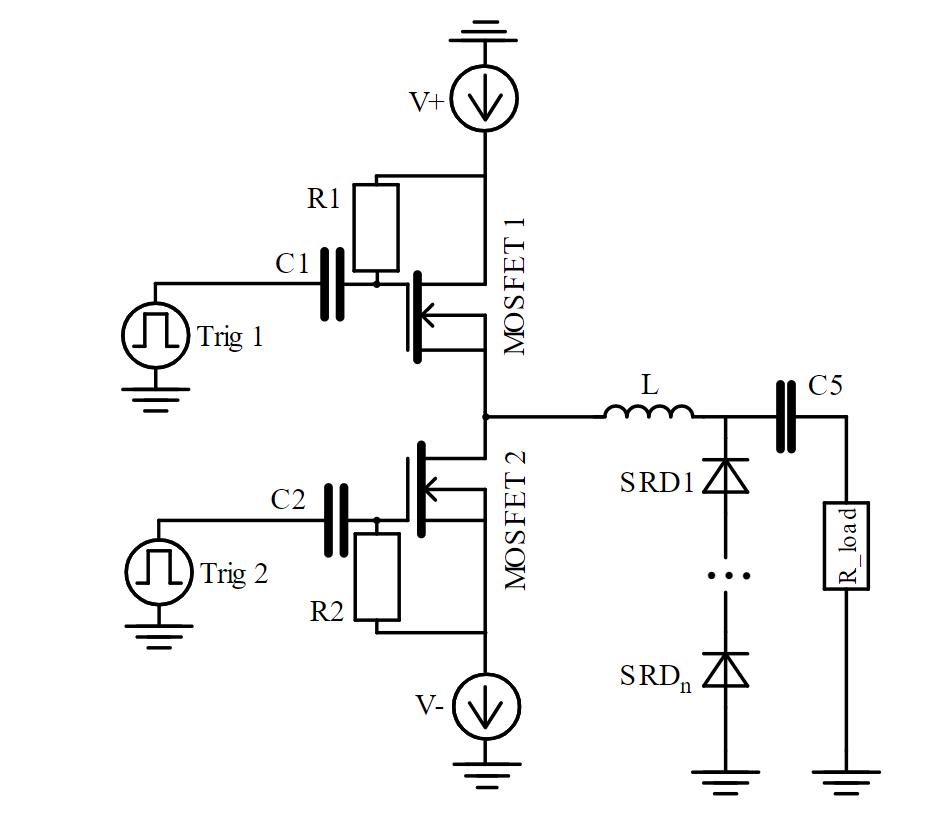


Рис. ???. Схема генератора СКИ с использованием двух транзисторов.

Запускающий импульс Trig 1, проходящий через ПТ MOSFET1, отвечает за накопление заряда в структуре ДНЗ, а импульс с Trig 2 за рассасывание заряда соответственно.

Также для обеспечения резких фронтов и малых длительностей СКИ важно сохранить параметры запускающего импульса при прохождении через ПТ. При прохождении через устройства, не подходящие для работы с ВЧ широкополосными сигналами, фронты запускающих импульсов «распадаются», на их фронтах могут появляться высокочастотные паразитные колебания, что приводит к увеличению длительностей импульсов и ухудшению формы их фронтов. Чтобы бороться с этим эффектом было предложено использовать транзисторы на кристаллах (уточнить про кристаллы).

Еще одной целью при проектировании устройства было достижение меньших значений напряжений постоянного питания с целью повышения КПД устройства. Улучшить эту характеристику также предлагается за счет использования транзисторных кристаллов с низкими значениями напряжений открывания.

# Модель устройства и изучение запускающего каскада

Для исследования функционирования предложенной модели была использована среда автоматизированного проектирования Microwave Office 17. Особый интерес для анализа представляет входной каскад.

Электрическая схема, составленная в пакете автоматизированного проектирования для анализа, представлена на рис. ???.

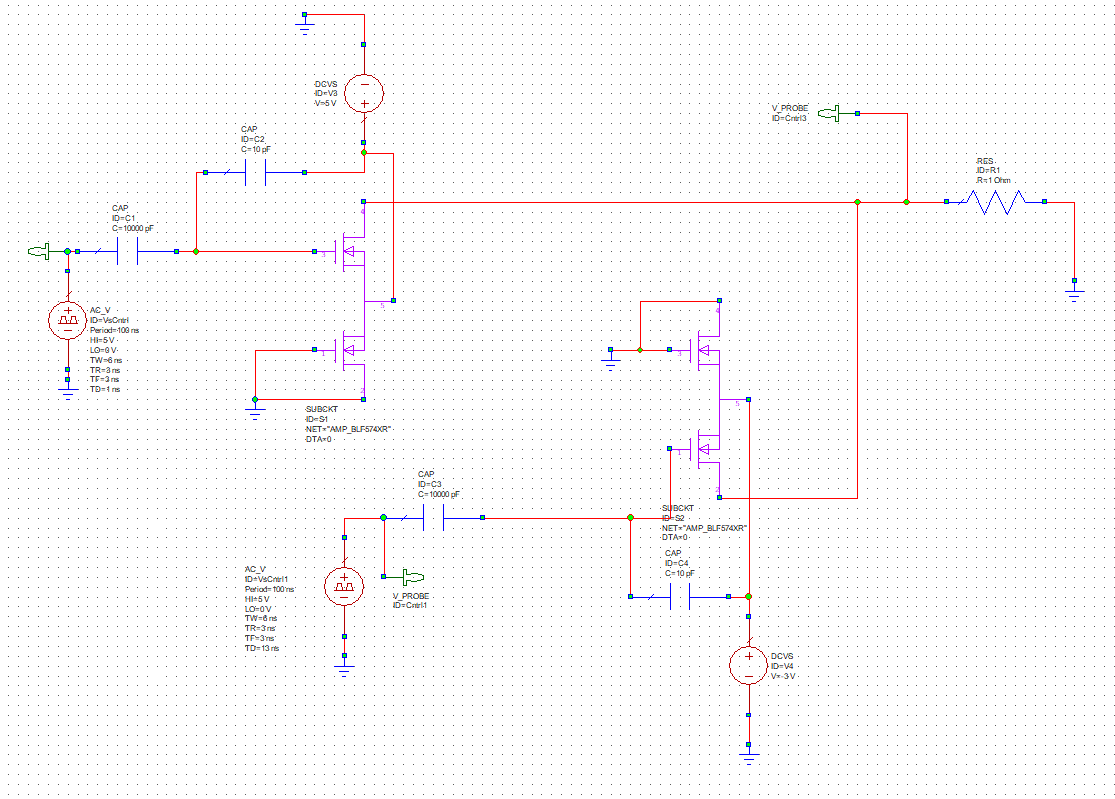


Рис. ???. Модель генератора СКИ в пакете автоматизированного проектирования.



Рис. ???. Модель для изучения запускающих импульсов.

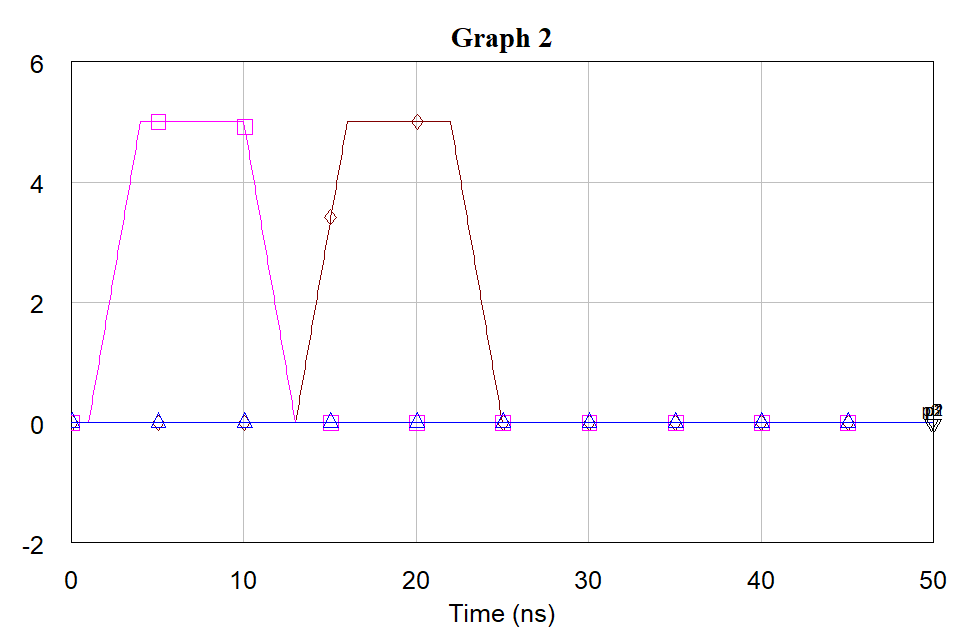


Рис. ???. Результаты моделирования.

На графике изображены импульсы с пробников на схеме, представленной на рис. ???.

# Эксперимент

Для проверки результатов моделирования был изготовлен экспериментальный образец генератора СКИ с двумя высокочастотными транзисторными кристаллами. В качестве подложки был использован диэлектрик Rogers (УТОЧНИТЬ ПАРАМЕТРЫ). В качестве транзисторов были использованы кристаллы Ampleon BLF574 [ссыль на даташит]. Для пайки транзисторов на текстолит была нанесена никелевая и золотая металлические пленки. Для защиты от внешних механических повреждений и пыли, устройство помещено в корпус. Экспериментальный макет приведен на рис. ???.

Целью эксперимента было получение двух СКИ: импульс с максимально возможной амплитудой и с минимальным уровнем звона, т.е. наименее отклоняющийся по форме от идеального гауссовского импульса.

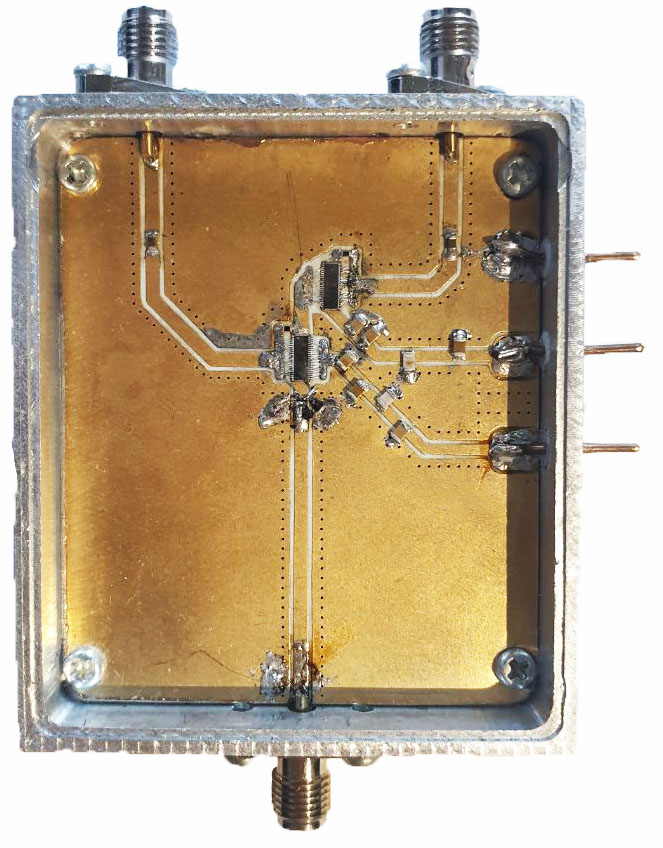


Рис. ???. Прототип разработанного устройства.

С изготовленным макетом был проведен натурный эксперимент. В качестве запускающих генераторов использовались два Agilent 81104A, для постоянного питания использовались БП Keysight U8031A. Выход установки был подключен через аттенюатор 46 дБ к стробоскопическому осциллографу Agilent DCA-X 86100D.

Осциллограммы импульсов, полученных в результате эксперимента приведены на рис. ???. Амплитуда составила, длительность составила. Уровень звона составляет порядка 6-7% процентов. (Можно докинуть сравнение с другими статьями). Также следует отметить отсутствие высокочастотных колебаний, что позволяет сохранить свойства спектров гауссовских колокольных импульсов. Формы импульсов во временной области также были оценены с использованием метода NMSE, что подробнее описано в следующем разделе работы.

Можно посчитать КПД

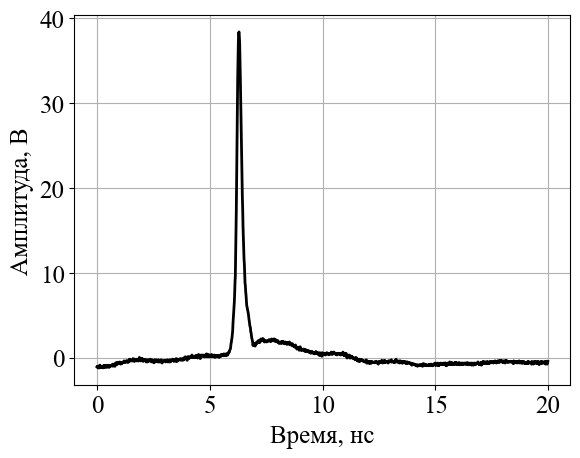


Рис. ???. Осциллограмма импульса с низким уровнем звона на выходе экспериментального макета.

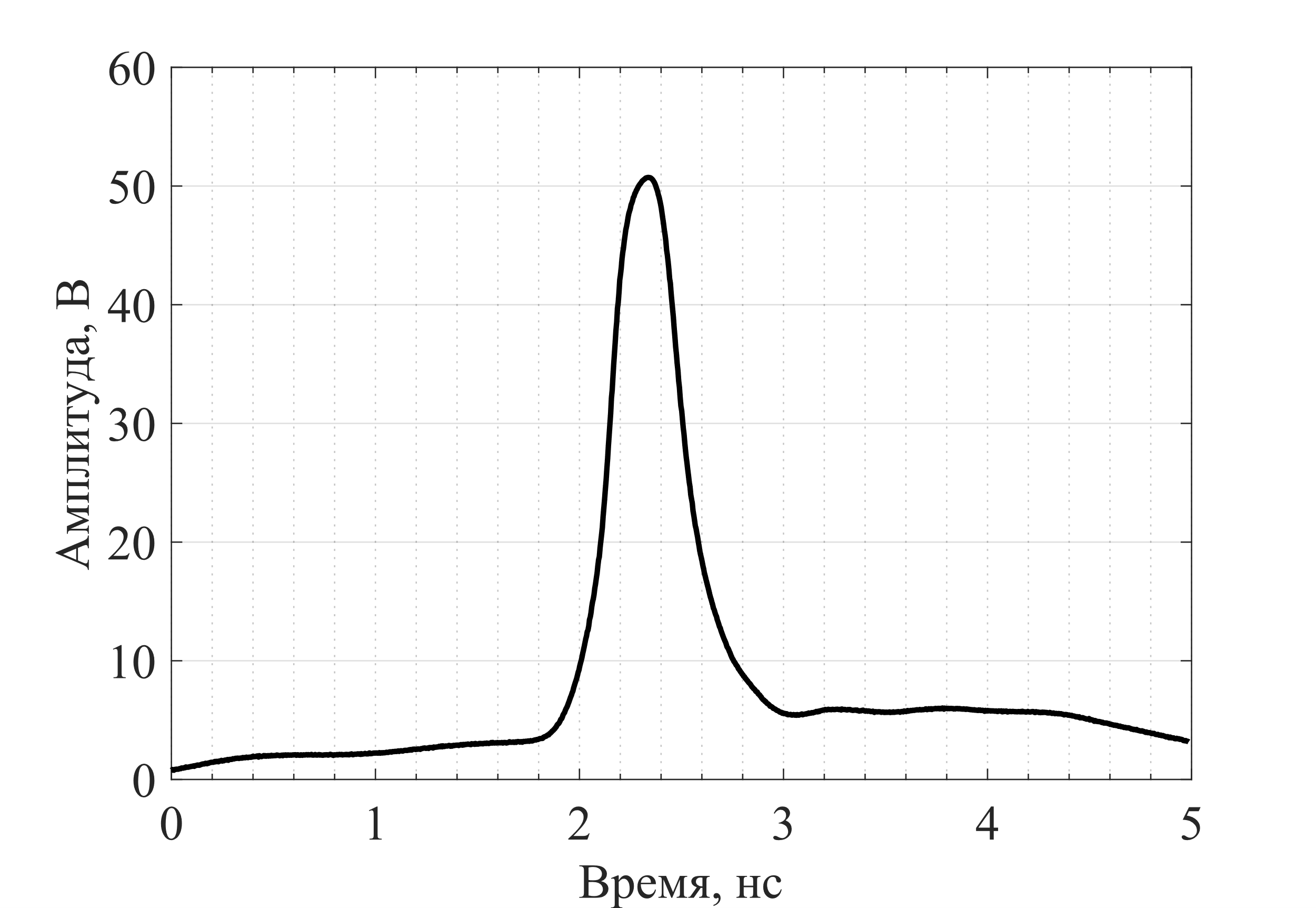


Рис. ???. Осциллограмма импульса с максимальной амплитудой.

Проанализируем полученные импульсы. Параметры импульса с минимальным уровнем «звона»:

* амплитуда: 38 В;
* длительность: 210 пс;
* уровень звона в процентах ~ 6.

Параметры импульса с максимальной амплитудой:

* амплитуда: 52 В;
* длительность: 320 пс;
* уровень звона в процентах ~ 10.

# Эксперимент с длительностями

Для исследования зависимостей амплитуды и длительности СКИ на выходе генератора был проведен следующий эксперимент.

Параметры:

* фронты запускающих импульсов: 3 нс;
* амплитуды запускающих импульсов: 6 В;
* напряжения питания: 5 В и – 3 В соответственно.

Для нивелирования длинны кабеля синхронизации выставили задержку основного импульса на мастер генераторе на 17.25 нс. Это позволило синхронизировать выходы запускающих импульсов.

Таблица ???. Экспериментальные данные

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | Trigger pulse, ns | | | | | | Gausian Pulse | |
| № | Del1 | Wight1 | W1+Front1 | Del2 | Wight2 | W2+Front2 | Ampl, V | Wight, ns |
| 1 | 17,25 | 6 | 12 | 12 | 6 | 12 | 34,4 | 185 |
| 2 | 17,25 | 6,5 | 12,5 | 12,5 | 6 | 12 | 35,6 | 194 |
| 3 | 17,25 | 7 | 13 | 13 | 6 | 12 | 36,6 | 196 |
| 4 | 17,25 | 7,5 | 13,5 | 13,5 | 6 | 12 | 37 | 200 |
| 5 | 17,25 | 8 | 14 | 14 | 6 | 12 | 37,8 | 206 |
| 6 | 17,25 | 8,5 | 14,5 | 14,5 | 6 | 12 | 38,3 | 211 |
| 7 | 17,25 | 9 | 15 | 15 | 6 | 12 | 38,7 | 213 |
| 8 | 17,25 | 9,5 | 15,5 | 15,5 | 6 | 12 | 39,1 | 215 |
| 9 | 17,25 | 10 | 16 | 16 | 6 | 12 | 39,3 | 220 |
| 10 | 17,25 | 10,5 | 16,5 | 16,5 | 6 | 12 | 39,6 | 223 |
| 11 | 17,25 | 11 | 17 | 17 | 6 | 12 | 39,9 | 224 |
| 12 | 17,25 | 11,5 | 17,5 | 17,5 | 6 | 12 | 40,2 | 227 |
| 13 | 17,25 | 12 | 18 | 18 | 6 | 12 | 40,3 | 228 |
| 14 | 17,25 | 12,5 | 18,5 | 18,5 | 6 | 12 | 40,4 | 227 |
| 15 | 17,25 | 13 | 19 | 19 | 6 | 12 | 40,6 | 232 |
| 16 | 17,25 | 13,5 | 19,5 | 19,5 | 6 | 12 | 40,7 | 237 |
| 17 | 17,25 | 14 | 20 | 20 | 6 | 12 | 40,8 | 234 |
| 18 | 17,25 | 14,5 | 20,5 | 20,5 | 6 | 12 | 40,9 | 236 |
| 19 | 17,25 | 15 | 21 | 21 | 6 | 12 | 40,9 | 233 |
| 20 | 17,25 | 15,5 | 21,5 | 21,5 | 6 | 12 | 40,9 | 236 |
| 21 | 17,25 | 16 | 22 | 22 | 6 | 12 | 40,9 | 236 |

Полученные зависимости амплитуд и длительностей результирующих импульсов представлены на графиках ниже.

Рис. ???. График зависимости амплитуды СКИ от длительности запускающего импульса.

Рис. ???. График зависимости длительности СКИ от длительности запускающего импульса.

Проанализируем полученные результаты. Сначала амплитуда выходного импульса увеличивается, а затем достигает максимального значения в 41 В. Это связано с «насыщением» структуры ДНЗ и стабилизацией переходных процессов.

Изменения длительности выходного импульса имеет несколько более сложный характер, но, в целом, подчиняется аналогичным зависимостям.

# Оценка импульсов

Оценка отклонения реальных СШП-импульсов от идеальных основана на использовании метода нормированной среднеквадратической ошибки, в зарубежной литературе normalized mean square error (NMSE). Эта величина вычисляется по формуле:

В качестве входных данных программы используется массив отсчетов, описывающих экспериментальный импульс (снятый осциллографом). Программа определяет длительности по полувысоте и максимальное значение импульса. Исходя из этих параметров строится идеальный импульс по известным инженерным формулам:

где:

A - амплитуда импульса;

t - сдвиг импульса во времени относительно начала координат;

- длительность импульса по полувысоте (для колокольного импульса) и от максимального значения до минимального (для моноцикла Гаусса)

Аналитический и экспериментальный импульс могут быть отображены на графиках для визуального анализа. Затем вычисляются отклонения и численный коэффициент NMSE в децибелах.

Алгоритм был реализован на языке программирования Python (v3.11.1) с использованием библиотек NumPy v.1.24.2 [6] и Matplotlib v.3.6.3 [7].

Полученные в результате эксперимента импульсы были проанализированы с помощью разработанного алгоритма. Графики осциллограмм в сравнении с «идеальными» импульсами приведены на рис. ???

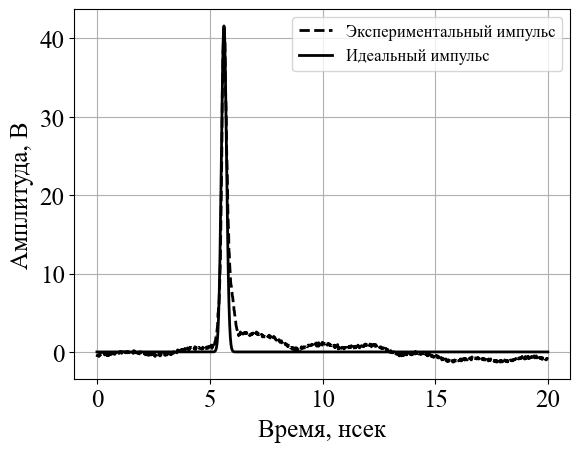


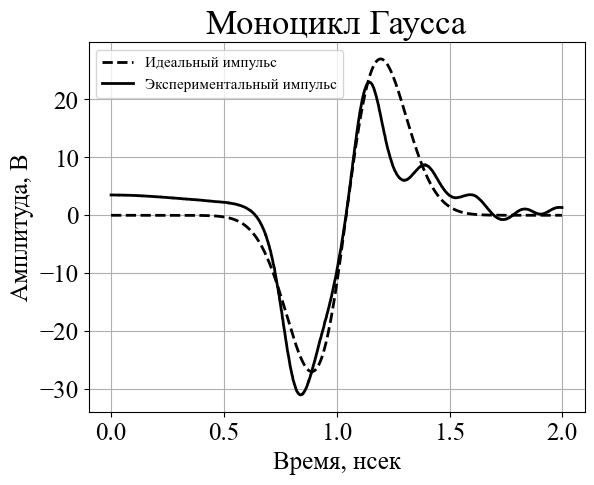
Рис. ???. «Идеальный» и реальный импульсы, построенные с помощью разработанного ПО

Уровень отклонения от идеальных значений составил порядка .

* pulse\_shape\_2 – -10.87 дБ;
* pulse\_shape\_3 – -10.54 дБ.

Стоит также отметить возможность разработанного ПО оценивать форму не только гауссовых колокольных импульсов, но и импульсов в форме моноцикла и дуплета Гаусса.

Из литературы (???) считается, что формы импульсов совпадают, если значение коэффициента NMSE не превышает -10 дБ. Соответственно импульсы, полученные в ходе эксперимента достаточно близки к идеальным гауссовым по форме во временной области.



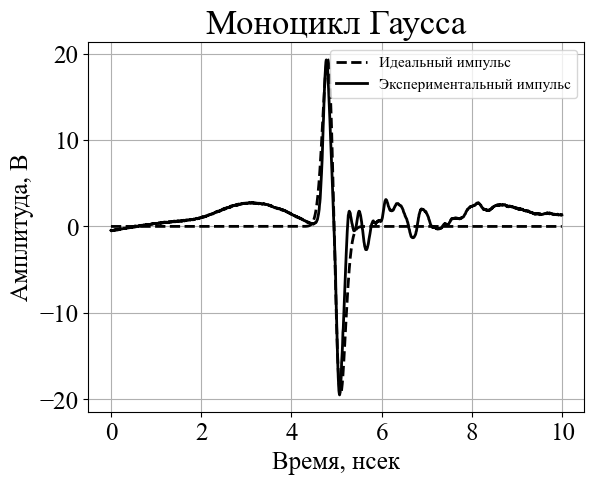


Рис. ???. ***Для объема***

# Заключение

ВОДА ВОДА ВОДА

ВОДА ВОДА ВОДА

ВОДА ВОДА ВОДА

ВОДА ВОДА ВОДА

ВОДА ВОДА ВОДА

ВОДА ВОДА ВОДА

ВОДА ВОДА ВОДА

ВОДА ВОДА ВОДА

ВОДА ВОДА ВОДА

ВОДА ВОДА ВОДА

ВОДА ВОДА ВОДА

ВОДА ВОДА ВОДА

ВОДА ВОДА ВОДА

ВОДА ВОДА ВОДА

ВОДА ВОДА ВОДА

ВОДА ВОДА ВОДА

ВОДА ВОДА ВОДА

ВОДА ВОДА ВОДА

ВОДА ВОДА ВОДА

ВОДА ВОДА ВОДА

ВОДА ВОДА ВОДА

ВОДА ВОДА ВОДА

В дальнейшем планируется провести натурный эксперимент по суммированию импульсов с помощью ранее разработанного сумматора констуркции Уилкинсона.

# Литература

1. Пикосекундная импульсная техника / В. Н. Ильюшенко [и др.], под ред. В. Н. Ильюшенко – Москва : Энергоатомиздат, 1993. – 386 с.
2. A. M. Bobreshov, A. S. Zhabin, A. D. Ryazantsev, V. A. Stepkin and G. K. Uskov, "Improvement of ultrashort pulses by serial connection of step recovery diodes," in IEEE Microwave and Wireless Components Letters, vol. 31, no. 2, pp. 204-206, Feb. 2021, doi: 10.1109/LMWC.2020.3046925.
3. A. M. Bobreshov, A. S. Zhabin, V. A. Stepkin and G. K. Uskov “Novel Tunable Ultrashort Pulse Generator With High Amplitude and Low Ringing Level”, IEEE Microw. Wireless Compon. Lett., vol. 27, no. 11, pp. 1013–1015, November 2017.
4. P. Krishnaswamy, A. Kuthi, P. T. Vernier and M. A. Gundersen, "Compact Subnanosecond Pulse Generator Using Avalanche Transistors for Cell Electroperturbation Studies," in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 14, no. 4, pp. 873-877, Aug. 2007
5. I. V. Grekhov, S. V. Korotkov, A. L. Stepaniants, D. V. Khristyuk, V. B. Voronkov and Y. V. Aristov, "High-power semiconductor-based nano and subnanosecond pulse Generator with a low delay time," in IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 33, no. 4, pp. 1240-1244, Aug. 2005
6. A. De Angelis, M. Dionigi, R. Giglietti and P. Carbone, "Experimental Comparison of Low-Cost Sub-Nanosecond Pulse Generators," in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 60, no. 1, pp. 310-318, Jan. 2011
7. T. Toyooka and Y. Minamitani, "Development of a cluster burst pulse generator based on a SOS diode switch for bioelectrics applications," 2011 IEEE Pulsed Power Conference, Chicago, IL, USA, 2011, pp. 1186-1189
8. Z. Pei, X. Li, Q. Zhang, Z. Wu, Y. Zhao and X. Chen, "Development of a high voltage, 240ps pulse generator in GIS for PD testing," 2018 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC), Jackson, WY, USA, 2018, pp. 261-263, doi: 10.1109/IPMHVC.2018.8936712.
9. I. V. Grekhov, "Pulse Power Generation in Nano- and Subnanosecond Range by Means of Ionizing Fronts in Semiconductors: The State of the Art and Future Prospects," in IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 38, no. 5, pp. 1118-1123, May 2010
10. Qing Wang and Jianping Yao, "Switchable optical UWB monocycle and doublet generation using a reconfigurable photonic microwave delay-line filter," Opt. Express 15, 14667-14672 (2007)
11. MAVR-044769-12790T Datasheet, Macom.com. Accessed: Dec. 30, 2020. [Online]. Available: https://www.macom.com/products/ product-detail/MAVR-044769-12790T [датаshiiit диода]
12. Ampleon BLF574 HF / VHF power LDMOS transistor Datasheet, Ampleon.com/. Accessed: Jun. 30, 2023. [Online]. <https://www.ampleon.com/documents/data-sheet/BLF574.pdf>
13. NumPy documentation – URL: https://numpy.org/doc/1.24 (дата обращения: 16.01.2023).
14. Matplotlib 3.6.3 documentation – URL: https://matplotlib.org/stable/index.html