

Воспроизведение переменного напряжения с применением эффекта Джозефсона

А. Н. Петровская, А. С. Катков, А. И. Быков, В. Э. Ловцюс

Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им Д. И. Менделеева
a.n.petrovskaya@vniim.ru

Аннотация. The results of a study of pulse-driven SNS-type Josephson chips are presented. For the placement of chips at a temperature 4.2 K a cryoprobe has been specially developed. A delta-sigma modulator is used to generate a high-quality pulse code for synthesis of voltages. A compensation circuit is created to increase the values of an output voltage. For the pulse-driven system the frequency spectras are demonstrated that higher harmonics are suppressed below the noise floor for various output voltages, by connection of one or more chips and with different amplitude factors of $\Delta\Sigma$ -code. Some examples of very pure frequency spectras are also presented.

Ключевые слова: Josephson Effect; superconductor-normal conductor-superconductor (SNS) junction; pulse pattern generator; pulse-driven; delta-sigma modulation; cryoprobe; synthesis sine waveform

I. ОПОРА НА ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ КОНСТАНТЫ

Для исследования выбраны джозефсоновские микросхемы (ДМ) с переходами SNS-типа, которые позволяют осуществлять преобразование сверхвысокочастотного (СВЧ) модулированного импульсного сигнала в переменное напряжение [1–3]. При наличии СВЧ облучения на вольт-амперных характеристиках (ВАХ) ДМ проявляются ступени с напряжением U , значения которого определяются числом переходов N и частотой облучения f :

$$U = \frac{Nf}{K_J},$$

где K_J – константа Джозефсона.

С 20 мая 2019 года ввиду переопределения Международной системы единиц для константы Джозефсона принято точное значение. Оно определяется новыми значениями постоянной Планка h и элементарного заряда e :

$$K_J = \frac{2e}{h} = 483\,597,848\,416\,984 \text{ ГГц/В}.$$

Режим импульсной накачки позволяет создавать на основе ДМ квантовые эталоны для воспроизведения переменного напряжения любой формы, в том числе и постоянного, в широком диапазоне уровней от 1 мВ до 2 В [3]. Опора на фундаментальные физические константы дает возможность использовать джозефсоновские микросхемы для проведения калибровки средств измерений напряжения с высокой точностью.

II. ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ПЕРЕМЕННОГО НАПЯЖЕНИЯ В РЕЖИМЕ ИМПУЛЬСНОЙ НАКАЧКИ ДМ

Подробное описание процесса изготовления микросхем с переходами джозефсона и их характеристики приведены в [2]. Для сверхпроводящих слоев ДМ используется ниобий, а для барьера, образующего изолятор между сверхпроводниками, применён аморфный кремний с содержанием ниобия около 20 %. Одна микросхема содержит 9000 или 10500 джозефсоновских переходов. Для функционирования джозефсоновских микросхем при температуре 4,2 К разработан криозонд, который погружается в жидкий гелий. Работоспособность ДМ контролируется по ВАХ при различных режимах работы по значению критического тока и ширине ступеньки. В режиме импульсной накачки на ДМ подается последовательности импульсов. В свою очередь ДМ преобразует эти импульсы в спектр, содержащий низкочастотную составляющую, определяющую синтезируемое переменное напряжение, и высокочастотную составляющую, которая ослабляется до уровня шумов с помощью фильтров. Синтез переменного напряжения, воспроизводимого микросхемами, проводится с помощью метода дельта-сигма ($\Delta\Sigma$) преобразования [2, 4–5]. Исходными параметрами $\Delta\Sigma$ -модулятора для формирования квантованных значений, распределенных во временной области, являются: частота воспроизводимого напряжения; значение воспроизводимого напряжения; значение несущей частоты; число периодов, которое подвергается преобразованию в код; число переходов Джозефсона в микросхеме; размер доступной памяти в генераторе импульсов. Результатами расчета является дельта-сигма код, его длина, выраженная в битах, и амплитудный фактор, выраженный в %. $\Delta\Sigma$ -код преобразуется в бинарные данные и загружается в память биполярного импульсного генератора. Формирование сигнала в импульсном генераторе происходит по уровням (+1, 0, -1). Действующее значение воспроизводимого напряжения связано с амплитудным фактором $\Delta\Sigma$ – кода. При амплитудном факторе более 15 % необходимо применение схемы компенсации [1, 6], которая формирует ток через джозефсоновскую микросхему с частотой равной частоте воспроизводимого напряжения. В режиме компенсации регулируется амплитуда и фаза тока компенсации, поступающего на ДМ. Для контроля параметров воспроизводимого напряжения разработан анализатор спектра. Качество воспроизводимого переменного напряжения оценивается по амплитуде, частоте,

напряжению гармоник, уровню помех и шума. Экранирование ДМ и питание от специальных аккумуляторных источников обеспечивает снижение воздействия наводок, ввиду высокой чувствительности ДМ к воздействию переменных электрических полей.

III. ЧАСТОТНЫЕ СПЕКТРЫ ПЕРЕМЕННОГО НАПЯЖЕНИЯ С МАЛЫМ УРОВНЕМ ГАРМОНИК

Джозефсоновские переходы под действием импульсной накачки могут формировать сигналы произвольной формы, в которых побочные гармоники подавляются более чем на 100 дБн [2, 3]. На практике для подавления порядка 100 дБн требуется тщательная настройка выходов биполярного импульсного генератора. Для каждого канала независимо регулируется 6 параметров трехуровневого сигнала: амплитуда положительных и отрицательных импульсов, коэффициент заполнения положительных и отрицательных импульсов, постоянное смещение и задержка. В качестве примера на рис. 1–3 представлены частотные спектры воспроизводимого синусоидального сигнала при частоте 125 Гц, несущей частоте 14 ГГц. На рис. 1 представлен спектр воспроизводимого синусоидального сигнала, который получен на двух микросхемах с 9000 и 10500 переходами без применения компенсации. Каждая ДМ дает 30 и 35 мВ соответственно.

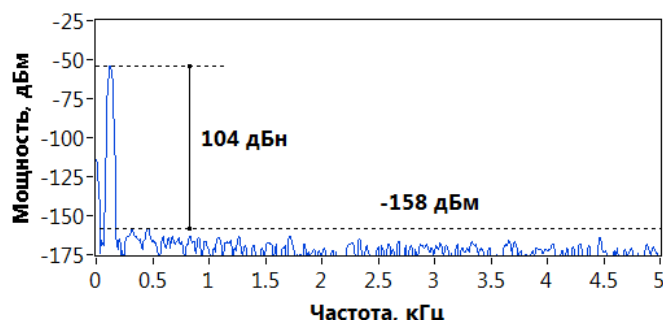


Рис. 1. Частотный спектр воспроизводимого сигнала при значении действующего напряжения 65 мВ на двух ДМ. Амплитудный фактор $\Delta\Sigma$ -кода 16%. Без применения компенсации.

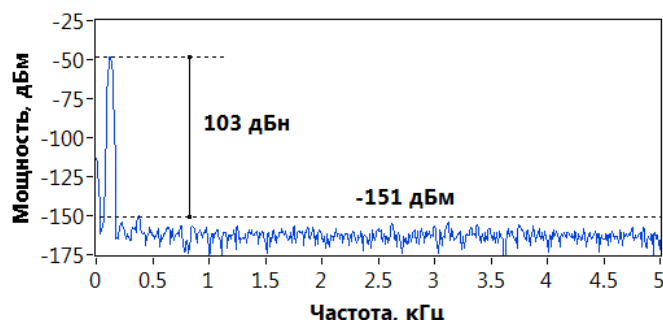


Рис. 2. Частотный спектр воспроизводимого сигнала при значении действующего напряжения 130 мВ на четырех ДМ. Амплитудный фактор $\Delta\Sigma$ -кода 16%. Без применения компенсации.

Для того чтобы получить чистый частотный спектр с подавлением шумов и помех ~ 104 дБн, был сформирован $\Delta\Sigma$ -код длиной 112000000 с амплитудным фактором 16 %. Подключая несколько микросхем, можно повышать уровень воспроизводимого напряжения. На рис. 2

представлен частотный спектр при значении действующего напряжения 130 мВ, полученный при последовательном подключении четырех ДМ (две по 9000 переходов и две по 10500). На рис. 3 представлен спектр воспроизводимого синусоидального сигнала при значении действующего напряжения 260 мВ, полученный при последовательном подключении четырех ДМ. Повышение действующего значения напряжения обеспечивается увеличением амплитудного фактора $\Delta\Sigma$ -кода с 16 % до 32 % и применением схемы компенсации.

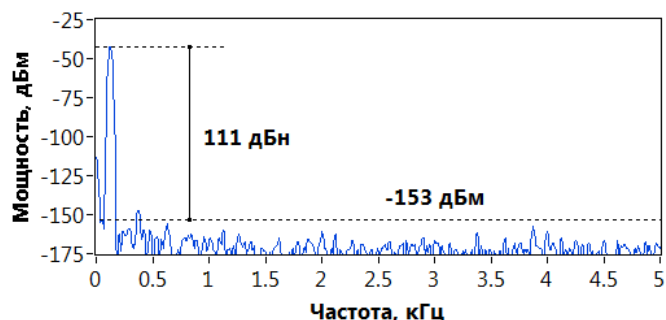


Рис. 3. Частотный спектр воспроизводимого сигнала при значении действующего напряжения 260 мВ на четырех ДМ. Амплитудный фактор $\Delta\Sigma$ -кода 32%. С применением компенсации.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование работы ДМ в условиях импульсной накачки показали возможность подавления гармоник при различных действующих значениях напряжения, при последовательном подключении одной или нескольких ДМ и изменении амплитудного фактора $\Delta\Sigma$ -кода.

ВЫРАЖЕНИЕ ПРИЗНАТЕЛЬНОСТИ

Выражаем благодарность за оказанную помощь и консультации при выполнении работ по воспроизведению переменного напряжения сотрудников РТВ, Германия, Р. Бэра, О. Киелера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Benz S.P., Dresselhaus P.D., Rüfenacht A., Berggren N.F., Kinard J.R., Landim R.P. Progress toward a 1 V pulse-driven AC Josephson voltage standard // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2009. Vol. 58. N. 4. pp. 838-843.
- [2] Kieler O.F., Iuzzolino R., Kohlmann J. Sub- μ m SNS Josephson junction arrays for the Josephson arbitrary waveform synthesizer // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2009. Vol. 19. No. 3. pp. 230-233.
- [3] Flowers-Jacobs N.E., Rüfenacht A., Fox A.E., Dresselhaus P.D., Benz S. P. 2 volt pulse-driven Josephson arbitrary waveform synthesizer // CPEM. 2016. Conf. Digest. pp. 1-2.
- [4] Schreier R., Temes G. Understanding Delta-Sigma Data Converters. Piscataway, New Jersey: IEEE Press. 2005. 1986. Vol. COM-34. N. 1. pp. 72-76.
- [5] Candy J.C. Decimation for Sigma Delta Modulation // IEEE Transactions on Communications.
- [6] Benz S.P., Burroughs C.J., Dresselhaus, P.D. AC Coupling Technique for Josephson Waveform Synthesis // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2001. Vol. 11. N. 1. pp. 612–616.