

КОМП'ЮТЕРНІ ЗАСОБИ, МЕРЕЖІ ТА СИСТЕМИ

Проанализированы различные схемотехнические варианты построения магнитометров на основе ПТ СКВИДов. Для импульсно-релаксационного магнитометра, использующего релаксационные колебания, частотно-модулированные измеряемым магнитным полем, предложен цифровой выход с использованием цифрового интегратора. Предложенная схема не вносит дополнительного шума дискретизации и использует отрицательную ОС, что позволяет иметь аналоговый выход для настройки.

© А.Г. Русанов, В.П. Жолоб,
Н.Н. Будник, П.И. Сутковой,
И.Д. Войтович, 2003

УДК 621.317.42:537.312.62

А.Г. РУСАНОВ, В.П. ЖОЛОБ, Н.Н. БУДНИК,
П.И. СУТКОВОЙ, И.Д. ВОЙТОВИЧ

СКВИД-МАГНИТОМЕТР С ЦИФРОВЫМ ВЫХОДОМ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СВЕРХСЛАБЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Введение. Известно, что биологическими объектами (в том числе и различными органами человека) в пространство излучаются низкочастотные магнитные поля, которые несут весьма обширную информацию о физиологическом состоянии организма. Однако эти поля имеют настолько малую величину, что их измерение общепринятыми, традиционными методами не даёт полной и достоверной информации о состоянии органов живого организма. Однако сейчас такая возможность появилась в связи с использованием новых разработок сверхчувствительных измерительных устройств, работающих на основе сверхпроводящих квантовых интерференционных датчиков (СКВИДов) [1].

Основу таких приборов составляет кольцо из сверхпроводника, замкнутое одним или двумя туннельными переходами Джозефсона (ТПД). Из-за чрезвычайно малого энергопотребления и рассеиваемой мощности, а также очень высокого быстродействия цифровые схемы та ТПД предлагались ранее в качестве элементов при разработках вычислительных и других цифровых устройств на сверхпроводниках. Это запоминающие [2,3], преобразовательные [4-6], логические [7-9], переключающие [10] и другие устройства. При этом в сверхпроводниковой электронике [11] используются два принципиально различных варианта ТПД – шунтированные ТПД с безгистерезисной вольт-амперной характеристикой (ВАХ) и нешунтированные, ВАХ

которых имеет существенный N-образный гистерезис. Для эффективного использования ТПД в сверхпроводниковых устройствах были проведены технологические, экспериментальные и теоретические исследования их свойств [12-15].

В измерительной технике наибольший интерес вызывают измерительные устройства с ТПД, включённые по схеме СКВИДа. Такие устройства являются приборами, с помощью которых можно непосредственно измерять очень слабые магнитные поля различного происхождения. Существует два основных типа СКВИДов – высокочастотные (ВЧ) и постоянного тока (ПТ). Первые используют один ТПД, вторые – два ТПД, включённые параллельно. Исторически первыми были ВЧ СКВИДы (70-е годы XX ст.), однако в 80-е годы XX ст. ПТ СКВИДы имели лучшую стабильность, чувствительность и были более технологичны при изготовлении. Первым вариантом электроники ПТ СКВИДов была схема амплитудной модуляции (АМ). Она представляла собой стандартную схему Модулятор-ДеМодулятор (МДМ), использующую АМ входного магнитного потока в кольце СКВИДа вспомогательным сигналом (частотой несколько десятков кГц) и последующую демодуляцию на выходе. С развитием технологии изготовления ТПД и совершенства элементной базы ее недостатки (низкий микровольтовый уровень сигнала, влияние амплитудных помех, инерционность) стали сдерживающим фактором развития СКВИД-техники. Поэтому в 90-е годы XX ст. было разработано несколько модификаций, отличающихся конструкцией, технологией изготовления и параметрами. Наиболее известные среди них можно отнести к трем типам: импульсно-модулированные (ИМ), схемы без модуляции с прямым интегрированием (ПИ) и схемы с частотной модуляцией (ЧМ) [16].

Постановка задачи. В ИМ схемах используется модуляция не магнитного потока в кольце СКВИДа, а его критического тока, в результате чего происходит переключение СКВИДа из сверхпроводящего в резистивное состояние. При отсутствии внешнего магнитного поля импульсы противоположной полярности идентичны и выходной сигнал равен нулю. Внешнее поле изменяет вероятность появления или характеристики (амплитуду, ширину) импульсов противоположной полярности в разных направлениях и, следовательно, на выходе появляется отличный от нуля сигнал. Поэтому в англоязычной литературе такие схемы носят название PPM – Pulse Probability Modulation.

С усовершенствованием технологии изготовления ТПД и элементной полупроводниковой базы стал возможным переход и к ПИ схемам. В них отказываются от АМ входного сигнала и его последующего детектирования. Для этого используются специальные ТПД с очень высокой крутизной ВАХ, что обеспечивает усиление сигнала со СКВИДа до десятков-сотен микровольт, а также низкошумящие предусилители с очень высоким коэффициентом усиления. В качестве таких предусилителей нередко используются усилители на ПТ СКВИДах, охлажденные до температуры жидкого гелия, поэтому в англоязычной литературе такие схемы называются DOIT – Direct Offset Integration Technique.

В ЧМ схемах СКВИД включается в схему генератора релаксационных колебаний (ГРК) как элемент с N-образной ВАХ. В результате этого при определенном подборе величин элементов схемы и питающих напряжений происходит самовозбуждение РК. При этом, аналогично ИМ варианту, также происходит периодическое переключение СКВИДа из сверхпроводящего в резистивное состояние. Отличие состоит в том, что импульсы РК однополярные, а внешнее магнитное поле изменяет частоту их появления. Поэтому в англоязычной литературе такие схемы часто называют FM – Frequency Modulation.

Рассмотренные выше ИМ и ЧМ схемы предполагают переход в СКВИДе от аналоговых сигналов к импульсным. Однако СКВИД является нуль-детектором и для устойчивой работы (фиксации рабочей точки) требует наличия аналогового сигнала отрицательной обратной связи (ООС). Поэтому на выходе СКВИД-электроники, импульсы, как правило, интегрируются для преобразования в аналоговую форму. Таким образом, актуальным и логичным направлением развития СКВИД-электроники является отказ от аналогового интегрирования. В данной работе решается задача усовершенствования ЧМ схемы с целью перехода от аналоговой электроники к полностью цифровой схеме.

ИРМ с аналоговым выходом. Базовая схема, подлежащая усовершенствованию, представляет собой импульсно-релаксационный СКВИД-магнитометр (ИРМ), работа которого основана на использовании участка ВАХ ТПД с отрицательной дифференциальной проводимостью. Сенсором магнитного поля является двухконтактный СКВИД, включённый по схеме генератора РК, частота следования которых зависит от величины внешнего измеряемого магнитного поля, проникающего в отверстие интерферометра. Данный ИРМ предназначен для измерения, анализа и обработки широкого спектра сверхслабых магнитных полей, в том числе и биополей органов человека.

Именно ИР режим работы СКВИДа и зависимость частоты его генерации от величины измеряемого магнитного поля дала возможность создать такой магнитометр, хотя особенность его работы состоит не только в этом. Входным сигналом ИРМ является измеряемое магнитное поле, а выходным - электрическое напряжение, пропорциональное индукции магнитного поля в точке измерения. Работа ИРМ подробно описана в [17,18], поэтому здесь ограничимся кратким описанием принципа ИРМ в рамках прохождения сигнала по его блок-схеме (рис. 1). Это необходимо для дальнейшего понимания сути предлагаемой в данной работе цифровой обработки.

Если на СКВИД-генератор РК 1 воздействует магнитное поле (МП), то он генерирует импульсы, частота которых контролируется этим МП. Для получения значения сигнала в виде электрического напряжения эти импульсы усиливаются импульсным усилителем 2 и поступают на сравнивающее устройство (компаратор) 3 с целью уменьшения амплитуды шумов. После прохождения импульсного формирователя 4 импульсы с постоянной вольт-секундной площадью поступают на интегратор 5. С выхода интегратора аналоговый сигнал по цепи ООС подаётся на вход СКВИД-генератора для компенсации изменения входного

МП внутри кольца СКВИДа. После интегратора сигналы проходят через буферный повторитель 6 и идут, с одной стороны, на выход магнитометра, с другой – через сравнивающее устройство 7 поступают снова на интегратор.



РИС. 1. Блок-схема импульсно-релаксационного магнитометра (ИРМ)

Отметим, что частота СКВИД-генератора F_0 не остаётся постоянной. Нестабильность тока питания СКВИДа, различные токи утечки и напряжения смещения в элементах, образующих интегратор, приводят к тому, что интегратор даёт погрешность. Поэтому на выходе электроники ИРМ, работающего в режиме нуль-детектора, выходной сигнал ООС имеет случайную составляющую, вызванную тепловыми и дробовыми флуктуациями тока и напряжения в элементах аналоговой электроники, в первую очередь – в интеграторе, а также в ТПД (собственный шум СКВИДа).

ИРМ с цифровым выходом. Современные методы обработки сигналов с использованием ЭВМ требуют представления выходного сигнала в цифровой форме. Это предполагает наличие в составе проблемно-ориентированных измерительно-вычислительных комплексов (ИВК), построенных на базе ИРМ, аналого-цифрового преобразователя (АЦП). В многоканальном магнитокардиографическом ИВК требуется АЦП с достаточно большим количеством каналов (более 10), высокой частотой дискретизации (не менее 1 кГц), хорошей развязкой каналов, изменяемым коэффициентом усиления и т. д. [19].

Такие высокие характеристики АЦП определяют его достаточно высокую цену, которая увеличивает и себестоимость всего комплекса, что нежелательно с точки зрения внедрения таких приборов в практику клинической диагностики. Поэтому в настоящей работе рассматривается возможность получения на выходе ИРМ необходимого для ЭВМ цифрового сигнала, в результате чего нет необходимости применять АЦП при использовании ИРМ в составе магнитокардиографических ИВК.

Частота импульсов СКВИД-генератора содержит информацию об измеряемом объекте по МП, которое он генерирует в точке измерения. Для получения информации о частоте выходного сигнала в цифровой форме необходимо импульсы СКВИД-генератора проинтегрировать цифровым интегратором. С точки

зрения цифровой схемотехники, цифровой интегратор представляет собой сумматор $K_4(S)$. На протяжении периода квантования $T=1$ мс интегратор суммирует импульсы РК. Так как частота РК около 1 МГц, то получается около 1000 импульсов. Через период квантования он обновляет число импульсов – добавляет число импульсов, выданных за этот период ИРМ и вычитает величину F_0 , где F_0 – частота ИРМ в рабочей точке.

Здесь предполагается, что цифровой интегратор работает без случайной погрешности, что справедливо, так как его погрешность значительно меньше случайных погрешностей на выходе аналогового интегратора. Систематическая погрешность при этом не имеет значения, так как СКВИД-магнитометр относительный, а не абсолютный измерительный прибор. Однако, чтобы компенсировать неизбежный дрейф частоты F_0 , требуется блок коррекции, который непрерывно определяет величину F_0 путем вычисления среднего значения числа импульсов за некоторое (довольно большое) число периодов квантования T .

Основным параметром, характеризующим качество такого цифро-аналогового преобразования, является погрешность дискретизации. Такая погрешность отсутствует в аналоговом интеграторе, поэтому она требует отдельного исследования. Для решения этого вопроса воспользуемся методом, детально описанным в [20]. На рис. 2 представлена предлагаемая структурная схема ИРМ в частотной области. Здесь $X(S)$ – входной сигнал магнитометра; $Y_0(S)$ – частотный выход магнитометра; $Y_1(S)$ – аналоговый выход магнитометра; $Y_2(S)$ – цифровой выход магнитометра; Σ – сумматор; $K_1(S)$ – преобразователь индукции магнитного поля в частоту (СКВИД-генератор); $K_2(S)$ – преобразователь частота-напряжение (аналоговый интегратор); $K_3(S)$ – преобразователь напряжение – индукция магнитного поля (цепь ООС); $K_4(S)$ – цифровой интегратор (ЦИ).

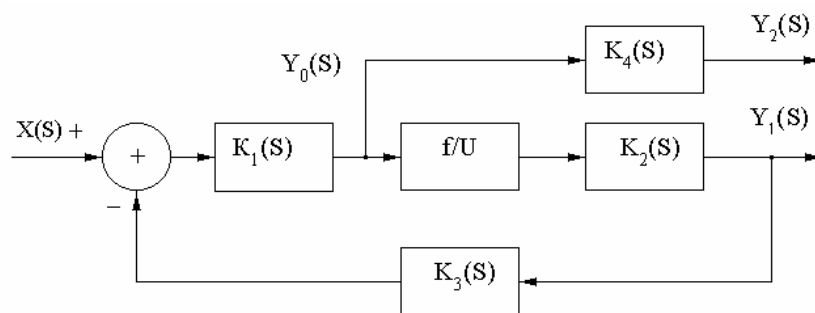


РИС. 2. Структурная схема ИРМ с цифровым выходом

Если выходом ИРМ считать частоту СКВИД-генератора $Y_0(S)$, тогда передаточная функция этой структуры будет иметь вид

$$H_0(S) = \frac{Y_0(S)}{X(S)} = \frac{K_1 S}{1 + K_1(S)K_2(S)K_3(S)} \quad (1)$$

Подставим значения передаточных функций элементов, образующих схему. Элементы $K_1(S)$ и $K_2(S)$ - частотно независимы потому, что речь идёт о частоте магнитного сигнала, а не СКВИД-генератора. Поэтому их передаточные функции есть, соответственно, константы K_1 (коэффициент преобразования «индукция МП-частота») и K_3 (коэффициент преобразования напряжение – индукция МП). Тогда передаточная функция элемента K_2

$$K_2(S) = \frac{K_2}{\tau S}, \quad (2)$$

где K_2 - коэффициент преобразования частота – напряжение; τ - постоянная времени интегратора. После подстановки $K_2(S)$ в (1) получаем

$$H_0(S) = \frac{Y_0(S)}{X(S)} = \frac{K_1}{1 + \frac{K_1 K_2 K_3}{\tau S}} = \frac{K_1 S}{S + \frac{K_1 K_2 K_3}{\tau}}. \quad (3)$$

Рассмотрим блок K_4 - ЦИ с его передаточной функцией $K_4(S)=1/S$. Передаточная функция

$$H_0(S) = \frac{Y_0(S)}{X(S)} = \frac{K_1}{1 + \frac{K_1 K_2 K_3}{\tau S}} = \frac{K_1 S}{S + \frac{K_1 K_2 K_3}{\tau}}. \quad (4)$$

Если на вход системы подать единичную ступеньку (её представление в частотной области - $1/S$), то на выходе получим отклик

$$H_0(S) = \frac{Y_2(S)}{X(S)} = H_0(S)K_4(S) = \frac{K_1}{S + \frac{K_1 K_2 K_3}{\tau}}. \quad (5)$$

Во временной области этот отклик представляется выражением

$$C(t) = K_1 \left[1 - \exp\left(-\frac{K_1 K_2 K_3}{\tau} t\right) \right]. \quad (6)$$

Из формулы (6) следует, что при подаче на вход единичной ступеньки через время, равное нескольким τ , код на цифровом выходе магнитометра изменится на K_1 единиц. Отсюда можно сделать вывод, что ошибка квантования цифрового магнитометра определяется только коэффициентом преобразования $K_1(S)$ «индукция магнитного поля - частота СКВИД-генератора». Цена младшего разряда выходного кода - это такое изменение индукции магнитного поля, которое вызывает изменение частоты СКВИД-генератора на 1 Гц.

Таким образом, погрешность дискретизации цифрового интегратора определяется ценой младшего разряда и равна $\delta F=1$ Гц. Для оценки возможности ис-

пользования ЦИ в ИРМ эту величину необходимо сравнить с флуктуациями на выходе аналогового интегратора. Такое сравнение удобно проводить не через частоту, а через величину магнитного потока, так как основной передаточной характеристикой, характеризующей ИРМ, есть герц-потокковая характеристика, равная $H=10 \text{ МГц}/\Phi_0$, где Φ_0 – квант магнитного потока. Тогда шумовой магнитный поток дискретизации, пересчитанный ко входу СКВИДа,

$$\delta\Phi_{\text{ц}}=\delta F/H=1 \text{ Гц}/10 \text{ МГц}/\Phi_0=10^{-7}\Phi_0=0,1 \text{ мк}\Phi_0 . \quad (7)$$

Величина (7) значительно меньше пересчитанного ко входу шумового магнитного потока ИРМ с аналоговой электроникой, равного $\delta\Phi=8 \text{ мк}\Phi_0$. Как показывают расчеты [17,18], этот шум определяется не электроникой СКВИДа, а является собственным шумом, определяемым внутренними флуктуациями в ТПД. Таким образом, шум дискретизации, вносимый ЦИ, в 80 раз меньше собственного шума СКВИДа, поэтому использование цифрового выхода не ухудшает чувствительности магнитометра.

Заключение. Как отмечалось выше, магнитометры с ПТ СКВИДа могут работать либо с отрицательной ОС, как нуль-детекторы в аналоговом режиме, либо без ОС в режиме цифрового счёта квантов магнитного потока. Предложенная схема работает в цифровом режиме с использованием ООС, что также упрощает схему магнитометра и является ещё одним его преимуществом.

Таким образом, описанная схема магнитометра преобразовывает аналоговое напряжение на выходе интегратора с помощью ЦИ в цифровой код, который можно непосредственно вводить в компьютер без использования АЦП. Такая схема не вносит дополнительных погрешностей, обусловленных наличием в ЦИ шума дискретизации. Такой вариант также работает с использованием обычной аналоговой ООС, что позволяет иметь на выходе ИРМ одновременно как цифровой, так и аналоговый выход. Последний удобно иметь для технологических целей (настройка генератора РК, балансировка антенны, управления работой ИРМ с автономного пульта технического контроля без подключения ПК и т.д.).

Работа выполнена при поддержке Научно-Технологического Центра в Украине (УНТЦ), грант №2187.

1. *Cohen D.* Measurement of the magnetic fields produced by the human heart, brain and lungs // IEEE Trans. – 1975. – V. MAG – 11, No 2. – P. 694-700.
2. *Жолоб В.П.* Криоэлектронный запоминающий элемент с комбинированным управлением // Физико-технолог. методы в ВТ. – Киев: Ин-т кибернетики им. В.М. Глушкова НАН Украины, 1987. – С. 40 – 43.
3. *А.с. №1535229.* Ячейка памяти / И. Д. Войтович, В. П. Жолоб, Е. Пугачёва. – Оpubл. 07. 01. 1990, Бюл. №1.
4. *А.с. №1034591.* Криотронный дешифратор / И, Д. Войтович, В.П. Жолоб. – Оpubл. 07. 08. 1983, Бюл. №29.
5. *А.с. №1087010.* Аналого-цифровой преобразователь / И. Д. Войтович, В. П Жолоб, В. Н. Сосницкий. – Оpubл. 15. 04. 1984, Бюл. №14.

6. *А.с. №1113889*. Криотронный преобразователь слабых сигналов / И.Д. Войтович, В.П. Жолоб., Ю.Д. Минов, В.Н. Сосницкий. – Оpubл. 15. 09. 1984, Бюл. №34.
7. *Войтович И.Д.* Анализ импульсных логических элементов на джозефсоновских гистерезисных криотронах. – Киев, 1978. – 46с. – (Препр. / Ин-т кибернетики АН УССР; 78-41).
8. *А.с. №1140658*. Логический элемент / В.П. Жолоб, В.Н. Сосницкий – Оpubл. 15. 02. 1985, Бюл. №6.
9. *Будник М.М., Жолоб В.П., Ніженковський І.В.* Надпровідникова логічна комірка // Нові комп'ютерні засоби, обчислювальні машини та мережі. – К.: Ін-т кибернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, 2001. – С. 57 - 60.
10. *А.с. №1063255*. Сверхпроводящий переключатель тока / В.П. Жолоб, А.С. Полищук. – Оpubл. 23. 12. 1983, Бюл. №47.
11. *ИС и микроэлектронные устройства на сверхпроводниках / В.Н. Алфеев, П.А. Бахтин, И.Д. Войтович и др.* – М.: Радио и связь, 1985. – 232 с.
12. *Войтович И.Д., Жолоб В.П., Михайлов Г.А. и др.* Экспериментальное исследование джозефсоновских ТК на основе плёнок ниобия // ЗУ и криоэл. компоненты ЭВМ. – Киев: Ин-т кибернетики АН УССР, 1978. – С. 81- 87.
13. *Войтович И.Д., Жолоб В.П., Полищук А.С.* Влияние технологических процессов на свойства джозефсоновских плёночных ТП и криотронов // Тез. докл. 8-й Всесоюз. конф. по микроэлектронике. – М.: МИЭТ, 1978. – С. 39.
14. *Лебедева Т.С., Шпилевой П.Б., Жолоб В.П., Орленко А.Б.* Разработка системы экспресс контроля методом анодной спектроскопии для тонкоплёночных технологий // Нові комп'ютерні засоби, обчислювальні машини та мережі. – К.: Ін-т кибернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, 2001. – С. 47 - 52.
15. *Будник Н.Н., Ніженковський І.В.* Малосигнальный анализ джозефсоновских контактов // Там же. – С.61- 68.
16. *Drung D.* DC SQUID systems overview // Supercond. Sci. Technology. – 1991. – 4, №2. – P. 377-385.
17. *Pulse-relaxation oscillation SQUID-magnetometer / N. Budnik, V. Sosnitsky, I. Vojtovich et al* // Proc. 13 IMEKO World Congress. – Torino(Italy), 1994. – Vol. III. – P.2383 - 2387.
18. *Computer-Aided Biomagnetic Investigation Systems / I. Vojtovich, V.Sosnitsky, N. Budnik et al* //УсиМ. – 1995. – № 3. – С. 31 - 46.
19. *Magnetocardiograph MCG7*. Technical specification. – SQUID AG, Essen (Germany). – 2001. – 25 p.
20. *Сиберт У.М.* Цепи, сигналы, системы. – М.: Мир, 1988. – 336 с.

Получено 03.04.2003