

КВАНТОВЫЕ ЦИФРОВЫЕ СИНТЕЗАТОРЫ ПОСТОЯННОГО И ПЕРЕМЕННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО НАПРЯЖЕНИЯ, ПРАКТИКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

С.В. Шерстобитов

ФГУП "ВНИИФТРИ", Менделеево Московская обл.

Lab-610@vniiftri.ru

Рассмотрены особенности построения, теоретические и экспериментальные результаты применения высокоточных синтезаторов постоянного и переменного напряжения на эффекте Джозефсона для разработки эталонов в области электрических измерений

Ключевые слова: синтезатор, эффект Джозефсона, эталон, электрические измерения

Обеспечение естественной системы единиц физических величин с опорой на фундаментальные константы является основной задачей квантовой метрологии. Стабильность и воспроизводимость таких эффектов позволяют значительно расширить измерительные возможности метрологов, ученых и экспериментаторов. В метрологии электрических измерений использование квантовых эффектов Джозефсона и Холла позволило на порядки повысить точность эталонов постоянного электрического напряжения, сопротивления и силы тока. Дальнейшие перспективы использования эффекта Джозефсона в метрологии видятся в создании эталонов переменного напряжения произвольной формы, электрической мощности и проведения других экспериментов.

Два сверхпроводника, разделенные слабой связью принято называть Джозефсоновским переходом. Такой элемент является основой для различных приложений в сверхпроводящей электронике. Рассмотрим

вопросы, связанные с метрологической практикой. Одним из значимых применений является эталон вольта на эффекте Джозефсона, достаточно широко распространенный в мировой практике. Основным элементом современного эталона вольта является джозефсоновский интегральный преобразователь, называемый иногда как цепочка или массив джозефсоновских переходов, представляющий из себя микрополосковую структуру, выполненную по тонкопленочной технологии, в виде последовательно соединенных джозефсоновских переходов. Современные схемы могут содержать до 100000 переходов Джозефсона. Такое количество переходов позволяет достигать необходимых в метрологической практике размеров электрического напряжения вплоть до 1-10 В. Эффект Джозефсона сводит воспроизведение электрического напряжения к измерению частоты, которая в настоящее время воспроизводится атомными часами (эталон времени и частоты) наиболее точно.

ФГУП ВНИИФТРИ активно занимается проблемой построения высокоточных средств измерений СИ с использованием эффекта Джозефсона и эксплуатирует в составе вторичного эталона единицы постоянного электрического напряжения ВЭТ 13-13-01 квантовую меру на эффекте Джозефсона. Посредством квантовой меры контролируется групповая мера на основе термостатированных нормальных элементов. Дрейф групповой меры на основе нормальных элементов эталона в течение с 2001 года по настоящее время составляет порядка 0,1 мкВ в год.

Повышение интереса в точном измерении переменного напряжения стимулировало попытки разработать практические реализации квантовой меры для измерений переменного электрического напряжения.

Основное, используемое на практике соотношение, используемое в эталонах вольты, следующее:

$$U = n_f K_j, \quad (1)$$

где U – напряжение на джозефсоновском переходе, n – число джозефсоновских переходов, f – частота облучения, K_j – константа Джозефсона, равная отношению двух зарядов электрона к постоянной Планка и зафиксированная международным соглашением на уровне

$$K_j 90 = 483597,9 \text{ ГГц/В.}$$

Как видно из соотношения (1), управлять напряжением на джозефсоновском переходе можно либо через изменение числа n включенных переходов, либо через изменение частоты облучения f .

При синусоидальном смеще-

нии джозефсоновского интегрального преобразователя управлять напряжением в широком диапазоне, изменяя частоту смещения f не получается в широких пределах (максимум 10 - 20 %), поэтому основной элемент управления – это изменение числа включенных переходов (или номера квантовой ступеньки).

Ранее в печати [1,2] и в выступлениях на конференциях были изложены основные принципы построения синтезаторов переменного напряжения на эффекте Джозефсона. В том числе способ, предложенный в 1999-2000 году, – способ управления напряжением на переходе Джозефсона посредством модуляции СВЧ мощности накачки Джозефсоновской интегральной схемы для синтеза переменного напряжения посредством ШИМ преобразования [3 - 5].

Можно выделить несколько основных способов построения эталонов переменного напряжения на эффекте Джозефсона.

Первый способ – на основе цепочки джозефсоновских переходов, разделенных на двоичные секции с числом переходов, кратных 2, 4, 8, 16, 32, 64.... В таких системах выходное напряжение регулируется путем включения в выходную цепь цепочки необходимого числа секций двоичной последовательности. Данный способ идеально подходит для создания программируемых эталонов постоянного напряжения. Однако при синтезе ступенчатого переменного напряжения погрешность среднеквадратичного значения для

данного способа зависит от времени переключения между ступенями и линейно повышается с ростом частоты синтезируемых сигналов. В дополнение, неравенство фронтов сигналов переключения различных секций или фронтов нарастания и спада в разной полярности повышают неопределенность результата измерений среднеквадратичного значения переменного напряжения с использованием данного способа. Предельные значения по оценке погрешности составляют порядка 1 ppm для сигнала частотой 100 Гц при времени переключения между ступеньками порядка 250 нс [6, 7]. Данный способ используется во ВНИИФТРИ и позволяет проводить калибровку линейности вольтметров и АЦП на постоянном токе и ступенчатых сигналах, каждая величина ступени которых определена с точностью до фундаментальных констант и частоты СВЧ смещения.

Второй способ – использование для смещения джозефсоновской схемы не синусоидальную частоту СВЧ диапазона, а кодовую последовательность пикосекундных импульсов (дельта-сигма цифро-аналоговый преобразователь на эффекте Джозефсона) [8]. В этом случае среднеквадратичное значение синтезируемых сигналов поддается четкому расчету. Этот способ, в отличие от предыдущего, позволяет синтезировать более сглаженную форму волны переменного напряжения с низким содержанием гармонических составляющих и стабильным значением среднеквадратичного значения пе-

ременного напряжения. Однако практическая реализация данного способа сталкивается с некоторыми трудностями, связанными со сложностью оборудования генераторов коротких импульсов и необходимостью оптимального согласования всего тракта в широкой полосе частот от постоянного тока до десятков гигагерц. По этой причине сложно получить достаточное согласование и малое затухание импульсов для длинных джозефсоновских схем, содержащих тысячи переходов, с выходным напряжением порядка 1 В . Уровень напряжения, достигнутый для данного способа, составляет десятки милливольт, что ограничивает относительное значение погрешности синтезируемого переменного напряжения. Однако этот способ является перспективным для дальнейшей проработки, поскольку позволяет генерировать сигналы напряжения требуемой формы в широком диапазоне частот или спектрально чистые сигналы со стабильным среднеквадратичным значением. Сейчас такие исследования ведут США (NIST), Германия (PTB) и некоторые другие метрологические центры.

Третий способ - на основе широко-импульсной модуляции синусоидальной СВЧ мощности смещения, впервые обнаруженного автором статьи при проведении исследований цепочек сильношунтированных джозефсоновских переходов, изготовленных по технологии SINIS (сверхпроводник – изолятор-нормальный металл-изолятор-сверхпро-

водник) [3, 4]. Для реализации способа необходимы интегральные схемы, содержащие сильношунтированные джозефсоновские переходы с параметрами, позволяющими пере-

крываться соседним ступенькам напряжения при одном и том же постоянном токе, протекающем через переходы, но при различной мощности фиксированной частоты СВЧ смещения [9].

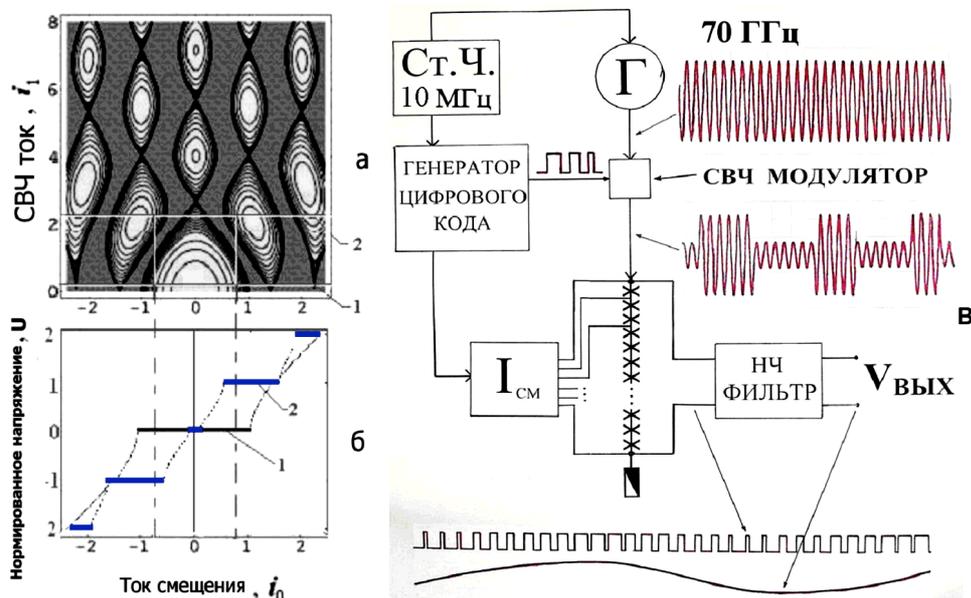


Рис.1. Области захвата фаз для джозефсоновского перехода, облучаемого синусоидальной СВЧ мощностью – а), соответствующие двум уровням синусоидальной СВЧ мощности вольт-амперные характеристики перехода – б) и схема устройства синтезатора с ШИМ модуляцией – в)

На рис. 1-а показаны так называемые области захвата фаз для сильношунтированного джозефсоновского перехода, облучаемого синусоидальной СВЧ мощностью, на рис. 1-б - соответствующие двум уровням синусоидальной СВЧ мощности вольт-амперные характеристики перехода. Из рисунка видно, что при изменении уровня СВЧ мощности смещения перехода с уровня 1 до уровня 2 при фиксированном постоянном токе, протекаю-

щем через переход (отмечен вертикальными штрих линиями), возможно переключение между соседними нулевой и первой квантовыми ступенями. Напряжение в области ступенек определено в соответствии с джозефсоновским вольтчастотным соотношением (1). Модулирование СВЧ мощности смещения для переключений между двумя ступеньками по принципу широтно-импульсной модуляции в соответствии с цифровым кодом и

сглаживание выходного напряжения джозефсоновского преобразователя посредством низкочастотного фильтра позволяет на выходе получить требуемую форму волны переменного напряжения. По сути, на выходе ШИМ преобразователя будет сигнал в виде импульсов постоянного уровня и переменной длительности. Такой сигнал в общем случае содержит низкочастотную составляющую, связанную с неравномерным распределением плотности импульсов, а также высокочастотную составляющую, которая является следствием высокой частоты следования фронтов импульсов. Последующий процесс фильтрации сглаживает сигнал, срезает высокие частоты и выделяет низкочастотную составляющую, которая представляет собой генерируемый аналоговый сигнал, соответствующий заданной последовательности импульсов для исходного сигнала определённой формы. Рис. 1-в поясняет принцип работы синтезатора данного типа.

Существуют и другие способы, которые подробно не будут рассматриваться в данной статье.

В рамках НИР и НИОКР, выполняемых ФГУП «ВНИИФТРИ», финансируемых агентством по Ростехрегулированию и метрологии, были опробованы основные принципы построения синтезаторов переменного напряжения, проверены теоретические расчеты и получены результаты экспериментальных исследований. Исследования проводились с использованием отечественных и зарубежных эксперименталь-

ных интегральных схем, содержащих группы с двоичным числом переходов Джозефсона и рассчитанных на воспроизведение электрического напряжения до 1. Основная задача исследований – обеспечить экспериментальную базу для измерений переменного напряжения и напряжения произвольной формы, базу для определения характеристик прецизионных цифро-аналоговых и аналогово-цифровых преобразователей (ЦАП АЦП) и систем на их основе, используемых в настоящее время чрезвычайно широко в современном приборостроении. Актуальность данных вопросов обуславливается тем, что осуществляемая модернизация приоритетных направлений экономики требует существенного повышения точности и достоверности, обеспечиваемых средствами измерений электрических величин.

Важнейшим функциональным блоком практически всех современных цифровых систем является аналого-цифровой преобразователь (АЦП).

В ряде ключевых отраслей национальной экономики в настоящее время прогнозируется потребность в существенном повышении уровня точности цифровых систем сбора и анализа измерительных данных (информационно-телекоммуникационные технологии), широко использующих ЦАП/АЦП. Такие цифровые системы становятся востребованными:

- в системах мониторинга акустического, геоакустического и гид-

роакустического, также в биологии и медицине, при разведке на нефть и газ, в сфере национальной обороны и безопасности;

- в системах телекоммуникаций и связи;

- в системах обеспечения безопасности функционирования сложных (или потенциально опасных) инженерных сооружений, в т.ч. АЭС.

- электрохимическими исследованиями и рядом других приложений.

Постановка задач по метрологическому обеспечению сложных систем, в состав которых входят тракты преобразования и обработки цифровых сигналов, требует привлечения метрологических характеристик (МХ) АЦП.

Функции современных АЦП, работающих в составе сложных цифровых систем, выходят за рамки преобразования уровней сигнала в отдельных точках (как, например, в цифровых вольтметрах и мультиметрах для вывода на цифровые индикаторы или другими интерфейсами). В современных системах входные сигналы АЦП являются функциями времени и, возможно, других переменных (таких как пространственные координаты и др.). Практически процесс получения значений характеристик АЦП может быть реализован в следующей последовательности:

1. Подача на вход АЦП образцового аналогового тестового сигнала (например, от синтезатора на эффекте Джозефсона), входящего в

класс допустимых сигналов, с заданными значениями параметров.

2. Запись полученной в рабочем режиме реального времени последовательности цифровых отсчетов АЦП в запоминающее устройство ЭВМ.

3. Восстановление (измерение) значений параметров сигнала путём компьютерной обработки записанной последовательности с применением специального программного обеспечения.

4. Сравнение полученных значений параметров с заданными и вычисление значений характеристик АЦП как погрешностей преобразования сигнала.

Необходимо заметить, что традиционные статические и динамические характеристики не являются общими характеристиками всех блоков АЦП, так как соответствующие тестовые сигналы (постоянный и ступенчатый сигнал) могут не входить в класс допустимых сигналов блока АЦП, например, если аналоговая часть АЦП содержит полосовые фильтры, не пропускающие постоянную составляющую.

Предлагаемый подход к определению динамических характеристик АЦП даёт возможность определить именно те характеристики АЦП (являющиеся характеристиками искажений при преобразовании сигнала), которые входят в модель цифрового сигнала, поступающего на ЭВМ, и которые необходимы для корректного определения характеристик программного обеспечения (ПО) как функционального блока

системы и, в конечном счёте, для определения метрологических характеристик всей системы.

Для реализации предлагаемого принципа определения характеристик АЦП оптимальным выбором тестового сигнала является синусоидальный сигнал. Приведём основные причины такого выбора.

1. Синусоидальный сигнал входит в общий класс сигналов, имеющих спектр в определённой полосе частот. Этот класс достаточно широк: в него входят такие сигналы, как узкополосные, импульсные, видеосигналы и др.

2. Специальные виды сигналов, в которых полезная информация "защита" каким-либо сложным путём (использование особым способом модулированных несущих и поднесущих, импульсно-кодовая модуляция и др.) при прохождении через определённые цепи и преобразователи во многих случаях рассматриваются как сигналы, состоящие из синусоидальных составляющих с частотами в определённой полосе.

3. Для генерации аналогового синусоидального сигнала существуют образцовые генераторы (в т.ч. цифроаналоговые преобразователи, синтезаторы на эффекте Джозефсона), имеющие достаточно высокие характеристики точности, превосходящие характеристики генераторов других типов сигналов.

Заключительным этапом определения динамических характеристик АЦП является вычисление их значений с помощью специальной

программы обработки данных, которая определяет параметры выходного цифрового сигнала АЦП и путём сравнения полученных и заданных значений параметров определяет динамические характеристики АЦП как преобразователя. Работа алгоритма программы, используемой в работе, основана на методе регрессионного анализа по принципу наименьших квадратов.

Для реализации источника эталонных сигналов для исследования синтезатора переменного напряжения - основе цепочки Джозефсоновских переходов, разделенных на двоичные секции, ВНИИФТРИ были разработана специальная аппаратура управления, криозонд для размещения Джозефсоновского интегрального преобразователя и программное обеспечение для формирования сигналов управления джозефсоновской аппаратурой.

ПО состоит из двух блоков - компьютерного генератора цифрового сигнала и блока обработки цифровых реализаций. Компьютерный генератор цифрового сигнала вычисляет и записывает в оперативную память ЭВМ или в файл последовательность отсчетов y_j гармонического сигнала вида

$$y_j = \sum_{k=1}^M A_k \cos\left(\frac{2\pi}{\mu} kj + \phi_k\right) + \psi_j, \quad (2)$$

где $\mu = F_d/F$ - число отсчетов на период сигнала, $j = 0, 1, \dots, N-1$ - номер отсчета; N - число отсчетов в реализации, A_k - амплитуда k -й гармоники;

$k = 1, \dots, M$ - номер гармоники, F - частота основного тона; F_d - частота дискретизации; φ_k - начальная фаза k -й гармоники; ψ_j - отсчет белого шума.

Кодировка отсчетов устанавливается в соответствии с входной кодировкой цифро-аналогового преобразователя: обратный или прямой код, число двоичных разрядов 16, 24, 32. Отсчеты ψ_j удовлетворяют условию нормировки

$$\zeta = \frac{\overline{\psi^2}}{P}, P = 1/2 \sum_{k=1}^M A_k^2, \quad (3)$$

где ζ - отношение шум/сигнал; $\psi^2 = \overline{\psi_j^2}$ - мощность шума, $\sum_{k=1}^M A_k^2$ - суммарная мощность гармоник, черта сверху означает усреднение по времени.

Блок обработки цифровых реализаций использует модель сигнала (2) и программу восстановления (измерения) значений параметров μ , A_k , φ_k , ζ модели сигнала (2). Программа реализует алгоритм, минимизирующий функционал "близости" обрабатываемой и модельной последовательностей

$$\Phi(\mu, A_k, \varphi_k, \zeta) = \sum_{j=0}^{N-1} (x_j - y_j(\mu, A_k, \varphi_k, \zeta))^2, \quad (4)$$

где x_j - отсчеты обрабатываемой по следовательности; $y_j(\mu, A_k, \varphi_k, \zeta)$ - модельные отсчеты, определяемые по (2) и (3).

Здесь необходимо отметить, что так как частоты сигнала F и дискретизации F_d входят в модель (2) только в виде отношения F_d/F через параметр μ , то программа обработки может восстановить только

отношение μ . Определение значения одной из частот F или F_d возможно, если известно значение другой.

При известном значении μ задача определения остальных параметров A_k , φ_k , ζ сводится к задаче линейной регрессии [10], которая решается аналитически точно. Неопределенность получаемых результатов в этом случае связана со стохастическим характером шума ψ_j , погрешностью округления отсчетов при их преобразовании в цифровую форму и числом отсчетов N в обрабатываемой реализации.

В то же время, присутствие даже небольшой неопределенности в определении μ (в случае натуральных реализаций) приводит к значительному увеличению погрешности определения остальных параметров. Это связано с эффектом накопления погрешности фазы синусоиды при увеличении аргумента. Поэтому одной из главных целей являлась разработка алгоритма точного определения параметра μ .

В данной задаче для определения μ использовался алгоритм, реализующий принцип прогнозирования, являющийся разновидностью регрессионного метода [10]. Такой алгоритм позволяет определить μ при отсутствии какой-либо априорной информации о значении этого параметра. Основой алгоритма является рекуррентное соотношение, связывающее предсказываемые значения отсчетов гармонического сигнала с полученными, оптимизированное по минимуму ошибки предска-

зания. Это увеличивает точность определения μ вследствие эффекта увеличения эквивалентной длины реализации.

Для разработки теоретических предпосылок и оценки возможных параметров синтезатора переменного напряжения на эффекте Джоузефсона с использованием ШИМ способа были разработаны и исследованы алгоритмы формирования широтно-модулированных сигналов управления для случаев генерации синусоидальных сигналов и сигналов произвольной формы, с учетом последующей фильтрации фильтрами первого или второго порядка. Одним из основных функциональных блоков генератора является компьютерная программа генерации управляющей битовой последовательности, реализующая определённый алгоритм расстановки широтно-модулированных импульсов в соответствии с заданной моделью выходного сигнала. Разработка такого алгоритма представляет собой не простую задачу, требующую многостороннего подхода.

В данном случае задана тактовая частота, жёстко определяющая положение фронтов импульсов, и постоянная амплитуда импульсов. Применяемые системы импульсов могут быть (в зависимости от особенностей технической реализации устройства) двухуровневые и трёхуровневые. В двухуровневой системе сигнал может принимать только положительные и отрицательные значения амплитуд импульсов, в

трёхуровневой системе сигнал может принимать также и нулевые значения. На данном этапе работы проводился анализ следующих алгоритмов:

1. Алгоритм, определяющий плотность расстановки импульсов пропорционально среднему значению уровня функции на текущем коротком отрезке времени.

2. Алгоритм, определяющий расстановку импульсов с помощью обратной функции генерируемого сигнала $\text{Arccos}(x)$.

3. Адаптивный алгоритм, который при установке уровней импульсов учитывает влияние фильтра выходного сигнала ШИМ.

Выходной фильтр является неотъемлемой частью разрабатываемого синтезатора переменного сигнала. На данном этапе работы было проведено исследование влияния фильтров следующих типов на выходной сигнал генератора:

1. Фильтр 0 скользящего среднего на отрезке реализации заданной длины.

2. Интегрирующая RC-цепь – фильтр 1-го порядка.

3. Последовательная RLC-цепь в критическом режиме - фильтр 2-го порядка.

Для определения точностных характеристик алгоритмов было проведено компьютерное моделирование работы ШИМ синтезатора. Генерация управляющего сигнала ШИМ производилась с применением трёх алгоритмов, далее обозначаемых как алгоритм 1, алгоритм 2, алгоритм 3 в соответствии с определе-

нием выше. Фильтрация выходного импульсного сигнала ШИМ производилась путём вычисления отсчёта аналогового сигнала генератора с учётом результата реакции фильтра на текущий импульсный сигнал в течение интервала дискретизации ШИМ. Для этого использовались соответствующие выражения для отклика фильтров. Исследования проводились как для двухуровневой системы импульсов, где сигнал в любой момент времени может принимать только два значения разных знаков, так и для трёхуровневой си-

стемы, где сигнал может принимать ещё и значение нулевого уровня. В таблице приведены результаты модельных испытаний алгоритмов для следующих значений параметров:

$F_d = 1536000$ Гц – частота дискретизации (тактовая частота ШИМ); $F_s = 50$ Гц – частота генерируемого синусоидального сигнала; $A = 2.9$ В – амплитуда импульсов ШИМ; амплитуда генерируемого аналогового синусоидального сигнала 1 Вольт.

Оценка погрешности коэффициента нелинейных искажений КНИ и амплитуды сигнала для различных алгоритмов

Фильтр	N – число уровней	Алгоритм 1, КНИ	Алгоритм 2, КНИ	Алгоритм 3, КНИ	Относительная ср. кв. погрешность амплитуды (Для Алгоритма 3)
Фильтр 1	2	-	-	0.00044	0.0022
Фильтр 1	3	-	-	0.00012	0.00051
Фильтр 1	3+	0.024	0.00042	0.0037	0.00019
Фильтр 2	2			2.08e-05	0.00099
Фильтр 2	3			2.28e-05	0.00087
Фильтр 2	3+	0.016	0.00031	0.021	0.00021
Фильтр 3	2	-	-	3.76e-07	7.2e-07
Фильтр 3	3	-	-	3.48e-07	8.3e-07
Фильтр 3	3+	0.016	0.00018	0.074	0.0084

Рассматривались два возможных варианта трёхуровневой системы импульсов для выходного сигнала ШИМ:

Полярность импульса устанавливается в процессе оптимального выбора импульса для текущего интервала дискретизации без привязки к знаку генерируемого сигнала (в таблице указано число уровней 3).

Полярность импульса жёстко

устанавливается по знаку текущего полупериода сигнала (число уровней 3+).

Алгоритмы 1 и 2 по своему смыслу предполагают определённую расстановку импульсов на периоде генерируемого сигнала, включая установку полярности по знаку сигнала, поэтому данные для этих алгоритмов представлены в таблице только для системы 3+. Относитель-

ная погрешность амплитуды генерируемого синусоидального сигнала представлена в таблице только для алгоритма 3, так как для алгоритмов 1 и 2 значения амплитуд генерируемого синусоидального сигнала определяются сложнее.

Можно отметить один факт, заметно проявившийся в результатах по алгоритму 3 таблицы. Это сильное падение точности при фильтрации импульсов в системе 3+. Причиной этого является инерционность сглаживающих фильтров, которая в режиме принудительного изменения полярности импульсов при переходе сигнала через нулевой уровень приводит к появлению искажения сигнала в виде пологой ступеньки. Надо отметить также, что это явление отсутствует в системе 3 при учёте работы фильтра в процессе генерации управляющего сигнала и установке уровня импульса по наименьшему отклонению фильтрованного сигнала от модельного значения на каждом тактовом интервале.

Проведённые исследования показали, что наилучшие характеристики имеет алгоритм 3 в двухуровневой системе и в трёхуровневой системе импульсов 3. При этом точностные характеристики в двухуровневой (казалось бы, в более грубой) системе практически такие же, как и в трёхуровневой системе 3.

Кроме того, применение алгоритма 3 принципиально позволяет создать прецизионный генератор переменного сигнала со следующими свойствами:

Генерация синусоидального

сигнала с любым значением частоты из рабочего диапазона.

Установка любого значения амплитуды генерируемого синусоидального сигнала из рабочего диапазона.

Генерация полигармонического сигнала с заданными значениями амплитуд и фаз гармоник.

Генерация специальных сложных сигналов заданной формы, в том числе, непериодических.

Генерация многоканальных согласованных во времени сигналов.

Стабилизация заданной частоты сигнала с высокой точностью путём привязки тактовой частоты ШИМ к эталону.

Таким образом, на основе проведённого компьютерного моделирования были сделаны следующие выводы:

Принципиально возможно создание прецизионного генератора переменного аналогового сигнала на основе цепочки переходов Джексона с применением метода широкоимпульсной модуляции.

Для получения непрерывного выходного аналогового сигнала необходимо применение сглаживающих фильтров.

Из рассмотренных алгоритмов реально возможно применение алгоритма 3 в двухуровневой или трёхуровневой системе импульсов с фильтром 2 второго порядка.

Ориентировочное значение относительной погрешности воспроизведения амплитуды синусоиды порядка 10^{-6} , 10^{-7} и коэффициента гармоник сигнала порядка 10^{-6} при

параметрах сигнала, указанных выше.

Для реализации синтезатора данного типа на эффекте Джозефсона на практике была разработана экспериментальная аппаратура для управления Джозефсоновской схе-

мой в режимах импульсно-кодовой модуляции и широтно-импульсной модуляции с тактовой частотой до 1,5 МГц.

Внешний вид установки показан на рис.2



Рис.2. Внешний вид экспериментальной установки

Для проведения переключений между квантованными уровнями использовалось как токовое управление напряжением на джозефсоновской схеме, так и управление СВЧ мощностью накачки посредством СВЧ модулятора на основе р-і-п диода. В экспериментах использовалась схема типа SINIS, содержащая 8192 перехода Джозефсона, облучаемая СВЧ частотой 70 ГГц с выходным напряжением порядка 1,2 В, изготовленная в РТВ (Германия). Быстродействие модулятора СВЧ мощности на основе р-і-п диода составило менее 5 нс. Для осуществ-

ления смещения джозефсоновской схемы постоянным током использовалась разработанная аппаратура управления. Время переключения тока блока смещения составляло в различных экспериментах от 70 нс до 500 нс. Время переключения важно не только для расширения частотного диапазона генерируемых сигналов, но и для минимизации погрешности амплитуды выходного напряжения. При использовании схем с меньшим выходным напряжением с накачкой 10 ГГц удавалось получить на выходе длительность фронта переключения сигнала по-

рядка 50 нс. Проведенные исследования показали, что время переключения зависит от режима работы джозефсоновской схемы, выходных сопротивлений источника смещения и согласования всех присоединительных кабелей. В некоторых экспериментах по модулированию СВЧ мощности были замечены нежелательные эффекты, когда при достижении некоторой величины СВЧ мощности наблюдались эффекты уменьшения ширины ступеньки ВАХ джозефсоновской схемы, связанные с тепловым эффектом влияния повышенной мощности. Тем не менее, преимущество использования модуляции СВЧ мощности состоит в том, что позволяет физически разнести сигнал управления от выходных цепей джозефсоновского преобразователя и тем самым минимизировать паразитное проникновение управляющего сигнала в выходную цепь.

Экспериментальная оценка погрешности среднеквадратичного значения выходного напряжения джозефсоновского преобразователя для двуполярных прямоугольных сигналов в частотном диапазоне от 40 Гц до 2 кГц для различных времен переключений была получена в диапазоне от 3 до 200 ppm. Экспериментальные исследования спектрального состава синтезируемых синусоидальных сигналов в режиме ШИМ продемонстрировали возможность синтеза синусоидальных сигналов с уровнями гармонических составляющих 2,3,4,5 гармоник ниже - 80 дБ при использовании РС

фильтра первого порядка, ниже - 90 дБ при использовании фильтра второго порядка.

Таким образом, в ходе проведенных экспериментов были получены следующие технические характеристики цифрового синтезатора: частотный диапазон генерируемых сигналов синусоидальной формы 0,01 – 1000 Гц, амплитудное значение – до 1,1 В, КНИ 0,003 – 0,02 %, погрешность среднеквадратичного значения – 0,0004-0,02 %.

Проведенные исследования показали, что задачи получения на выходе синтезатора сигналов с точным и стабильным уровнем среднеквадратичного значения напряжения или же коэффициента нелинейных искажений должны оптимизироваться по разным алгоритмам. Оптимизация и согласование джозефсоновской интегральной схемы, алгоритмов, фильтров и конструкции синтезатора в целом позволит в дальнейшем генерировать низкочастотные сигналы переменного напряжения требуемого спектрального состава с неопределенностью среднеквадратичного значения менее 0,0001 %. В настоящее время продолжают исследования и усовершенствование технических и метрологических характеристик синтезатора и оптимизация алгоритмов расчета и проведения измерений. Данные устройства являются перспективными для метрологии постоянного и переменного электрического напряжения, напряжения произвольной формы и метрологических исследований прецизионных ЦАП/АЦП и систем на их

основе.

Литература

1. Шерстобитов С.В. Основные подходы к построению синтезаторов сигналов переменного напряжения на эффекте Джозефсона.- Труды ВНИИФТРИ, вып. 46 (138), М, 2004.
2. Карпов О.В., Шерстобитов С.В., Верховых Ю.Ф. Цифровой синтезатор переменного напряжения на основе джозефсоновской интегральной микросхемы с двоичными секциями// ПТЭ, №5, 2002, с. 83-87.
3. Karpov O.V., Koutovoi V.D., Sherstobitov S.V., Krutikov V.N., Niemeyer J. Pulse width modulation type Josephson ac waveform synthesizer, in CPEM 2002 Conference digest, Ottawa, Canada, 2002, pp. 497-497.
4. Karpov O.V., Buchstaber V.M., Sherstobitov S.V., Tertychniy S.I., Tertychnaya M.A. and Niemeyer J. Quantum digital ac waveform synthesizer based on pulse-width modulation method// Journal of Applied Physics, 104, 093911, 2008.
5. Карпов О.В., Бухштабер В.М., Тертычная М.А., Тертычный С.И., Шерстобитов С.В. Квантовый цифровой синтезатор переменного напряжения на основе широтно-импульсной модуляции тока смещения джозефсоновского перехода// Радиотехника и электроника, т. 54, № 2, 2009, с. 246-252.
6. Lee J., Behr R., Katkov A. and Palafox L. Error contributions in stepwise synthesized Josephson sine waves// Conference Digest CPEM 2008, Boulder, 2008, p. 78-79.
7. Hamilton C.A., Burroughs C.J., Benz S.P. and Kinard J.R. AC Josephson voltage standard: Progress report, IEEE Trans. Instrum. Meas., v. 46, pp. 224-228, Apr. 1997.
8. Benz S.P. and Hamilton C. A. A pulse-driven programmable Josephson voltage standard, Appl. Phys. Lett. v. 68, pp. 3171-3173, May 1996.
9. Karpov O.V., Buchstaber V.M., Sherstobitov S.V., Tertychniy S.I., Niemeyer J., Kieler O. Josephson Junction Parameters for Alternative Current Wave form Synthesis// JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, 2006, 100, 093907.
10. Калиткин Н.Н. Численные методы. – М.: Наука, 1972.