

УДК 538.945

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ШУМОВЫХ СВОЙСТВ
ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО МИКРОВОЛНОВОГО ТРАКТА
СВЕРХПРОВОДЯЩИХ КВАНТОВЫХ ЦЕПЕЙ****И.Л. Новиков¹, Б.И. Иванов¹, А.В. Кривецкий¹,
П.С. Щекин¹, Е.В. Ильичев^{1,2}, А.Г. Вострецов¹**¹*Новосибирский государственный технический университет*²*Лейбниц, Институт фотонных технологий*

Экспериментальные исследования сверхпроводниковых квантовых структур предъявляют повышенные требования к измерительному тракту и обеспечению комплексной работы охладительной системы и системы измерений с повышенной защитой от внешних помех и шумов. В данной работе представлен результат экспериментальных исследований по измерению общего уровня шума микроволнового измерительного тракта, установленного в холодильнике растворения, в широкой полосе частот. Рабочая температура холодильника достигала 10 мК. Основой микроволнового тракта является малошумящий полупроводниковый криогенный усилитель. Максимальный коэффициент усиления в криогенном тракте достигал 15 дБ, максимальная мощность рассеяния составляла 1,5 мВт, рабочая полоса частот усилителя – 4 ГГц. Общий уровень подавления внешних помех был более 100 дБ.

Ключевые слова: холодильник растворения, микроволновый тракт, измерение уровня шума усилителя, неразрушающий метод измерения.

DOI: 10.17212/1727-2769-2015-1-52-65

Введение

Идея создания квантового компьютера относится к одной из наиболее актуальных задач научно-технического прогресса. Связано это с последними достижениями современных электронных технологий, позволяющими создавать новые классы электронных устройств, работающих на принципах квантовой механики.

Основой квантового процессора является квантовый бит (кубит), представляющий собой двухуровневую квантовую систему. В такой системе информация хранится в виде волновой функции, являющейся суперпозицией волновых функций двух квантовых состояний. Процесс вычислений протекает в виде эволюции квантовой системы, при которой изменяется волновая функция кубита или целой группы кубитов. На сегодняшний день простейшие квантовые биты уже реализованы на основе ядерных спинов; атомных или ионных ловушек; туннельных джозефсоновских контактов [1–8]. Одним из перспективных типов квантовых битов являются трехконтактные сверхпроводниковые потоковые квантовые биты на основе джозефсоновских контактов – сверхпроводниковые кубиты.

Как правило, частота возбуждения кубита лежит в диапазоне частот до десятков гигагерц при рабочих температурах ниже 50 мК. Поэтому для определения состояний кубитов требуются высокочувствительные детекторы, входящие

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках государственного задания, проект № 8.337.2014/К и РФФИ, проект 14-02-31601 мол_а.

© 2015 И.Л. Новиков, Б.И. Иванов, А.В. Кривецкий, П.С. Щекин, Е.В. Ильичев,
А.Г. Вострецов

в состав измерительного оборудования. При экспериментальной реализации устройств для лазерной генерации система кубитов помещается в квантовый резонатор, выполненный на основе СВЧ копланарной линии передачи (рис. 1, *a*). Стимулированный переход между рабочими уровнями приводит к передаче энергии от кубитов в резонатор в виде фотонов с энергией $\hbar\omega = E_2 - E_1$, при этом квантовый резонатор должен быть настроен в соответствии с разницей энергий между рабочими уровнями кубита. Частота настройки такого резонатора лежит в пределах 1...10 ГГц. Электронная фотография высокого разрешения (микрограф) сверхпроводникового кубита, связанного с СВЧ-резонатором, изображена на рис. 1, *б*.

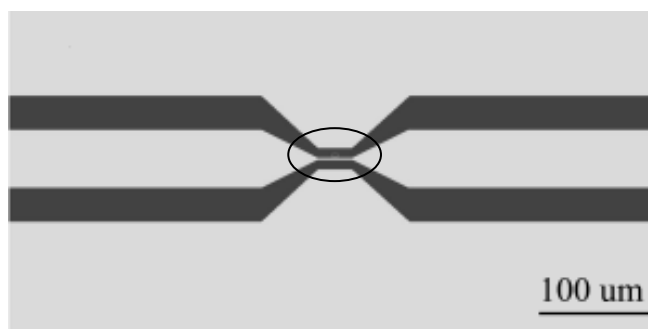
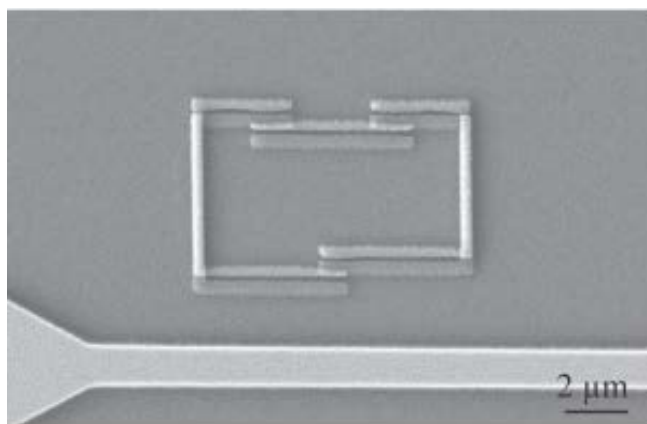
*a**б*

Рис. 1 – Система кубит – СВЧ-резонатор (копланарный СВЧ-резонатор, связанный с кубитом, отмечен овалом) (*a*); микрограф увеличенного изображения трехконтактного сверхпроводникового потокового квантового бита, связанного с СВЧ-резонатором (*б*)

Fig. 1 – A flux qubit coupled to microwave coplanar waveguide resonator (a qubit deposition place is marked with a circle) (*a*); A micrograph of a three junction superconducting flux qubit made by scanning electron microscopy (*b*)

Для систем считывания состояния сверхпроводниковых кубитов требуются малозумящие СВЧ-устройства. При этом актуальными являются задачи разработки и оптимизации трактов передачи СВЧ-сигналов, а также обеспечение

подавления шумов и помех в цепях управления и питания. Рассматриваемые устройства предназначены для работы при сверхнизких температурах, а рассеяние тепловой мощности на них должно быть сведено к минимуму.

Известно, что в результате действия шума измерительного оборудования время когеренции квантовой системы уменьшается [9–11]. Поэтому в ВЧ и СВЧ измерительных системах сверхпроводниковых кубитов необходимо обеспечить широкую полосу подавления в сигнальных линиях и линиях смещения кубита постоянным магнитным потоком. При этом, естественно, проникновение в измерительные тракты паразитных электромагнитных сигналов не допустимо.

По указанным причинам микроволновый измерительный тракт для систем детектирования сверхпроводниковых квантовых битов должен иметь полосу пропускания до 20 ГГц, обладать малым коэффициентом теплопроводности, сравнительно малыми потерями в полосе рабочих частот, отсутствием частот режекции резонансного типа, отсутствием отражений, хорошей термализацией.

В настоящей работе было проведено исследование шумовых свойств системы измерения состояний сверхпроводниковых квантовых битов и сверхпроводящих устройств на их основе. Был охарактеризован общий уровень шума системы, чувствительность которой определяется шумовыми свойствами широкополосного криогенного усилителя. Было проведено экспериментальное исследование экранирующих свойств микроволновых трактов при криогенных температурах эксперимента до 10 мК.

1. Микроволновые измерительные тракты

В работе были экспериментально исследованы микроволновые измерительные тракты рефрижератора растворения при различных температурных режимах: 300 К, 4,2 К, 37 мК. В качестве СВЧ измерительных линий передачи использовались следующие кабели: стандартный коаксиальный кабель сечением 2,2 мм (применялся для соединения векторного анализатора цепей (ВАЦ) с внутренними линиями рефрижератора); внутренние линии рефрижератора (ВЧ-тракты), состоявшие из коаксиального кабеля ВеСu-ВеСu сечением 2,19 мм, соединявшего платы при температурах 300 К и 40 К; далее были использованы ВЧ стальные кабели до камеры растворения 10 мК с прерываниями для термализации криогенными СВЧ-разъемами с полосой пропускания до 40 ГГц; криогенный полугибкий алюминиевый коаксиальный кабель сечением 2,2 мм, имеющий при рабочих температурах рефрижератора сверхпроводящую металлическую оболочку, которая обеспечивала дополнительное экранирование от электромагнитных помех (данный кабель обеспечивал соединение криогенного усилителя с измерительным трактом рефрижератора).

Для характеристики трактов использовался ВАЦ ZVL-13, с максимальной аналоговой частотой измерения 13 ГГц и опцией анализатора спектра. Фильтр промежуточной частоты имел полосу пропускания шириной 10 кГц, мощность входного сигнала в исследуемый СВЧ-тракт соответствовала –30 дБм (1 мкВт). Схема измерения трактов представлена на рис. 2, а.

Были выполнены измерения матриц рассеяния S_{11} , S_{12} , S_{21} , S_{22} от частоты в рабочем диапазоне от 10 кГц до 13 ГГц, позволяющей судить об уровне затухания сигнала, его отражении в сочленениях и наличии паразитных резонансов в линии. Матрицы рассеяния для микроволновых трактов при двух температурах представлены на рис. 3. Параметры матрицы S_{21} и S_{12} полностью совпадают для выбранного диапазона частот, поэтому приведены только параметры S_{21} . Как видно

из рис. 3, *a* параметры матрицы рассеяния S_{11} и S_{22} близки по значению. Поэтому для сверхнизкой температуры показан только параметр S_{22} . Как видно из рисунка, коэффициент затухания линий ведет себя линейно с ростом частоты. Отсутствуют частоты режекции и паразитные резонансы. Отражения от входа и выхода составляют величину менее -20 дБ. Это подтверждает отсутствие стоячих волн в микроволновом измерительном тракте и потерь, связанных с отражением СВЧ-сигналов.

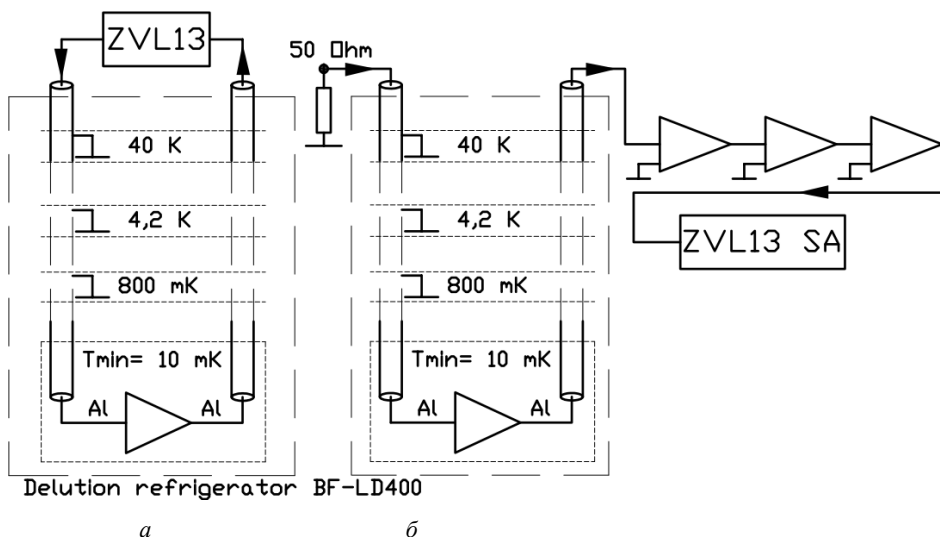


Рис. 2 – Схемы измерения:

a – матриц рассеяния [S] измерительных трактов, расположенных в рефрижераторе растворения; *б* – спектральной плотности мощности шума

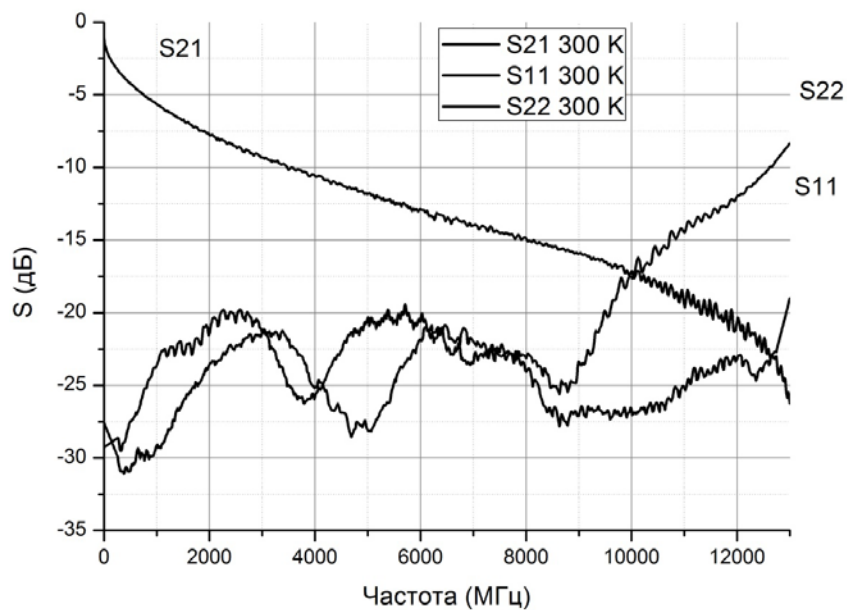
Fig. 2 – Measurement schemes for:

a – scattering parameters of the microwave setup; *b* – spectral power noise density

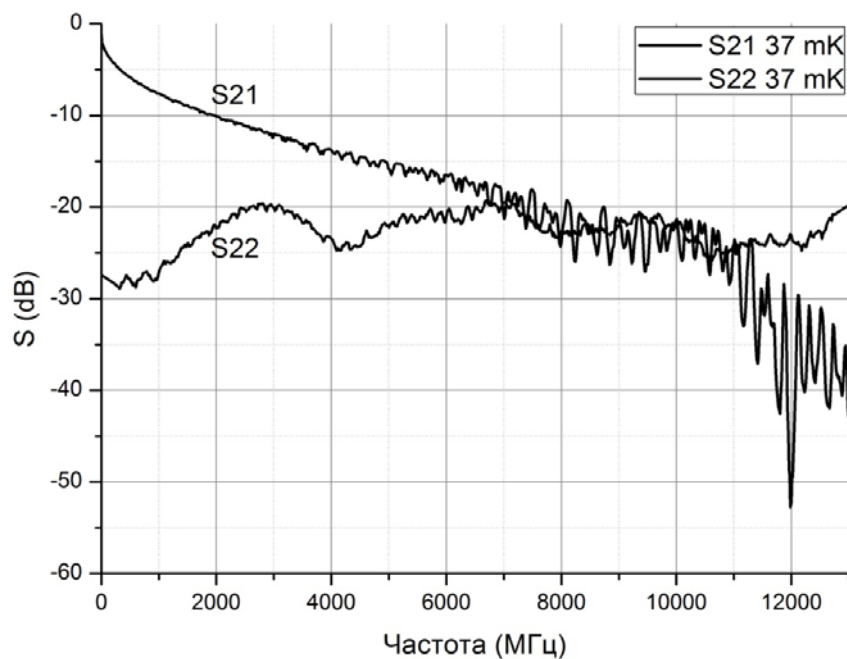
Для оценки эффективности экранирования измерительного тракта рефрижератора были выполнены измерения спектральной плотности мощности шума (в единицах измерения дБм/Гц) всей системы в следующей конфигурации: широкополосная нагрузка 50 Ом на входе линий рефрижератора – входной ВЧ-тракт – Al коаксиальный кабель – криоусилитель – Al коаксиальный кабель – выходной ВЧ-тракт рефрижератора – коаксиальный кабель сечением 2,2 мм – 3 выходных СВЧ-усилителя (КУ) – анализатор спектра.

Для экспериментального исследования свойств сверхпроводниковых кубитов и сверхпроводниковых структур на их основе при криогенных температурах вплоть до 100 мК в полосе частот 1 МГц...4 ГГц был разработан новый тип двухкаскадного криогенного усилителя мощности с малым значением шумовой температуры на основе SiGe гетероструктурных биполярных транзисторов.

Разработанный усилитель представляет собой двухкаскадную схему, включенную по схеме с общим эмиттером, с обратной связью по току. Для данного усилителя применялись биполярные транзисторы VFP640 компании Infineon Technologies [12]. Данные транзисторы зарекомендовали себя в ряде перспективных разработок [13–17], в которых показан уровень собственных шумов с шумовой температурой ниже 10 К.



a



б

Рис. 3 – Экспериментально полученные матрицы рассеяния [S] измерительного тракта в зависимости от частоты при различных рабочих температурах:

a – температура рефрижатора 300 K; б – рабочая температура рефрижатора 37 mK
 Fig. 3 – Measured scattering parameters of the microwave setup with two temperatures of the experiment:

a – temperature of the refrigerator is 300 K; b – the refrigerator temperature is 37 mK

Принципиальная схема разработанного усилителя показана на рис. 4. В качестве разделительных емкостей между каскадами усилителя и емкостей в фильтрах питания использовались конденсаторы с материалом диэлектрика NPO и COG. Данные конденсаторы обладают малым температурным коэффициентом емкости. Кроме того, в цепях питания использовались прецизионные резисторы, выполненные по технологии microMELF. Согласующие цепи были выполнены в виде дискретных RC-элементов.

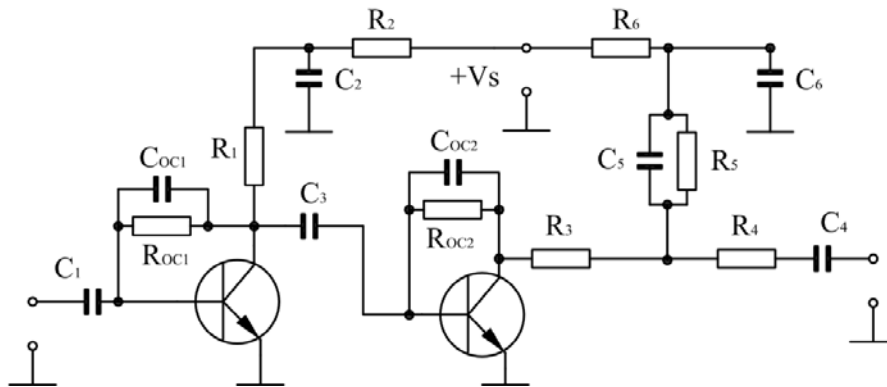


Рис. 4 – Принципиальная схема двухкаскадного криогенного усилителя

Fig. 4 – The principal electrical circuit of cryogenic amplifier

Было проведено исследование передаточных свойств криогенного усилителя. Диапазон коэффициентов усиления по напряжению при комнатной температуре для различных режимов питания криогенного усилителя в рабочей полосе частот 1 МГц...4 ГГц составлял от 2 до 20 дБ.

Измерение спектральной плотности мощности шума микроволнового тракта было выполнено при различных режимах питания усилителя. Было получено семейство кривых, из которых наибольший интерес для оценки шума тракта представляют кривые с минимальным и максимальным коэффициентом усиления. Измерения выполнялись при двух режимах криогенного усилителя: а) минимальный коэффициент усиления (напряжение питания $V_s = 1,022$ В); б) максимальный коэффициент усиления (напряжение питания $V_s = 3,54$ В).

Очевидно, что в случае присутствия внешних электромагнитных помех на входе исследуемого микроволнового тракта величина всплесков в спектральной плотности мощности шума зависела бы от коэффициента усиления криогенного усилителя. Однако из полученной характеристики видно, что значения уровней спектральной мощности во всплесках не пропорциональны коэффициенту усиления криогенного усилителя и имеют постоянный спектральный уровень (рис. 5). Отсюда можно сделать вывод, что электромагнитные помехи, присутствующие в спектре, проникают в выходные цепи тракта. Таким образом, можно разделить паразитные электромагнитные помехи, проникающие в измерительный тракт через внешний коаксиальный кабель и выходной усилительный каскад, от помех, поступающих на вход криогенного усилителя, который находится внутри рефрижератора.

Далее, эффективность экранирования оценивалась математическим вычитанием из спектральной плотности мощности шума, полученного при напряжении питания 3,54 В (максимальный коэффициент S_{21} матрицы рассеяния S_{max}), уровня мощности шума при напряжении питания 1,022 В (минимальный коэффициент S_{21} матрицы рассеяния S_{min}). Результат оценки показан на рис. 6.

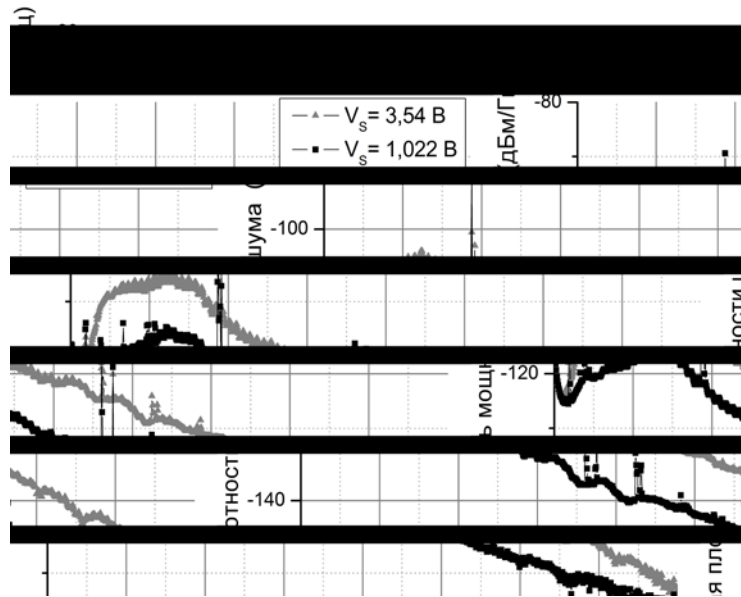


Рис. 5 – Экспериментальные кривые спектральной плотности мощности шума измерительной системы при двух рабочих точках криогенного усилителя

Fig. 5 – Experimentally obtained power spectral noise density for two working points of the cryogenic amplifier

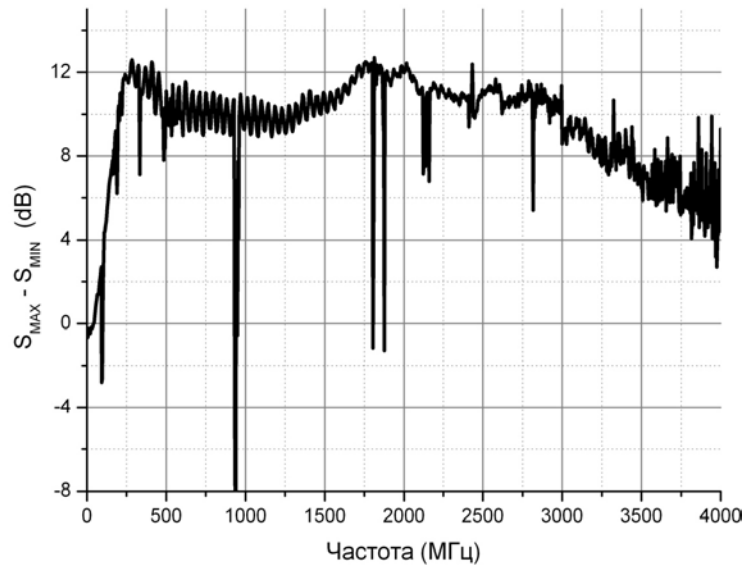


Рис. 6 – Экспериментально полученная кривая разности спектральной плотности мощности шума измерительной системы при двух рабочих точках усилителя (при максимальном и минимальном коэффициентах усиления)

Fig. 6 – A measured difference of power spectral noise densities for two working points of the cryogenic amplifier: working points correspond to maximum and minimum gain of the cryoamplifier

Из рисунка видно, что внешние помехи, поступающие на выход измерительного тракта, не будут усилены криогенным усилителем и, поэтому разница спектральной плотности шумов при максимальном и минимальном усилении криоусилителя покажет не паразитные пики, а провалы сигнала на соответствующих частотах. Более того, было проведено измерение спектральной мощности шума комнатных усилителей, на которой было явно видно наличие всплесков на частотах 980 МГц, 1,8 ГГц, 2,2 ГГц, 2,7 ГГц. Данные частоты соответствуют коммуникационным стандартам передачи данных GSM, CDMA и Wi-Fi сетей. Таким образом, получено, что все паразитные помехи проникают в измерительную систему через внешние элементы питания комнатных усилителей, а сам исследуемый измерительный тракт в холодильнике растворения позволяет проводить измерения на уровне не хуже -174 дБм/Гц.

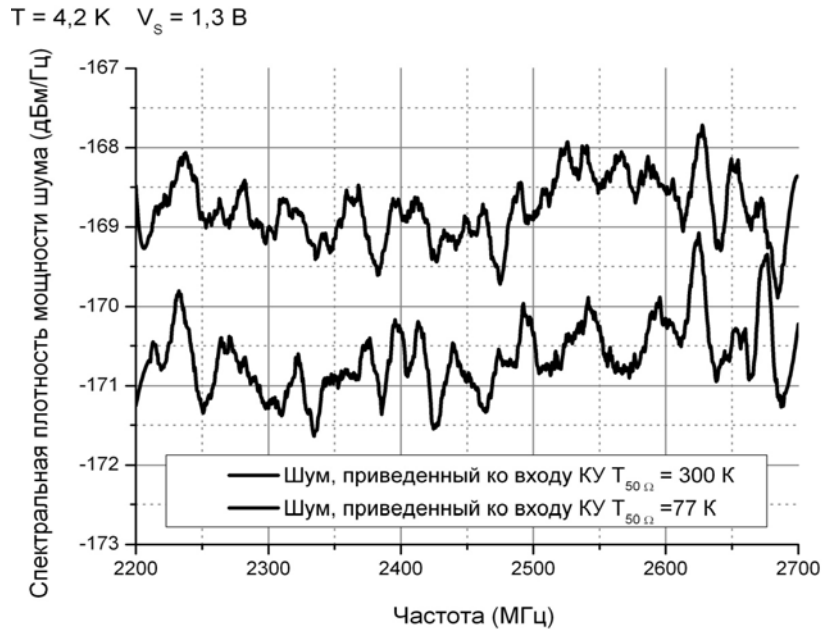
2. Шумовые свойства широкополосного микроволнового измерительного тракта

Для проверки возможностей измерительного тракта для систем детектирования состояния сверхпроводниковых кубитов были выполнены измерения его шумовых характеристик. Измерения шумовых характеристик измерительного тракта холодильника были выполнены в следующей конфигурации: широкополосная нагрузка 50 Ом на входе линий холодильника – входной ВЧ-тракт – А1 коаксиальный кабель – криоусилитель – А1 коаксиальный кабель – выходной ВЧ-тракт холодильника – коаксиальный кабель 2,2 мм – выходные СВЧ-усилители КУ – анализатор спектра. Измерения проводились при рабочей температуре холодильника 4,2 К. Схема измерения представлена на рис. 2, б.

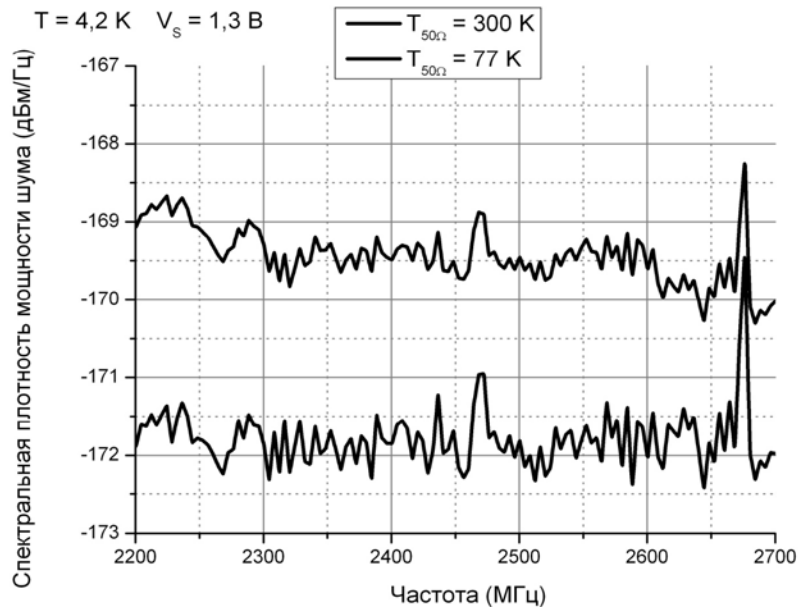
Общий уровень шума системы делится на две составляющие: шум микроволнового тракта, включающего криогенный усилитель, входные и выходные коаксиальные кабели и широкополосную согласованную нагрузку, и шум комнатных широкополосных усилителей.

Было проведено измерение уровня шума комнатных усилителей. Измеренная спектральная плотность шума, приведенного ко входу, комнатного усилительного каскада определялась вычитанием из выходного шума каскада его коэффициента усиления в системе единиц дБ. Очевидно, что первый усилитель должен обладать минимальным коэффициентом шума. Согласно заявленным в документации производителем параметрам коэффициент шума первого комнатного усилителя составляет 1 дБ, что соответствует уровню спектральной плотности мощности шума в -173 дБм/Гц. Известно, что спектральная плотность мощности шума согласованной нагрузки определяется как $P_N = k_B T$ и составляет -174 дБм/Гц при комнатной температуре 300 К. Экспериментально полученный результат хорошо согласуется с оценкой уровня шума первого усилителя в каскаде.

Спектральная плотность мощности шума широкополосной нагрузки линейно зависит от температуры. Поэтому для снижения влияния шума от нагрузки и оценки влияния измерительного тракта на полный шум системы были проведены измерения при разных температурах: 300 К и 77 К (нагрузка при этом помещалась в сосуд с жидким азотом) в полосе частот 2,2...2,7 ГГц, вблизи резонансной частоты кубита 2,5 ГГц. При этом коэффициент усиления криогенного усилителя устанавливался максимальным (напряжение питания V_S составляло 1,3 В). Результаты измерений представлены на рис. 7, а. Можно видеть, что при понижении температуры источника шума полный шум на выходе микроволнового тракта холодильника уменьшился на 2 дБ.



а



б

Рис. 7 – Экспериментальная (а) и расчетная (б) спектральные плотности мощности шума на выходе микроволнового тракта рефрижератора, полученные при разных температурах широкополосной нагрузки: 300 К (верхняя кривая); 77 К (нижняя кривая)

Fig. 7 – Experimental (a) and estimated (b) noise power spectral densities at the output of the microwave refrigerator path obtained at different temperatures broadband load: 300 K (upper curve); 77 K (lower curve)

Для сравнения полученных результатов был рассчитан ожидаемый уровень спектральной плотности мощности шума на выходе микроволнового тракта рефрижератора (рис 7, б). На рисунке приведен суммарный расчетный уровень источника шума, измерительного тракта с криогенным усилителем и приведенным ко входу собственным шумом выходного усилительного каскада. Расчет включал потери в коаксиальных линиях (коэффициент затухания, измеренный отдельно) и коэффициент усиления криогенного усилителя (уровень шума криогенного усилителя при рабочих температурах рефрижератора 4,2 К при данном анализе в расчет не принимался).

Сравнение характеристик на рис. 7, а и б показывает хорошее согласие экспериментального уровня шума и рассчитанного. Этот результат показывает, что измерительный тракт не имеет дополнительных источников шума, позволяя шумовому сигналу достигать выходного усилительного каскада без изменений.

Заключение

В данной статье представлен результат экспериментального исследования общего уровня шума установки измерения состояний сверхпроводниковых квантовых битов и сверхпроводниковых устройств на их основе. Кроме того, было проведено измерение эффективности экранировки данной установки. Были измерены передаточные и экранирующие свойства микроволновых трактов, установленных в рефрижератор растворения, в широкой полосе частот до 40 ГГц при минимальной рабочей температуре рефрижератора 10 мК. Общий уровень подавления внешних помех составил более 100 дБ.

Основой микроволнового тракта является малошумящий полупроводниковый криогенный усилитель. Максимальный коэффициент усиления в криогенном тракте достигал 15 дБ, максимальная мощность рассеяния составляла 1,5 мВт, рабочая полоса частот усилителя 1 МГц...4 ГГц. Измерения эффективного экранирования системы детектирования показали, что измерения в рефрижераторе растворения проходят с чувствительностью на уровне не хуже -174 дБм/Гц. Данная спектральная плотность мощности шума является шумовым фоном при проведении экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Coherent dynamics of a flux qubit coupled to a harmonic oscillator / I. Chiorescu, P. Bertet, K. Semba, Y. Nakamura, C.J.P.M. Harmans, J.E. Mooij // *Letters to Nature*. – 2004. – Vol. 431, N 7005. – P. 159–162. – doi: 10.1038/nature02831.
2. P'ichev E., Greenberg Ya.S. Flux qubit as a sensor of magnetic flux // *A Letters Journal Exploring the Frontiers of Physics*. – 2007. – Vol. 77, N 5. – P. 58005-p1–58005-p4. – doi: 10.1209/0295-5075/77/58005.
3. Josephson persistent-current qubit / J.E. Mooij, T.P. Orlando, L. Levitov, L. Tian, C.H. van der Wal, S. Lloyd // *Science*. – 1999. – Vol. 285, N 5430. – P. 1036–1039. – doi: 10.1126/science.285.5430.1036.
4. Serban I., Plourde B.L.T., Wilhelm F.K. Quantum nondemolition-like fast measurement scheme for a superconducting qubit // *Physical Review B*. – 2008. – Vol. 78, N 5. – P. 054507-1–054507-10. – doi: 10.1103/PhysRevB.78.054507.
5. Flux qubits and readout device with two independent flux lines / B.L.T. Plourde, T.L. Robertson, P.A. Reichardt, T. Hime, S. Linzen, C.-E. Wu, J. Clarke // *Physical Review B*. – 2005. – Vol. 72, no. 6. – P. 060506(R)-1–060506(R)-4. – doi: 10.1103/PhysRevB.72.060506.
6. Clarke J., Wilhelm F.K. Superconducting quantum bits // *Nature*. – 2008. – Vol. 453, N 7198. – P. 1031–1042. – doi: 10.1038/nature07128.
7. Devoret M.H., Wallraff A., Martinis J.M. Superconducting qubits: a short review / *The Smithsonian/NASA Astrophysics Data System*. – [s. l.], 2004. – 41 p.

8. **Leggett A.J.** Superconducting qubits – a major roadblock dissolved // *Science*. – 2002. – Vol. 296, N 5569. – P. 861–862. – doi: 10.1126/science1071703.
9. **Shnirman A., Makhlin Y., Schön G.** Noise and decoherence in quantum two-level systems // *Physica Scripta*. – 2002. – Vol. 102. – P. 147–154. – doi: 10.1238/Physica.Topical.102a00147.
10. **Amin M.H.S., Truncik C.J.S., Averin D.V.** Role of single qubit decoherence time in adiabatic quantum computation // *Physical Review A*. – 2009. – Vol. 80. – P. 022303-1–022303-5. – doi: 10.1103/PhysRevA.80.022303.
11. Quantum-to-classical transition in cavity quantum electrodynamics / J.M. Fink, L. Steffen, P. Studer, L.S. Bishop, M. Baur, R. Bianchetti, D. Bozyigit, C. Lang, S. Filipp, P.J. Leek, A. Wallraff // *Physical Review Letters*. – 2010. – Vol. 105. – P. 163601-1–163601-4. – doi: 10.1103/PhysRevLett.105.163601.
12. BFP640ESD: robust low noise silicon germanium bipolar RF transistor. Revision 1.1 [Electronic resource]. – Ed. 2012-09-17. – Munich, Germany: Infineon Technologies AG, 2013. – 27 p. – URL: http://www.infineon.com/dgdl/Infineon-BFP640ESD-DS-v01_01-en.pdf?fileId=db3a30432968c552012991de121f54ac (accessed: 22.11.2014).
13. Cryogenic ultra-low-noise SiGe transistor amplifier / B.I. Ivanov, M. Trgala, M. Grajcar, E. Il'ichev, H.-G. Meyer // *Review of Scientific Instruments*. – 2011. – Vol. 82, iss. 10. – P. 104705-1–104705-3. – doi: 10.1063/1.3655448.
14. **Kiviranta M.** Use of SiGe bipolar transistors for cryogenic readout of SQUIDs // *Superconductor Science and Technology*. – 2006. – Vol. 19, N 12. – P. 1297–1302. – doi: 10.1088/0953-2048/19/12/014.
15. **Beev N., Kiviranta M.** Note: cryogenic low-noise dc-coupled wideband differential amplifier based on SiGe heterojunction bipolar transistors // *Review of Scientific Instruments*. – 2012. – Vol. 83, iss. 6. – P. 066107-1–066107-3. – doi: 10.1063/1.4729665.
16. Matched wideband low-noise amplifiers for radio astronomy / S. Weinreb, J. Bardin, H. Marni, G. Jones // *Review of Scientific Instruments*. – 2009. – Vol. 80, iss. 4. – P. 044702-1–044702-5. – doi: 10.1063/1.3103939.
17. **Иванов Б.И.** Экспериментальное исследование криогенных усилителей на основе SiGe биполярных транзисторов при температуре 4,2 К // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2014. – № 1 (22). – С. 73–82.

EXPERIMENTAL STUDY OF NOISE PARAMETERS IN A MICROWAVE MEASUREMENT SYSTEM FOR FLUX QUBIT READOUT

**Novikov I.L.¹, Ivanov B.I.¹, Krivetskiy A.V.¹,
Schekin P.S.¹, Il'ichev E.V.^{1,2}, Vostretsov A.G.¹**

¹*Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation*

²*Leibniz Institute of Photonic Technology, Jena, Germany*

High quality noise free measurements for superconducting circuits are provided by a joint operation of a refrigerator and a measurement setup. In this paper we show experimental results of noise power spectral density measurements for a full microwave setup of quantum circuit readout with various temperatures up to 10 mK. The main part of the microwave setup is a low noise cryogenic amplifier. A maximum gain of the amplifier amounts to 15 dB with power consumption of 1.5 mW. The amplifier has a wideband frequency range from 1 MHz to 4 GHz. The efficiency of the shielding part of the cryostat provides noise suppression of over 100 dB.

Keywords: dilution refrigerator, microwave setup, microwave measurements, nondestructive measurements.

DOI: 10.17212/1727-2769-2015-1-52-65

REFERENCES

1. Chiorescu I., Bertet P., Semba K., Nakamura Y., Harmans C.J.P.M., Mooij J.E. Coherent dynamics of a flux qubit coupled to a harmonic oscillator. *Letters to Nature*, 2004, vol. 431, no. 7005, pp. 159–162. doi: 10.1038/nature02831

2. Il'ichev E., Greenberg Ya.S. Flux qubit as a sensor of magnetic flux. *A Letters Journal Exploring the Frontiers of Physics*, 2007, vol. 77, no. 5, pp. 58005-p1–58005-p4. doi: 10.1209/0295-5075/77/58005
3. Mooij J.E., Orlando T.P., Levitov L., Tian L., Wal C.H. van der, Lloyd S. Josephson persistent-current qubit. *Science*, 1999, vol. 285, no. 5430, pp. 1036–1039. doi: 10.1126/science.285.5430.1036
4. Serban I., Plourde B.L.T., Wilhelm F.K. Quantum nondemolition-like fast measurement scheme for a superconducting qubit. *Physical Review B*, 2008, vol. 78, no. 5, pp. 054507-1–054507-10. doi: 10.1103/PhysRevB.78.054507
5. Plourde B.L.T., Robertson T.L., Reichardt P.A., Hime T., Linzen S., Wu C.-E., Clarke J. Flux qubits and readout device with two independent flux lines. *Physical Review B*, 2005, vol. 72, no. 6, pp. 060506(R)-1–060506(R)-4. doi: 10.1103/PhysRevB.72.060506
6. Clarke J., Wilhelm F.K. Superconducting quantum bits. *Nature*, 2008, vol. 453, no. 7198, pp. 1031–1042. doi: 10.1038/nature07128
7. Devoret M.H., Wallraff A., Martinis J.M. Superconducting qubits: a short review. The Smithsonian/NASA Astrophysics Data System, 2004. 41 p.
8. Leggett A.J. Superconducting qubits – A major roadblock dissolved. *Science*, 2002, vol. 296, no. 5569, pp. 861–862. doi: 10.1126/science1071703
9. Shnirman A., Makhlin Y., Schön G. Noise and decoherence in quantum two-level systems. *Physica Scripta*, 2002, vol. 102, pp. 147–154. doi: 10.1238/Physica.Topical.102a00147
10. Amin M.H.S., Truncik C.J.S., Averin D.V. Role of single qubit decoherence time in adiabatic quantum computation. *Physical Review A*, 2009, vol. 80, pp. 022303-1–022303-5. doi: 10.1103/PhysRevA.80.022303
11. Fink J.M., Steffen L., Studer P., Bishop L.S., Baur M., Bianchetti R., Bozyigit D., Lang C., Filipp S., Leek P.J., Wallraff A. Quantum-to-classical transition in cavity quantum electrodynamics. *Physical Review Letters*, 2010, vol. 105, pp. 163601-1–163601-4. doi: 10.1103/PhysRevLett.105.163601
12. BFP640ESD. Robust low noise silicon germanium bipolar RF transistor. Revision 1.1. Edition 2012-09-17. Munich, Germany, Infineon Technologies AG, 2013. 27 p. Available at: http://www.infineon.com/dgdl/Infineon-BFP640ESD-DS-v01_01-en.pdf?fileId=db3a30432968c552012991de121f54ac (accessed 22.11.2014)
13. Ivanov B.I., Trgala M., Grajcar M., Il'ichev E., Meyer H.-G. Cryogenic ultra-low-noise SiGe transistor amplifier. *Review of Scientific Instruments*, 2011, vol. 82, iss. 10, pp. 104705-1–104705-3. doi: 10.1063/1.3655448
14. Kiviranta M. Use of SiGe bipolar transistors for cryogenic readout of SQUIDS. *Superconductor Science and Technology*, 2006, vol. 19, no. 12, pp. 1297–1302. doi: 10.1088/0953-2048/19/12/014
15. Beev N., Kiviranta M. Note: cryogenic low-noise dc-coupled wideband differential amplifier based on SiGe heterojunction bipolar transistors. *Review of Scientific Instruments*, 2012, vol. 83, iss. 6, pp. 066107-1–066107-3. doi: 10.1063/1.4729665
16. Weinreb S., Bardin J., Mani H., Jones G. Matched wideband low-noise amplifiers for radio astronomy. *Review of Scientific Instruments*, 2009, vol. 80, iss. 4, pp. 044702-1–044702-5. doi: 10.1063/1.3103939
17. Ivanov B.I. Eksperimental'noe issledovanie kriogennykh usilitelei na osnove SiGe bipolyarnykh tranzistorov pri temperature 4.2 K [Experimental study of cryogenic SiGe bipolar transistors at 4.2 K]. *Doklady Akademii nauk vyshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2014, no. 1 (22), pp. 73–82.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Новиков Илья Леонидович – родился в 1969 году, канд. техн. наук, доцент кафедры полупроводниковых приборов и микроэлектроники, научный сотрудник межфакультетской лаборатории криогенной квантовой электроники Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: применение сверхпроводимости, сверхпроводниковые устройства измерения слабых магнитных полей, сверхпроводниковые однофотонные детекторы излучения. Опубликовано более 20 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. Email: ilya_novikov@mail.ru).

Novikov Ilya Leonidovich (b. 1969) – Candidate of Sciences (Eng.), Associate Professor of the Semiconductor Devices and Microelectronics Department, senior scientist of the cryogenic quantum electronics laboratory in the Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on applied superconductivity, superconducting quantum detectors to measure weak magnetic fields, superconducting single-photon detectors. He is author of more than 20 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russian Federation. Email: ilya_novikov@mail.ru).



Иванов Борис Игоревич – родился в 1986 году, канд. техн. наук, научный сотрудник лаборатории криогенной квантовой электроники Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: криогенные усилители, сверхпроводниковые устройства СВЧ, квантовые биты. Опубликовано 12 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. Email: to_ivanov_boris@yahoo.com).

Ivanov Boris Igorevich (b. 1986) – Candidate of Sciences (Eng.), senior scientist of the cryogenic quantum electronics laboratory in the Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on cryogenic amplifiers and superconducting quantum circuits. He is author of 12 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russian Federation. Email: to_ivanov_boris@yahoo.com).



Кривецкий Андрей Васильевич – родился в 1974 году, канд. техн. наук, доцент кафедры конструирования и технологии радиоэлектронных средств, научный сотрудник межфакультетской лаборатории криогенной квантовой электроники Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: измерения, обработка сигналов, схемотехника измерительных устройств, автоматизация измерений. Опубликовано более 20 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. Email: jcu@ngs.ru).

Krivetsky Andrey Vasilyevich (b. 1974) – Candidate of Science (Eng.), Associate Professor of the Development and Technology Radioelectronic Devices Department, senior scientist of cryogenic quantum electronics laboratory in the Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on measurements, signal processing, measurement electronics, measurement automatization. He is author more than 20 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russian Federation. Email: jcu@ngsl.ru).



Щекин Павел Сергеевич – родился в 1985 году, инженер лаборатории криогенной квантовой электроники Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: низкошумящая аналоговая схемотехника и проектирование цифровых устройств. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. Email: a7s2@yandex.ru).

Schekin Pavel Sergeevich (b. 1985) – engineer of the cryogenic quantum electronics laboratory in the Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on low noise analog devices and digital devices (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russian Federation. Email: a7s2@yandex.ru).



Ильичев Евгений Вячеславович – родился в 1957 году, д-р физ.-мат. наук, профессор лаборатории криогенной квантовой электроники Новосибирского государственного технического университета. Руководитель группы «Макроскопические квантовые системы» в Институте фотонных технологий, г. Йена, Германия. Область научных интересов: макроскопические квантовые системы, сверхпроводящая электроника, сверхпроводниковые квантовые биты. Опубликовано более 50 научных работ, 2 монографии. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. Email: evgeni.ilichev@ipht-jena.de).

Il'ichev Evgeni Vyacheslavovich (b. 1957) – Ph.D. (Phys.&Math.), Professor of the cryogenic quantum electronics laboratory in the Novosibirsk State Technical University. He is a group leader in the Macroscopic quantum systems laboratory at the Leibniz Institute of Photonic Technology, Jena, Germany. His research interests are currently focused on macroscopic quantum systems, superconducting electronics and superconducting quantum bits. He is author of over 50 publications cited to Web of Science including 2 monographs. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russian Federation. Email: evgeni.ilichev@ipht-jena.de).



Вострецов Алексей Геннадьевич – родился в 1955 году, д-р техн. наук, профессор, проректор по научной работе, заведующий кафедрой конструирования и технологии радиоэлектронных средств Новосибирского государственного технического университета, заслуженный деятель науки Российской Федерации с 2010 года. Область научных интересов: обработка сигналов в радиотехнических и информационно-измерительных системах. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. Email: vostretsov@adm.nstu.ru).

Vostretsov Aleksey Gennadjevich (b. 1955) – Doctor of Sciences (Eng.), Professor, Vice-Rector for research, Head of the Development and Technology Radioelectronic Devices Department in the Novosibirsk State Technical University. He was awarded The Honored Science Worker of the Russian Federation title in 2010. His research interests are currently focused on the statistical theory of signal processing in conditions of a priori uncertainty. He is author of over 150 publications including 3 monographs. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russian Federation. Email: vostretsov@adm.nstu.ru).

*Статья поступила 22 ноября 2014 г.
Received November 22, 2014*

To Reference:

Novikov I.L., Ivanov B.I., Krivetskii A.V., Shchekin P.S., Il'ichev E.V., Vostretsov A.G. Eksperimental'noe issledovanie shumovykh svoystv izmeritel'nogo mikrovolnovogo trakta sverkhprovodyashchikh kvantovykh tsepei [Experimental study of noise parameters in a microwave measurement system for flux qubit readout]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2015, no. 1 (26), pp. 52–65. doi: 10.17212/1727-2769-2015-1-52-65