



DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.9.8>

УДК: 621.373

ФОРМИРОВАНИЕ ДУПЛЕТА ГАУССА С ПОМОЩЬЮ КОНФИГУРИРУЕМОГО ГЕНЕРАТОРА СШП СИГНАЛОВ

Г.К. Усков, А.Е. Елфимов, К.В. Смусева, А.С. Величина, А.М. Бобрешов

**Воронежский государственный университет
394018, Воронеж, Университетская площадь, 1**

Статья поступила в редакцию 22 апреля 2023.

Аннотация. В работе предложен способ формирования сверхширокополосных импульсных сигналов в форме квазидуплета, квазимоноцикла Гаусса и эрмитового импульса за счет суммирования четырех сверхкоротких импульсов (СКИ) колоколообразной формы. Предложенный способ позволяет менять длительность импульсов, их форму, спектры и задержки между исходными импульсами с генераторов.

Ключевые слова: сумматор Уилкинсона, генераторы импульсов, дуплет Гаусса, СШП-передатчики.

Финансирование: работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда грант 21-19-00323, <https://rscf.ru/en/project/21-19-00323/>.

Автор для переписки: Величина Анастасия Сергеевна,
nastyavelichkina65@gmail.com

Введение

Современные генераторы сверхкоротких видеоимпульсов (СКИ), обладающие широкой полосой спектра и малой длительностью, находят применение в системах ближней радиолокации и высокоскоростной радиосвязи. Генераторы, построенные на основе диодов с накоплением заряда, позволяют получить на выходе импульсы квазигауссовской формы с длительностью от 10 до 1000 пс и амплитудой, порядка нескольких десятков вольт [1]. Однако, значительная часть их энергии сосредоточена в нижних частотах спектра СКИ, что затрудняет проектирование антенн для излучения импульсов без искажений. Для решения этой проблемы, как правило, используют импульсы в форме первой и второй производных от Гауссовской кривой: моноцикл и дуплет Гаусса. Применение таких сигналов в системах связи позволяет значительно улучшить отношение сигнал/шум на входе приемника [2].

Целью данной работы является формирование импульсов в форме первой и второй производной от гауссовой кривой, длительностью до 1 нс, размахом выше 20 В с возможностью корректировать форму импульсов без изменения аппаратной части.

В работе предложена структура формирования сигнала в форме дуплета Гаусса на основе усовершенствованной трехзвенной конструкции Уилкинсона, в полосе частот от 0.5 до 5 ГГц. Проведены теоретические и экспериментальные исследования предложенной структуры. Результаты эксперимента в достаточной степени совпали с результатами моделирования.

Разработка и моделирование сумматора Уилкинсона

Сумматор или делитель мощности конструкции Уилкинсона [3] представляет собой пассивное радиочастотное устройство, которое может быть использовано как для сложения двух сигналов, так и для деления сигнала с минимальными потерями по мощности. Его работа основана на использовании четвертьволновых преобразователей, в качестве которых могут быть использованы микрополосковые линии. Основным преимуществом

использования сумматора Уилкинсона является возможность достижения высокой развязки между входными портами устройства и, следовательно, низкого уровня взаимного влияния генераторов СКИ. Недостатком конструкции является узкая полоса рабочих частот, порядка 10-100 МГц. Из-за этого классическая (однозвенная) конструкция плохо применима для суммирования сверхширокополосных сигналов, в частности СКИ с длительностью менее 1 нс.

Сумматор Уилкинсона описывается с помощью S-параметров, которые выражаются через волновые проводимости топологии устройства:

$$\begin{aligned} S_{33} &= \frac{1 - 2Y_1^2}{1 + 2Y_1^2}, \\ S_{11} = S_{22} &= \frac{1}{2} \left(\frac{1 - 2Y_1^2}{1 + 2Y_1^2} + \frac{1 - Y_2}{1 + Y_2} \right), \\ S_{12} &= \frac{1}{2} \left(\frac{1 - 2Y_1^2}{1 + 2Y_1^2} - \frac{1 - Y_2}{1 + Y_2} \right). \end{aligned}$$

Однозвенная конструкция, разработанная для полосы частот 10-100 МГц не применима для суммирования сверхширокополосных сигналов, в частности СКИ с длительностью менее 1 нс. Для расширения полосы сумматора, в настоящее время, используют многозвенные конструкции [4-6]. Подобный эффект достигается за счет использования в каждом из звеньев микрополосковых линий различной электрической длины и разным волновым сопротивлением, а для обеспечения развязки между входами и согласования схемы применяют балластные резисторы.

Физика расширения частотного диапазона сумматора за счет введения дополнительных звеньев основана на использовании свойств каскадов четвертьволновых преобразователей. В [7] показано, что за счет использования n каскадов в устройстве с четвертьволновыми трансформаторами и трансформаторами Чебышева, полоса пропускания устройства становится функцией от n . При этом чем больше звеньев вводится в устройство, тем шире становится полоса.

Для получения параметров трёхзвенного сумматора воспользуемся аналитическим алгоритмом и формулами для вычисления волновых сопротивлений полосков и балластных сопротивлений, описанными в [6].

При вычислениях удобнее перейти к описанию балластных резисторов через проводимости $G_i = 1/R_i$ и $Y_i = 1/Z_i$. Для автоматизации работы алгоритма, а также учета параметров подложки реального устройства, использовалась среда моделирования CST Studio с применением метода Finite integration technique (FIT) в частотном диапазоне 0.5-5 ГГц. Такая полоса выбрана исходя из ширины спектра колокольного Гауссовского импульса длительностью 10-200 пс. Для оптимизации был применен Nelder Simplex Algorithm по аналогии с [8].

В ходе оптимизации параметров варьировались геометрические размеры радиусов колец сумматора, толщина и длины полосков. Моделирование производилось для устройства на материале ФЛАН-3.8 с толщиной 2 мм и величиной диэлектрической проницаемости 3.8, на котором затем был изготовлен экспериментальный макет сумматора. Полученные в ходе оптимизации параметры приведены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры сумматора Уилкинсона

Параметр	Значение	Параметр	Значение
H1	80.03 мм	W2	1.25 мм
H2	35.49 мм	W3	2.17 мм
H3	183.54 мм	W4	3.49 мм
r1	11.17 мм	L	5 мм
r2	4.88 мм	Res1	132 Ом
r3	5.09 мм	Res2	185 Ом
r4	15 мм	Res3	250 Ом
W1	0.92 мм		

Для суммирования сигналов с четырёх генераторов использовалась конструкция из трёх соединенных сумматоров, представленная на рис. 1.

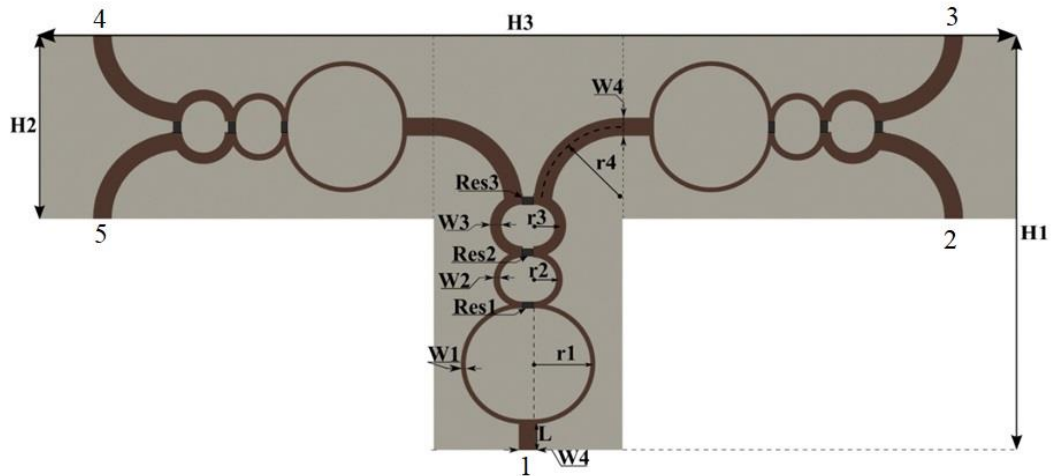


Рис. 1. Общий вид модели разработанного устройства.

S-параметры оптимизировались до значений S_{22} , S_{25} – не более -15 дБ, S_{21} – не менее -5 дБ и S_{23} – не более -15 дБ.

Для оптимизации эти параметры выбраны ввиду симметричности устройства и для него $S_{22} = S_{33} = S_{44} = S_{55}$, $S_{21} = S_{31} = S_{41} = S_{51}$, $S_{23} = S_{45}$, $S_{24} = S_{25} = S_{34} = S_{35}$.

S-параметры, полученные в ходе оптимизации и в ходе измерений с экспериментальным макетом изображены на рис. 2.

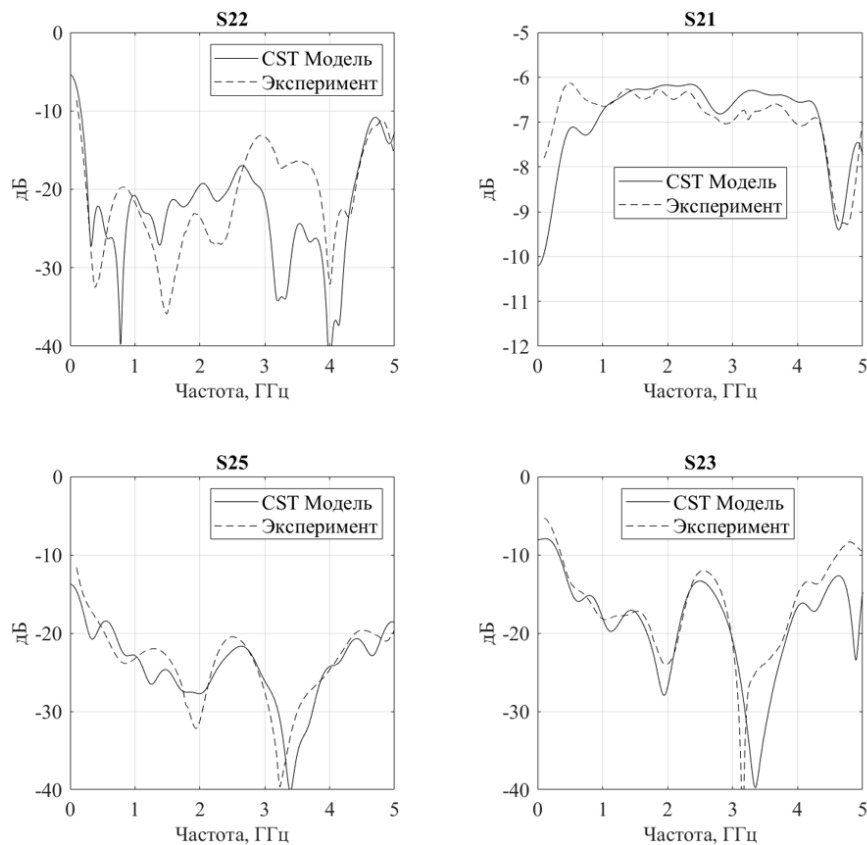


Рис. 2. S-параметры сумматора из CST Studio Suit и S-параметры реального устройства

Реальное устройство приведено на рис. 3. S-параметры экспериментального макета были измерены с помощью анализатора цепей Keysight PNA-X N5242B и приведены на рис. 2, пунктирная линия. Параметры реального устройства удовлетворяют целям, заданным для оптимизации при моделировании.



Рис. 3. Изображение экспериментального макета пятипортового трёхзвенного сумматора Уилкинсона, изготовленного по результатам моделирования

Описанный подход в моделировании широкополосного сумматора Уилкинсона опирается на описанные ранее [5, 6] аналитические выкладки для выбора стартовых параметров, таких как значение сопротивлений балластных резисторов. Электромагнитное моделирование используется для учета большего числа реальных параметров схемы (например, параметров подложки).

Разработка генераторов СКИ

Для формирования дуплета Гаусса было просуммировано четыре сверхкоротких импульса квазигауссовской формы. Для их генерации была выбрана схема формирователя на основе диодов с накоплением заряда (ДНЗ) фирмы MACOM [9]. Принципиальная электрическая схема генераторов импульсов разной полярности приведена на рис. 4.

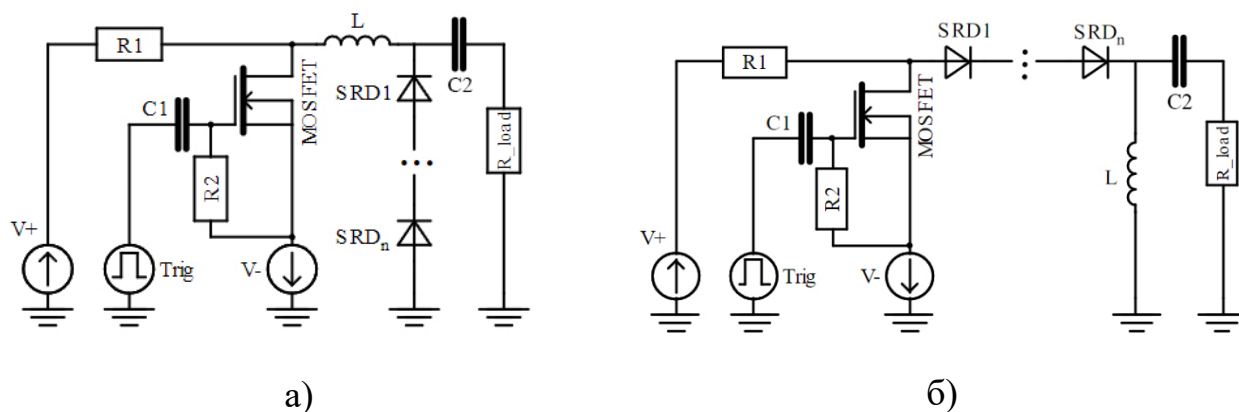


Рис. 4. Электрическая схема генераторов СКИ на основе ДНЗ;
 а) схема генерации импульса положительной полярности,
 б) схема генерации импульса отрицательной полярности

Схемотехническое моделирование работы генераторов проводилось в пакете автоматизированного проектирования с использованием модели диода [10].

Реальные устройства были изготовлены на материале Rogers 4350В с диэлектрической проницаемостью 3.48 и толщиной подложки 0.76 мм.

Формирование дуплета Гаусса

С помощью инструментов CST Studio Suite S-параметры сумматора были экспортированы для моделирования сложения импульсов, формируемых несколькими генераторами в САПР для автоматизированного проектирования электронных устройств. Применение схемотехнического моделирования позволило учесть воздействие генераторов друг на друга и точнее смоделировать результирующий сигнал.

В результатах моделирования был получен импульс формы дуплета Гаусса, изображенный на рис. 5 (б) пунктиром. Время от первого положительного пика до второго составило 800 пс. Размах напряжения импульса, посчитанный от минимального до максимального значения, составил 37 В. Уровень звона на выходе устройства составил -15 дБ.

По результатам моделирования были изготовлены четыре генератора СКИ и проведен эксперимент по сложению формируемых ими импульсов с помощью пятипортового сумматора Уилкинсона, описанного выше.

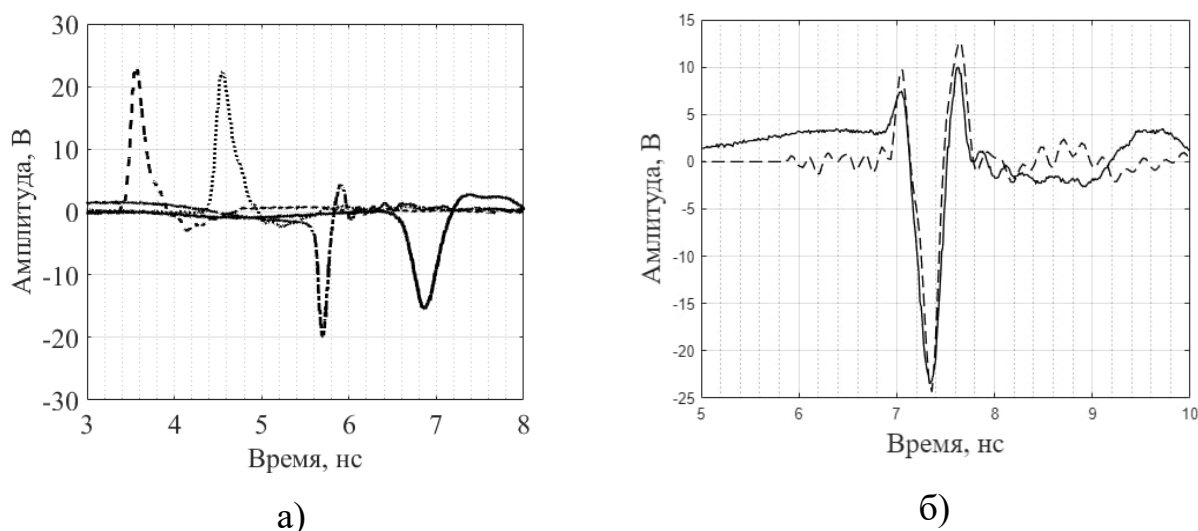
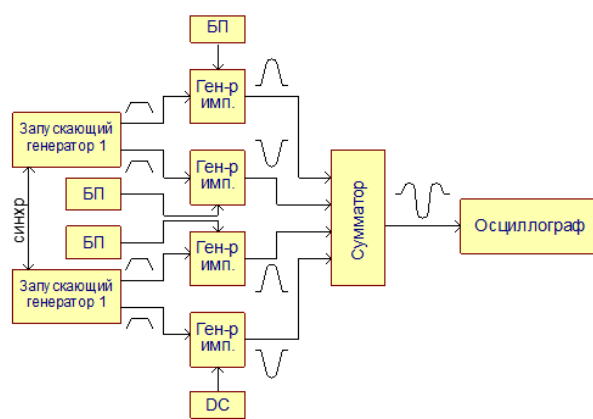


Рис. 5. Четыре сверхкоротких СКИ до суммирования (а).
Дуплет Гаусса, полученный в ходе моделирования (пунктирная линия)
и импульс, полученный экспериментально (сплошная линия) (б).

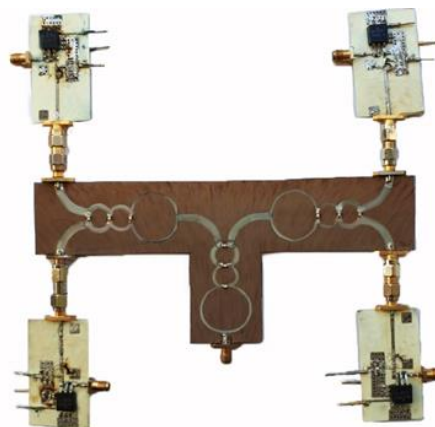
Блок-схема и фотография установки представлена на рис. 6. Для синхронной работы генераторов СКИ использовались генераторы запускающих импульсов 1 и 2, синхронизированные между собой по времени запуска. Питание генераторов СКИ осуществлялось источниками постоянного тока «БП». Сигналы с генераторов СКИ поступают на сумматор, а затем на вход осциллографа.

В качестве запускающих генераторов были использованы двухканальные Agilent 81104A, с помощью которых для каждого из генераторов СКИ устанавливалась индивидуальная задержка запускающего импульса. Таким образом, задавалась задержка импульсов на выходах генераторов. Осциллограммы импульсов снималась с помощью стробоскопического осциллографа Agilent DCA-X 86100D.

В ходе эксперимента был получен импульс в виде квази-дуплета Гаусса, изображенный на рис. 7 (а). Длительность импульса, рассчитанная от первого положительного пика до второго, составила 750 пс. Максимальный размах напряжения импульса - 34 В.



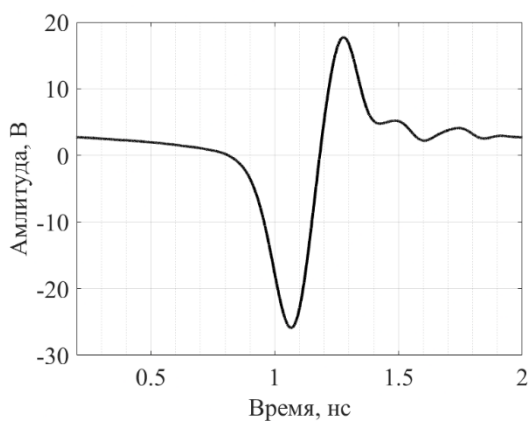
а)



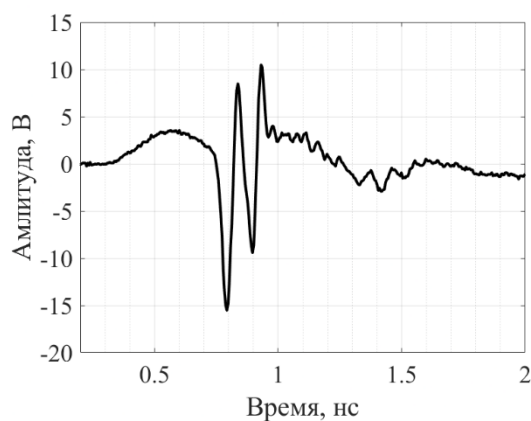
б)

Рис. 6. Блок-схема экспериментальной установки (а).
Сумматор Уилкинсона, соединенный с генераторами СКИ (б)

Значение звона, рассчитанного в децибелах относительно размаха, составил -15дБ . Также в ходе проведения эксперимента была показана возможность формирования импульса Эрмита. Результаты приведены на рис. 7 (а) и 7 (б). Размах напряжения импульса, посчитанный от минимального до максимального значения - 46 В , длительность от одного пика до второго порядка 220 пс . Был получен импульс Эрмита с амплитудой порядка 25 В и длительностью полупериода порядка 100 пс .



а)



б)

Рис. 7. Моноцикл, сформированный с помощью сложения
четырех импульсов (а). Импульс Эрмита (б)

Хорошее совпадение практических результатов с результатами моделирования удалось достичь благодаря адекватности предложенной модели сумматора. Также было установлено, что при изменении задержек запускающих импульсов можно сформировать импульсы разных форм: квазидуплеты

и квазимоноциклы Гаусса разных полярностей и импульс Эрмита. Это свойство можно использовать в системах связи для модуляции сигналов.

Заключение

В работе предложен метод формирования СКИ со сложной формой с применением четырех генераторов квазигауссовских импульсов и усовершенствованной конструкции сумматора Уилкинсона. Было показано, что с помощью данной установки можно получить СКИ квазигауссовой формы, моноциклы и дуплеты Гаусса и импульс Эрмита. Таким образом, предложенный генератор позволяет достаточно гибко формировать различные СШП сигналы. Управление их формой можно реализовать цифровыми методами, программно задавая задержки запускающих импульсов. Такой подход упрощает процессы модуляции импульсов и динамического изменения их спектра.

Финансирование: работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда грант 21-19-00323, <https://rscf.ru/en/project/21-19-00323/>.

Литература

1. Bobreshov A. M., Zhabin A. S., Ryazantsev A. D., Stepkin V. A., Uskov G. K., Improvement of Ultrashort Pulses by Serial Connection of Step Recovery Diodes *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. 2021. vol 31. №2. P.204-206: <https://doi.org/10.1109/LMWC.2020.3046925>
2. Bai Z., Yuan D., Zhang H., Kwak K. Cognitive Pulse Shaping for M-ary Direct Sequence BPAM UWB System. *3rd International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CrownCom 2008)*. 2008. P.1-4: <https://doi.org/10.1109/CROWNCOM.2008.4562498>
3. Wilkinson E. J. An N-Way Hybrid Power Divider. *IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1960. Vol 8, №1. P.116-118: <https://doi.org/10.1109/TMTT.1960.1124668>

4. Yu T. A Broadband Wilkinson Power Divider Based on the Segmented Structure. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2018. vol. 66, №4, P.1902-1911: <https://doi.org/10.1109/TMTT.2018.2799579>
5. Maktoomi, M.A., Akbarpour M., Hashmi M.S., Ghannouchi F.M. On the dual-frequency impedance/admittance characteristic of multi-section commensurate transmission-line. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*. 2017. №64, P.665-669: <https://doi.org/10.1109/TCSII.2016.2604425>
6. Omi A.I., Zafar Z.N., Al-Shakhori H., Savage A.N., Islam R., Maktoomi M.A., Zakzewski C., Sekhar P. A New Analytical Design Methodology for a Three-Section Wideband Wilkinson Power Divider. *Electronics*. 2021. №10. P.2332: <https://doi.org/10.3390/electronics10192332>
7. Matthaei G. L., Young L., Jones E. M. T. *Microwave Filters, Impedance Matching Networks and Coupling Structures*. McGraw-Hill, New York, 1964. 526 p.
8. Величкина А.С., Елфимов А.Е., Усков Г.К., Смусева К.В. Расширение частотного диапазона сумматора Уилкинсона для формирования сверхкоротких импульсов. *XXVIII Международная научно техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь 2022»*. Воронеж. 2022. Т.3. С.315-322.
9. MACOM Technology Solutions. MAVR-044769-12790T Datasheet [web]. MACOM. Дата обращения: 22.04.2023. URL: <https://www.macom.com/products/product-detail/MAVR-044769-12790T>
10. Kyhl J., Andersson M. An Advanced PIN-diode Model. *Microwave Journal*. 2005. №48.

Для цитирования:

Усков Г.К., Елфимов А.Е., Смусева К.В., Величкина А.С., Бобрешов А.М. Формирование дуплета Гаусса с помощью конфигурируемого генератора СШП сигналов. // Журнал радиоэлектроники. – 2023. – №. 9. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.9.8>