

УДК 621.396.61

Программный комплекс для анализа шумовых характеристик цифровых синтезаторов частот

Ромашов В.В., Докторов А.Н., Якименко К.А., Базжин А.С.

В статье разработан алгоритм моделирования шумовых характеристик цифровых синтезаторов частот с использованием образов основной частоты. Программный комплекс позволяет строить до 4 характеристик спектральной плотности мощности (СПМ) фазовых шумов в зависимости от начальных данных моделирования. В программе имеется встроенная база интегральных микросхем ЦВС и предоставляется доступ к добавлению пользовательских типов синтезаторов. Результаты моделирования могут выводиться отдельно в виде рисунка с необходимой информацией о параметрах построения.

Ключевые слова: цифровые синтезаторы частот, ЦВС, прямой цифровой синтез частот, фазовый шум, программный комплекс.

Введение

Синтезаторы частот на основе прямого цифрового метода синтеза на сегодняшний день стали наиболее перспективными устройствами получения высокостабильного, точного сигнала с гибким цифровым управлением частоты и фазы. Они обладают высоким частотным разрешением, порядка тысячных долей герца, и позволяют синтезировать сигналы с выходной частотой, достигающей нескольких гигагерц.

Цифровые вычислительные синтезаторы (ЦВС), как и любые источники сигнала, имеют определенную нестабильность частоты, проявляющуюся в виде паразитной фазовой модуляции случайного характера, ухудшающей спектральную чистоту данного сигнала. Фазовый шум является одним из главных показателей оценки стабильности частоты, изучение которого представляет собой сложную задачу, так как спектральный состав такого шума при прохождении через узлы устройства существенно изменяется [1,2].

Применение образов основной частоты ЦВС позволяет существенно повысить частоту выходного сигнала, и тем самым снять ограничение, связанное с невозможной генерацией выходного колебания выше половины тактовой частоты, но и возможностью снизить уровень фазовых шумов на выходе устройства [3,4].

Поскольку моделирование шумовых характеристик синтезатора частот с прямым

цифровым методом синтеза является тяжелой задачей, требующей проведения большого количества вычислений, то целесообразным является разработка программного комплекса для автоматизации процесса обработки информации и наглядной демонстрации результатов моделирования.

Целью данной работы является разработка алгоритма вычисления спектральной плотности мощности (СПМ) фазовых шумов синтезаторов прямого метода синтеза с использованием и без использования образов основной частоты и создание на его основе программного комплекса, позволяющего сравнивать и проводить анализ шумовых характеристик цифровых вычислительных синтезаторов.

Алгоритм вычисления СПМ фазовых шумов цифровых синтезаторов частот

В работах [5-7] приведена вся необходимая математическая база для проведения частотного планирования синтезаторов с использованием образов основной частоты.

Исходными данными для вычисления являются: частота сигнала на входе, формируемая генератором опорной частоты $f_{ГОЧ}$; выходная частота $f_{ВЫХ}$.

Также необходимыми данными являются параметры интегрального ЦВС: максимальная тактовая частота $f_{t\max}$; коэффициенты аппроксимации $k_1 - k_4$, методика расчетов которых приведена в статье [8].

Коэффициент передачи интегральных цифровых вычислительных синтезаторов ограничен максимальным и минимальным значениями:

$$K_{ЦВС\min} = \frac{1}{2^{N_{НКФ}}}; K_{ЦВС\max} = 0,35 \dots 0,4,$$

где $N_{НКФ}$ - значение разрядности накопителя фазы ЦВС.

Оптимальными значениями коэффициента передачи при использовании образов основной частоты, обеспечивающими эффективную фильтрацию, можно считать $K_{ЦВС} = 0,15 \dots 0,35$.

Шаг изменения коэффициентов передачи $\Delta K_{ЦВС} = \frac{1}{2^{N_{НКФ}}}$. Примем $\Delta K_{ЦВС} = 0,001$.

Алгоритм частотного планирования при использовании образов основной частоты ЦВС

Выходные данные моделирования в этом случае рассчитываются исходя из формулы:

$$f_{\text{вых}} = n_1 \cdot f_{ГОЧ} \cdot (n + K_{ЦВС}).$$

Коэффициент умножения тактовой частоты n_1 будет располагаться в пределах:

$$n_1 = 1 \dots n_{1\max},$$

где $n_{1\max} = \text{trunc} \left(\frac{f_{I\max}}{f_{ГОЧ}} \right)$.

Здесь функция $\text{trunc}()$ означает отбрасывание дробной части от результата. Номер образа в алгоритме изменяется в пределах $n = -3 \dots 3$. Подпрограмма расчета выходной синтезируемой частоты устроена в виде вложенных циклов, на каждой итерации которых в результирующую формулу подставляются значения коэффициента умножения n_1 , номера образа основной частоты n и коэффициента передачи $K_{ЦВС}$. Если в ходе подстановки выходная частота совпадает с той, которую ввел пользователь, то все информационные данные моделирования сохраняются в программе.

Тактовая частота в этом случае будет равняться $f_t = n_1 \cdot f_{ГОЧ}$. Выходная частота ЦВС вычисляется $f_{ЦВС} = f_t \cdot K_{ЦВС}$.

Алгоритм частотного планирования без использования образов основной частоты ЦВС

Если в результате проведенных вычислений не удалось использовать побочные составляющие сигнала, то происходит пересчет значений коэффициента n_1 и тактовой частоты сигнала f_t исходя из условия

$$f_{I\max} > (f_t = n_1 \cdot f_{ГОЧ}).$$

Проверка условия осуществляется в цикле при поэтапном увеличении коэффициента n_1 на 1 и заканчивается в результате превышения вычисляемой тактовой частоты над максимальной.

Коэффициент передачи при этом рассчитывается исходя из формулы $K_{ЦВС} = \frac{f_{ЦВС}}{f_t}$.

В ходе выполнения алгоритма вычисляются все необходимые информационные характеристики моделирования (коэффициент умножения n_1 , номер образа n , коэффициент передачи ЦВС $K_{ЦВС}$, тактовая частота f_t и выходная частота ЦВС $f_{ЦВС}$).

Моделирование СПМ фазовых шумов ЦВС осуществляется на основе математических моделей шумовых характеристик устройств [8-12]. Для проведения этой операции необходимо подставить значения параметров синтезатора, полученные в ходе частотного планирования, в соответствующие модели. Важной задачей на этапе моделирования является выбор наименьшего уровня фазовых шумов из различных вариантов конечных результатов вычисления. Это выбор достигается за счет применения алгоритмов сравнения и поиска комбинаций характеристик синтезатора, при которых уровень шумовых составляющих был бы минимален.

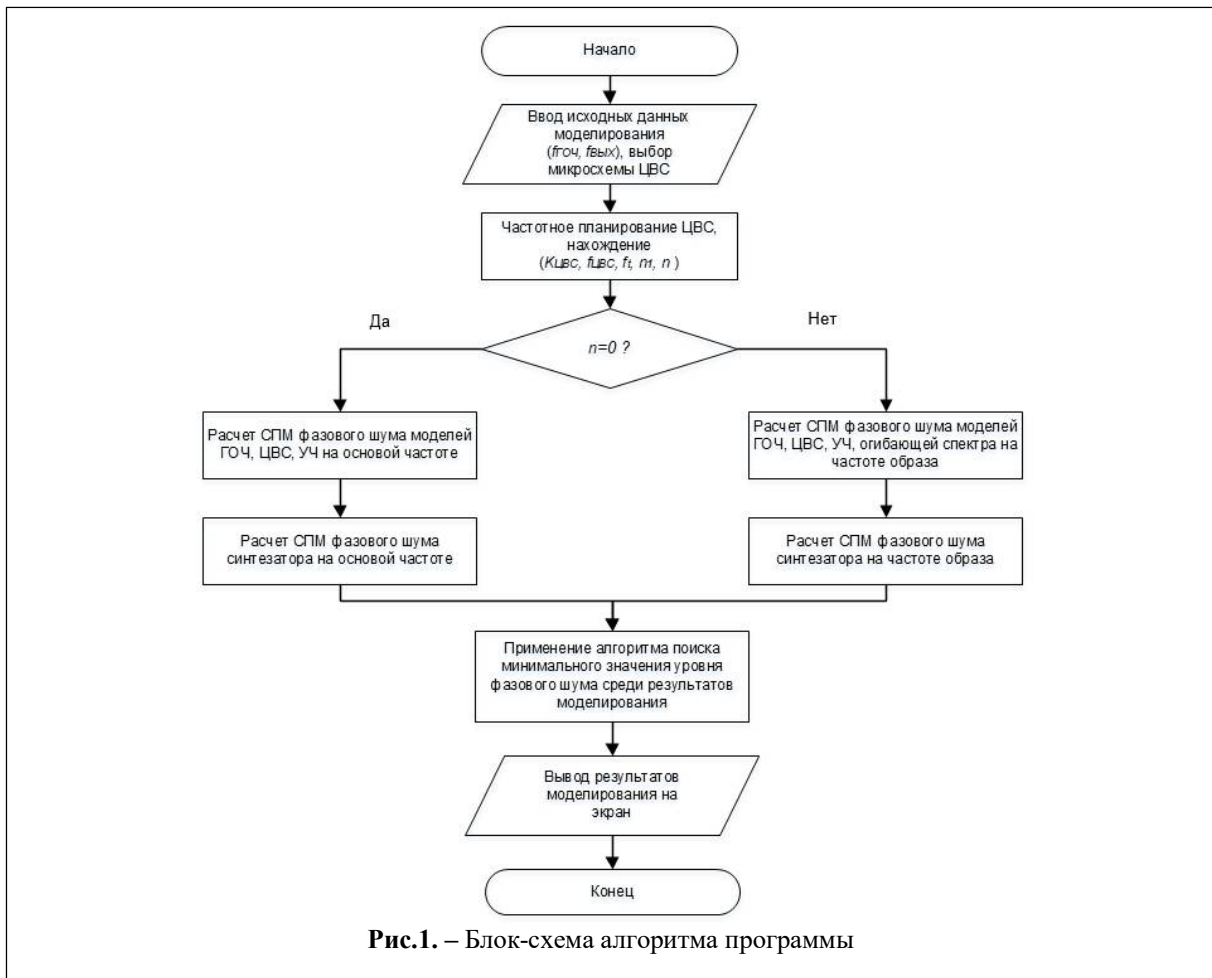


Рис.1. – Блок-схема алгоритма программы

Программный комплекс для расчета СПМ фазовых шумов

Блок схема алгоритма программы приведена на рис.1. После того как пользователь введет исходные данные для расчета, комплекс вы-

полняет частотное планирование ЦВС с нахождением комбинаций параметров моделирования. Далее в зависимости от возможности применения образа основной частоты синтезатора вычисляются модели СПМ фа-

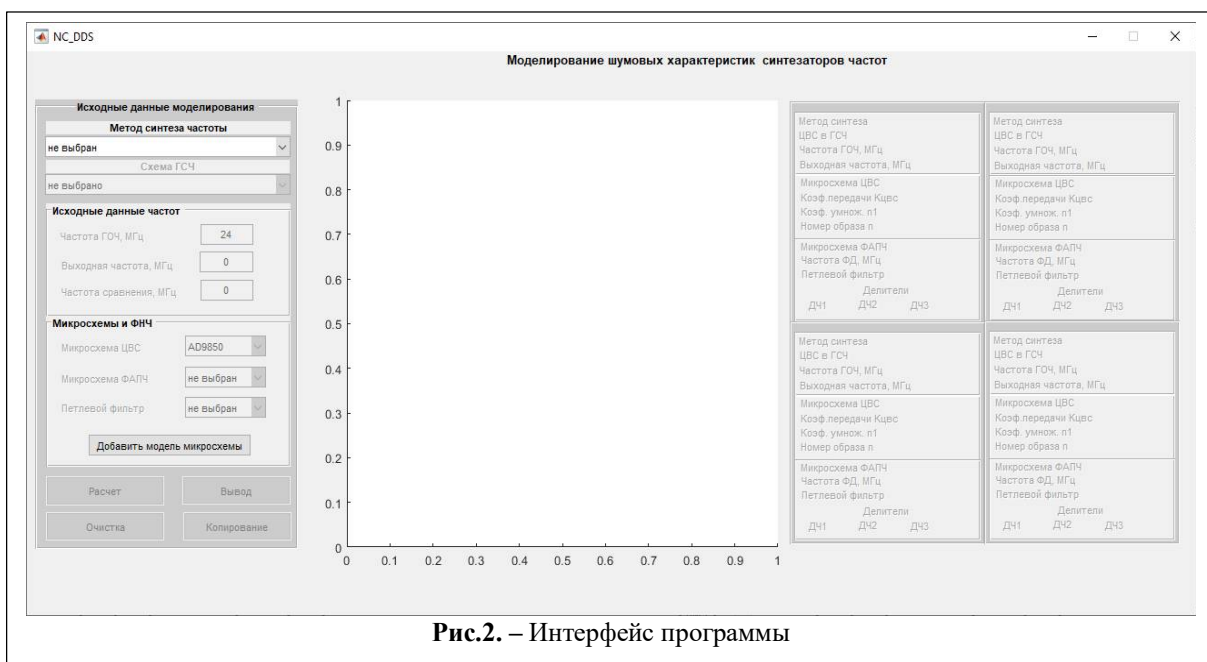


Рис.2. – Интерфейс программы

зового шума и находится итоговое значение шумовой составляющей. Применение алгоритма поиска минимального значения фазового шума позволяет найти его наиболее низкий уровень среди результатов предварительного моделирования. Итоговые характеристики отображаются на экране в виде графика.

Интерфейс программы представлен на рис. 2.

В левой части окна находится панель для задания исходных данных моделирования и панель для построения и редактирования полученных шумовых характеристик. При установке прямого цифрового метода синтеза частоты необходимо также указать интегральную микросхему ЦВС из списка выпадающего меню. Внизу панели исходных данных расположена кнопка «Добавить модель микросхемы», которая позволяет внести собственный вариант модели интегрального ЦВС в базу программы. Программный комплекс предусматривает построение до 4 графиков шумовых характеристик на экране. На рис.3 представлены результаты моделирования СПМ фазовых шумов прямого цифрового метода синтеза частоты для модели интегральной микросхемы ЦВС AD9910 при частоте ГОЧ $f_{ГОЧ} = 12$ МГц и различных выходных частотах ($f_{вых} = 400, 600, 840, 1200$

МГц).

Информация по результатам построенных зависимостей содержится в правой части главного окна в специальных панелях

На рис.4 представлены результаты моделирования СПМ фазовых шумов для различных интегральных микросхем (AD9850, AD9854, AD9910, AD9914) при частоте ГОЧ $f_{ГОЧ} = 10, 16, 32, 40$ МГц и выходной частоте $f_{вых} = 1$ ГГц.

Информация о построении:

График 1 – Частота ГОЧ $f_{ГОЧ} = 10$ МГц, микросхема ЦВС – AD9850, коэффициент передачи ЦВС $K_{ЦВС} = 0,2$, коэффициент умножения частоты тактового генератора $n1 = 125$, номер образа $n = -1$;

График 2 – Частота ГОЧ $f_{ГОЧ} = 16$ МГц, микросхема ЦВС – AD9854, коэффициент передачи ЦВС $K_{ЦВС} = 0,25$, коэффициент умножения частоты тактового генератора $n1 = 50$;

График 3 – Частота ГОЧ $f_{ГОЧ} = 32$ МГц, микросхема ЦВС – AD9910, коэффициент передачи ЦВС $K_{ЦВС} = 0,25$, коэффициент умножения частоты тактового генератора $n1 = 25$, номер образа $n = 1$;

График 4 – Частота ГОЧ $f_{ГОЧ} = 40$ МГц, микросхема ЦВС – AD9914, коэффициент передачи ЦВС $K_{ЦВС} = 0,25$, коэффициент умно-

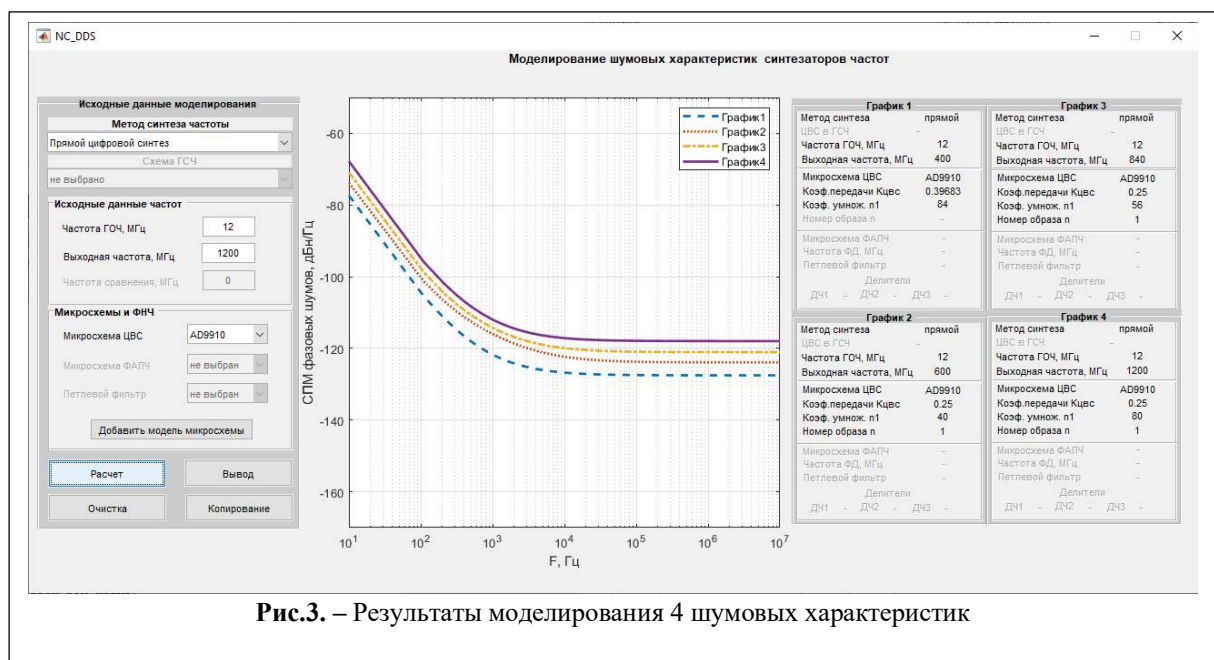


Рис.3. – Результаты моделирования 4 шумовых характеристик

жения частоты тактового генератора $n1 = 20$, номер образа $n = 1$

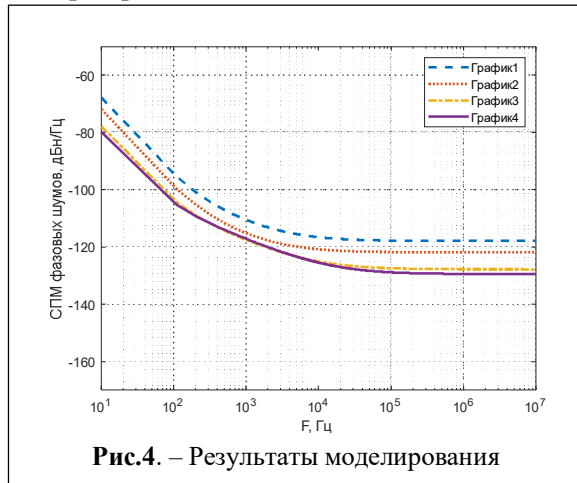


Рис.4. – Результаты моделирования

Заключение

1. Разработанные алгоритмы позволяют реализовать частотное планирование синтезаторов прямого цифрового синтеза с использованием и без использования образов основной частоты

2. Разработан алгоритм поиска минимальных значений шумовых характеристик при использовании моделей СПМ фазовых шумов.

3. На основе алгоритмов разработан программный комплекс для анализа шумовых характеристик синтезаторов частот прямого цифрового метода синтеза.

Литература

1. Рютман Ж. Характеристики нестабильности фазы и частоты сигналов высокостабильных генераторов: Итоги развития за пятнадцать лет / Ж.Рютман // ТИИЭР. –1978. –Т.66. –№ 99. –С. 70-102.

2. Kuleshov, V. N. Fluctuations Sources in Direct Digital Frequency Synthesizers and Their Contribution to the Output Oscillations Power Spectral Density, in Proceedings of the 1995 / V. N. Kuleshov, Y. H. Liu and B. E. Kuleshov // IEEE International Frequency Control Symposium. San Francisco, California, USA (IEEE Publication 95CH35752), 31 May-2 June 1995. -Pp. 282-287.

3. Ромашов В.В., Храмов К.К., Докторов А.Н. Модель цифрового вычислительного синтезатора, работающего на образах основной частоты // Ра-

Поступила 10 сентября 2019 г.

диотехнические и телекоммуникационные системы. 2012, №2. С. 13-17.

4. Ромашов В.В., Храмов К.К. Формирование сигналов в ОВЧ- и УВЧ-диапазонах при использовании метода прямого цифрового синтеза частот // Радиотехника. 2007, № 6. С. 39-41.

5. Ромашов В.В., Храмов К.К., Докторов А.Н. Частотное планирование формирователей сигналов радиосистем на основе цифровых вычислительных синтезаторов // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2012. № 4. С. 10-15.

6. Romashov V.V., Romashova L.V., Khramov K.K., Doktorov A.N. Simulation of Noise Curves of the New Integrated DDS from Analog Devices // Proc. of the 2013 Int. Siberian Conf. on Control and Communications (SIBCON). – Krasnoyarsk: Siberian Federal University, Russia, Krasnoyarsk, September 12–13, 2013. IEEECatalogNumber: CFP13794-CDR. ISBN: 978-1-4799-1060-1.

7. Докторов А.Н. Анализ алгоритма частотного планирования формирователей сигналов с использованием образов основной частоты цифровых вычислительных синтезаторов // Методы и устройства передачи и обработки информации, 2017, №19. С. 16-22.

8. Ромашов В.В., Ромашова Л.В. Методика расчета коэффициентов аппроксимации спектральной плотности мощности фазовых шумов цифровых вычислительных синтезаторов // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2012, № 1. С.23-26.

9. Ромашов В.В., Ромашова Л.В., Якименко К.А., Коровин А.Н. Моделирование шумовых характеристик гибридных синтезаторов частот на интегральных микросхемах // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2013, №1. С. 10-15.

10. Ромашов В.В., Ромашова Л.В. Моделирование шумовых характеристик интегральных цифровых вычислительных синтезаторов // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2011, № 4. С.20-23.

11. Ромашов, В.В. Модель спектральной плотности мощности фазовых шумов цифровых вычислительных синтезаторов на образах основной частоты / В.В. Ромашов, Л.В. Ромашова, К.К. Храмов, А.Н. Докторов // Радиопромышленность. 2012, №2. С.38 – 48.

12. Ромашов В.В., Храмов К.К. Формирователи сетки опорных частот возбуждителя передатчика с использованием образов основной частоты // Методы и устройства передачи и обработки информации. 2011. № 13. С. 44-47.

The article developed an algorithm for modeling the noise characteristics of digital frequency synthesizers using images of the fundamental frequency. The software package allows you to build up to 4 characteris-

tics of the spectral power density (PSD) of phase noise, depending on the initial simulation data. The program has a built-in base of integrated circuits for digital computers and provides access to add custom types of synthesizers. The simulation results can be displayed separately in the form of a picture with the necessary information about the construction parameters.

Key words: digital frequency synthesizers, DAC, direct digital frequency synthesis, phase noise, software.

Ромашов Владимир Викторович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиотехники Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

E-mail: romashovmurom@mail.ru.

Докторов Андрей Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехники Муромского института (филиала) ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

E-mail: doctorov_a_n@mail.ru

Адрес: 602264, г. Муром, ул. Орловская, 23.

Якименко Кирилл Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехники Муромского института (филиала) ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

E-mail: yakimenko.kirill@yandex.ru

Адрес: 602264, г. Муром, ул. Орловская, 23.

Базжин Альберт Сергеевич - магистрант Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

E-mail: bazjin.alb@yandex.ru

Адрес: 602264, г. Муром, ул. Орловская, 23.