

УДК 621.373.1

А.С. Подстригаев, М.Г. Слободян

Экспериментальное исследование СВЧ-генератора для унифицированного построения гетеродинов многоканального приемника радиотехнической разведки

Исходя из практической задачи разработки унифицированной схемы гетеродинов широкополосного многоканального приемника радиотехнической разведки, выполнены: оценка возможности построения унифицированного широкополосного СВЧ-генератора на несколько частотных исполнений, экспериментальное исследование длительности переходных процессов, а также оценка погрешности моделирования в специализированном программном обеспечении ADIsimPLL фирмы Analog Devices. Дополнительно экспериментально исследованы характеристики микросхемы СВЧ-усилителя HMC907LP5E

Ключевые слова: СВЧ-генератор, гетеродин, ФАПЧ, ГУН, многоканальный приемник, радиотехническая разведка.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-1-37-41

СВЧ-генераторы применяются в формирующих узлах передающих устройств и трактах преобразования частоты как приемных, так и передающих устройств в составе радиолокационных и радионавигационных средств, систем связи, радиоуправления, передачи информации и радиоэлектронной борьбы. В данной работе исследуется генератор, служащий гетеродином в широкополосном многоканальном приемнике радиотехнической разведки.

Приемник построен по матрично-параллельной схеме, подробно описанной в [1]. Для каждой пары каналов необходим отдельный гетеродин. В целях унификации все гетеродины должны быть выполнены по единой схеме. Требуемый общий диапазон частот гетеродинов составляет от 5,5 до 7,5 ГГц.

Целью настоящей работы является оценка возможности построения унифицированного широкополосного СВЧ-генератора на несколько частотных исполнений, экспериментальное исследование его характеристик, а также оценка погрешности его моделирования в специализированном программном обеспечении (ПО).

Требованиям к рабочей частоте формируемого сигнала и ее высокой стабильности удовлетворяет схема, основанная на стабилизации с помощью петли фазовой автоподстройки частоты [2]. Известны варианты построения схемы, оптимизированные по критерию минимального времени установления выходной частоты [3, 4] или минимальному уровню фазовых шумов [5]. Синтезатор на основе ФАПЧ, в котором в качестве сигнала опорной частоты используется генератор с прямым цифровым синтезом (DDS), помимо высокого быстродействия позволяет формировать ЧМ- и ФМ-сигналы [6]. Однако, учитывая отсутствие специальных требований к гетеродинам, целесообразно использовать базовую схему (рис. 1).

Генератор работает следующим образом. Высокостабильный опорный генератор формирует сигнал с частотой $f_{оп}$, который, проходя через делитель

частоты с коэффициентом деления R , поступает на фазовый детектор. ФД вырабатывает напряжение $U_{ФД}$, зависящее от разности фаз входных сигналов с частотами $\frac{f_{оп}}{R}$ и $\frac{f_{вых}}{N}$. Для подавления высокочастотных составляющих напряжение $U_{ФД}$ проходит через ФНЧ. С выхода ФНЧ управляющее напряжение $U_{упр}$ подается на генератор, управляемый напряжением. В зависимости от напряжения $U_{упр}$ ГУН вырабатывает сигнал с необходимой частотой $f_{вых}$. Этот сигнал является выходным сигналом генератора и, кроме того, как видно из схемы (см. рис. 1), через делитель частоты с коэффициентом деления N он подается на вход ФД, чем замыкается петля обратной связи. Для согласования выходного напряжения ФД $U_{ФД}$ с напряжением $U_{упр}$, необходимым ГУН для формирования требуемой частоты, ФНЧ может быть активным. После стабилизации частоты петель ФАПЧ выполняется следующее равенство:

$$f_{срав} = \frac{f_{вых}}{N} = \frac{f_{оп}}{R}. \quad (1)$$

При проектировании генератора с ФАПЧ равенство (1) позволяет, исходя из требуемой выходной частоты $f_{вых}$, выбрать частоту опорного генератора $f_{оп}$ и коэффициенты деления N , R . Эти величины определяют также частоту сравнения фазового детектора $f_{срав}$, значение которой должно быть как можно меньше для уменьшения фазовой ошибки $\Delta\varphi$, которая приводит к нестабильности частоты выходного сигнала. С другой стороны, при малой частоте сравнения возрастает длительность переходного процесса при установлении частоты выходного сигнала $f_{вых}$. Поэтому необходим выбор высокой частоты опорного генератора $f_{оп}$ и малого коэффициента деления N частоты выходного сигнала.

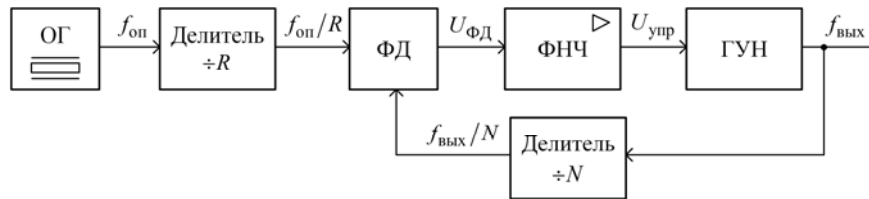


Рис. 1. Структурная схема генератора СВЧ-сигнала

Это позволяет обеспечить приемлемую длительность установления частоты при низком фазовом шуме и соответственно малом дрожании выходной частоты $f_{\text{вых}}$ [7, 8]. Схема на основе ФАПЧ позволяет унифицировать построение гетеродинов.

Отличием является подаваемый на нее код частоты и номинал резистора, задающего коэффициент усиления активного фильтра.

Для реализации выбранной структуры использована ИМС фирмы Analog Devices ADF4108BCPZ, включающая в себя фазовый детектор и два делителя с программируемыми коэффициентами деления (на рис. 1 – N и R). Исходя из выходного диапазона частот, выбраны частоты опорного генератора $f_{\text{оп}} = 100$ МГц и сравнения $f_{\text{срав}} = 200$ кГц. В качестве ГУН использована ИМС HMC586LC4B фирмы Analog Devices, работающая в диапазоне от 4 до 8 ГГц. Для пропорционального преобразования напряжения $U_{\text{ФД}}$ с выхода ADF4108BCPZ в напряжение $U_{\text{упр}}$, требуемое для работы выбранного ГУН, ФНЧ выполнен на операционном усилителе. Для уменьшения шумов на входе ГУН использован малозумящий ОУ LT1028A. ФНЧ рассчитан на полосу 900 ± 70 кГц (зависит от номинала резистора, задающего коэффициент усиления) со сдвигом фазы выходного сигнала на 35° .

Для разработки схем генераторов, стабилизированных петель ФАПЧ, фирмой Analog Devices рекомендуется специализированное ПО ADIsimPLL, широко используемое в данной области как зарубежными [9–12], так и отечественными специалистами [13, 14]. По оценкам зарубежных специалистов на сегодняшний день ADIsimPLL реализует

наиболее полный функционал для проектирования синтезаторов частоты с ФАПЧ. ПО упрощает расчет частотных и временных характеристик схемы для выбранной электронной компонентной базы и позволяет как оптимизировать характеристики, исходя из типов и номиналов ЭКБ, так и подобрать оптимальную для разработчика ЭКБ, учитывая заданные характеристики.

Для выбора ЭКБ и анализа работы схемы использована программа ADIsimPLL версии 3.6, бесплатно предоставляемая по запросу фирмой Analog Devices. Одним из результатов анализа схемы в программе ADIsimPLL является график временной зависимости абсолютной ошибки установления выходной частоты $\Delta f_{\text{вых}}(t)$, позволяющий оценить длительность переходного процесса. Графики для разработанной схемы на граничных рабочих частотах 5,5 и 7,5 ГГц представлены на рис. 2.

Аналогичное измерение ошибки выходной частоты $\Delta f_{\text{вых}}(t)$ на макете напрямую затруднено. А при попытке измерения времени установления напряжения непосредственно на входе ГУН вносимые шумом осциллографа искажения приводят к срыву установления частоты. Поэтому исследован переходный процесс на выходе ОУ (ОУ и ГУН разделены интегрирующей RC-цепью). При этом отклонение от установившегося значения напряжения измерялось до величины 40 мВ. Более точное измерение затруднено пульсациями на выходе ОУ, а также искажениями, вносимыми шумом осциллографа, и наводками отдельных цепей генератора. Указанные паразитные пульсации «гасятся» на входе ГУН RC-цепью (1,8 кОм и 47 пФ).

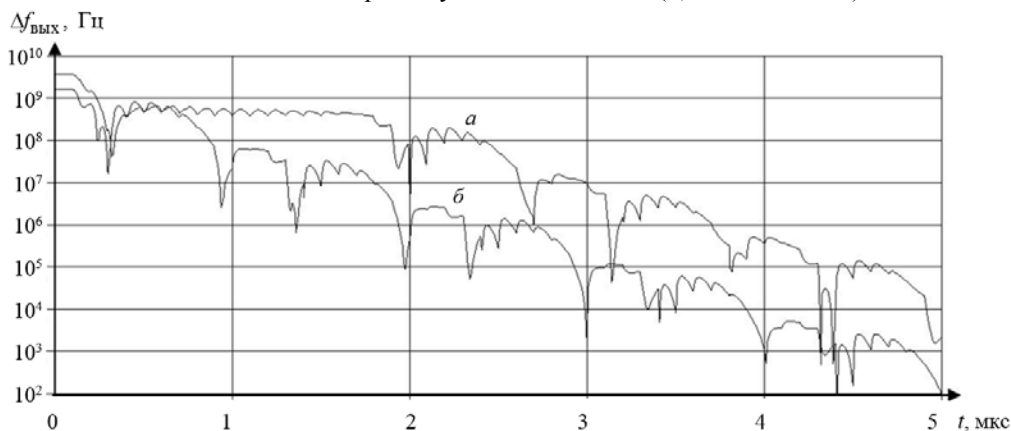


Рис. 2. Ошибка установки выходной частоты в программе ADIsimPLL для частот 5,5 ГГц (а) и 7,5 ГГц (б)

Время установления частоты до отклонения напряжения на выходе ОУ 40 мВ составило около

50 мкс для 5,5 ГГц и около 80 мкс для 7,5 ГГц. Для частот в промежутке между указанными значениями

время установления принимало промежуточные значения. Считая, что крутизна характеристики ГУН $S_{\text{ГУН}} \approx 310$ МГц/В [15], отклонение напряжения на входе ГУН $\Delta U_{\text{ГУН}} \approx 40$ мВ соответствует отклонению частоты $\Delta f_{\text{вых}} \approx 12,4$ МГц.

То же отклонение по частоте можно определить по графикам на рис. 2, полученным в ADIsimPLL. Это позволяет сравнить длительность переходного процесса, рассчитанную в специализированном ПО и полученную при макетировании. Сравнительные данные для граничных рабочих частот 5,5 и 7,5 ГГц представлены в таблице.

Сравнительные данные для граничных рабочих частот

Источник данных	Длительность переходного процесса, мкс	
	При $f_{\text{вых}} = 5,5$ ГГц	При $f_{\text{вых}} = 7,5$ ГГц
ADIsimPLL	1,8	3,0
Эксперимент	50	80

Из таблицы видно, что полученные при макетировании результаты не соответствуют результатам моделирования в программе ADIsimPLL. На практике переходный процесс затягивается, что обусловлено инерционностью ГУН (сведения о которой в техническом описании микросхемы ГУН отсутствуют). Не учитывается инерционность ГУН и в ПО.

Также в программе и на макете исследована возможность выставления фиксированного сопротивления, задающего коэффициент усиления активного ФНЧ. В случае выбора наименьшего коэффициента усиления генератор не формирует верхнюю частоту, а при установке наибольшего коэффициента усиления увеличиваются амплитуда и длительность переходного процесса.

Поэтому для настройки генератора на одно из частотных исполнений на практике целесообразно использовать переменное сопротивление.

В ходе макетирования также замечено следующее. В схеме генератора в качестве выходного каскада используется широкополосный СВЧ-усилитель НМС907LP5Е фирмы Analog Devices, информация о применении которого в отечественных публикациях отсутствует. Согласно технической документации на микросхему [16] номинальное напряжение питания составляет 10 В. При этом потребляемый ток около 350 мА. Соответственно потребляемая мощность составляет около 3,5 Вт, что, учитывая малые габаритные размеры ИМС (5×5 мм), требует качественного теплоотвода. ИМС предназначена для использования в миниатюрных СВЧ-устройствах, поэтому обеспечение ее необходимым радиатором является непросто задачей. Однако исследование макета показало, что при снижении напряжения питания до 3 В на выходе микросхемы обеспечивается необходимая полезная выходная мощность 5,5 дБм. При этом рассеиваемая микросхемой тепловая мощность значительно снижается, и крупногабаритный радиатор не требуется.

Очевидно, что для обеспечения максимальной выходной мощности 26 дБм потребуется номиналь-

ное напряжение питания. Однако тот факт, что для обеспечения меньшей выходной мощности может быть приложено меньшее питающее напряжение, является практически ценным и не оговорен в техническом описании на микросхему. Следует особо отметить отсутствие у производителя типовой зависимости выходной мощности от напряжения питания при заданных значениях мощности входного сигнала.

Представленные в работе результаты программного моделирования и макетирования генератора СВЧ-сигнала позволяют сделать следующие выводы:

1. Реализация гетеродинов в частотном диапазоне от 5,5 до 7,5 ГГц, выполненных по унифицированной схеме, возможна. При этом в зависимости от частотного исполнения генератора необходима регулировка подстроечного резистора, задающего коэффициент усиления активного ФНЧ, и смена кода частоты, задающего коэффициенты деления N , R . Максимальный диапазон частот определяется наименее широкополосным из звеньев. Как показано в работе [17], на сегодняшний день для СВЧ-генератора, собранного на отечественной ЭКБ, граничная частота составляет до 12 ГГц, а на иностранной ЭКБ – не менее 18 ГГц.

2. Проектирование генератора, стабилизированного петлей ФАПЧ, с использованием специализированного ПО ADIsimPLL возможно. Однако на практике длительность переходных процессов при включении генератора оказалась приблизительно в 25 раз выше, чем при моделировании в ПО, что вызвано инерционностью ГУН.

3. Дополнительно к основным результатам работы выявлена возможность использования пониженного напряжения питания широкополосного СВЧ-усилителя НМС907LP5Е в режиме малой мощности входного сигнала, что позволяет упростить теплоотвод.

Литература

1. Подстригаев А.С. Широкополосный матрично-параллельный приемник средств радиотехнической разведки с пониженной неоднозначностью определения частоты радиолокационных сигналов: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.14: защищена 05.10.2016; утв. 09.02.2017. – СПб., 2016. – 168 с.
2. Шахгильдян В.В. Проектирование устройств генерирования и формирования сигналов в системах подвижной радиосвязи: учеб. пособие / В.В. Шахгильдян, В.Л. Карякин; под ред. В.В. Шахгильдяна. – М.: СОЛОН-Пресс, 2011. – 400 с.
3. Chenakin A. Frequency Synthesizers. Concept to Product. – Norwood, MA: Artech House, 2011. – 214 p.
4. Леньшин А.В. Экспериментальные исследования синтезатора частот с коммутацией элементов кольца фазовой автоподстройки / А.В. Леньшин, Н.М. Тихомиров, В.Н. Тихомиров // Вестник Воронеж. ин-та МВД России. – 2016. – № 3. – С. 7–16.
5. Леньшин А.В. Экспериментальное исследование маломощного широкодиапазонного синтезатора частот / А.В. Леньшин, В.В. Лебедев, В.Н. Тихомиров // Вестник Воронеж. ин-та МВД России. – 2015. – № 1. – С. 105–110.

6. Govind Singh Patel, Sanjay Sharma Comparative Study of PLL, DDS and DDS-based PLL Synthesis Techniques for Communication System // *International Journal of Electronics Engineering*. – 2010. – No. 1. – P. 35–40.

7. Михалев П. Микросхемы ФАПЧ и синтезаторы на их основе производства компании Analog Devices // Компоненты и технологии. – 2006. – № 57. – С. 48–53.

8. MT-086. TUTORIAL. Fundamentals of Phase Locked Loops (PLLs) / Analog Devices, 2009. – 10 p. – URL: <http://www.analog.com/media/ru/training-seminars/tutorials/MT-086.pdf> (дата обращения: 22.03.2018).

9. Samir Kameche, Mohammed Feham Designing and Simulating a 2.4 GHz Integer-N Frequency Synthesizer with 1 MHz Frequency Step // *International Journal of Computer Applications*. – 2013. – No. 3. – P. 9–12.

10. Ameri H. Design An X-Band Frequency Synthesizer / H. Ameri, A. Attaran, M. Moghavvemi // *Microwaves & RF*. – 2010. – Vol. 79. – P. 98–103.

11. Vemula Lohith Kumar Simulation of Integer N Frequency Synthesizer // *International Journal of Engineering Trends and Technology*. – 2013. – Vol. 4, No. 6. – P. 2662–2665.

12. Design of S-Band Frequency Synthesizer for Microwave Applications / S. Shurender, K. Srividhya, V. Mantharachalam, K. Suresh, M. Umma Habiba // *International Journal of Innovation and Applied Studies*. – 2013. – Vol. 3, No. 4. – P. 1110–1115.

13. Дмитриев С. Одиночные радиочастотные синтезаторы с импульсно-фазовой автоподстройкой частоты серии ADF4000 / С. Дмитриев, Ю. Никитин // Компоненты и технологии. – 2002. – № 9. – С. 38–43.

14. Томозов Д.А. Сверхвысокочастотные синтезаторы на кольцах фазовой автоподстройки частоты с широкой полосой перестройки частоты // Труды МАИ. – 2011. – № 49. – С. 1–12.

15. Тех. описание микросхемы HMC586LC4B [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/hmc586.pdf> (дата обращения: 22.03.2018).

16. Тех. описание микросхемы HMC907LP5E [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/hmc907.pdf> (дата обращения: 22.03.2018).

17. Смоляков А.В. Анализ отечественной электронной компонентной базы для построения СВЧ-генераторов, стабилизированных петель ФАПЧ / А.В. Смоляков, А.С. Подстригаев, В.С. Климачев // Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем. – 2017. – № 1–2 (10). – С. 216–219.

Podstrigaev A.S., Slobodyan M.G.

Experimental research of microwave generator for unified construction of local oscillators in multichannel receiver for radio intelligence

Guided by a practical task to develop a local oscillator unified scheme for wideband multichannel receiver for radio intelligence the capability of creating a unified local oscillator with some frequency versions is estimated and the experimental research of transient process duration is made. The estimation of modeling inaccuracy with specialized software ADIsimPLL of Analog Devices company is given. In addition, the data of microwave amplifier chip HMC907LP5E is investigated.

Keywords: microwave generator, local oscillator, PLL, VCO, multichannel receiver, radio intelligence.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-1-37-41

References

1. Podstrigaev A.S. Shirokopolosnyi matrichno-parallelnyi priemnik sredstv radiotekhnicheskoi razvedki s ponizhennoi neodnoznachnost'yu opredeleniya chastoty radiolokatsionnykh signalov. Diss. kand. nauk [Wideband matrix-parallel receiver with reduced frequency determination ambiguity of radar signals for radio intelligence tools. Cand. Diss.]. St. Petersburg, 2016. 168 p.

2. Shakhgil'dyan V.V. *Proektirovanie ustroystv generirovaniya i formirovaniya signalov v sistemakh podvizhnoi radiosvyazi* [Designing of devices for generating and formatio signals in mobile radio systems]. Moscow, SOLON-Press, 2011. 400 p.

3. Chenakin A. Frequency Synthesizers. Concept to Product. Norwood, MA, Artech House, 2011. 214 p.

4. Len'shin A.V., Tihomirov N.M., Tihomirov V.N. Experimental researches of a synthesizer of frequencies with switching of elements of a ring of phase self-tuning. *Digest of Voronezh Institute of the Russian Ministry of Internal Affairs*, 2016, no. 3, pp. 7–16. (In Russ.).

5. Len'shin A.V., Lebedev V.V., Tihomirov V.N. Experimental study low-noise wide-range frequency synthesizer. *Digest of Voronezh Institute of the Russian Ministry of Internal Affairs*, 2015, no. 1, pp. 105–110. (In Russ.)

6. Govind Singh Patel, Sanjay Sharma. Comparative Study of PLL, DDS and DDS-based PLL Synthesis Techniques for Communication System. *International Journal of Electronics Engineering*, 2010, no 1, pp. 35–40.

7. Mikhalev P. Mikroskhemy FAPCh i sintezatory na ikh osnove proizvodstva kompanii Analog Devices [PLL chips and PLL chip-based synthesizers based produced by Analog Devices Company]. *Komponenty i tekhnologii*, 2006, no. 57, pp. 48–53. (In Russ.)

8. MT-086. TUTORIAL. Fundamentals of Phase Locked Loops (PLLs). Analog Devices, 2009. 10 p. Available at: <http://www.analog.com/media/ru/training-seminars/tutorials/MT-086.pdf> (accessed: 22 March 2018).

9. Samir Kameche, Mohammed Feham. Designing and Simulating a 2.4 GHz Integer-N Frequency Synthesizer with 1 MHz Frequency Step. *International Journal of Computer Applications*, 2013, no 3, pp. 9–12.

10. Ameri H., Attaran A., Moghavvemi M. Design An X-Band Frequency Synthesizer. *Microwaves & RF*, 2010, vol. 79, pp. 98–103.

11. Vemula Lohith. Kumar Simulation of Integer N Frequency Synthesizer. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 2013, vol. 4, no. 6, pp. 2662–2665.

12. Shurender S., Srividhya K., Mantharachalam V., Suresh K., Umma Habiba M. Design of S-Band Frequency Synthesizer for Microwave Applications. *International Jour-*

Подстригаев Алексей Сергеевич

Канд. техн. наук, начальник научно-исследовательского сектора АО «НИИ «Вектор», ст. преподаватель каф. радиоэлектронных средств СПбГЭТУ «ЛЭТИ» Проф. Попова ул., д. 5, г. Санкт-Петербург, Россия, 197376 ORCID: 0000-0001-8634-3968 Эл. почта: ap0d@ya.ru

Слободян Мария Геннадьевна

Студентка каф. электронных, радиоэлектронных и электротехнических систем (ЭРЭиЭС) Брянского государственного технического университета (БГТУ) 50-лет Октября бул., д. 7, г. Брянск, Россия, 241035 Тел.: +7-953-296-25-05 Эл. почта: slobmaria@yandex.ru

nal of Innovation and Applied Studies, 2013, vol. 3, no. 4, pp. 1110–1115.

13. Dmitriev S. Oдиночные радиочастотные синтезаторы с импульсно-фазовой автподстройкой частоты серии ADF4000 [Single radio frequency synthesizers with pulse-phase auto-tuning of frequency of the ADF4000 series]. *Komponenty i tekhnologii*, 2002, no. 9, pp. 38–43. (In Russ.)

14. Tomozov D.A. Sverkhvysokochastotnye синтезаторы на кол'tsakh фазовой автподстройки частоты с широкой полосой перестройки частоты [Microwave synthesizers on the phase-locked loop with a wide frequency tuning band]. *Trudy MAI*, 2011, no. 49, pp. 1–12. (In Russ.)

15. Datasheet HMC586LC4B. Available at: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/hmc586.pdf>. (accessed: 22 March 2018).

16. Datasheet HMC907LP5E. Available at: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/hmc907.pdf>. (accessed: 22 March 2018).

17. Smolyakov A.V., Podstrigaev A.S., Klimachev V.S. Analiz otechestvennoi elektronnoi komponentnoi bazy dlya postroeniya SVCh-generatorov, stabilizirovannykh petlei FAPCh [Analysis of the Russian electronic component base for the construction of microwave oscillators stabilized by the

PLL loop]. *Sovremennye problemy proektirovaniya, proizvodstva i ekspluatatsii radiotekhnicheskikh sistem*, 2017, no. 2, pp. 216–219.

Aleksey S. Podstrigaev

Ph.D. in Engineering Science, head of the research sector of JSC «Research Institute» Vector», senior lecturer of the Department of Radio Electronic Facilities, ETU «LETI» 5, Prof. Popov st., St. Petersburg, Russia, 197376
ORCID: 0000-0001-8634-3968
Email: ap0d@ya.ru

Maria G. Slobodyan

Student, Department of Electronic, Radioelectronic and Electrical Engineering systems, Bryansk State Technical University
7, 50-let Otyabrya blvd, Bryansk, Russia, 241035
Phone: +7-953-296-25-05
Email: slobmaria@yandex.ru