

Квантовая мера для воспроизведения сигналов переменного напряжения

А. С. Катков¹, В. Э. Ловцюс¹, А. И. Быков¹, В. И. Шевцов¹, А. Н. Петровская¹,
Р. Бэр², О. Киелер²

¹Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева, Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: a.n.petrovskaya@vniim.ru

²Physikalisch-Technische Bundesanstalt PTB, Braunschweig, Germany

Разработан макет меры на основе эффекта Джозефсона для воспроизведения синусоидального напряжения. Воспроизводимое напряжение характеризуется высокой точностью и малым уровнем гармоник. Это открывает новые возможности для метрологического обеспечения в области переменного напряжения. В состав меры входят криогенный зонд с микросхемами на основе эффекта Джозефсона, дельта-сигма модулятор, генератор для формирования последовательности импульсов, схема компенсации, анализатор спектра, блок видеоконтроля и специальное программное обеспечение. В процессе проведенных исследований макета меры показана возможность воспроизведения синусоидальных сигналов с действующим значением напряжений до 130 мВ в диапазоне частот 1–100 кГц. Подавление гармонических составляющих получено на уровне 100 дБн.

Ключевые слова: эффект Джозефсона, дельта-сигма модуляция, воспроизведение сигналов синусоидальной формы, импульсный генератор, криогенный зонд, анализатор спектра, схема компенсации.

Применение эффекта Джозефсона для воспроизведения квантового напряжения на постоянном токе с использованием микросхем SIS-типа (сверхпроводник – изолятор – сверхпроводник) (Германия, РТВ) началось во ВНИИМ в середине 1980-х гг. В 2001 г. утверждён Государственный первичный эталон единицы электрического напряжения ГЭТ 13–01 [1]. Заявленные метрологические характеристики ГЭТ 13–01 неоднократно подтверждены ключевыми сличениями, в том числе, с использованием транспортируемых эталонов вольт на эффекте Джозефсона [2, 3]. Основные достоинства микросхем SIS-типа: воспроизведение постоянного напряжения при нулевом токе смещения, получение напряжения в диапазоне –10...10 В [4, 5], несложная электроника управления. К недостаткам можно отнести малую ширину по току ступенек напряжения (менее 100 мкА), что влияет на стабильность напряжения, включая перескоки между ступеньками. Поэтому микросхемы SIS-типа применяются в основном для воспроизведения постоянного напряжения.

Прогресс в технологии позволил микросхемам с переходами SNS-типа (сверхпроводник – нормальный металл – сверхпроводник) конкурировать с переходами SIS-типа. Преимуществом микросхем на основе эффекта Джозефсона (ДМ) SNS-типа является стабильность выходного напряжения, однозначность вольт-амперной характеристики (ВАХ) и большая помехоустойчивость из-за более широкой квантовой ступени. Эти свойства учитывают при создании эталонов на программируемых ДМ [6–8]. Разрабатываемые эталоны имеют возможность измерять напряжение любой формы до 10 В по

амплитуде с частотами до 10 кГц. К недостаткам программируемых эталонов на основе ДМ можно отнести сравнительно сложную аппаратную реализацию и получение ступенчатой аппроксимации воспроизводимого переменного напряжения.

Позднее были разработаны ДМ SNS-типа, которые позволяют преобразовывать сверхвысокочастотный (СВЧ) модулированный импульсный сигнал в переменное напряжение и создавать на этой основе квантовые эталоны для воспроизведения переменного напряжения [9–11]. К достоинствам данного способа воспроизведения напряжения следует отнести получение напряжения любой формы, в том числе и постоянного, в широком диапазоне уровней $1 \cdot 10^{-3}$ –2 В [12].

ДМ можно применять для воспроизведения сигналов при калибровке средств измерений напряжения высокой точности, опираясь на фундаментальные физические константы.

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

$$K_J = 2e/h = 483597,848416984 \text{ ГГц/В.}$$

Во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева при поддержке РТВ разработан макет квантовой меры синусоидального напряжения с малым уровнем гармоник (рис. 1). В состав квантовой меры синусоидального напряжения входят следующие основные элементы: криогенный зонд, схема компенсации, анализатор спектра, блок видеоконтроля, импульсный генератор

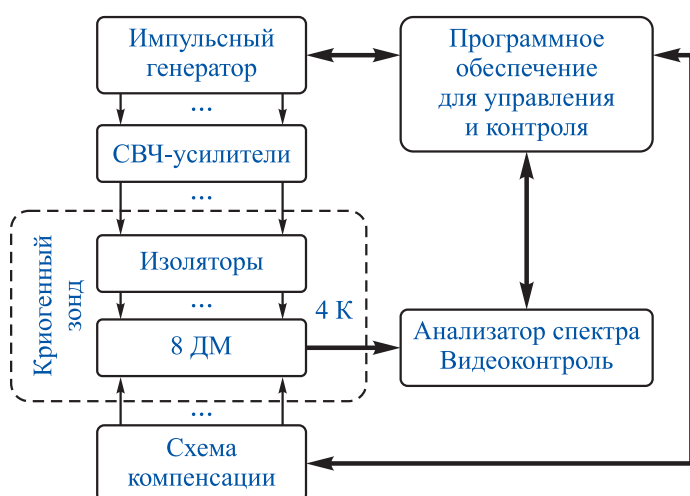


Рис. 1. Схема квантовой меры синусоидального напряжения

Fig. 1. Schematic diagram of the sinusoidal voltage quantum standard

в качестве формирователя последовательности импульсов, специальное программное обеспечение для управления аппаратурой и контроля измеряемых параметров и дельта-сигма ($\Delta\Sigma$) модулятор как часть специального программного обеспечения.

Макет меры рассчитан на работу с восемью ДМ на основе SNS-переходов. Для сверхпроводящих слоёв ДМ используется ниобий, а для барьера, образующего изолятор между сверхпроводниками, – аморфный кремний с содержанием ниобия около 20 %. Одна микросхема содержит 4000, 9000 или 10500 джозефсоновских переходов. На подложке размещены две микросхемы. Подробное описание процесса изготовления микросхем и их характеристики приведены в [10].

Для создания рабочих условий функционирования ДМ при температуре 4 К разработан криогенный зонд. Конструкция зонда обеспечивает: минимальные значения теплопроводности несущей конструкции для снижения расхода жидкого гелия; минимальные значения затухания при передаче мощности высокочастотного сигнала; экранирование ДМ от магнитного поля Земли; экранирование от электромагнитных помех; изоляцию между цепями подачи высокочастотной мощности, цепями управления и воспроизведения; минимальную индуктивную и ёмкостную связь между цепями управления и цепями воспроизводимого сигнала. Для функционирования ДМ в высокочастотном тракте криогенного зонда использованы изоляторы в качестве развязок по постоянному току выхода генератора импульсов и цепей коаксиальных кабелей. В тракте импульсного сигнала использованы также СВЧ-фильтры, имеющие волновое сопротивление 50 Ом и частоту среза 250 МГц.

Блок видеоконтроля позволяет визуально контролировать ВАХ ДМ на экране осциллографа при различных режимах работы с целью определения критического тока, ширины ступеней по току и рабочих токов сегментов микросхемы, выявления замороженных магнитных полей и определения влияния помех. Значение критического тока микросхемы

определяется по форме ВАХ. При СВЧ-облучении на ВАХ ДМ проявляются ступени напряжением U , значения которого определяются числом переходов N и частотой облучения f :

$$U = Nf/K_J.$$

Синтез расчётного значения переменного напряжения, воспроизводимого мерой, производится с помощью $\Delta\Sigma$ -преобразования [10, 13, 14]. Исходные параметры синтезируемого сигнала используются для расчёта двоичной последовательности, подаваемой на импульсный генератор с целью формирования последовательности импульсов, прикладываемой к ДМ. В свою очередь, ДМ преобразует импульсы в спектр, содержащий низкочастотную составляющую, определяющую синтезируемое переменное напряжение, и высокочастотную составляющую, которая ослабляется до уровня шумов с помощью фильтров. Исходными параметрами $\Delta\Sigma$ -модулятора для формирования квантованных значений, распределённых во временной области, являются: частота воспроизводимого напряжения; воспроизводимое напряжение, выраженное в виде действующего значения либо размаха; несущая частота; число периодов, которое подвергается преобразованию в код; число джозефсоновских переходов в микросхеме; размер доступной памяти в генераторе импульсов. Результатами расчёта параметров $\Delta\Sigma$ -управляющей кодовой последовательности являются $\Delta\Sigma$ -код, его длина, выраженная в битах, и амплитудный фактор, выраженный в процентах. $\Delta\Sigma$ -код преобразуется в бинарные данные и загружается в память генератора. Длина кода для генератора памятью 512 МБ варьируется от 16 до 536870912 цифр и периодически повторяется. Каждая цифра может соответствовать положительному или отрицательному импульсу, или нулю.

Формирование сигнала в импульсном генераторе происходит на уровнях (+1, 0, -1) с возвратом к нулевому уровню. Достоинством такого способа является относительная простота реализации в сравнении с многоуровневыми способами кодирования, так как технически необходимо реализовать всего три потенциальных уровня. Генератор импульсов имеет восемь выходных СВЧ-каналов.

С выходов импульсного генератора сигналы поступают на широкополосные СВЧ-усилители. Для обеспечения работы широкополосных усилителей разработаны специальные блоки питания, имеющие стабильные во времени параметры, низкий уровень пульсаций и шумов, гальваническую развязку от сетевого питания. Эти требования связаны с высокой чувствительностью ДМ к воздействию переменных электрических полей.

Важным элементом макета является схема компенсации [9, 15], предназначенная для формирования тока через ДМ с частотой, равной частоте воспроизводимого напряжения. Схема компенсации применяется при амплитудном факторе $\Delta\Sigma$ -кода более 15 % для увеличения действующего значения воспроизводимого напряжения. При этом осуществляется регулировка амплитуды и фазы тока компенсации, поступающего на ДМ. Схема компенсации содержит восемь независимых

источников переменного тока на основе четырёх прецизионных низкочастотных генераторов, имеющих по два выхода. Выходы гальванически развязаны с помощью восьми трансформаторов, обеспечивающих минимальный уровень наводок на ДМ, и интерференции между цепями формируемых токов смещения и выходных напряжений. Трансформаторные развязки обеспечивают полосу пропускания от 30 Гц до 100 кГц.

Контролировать параметры воспроизводимого напряжения, такие как амплитуда, частота, напряжение гармоник, уровень помех и шума, позволяет разработанный анализатор спектра. Все эти параметры необходимы для оценивания качества воспроизводимого переменного напряжения. Использование анализатора спектра совместно с разработанным программным обеспечением даёт возможность изменения характеристик визуализации сигнала, т. е. наблюдение его в линейном и логарифмическом масштабах, выбор ручного и автоматического пределов измерения, представление сигнала во временном и частотном видах, рассмотрение участков сигнала, запоминание и хранение выбранных данных для последующей обработки. Дополнительно в схеме макета меры применён сетевой блок питания анализатора спектра, в котором предусмотрен режим работы от аккумулятора. При подключении блока питания к сети отношение сигнал/шум анализатора спектра составляло 70 дБ, а переключение питания анализатора спектра на аккумулятор позволило снизить воздействие наводок и увеличить соотношение сигнал/шум до 100 дБ.

На созданной установке исследована возможность воспроизведения синусоидального напряжения с низким уровнем гармоник в диапазоне частот 1–100 кГц.

Измерения производились на ДМ, содержащих от 4000 до 10500 переходов. ВАХ микросхем исследовали методом подачи тока компенсации пилообразной формы и регистрации выходного напряжения на осциллографе блока видеоконтроля. Значения критических токов в зависимости от типа ДМ составляют 3,8–7,8 мА.

Джозефсоновские переходы под действием импульсной накачки могут формировать сигналы произвольной формы, в которых побочные гармоники подавляются более чем на 100 дБн [10, 11]. При воспроизведении синусоидального сигнала частотный спектр в идеальном случае должен иметь только основной тон. Чтобы на практике добиться подавления порядка 100 дБн требуется тщательная настройка выходов импульсного генератора. Для каждого канала независимо регулируется шесть параметров трёхуровневого сигнала: амплитуда положительных импульсов $A(+)$, амплитуда отрицательных импульсов $A(-)$, коэффициент заполнения положительных импульсов $DC(+)$, коэффициент заполнения отрицательных импульсов $DC(-)$, постоянное смещение *Offset* и задержка *Delay*. Амплитуда импульсов может изменяться от 0 до 4095 (0 соответствует 200 мВ, а 4095 – 500 мВ). Отдельно регулируемая задержка ± 39 пс для каждого канала позволяет компенсировать задержки, возникающие в кабеле, и синхронизировать выходы. Коэффициент заполнения устанавливает отношение длительности единичного интервала (импульса) к длительности нулевого интервала. В зависимости от тактовой частоты

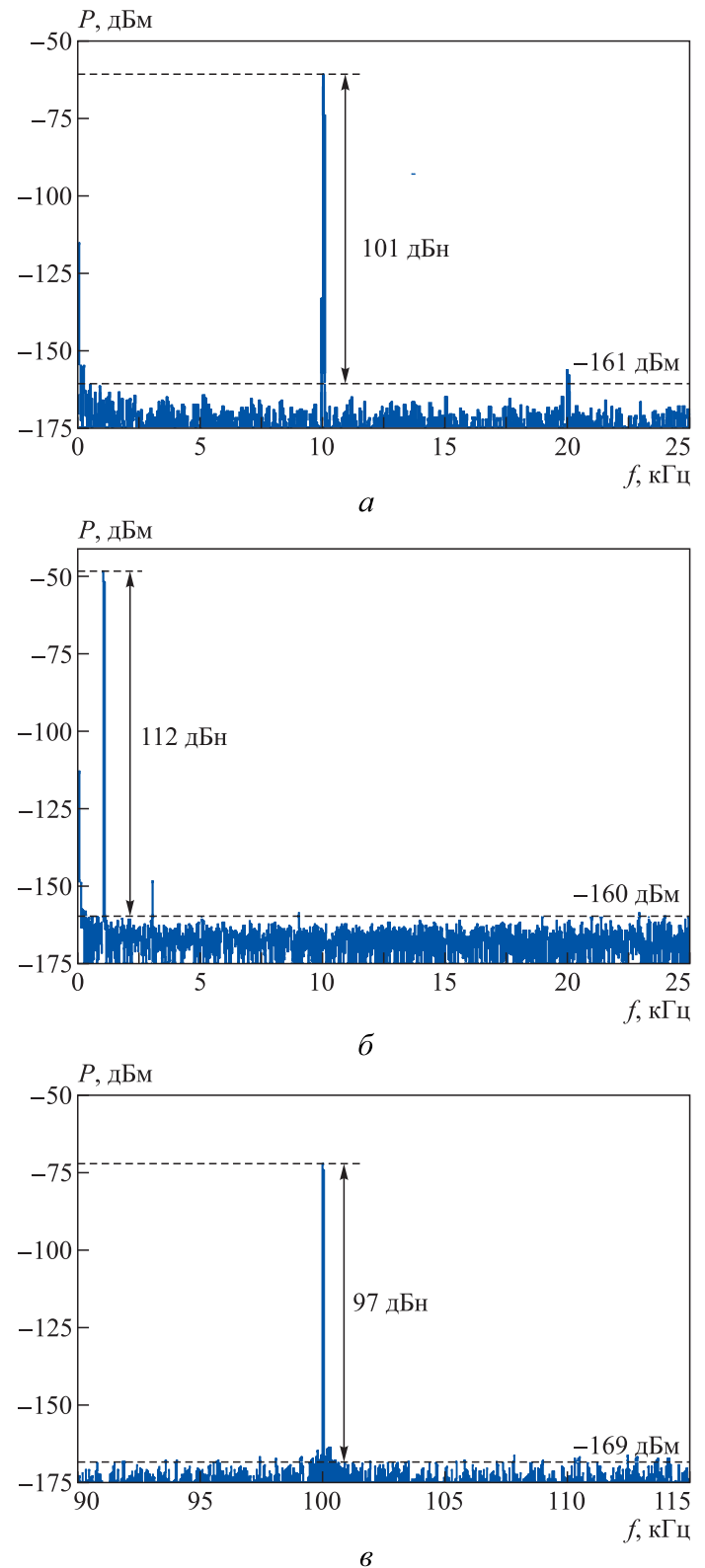


Рис. 2. Частотный спектр воспроизводимого сигнала при различных значениях частот и действующего напряжения (P – мощность, f – частота):
а – 10 кГц, 30 мВ; б – 1 кГц, 130 мВ; в – 100 кГц, 10 мВ

Fig. 2. Frequency spectrum of the synthesis signal at various frequencies and output voltages:
а – 10 kHz, 30 mV; б – 1 kHz, 130 mV; в – 100 kHz, 10 mV

коэффициент заполнения может регулироваться в диапазоне 40–60 %. Значения параметра варьируются от –1000 делений до +1000 делений. Значение параметра –1000 соответствует минимальной ширине импульса, а значение +1000 – максимальной ширине импульса.

На рис. 2, а представлен спектр воспроизводимого синусоидального сигнала при частоте 10 кГц и значении действующего напряжения 30 мВ. Для того чтобы получить спектр с подавлением шумов и помех ~101 дБн, был сформирован $\Delta\Sigma$ -код длиной 8400000 и амплитудным фактором 16 %. СВЧ-сигнал со второго канала генератора импульсов подавался на ДМ с 9000 переходов. Несущая частота задана 14 ГГц. Амплитуда положительных импульсов установлена на 3297 делений, отрицательных импульсов – на 3716 делений. Потребовалось также смещение в 2709 делений. Коэффициент заполнения для положительных импульсов задавался 949 делений из 1000, а для отрицательных –142 деления. Несмотря на небольшой амплитудный фактор $\Delta\Sigma$ -кода (16 %), потребовалось применение схемы компенсации: амплитуда тока компенсации 120 мкА, фаза 180°, частота 10 кГц. На рис. 3 представлен вид воспроизводимого синусоидального сигнала.

Параметры каналов импульсного генератора для четырёх ДМ

Параметр	Канал			
	1	2	3	4
Число джозефсоновских переходов	9000	9000	10500	10500
A(+)	1427	1120	1225	1830
A(–)	1653	1008	1314	1807
DC(+)	496	197	547	642
DC(–)	67	126	–213	138
Offset	0	0	0	1975
Delay	0	0	0	0

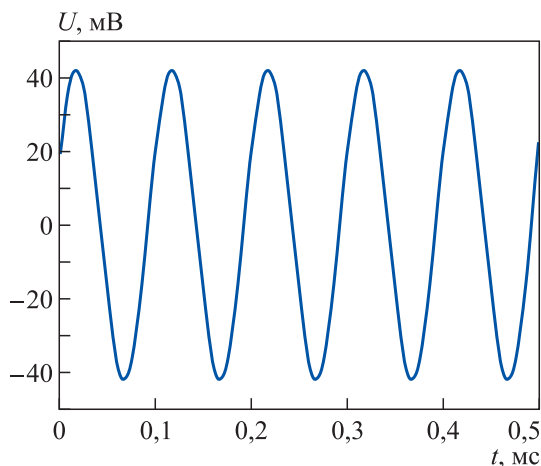


Рис. 3. Воспроизводимый сигнал при частоте 10 кГц и значении действующего напряжения 30 мВ (U – напряжение, t – время)

Fig. 3. Form of the synthesis signal at 10 kHz and sinusoidal voltage 30 mV RMS

Так как криогенный зонд рассчитан на восемь ДМ, то подключая несколько микросхем, можно повышать уровень воспроизводимого напряжения. На рис. 2, б в качестве примера показан частотный спектр воспроизводимого синусоидального сигнала на частоте 1 кГц, полученный на четырёх ДМ: две ДМ по 9000 переходов и две по 10500, всего 39000 переходов. Сумма действующих значений напряжения от четырёх ДМ составила 130 мВ.

Для того чтобы получить этот спектр с подавлением шумов и помех ~112 дБн на частоте 1 кГц, был сформирован $\Delta\Sigma$ -код длиной 14000000 с амплитудным фактором 16 %. СВЧ-сигнал с первого, второго, третьего и четвертого каналов генератора импульсов подавался на ДМ с 9000 и 10500 переходов. Несущая частота была задана 14 ГГц. Каналы генератора настраивались отдельно для получения чистого спектра на каждой микросхеме. После совместного подключения четырёх ДМ, понадобилась дополнительная подстройка каналов генератора (предположительно из-за взаимного влияния). В качестве примера в таблице приведены окончательные настройки четырех каналов генератора.

На рис. 2, в представлен частотный спектр синусоидального сигнала на частоте 100 кГц и с действующим значением напряжения 10 мВ. Спектр измерен на одной ДМ с 9000 переходов. Для получения чистого частотного спектра с подавлением гармоник до 97 дБн на высокой частоте, в отличие от низких частот, потребовалось использовать $\Delta\Sigma$ -модуляцию второго порядка [11]. С первым порядком $\Delta\Sigma$ -модуляции удалось получить подавление высших гармоник до ~70 дБн.

В исследованном частотном диапазоне 1–100 кГц наблюдалась стабильная картина подавления гармоник при различных действующих значениях напряжения, при последовательном подключении одной или нескольких ДМ и изменении амплитудного фактора $\Delta\Sigma$ -кода. Результаты имели воспроизводимость при неоднократном погружении зонда в жидкий гелий.

Исследования созданной квантовой меры переменного синусоидального напряжения показали возможность воспроизведения синусоидального напряжения с малым уровнем гармоник (подавление ~100 дБн). Полученные результаты планируется применить для определения метрологических характеристик средств измерений переменного напряжения с погрешностью менее 1 ppm при частотах до 100 кГц. В ходе исследований выявлены факторы, оказывающие влияние на достижение высокой точности и требующие проведения дальнейших исследований для их устранения.

Список литературы

1. Александров В. С., Катков А. С., Телитченко Г. П. Новый государственный первичный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений постоянного электрического напряжения и электродвижущей силы // Измерительная техника. 2002. № 3. С. 6–9.
2. Behr R., Katkov A. S., *Metrologia. Technical Supplement*, 2005, vol. 42, p. 01005. DOI: 10.1088/0026-1394/42/1A/01005
3. Катков А. С., Солве С. Ключевые сличения эталонов вольты ВНИИМ и МБМВ // Измерительная техника. 2011. № 11. С. 70–73.

4. Behr R., Schulze H., Müller F., Kohlmann J., Niemeyer J., *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1999, vol. 48, no. 2, pp. 270–273.
5. Lloyd F. L., Hamilton C. A., Beall J. A., Diane Go, Ono R. H., and Harris R. E., *IEEE Electron Device Letters*, 1987, vol. 8, no. 10, pp. 449–450. DOI: 10.1109/EDL.1987.26690
6. Катков А. С., Ловцыус В. Э., Быков А. И., Шевцов В. И., Новодережкин Г. В. Воспроизведение вольты на основе переходов джозефсона СИС- и СНС-типа // Измерительная техника. 2017. № 6. С. 46–48. DOI: 10.32446/0368-1025it.2017-6-45-48
7. Burroughs C. J., Dresselhaus P. D., Rüfenacht A., Elsbury M. M., and Benz S. P., *CPEM Digest, Conference on Precision Electromagnetic Measurements*, June 13–18, 2010, Daejeon Convention Center, Daejeon, Korea. DOI: 10.1109/CPEM.2010.5544234
8. Mueller F., Behr R., Weimann T., Palafox L., Olaya D., Dresselhaus P. D., Benz S. P., *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2009, vol. 19, no. 3, pp. 981–986. DOI: 10.1109/TASC.2009.2017911
9. Benz S. P., Dresselhaus P. D., Rüfenacht A., Bergren N. F., Kinard J. R., Landim R. P., *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2009, vol. 58, no. 4, pp. 838–843. DOI: 10.1109/CPEM.2008.4574646
10. Kieler O. F., Iuzzolino R., Kohlmann J., *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2009, vol. 19, no. 3, pp. 230–233. DOI: 10.1109/TASC.2009.2019283
11. Flowers-Jacobs N. E., Rüfenacht A., Fox A. E., Dresselhaus P. D., and Benz S. P., *CPEM Digest, Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2016)*, Ottawa, ON, 2016, pp. 1–2. DOI: 10.1109/CPEM.2016.7540601
12. Schreier R., Temes G., *Understanding Delta-Sigma Data Converters*, Piscataway, New Jersey, IEEE Press, 2005.
13. Candy J., *IEEE Transactions on Communications*, January 1986, vol. 34, no. 1, pp. 72–76. DOI: 10.1109/TCOM.1986.1096432
14. Benz S. P., Burroughs C. J., Dresselhaus, P. D., *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2001, vol. 11, no. 1, pp. 612–616. DOI: 10.1109/77.919419
2. Behr R., Katkov A. S., *Metrologia. Technical Supplement*, 2005, vol. 42, p. 01005. DOI: 10.1088/0026-1394/42/1A/01005
3. Katkov A., Solve S., *Measurement Techniques*, 2012, vol. 54, no. 11, pp. 1313–1318. DOI: 10.1007/s11018-012-9873-6
4. Behr R., Schulze H., Müller F., Kohlmann J., Niemeyer J., *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1999, vol. 48, no. 2, pp. 270–273.
5. Lloyd F. L., Hamilton C. A., Beall J. A., Diane Go, Ono R. H., and Harris R. E., *IEEE Electron Device Letters*, 1987, vol. 8, no. 10, pp. 449–450. DOI: 10.1109/EDL.1987.26690
6. Katkov A. S., Lovtsyus V. E., Bykov A. I., Shevtsov V. I., Novoderezhkin G. V., *Measurement Techniques*, 2017, vol. 60, no. 6, pp. 589–593. DOI: 10.1007/s11018-017-1240-1
7. Burroughs C. J., Dresselhaus P. D., Rüfenacht A., Elsbury M. M., and Benz S. P., *CPEM Digest, Conference on Precision Electromagnetic Measurements*, June 13–18, 2010, Daejeon Convention Center, Daejeon, Korea. DOI: 10.1109/CPEM.2010.5544234
8. Mueller F., Behr R., Weimann T., Palafox L., Olaya D., Dresselhaus P. D., Benz S. P., *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2009, vol. 19, no. 3, pp. 981–986. DOI: 10.1109/TASC.2009.2017911
9. Benz S. P., Dresselhaus P. D., Rüfenacht A., Bergren N. F., Kinard J. R., Landim R. P., *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2009, vol. 58, no. 4, pp. 838–843. DOI: 10.1109/CPEM.2008.4574646
10. Kieler O. F., Iuzzolino R., Kohlmann J., *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2009, vol. 19, no. 3, pp. 230–233. DOI: 10.1109/TASC.2009.2019283
11. Flowers-Jacobs N. E., Rüfenacht A., Fox A. E., Dresselhaus P. D., and Benz S. P., *CPEM Digest, Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2016)*, Ottawa, ON, 2016, pp. 1–2. DOI: 10.1109/CPEM.2016.7540601
12. Schreier R., Temes G., *Understanding Delta-Sigma Data Converters*, Piscataway, New Jersey, IEEE Press, 2005.
13. Candy J., *IEEE Transactions on Communications*, January 1986, vol. 34, no. 1, pp. 72–76. DOI: 10.1109/TCOM.1986.1096432
14. Benz S. P., Burroughs C. J., Dresselhaus, P. D., *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2001, vol. 11, no. 1, pp. 612–616. DOI: 10.1109/77.919419

References

1. Aleksandrov V. S., Katkov A. S., Telitchenko G. P., *Measurement Techniques*, 2002, vol. 45, no. 3, pp. 228–232. DOI: 10.1023/A:1015954501462

Дата поступления: 13.02.2020.

Дата принятия: 05.03.2020.

Quantum Standard for Synthesis AC Voltage

Alexander S. Katkov¹, Viktor E. Lovtsyus¹, Andrey I. Bykov¹, Vladimir I. Shevtsov¹,
Anastasia N. Petrovskaya¹, Ralf Behr², Oliver F. Kieler²

¹D. I. Mendeleyev Institute for Metrology, St. Petersburg, Russia, e-mail: a.n.petrovskaya@vniim.ru

²Physikalisch-Technische Bundesanstalt PTB, Braunschweig, Germany

Prototype of quantum standard based on the Josephson effect for synthesis sine wave with low level harmonics and high accuracy was developed at VNIIM, which opens up new possibilities for metrological support in the field of AC voltage. The standard includes cryogenic probe with Josephson chips, delta-sigma modulator, pulse pattern generator, compensation circuit, spectrum analyzer, video control unit and software. The capability of synthesis sine wave with an output voltage up to 130 mV RMS over a wide frequency range from about 1 kHz to 100 kHz is shown. Higher harmonics are suppressed below the noise floor up to 100 dBc.

Key words: Josephson Effect, delta-sigma modulator, sine waveform synthesis, pulse pattern generator, cryogenic probe, spectrum analyzer, compensation circuit.