

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



СЗУУ.ЗГ
В-191

19/12-77
P13 - 10949

Б.В.Васильев, А.В.Сермягин, А.Ю.Суханов

5075/2-77

ЦИФРОВОЙ СИНХРОННЫЙ ДЕТЕКТОР
ДЛЯ КВАНТОВОГО СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО
ИНТЕРФЕРОМЕТРА

1977

P13 - 10949

Б.В.Васильев, А.В.Сермягин, А.Ю.Суханов

ЦИФРОВОЙ СИНХРОННЫЙ ДЕТЕКТОР
ДЛЯ КВАНТОВОГО СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО
ИНТЕРФЕРОМЕТРА

Васильев Б.В., Сермягин А.В., Суханов А.Ю.

P13 - 10949

Цифровой синхронный детектор для квантового сверхпроводящего интерферометра

Описан цифровой синхронный детектор, предназначенный для обработки низкочастотных сигналов при высоком уровне шума. Прибор позволяет определять площадь и амплитуду импульсов и регистрировать их медленное изменение во времени. Для увеличения отношения сигнал/шум используется метод многократного накопления сигнала. Время накопления может быть сделано сколь угодно большим. Компенсация медленного дрейфа параметров системы при измерениях обеспечивается за счёт полупериодной работы каждого из двух каналов накопления и последующего вычитания результатов измерения в каналах. При работе с квантовым сверхпроводящим интерферометром, шумы которого лежали на уровне $5 \cdot 10^{-4} \phi_0 / \sqrt{\text{Гц}}$, за 200 мин накопления прибор позволил достигнуть точности измерения магнитного потока на уровне $5 \cdot 10^{-8} \phi_0$.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1977

Vasiliev B.V., Sermyagin A.V.,
Sukhanov A.Yu.

P13 - 10949

Digital Synchronous Detector for a Superconducting
Quantum Interferometer

A digital synchronous detector for processing the low-frequency signals at a high noise level is described. The device allows to determine a pulse square and amplitude and to detect their slow time variations. To increase the signal-noise ratio a method of signal accumulation is used. The accumulation time may be choosed arbitrarily large. A slow drift of system parameters at measurements is compensated with the help of a semiperiodical operation of each of two accumulation channels and by the following subtraction of measurement data in channels. When working with the superconducting quantum interferometer with noise level $5 \cdot 10^{-4} \phi_0 / \sqrt{\text{Hz}}$, the device has allowed to get a magnetic flux measurement accuracy of about $5 \cdot 10^{-8} \phi_0$ for 200 min accumulation time.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1977

Описан цифровой синхронный детектор с большим временем накопления, предназначенный для обработки низкочастотных сигналов, синхронизированных с опорным напряжением. Прибор позволяет определить амплитуду и площадь импульсов простой формы /прямоугольных, треугольных, синусоидальных и т.п./ и регистрировать их медленное изменение во времени при высоком уровне шума.

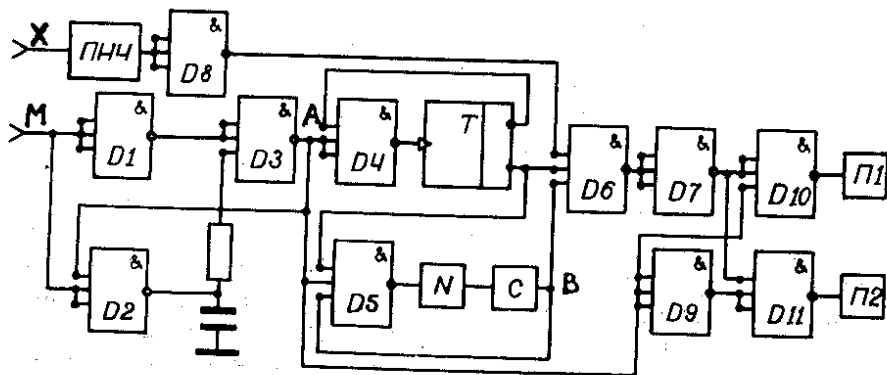
Шумы сверхпроводящего квантового интерферометра /КСИ/, ограничивающие его чувствительность, обычно лежат на уровне $10^{-3} \div 10^{-4} \phi_0 / \sqrt{G\zeta} / 1/$ (ϕ_0 - квант магнитного потока). Проблема регистрации сигналов меньшей амплитуды может быть решена стандартным методом накопления сигнала: проводя N измерений сигнала и складывая их результаты, достигают усиления для сигнала в N раз, в то время как шумовые флуктуации усиливаются только в \sqrt{N} раз. Эта процедура ведет в результате к уменьшению суммарной статистической ошибки и эффективному повышению отношения сигнал/шум, примерно в \sqrt{N} раз. Однако применение стандартного аналогового синхронного детектора на выходе КСИ не позволяет ни получить большое время накопления, ни ликвидировать медленный паразитный дрейф внешних параметров системы /шумы типа $1/f$ /.

Предлагаемый цифровой синхронный детектор свободен от этих недостатков. Он работает в режиме синхронного интегрирования сигнала, что дает возможность численно измерять амплитуду или площадь симметричных сигналов, синхронных с опорным напряжением, а также регистрировать медленные изменения этих параметров

во времени при времени накопления от секунд до десятков часов.

Работа прибора основана на интегральном принципе измерения параметров импульсов. Усиленное выходное напряжение КСИ непрерывно кодируется с помощью преобразователя напряжение-частота /ПНЧ/. Импульсы счета с ПНЧ регистрируются двумя пересчетными схемами, коммутируемыми опорным напряжением. Медленный дрейф внешних параметров системы /температура, напряжение сети и т.п./ сказывается только на работе КСИ и ПНЧ. Подавление этого паразитного дрейфа при измерениях достигается за счет полупериодной работы каждого канала счета: на пересчет первого канала идет информация во время первого полупериода опорного напряжения, на пересчет второго - во время второго полупериода. Для сохранения информации о величине абсолютного значения выходного сигнала вывод результатов измерений организован в виде двух чисел - уменьшаемого и вычитаемого. Их разность пропорциональна амплитуде или площади входного сигнала цифрового синхронного детектора. Изменение внешних параметров может привести к смещению напряжения на входе ПНЧ относительно его начального уровня, однако благодаря линейности характеристик ПНЧ разность между показаниями обоих каналов от этого не изменится.

На рисунке представлена функциональная схема цифрового синхронного детектора, состоящая из трех основных узлов: ПНЧ, схемы управления временем накопления и схемы коммутации каналов счета.



В исходное состояние схема приводится общим сбросом всех счетчиков. Опорным сигналом является логический меандр. Уровень "1" соответствует первому полупериоду обрабатываемого сигнала, "0" - второму. Меандр подается на вход "М". На вход "Х" поступает измеряемое напряжение от КСИ. Преобразователь напряжение-частота собран по схеме мультивибратора, у которого в цепь времязадающих емкостей включены транзисторы /2/. Крутизна преобразования - около 12 кГц/В, линейность в диапазоне ± 3 В - не хуже 5%. Микросхема Д 8 необходима для стандартизации импульсов ПНЧ.

На микросхемах Д 1-3 собран формирователь меандра, цепочка RC служит для регулировки скважности. Схема управления временем накопления включает в себя счетчик времени "N", Т-триггер и микросхемы Д 4-7. В качестве счетчиков использованы стандартные пересчетные декады, поэтому для согласования уровней с логическими элементами необходим преобразователь уровня - элемент "С".

В начале работы уровень точки А равен "1", схема включается вторым импульсом меандра, который перебрасывает триггер и вызывает его автоблокировку, в связи с чем начинается счет в счетчике "N". Конечная точка В устанавливается нулевой уровень. На Д 9-11 собрана схема коммутации каналов счета. В первом полупериоде сигнала, когда значение меандра равно "1", импульсы направляются в счетчик импульсов П1, во втором, когда значение меандра равно "0", - в счетчик П2.

В результате, после обработки N периодов симметричного сигнала длительности 2Т, разность чисел, накопленных в пересчетных схемах, будет равна:

$$|\Delta N| = 2Nk \int_0^T U(t) dt = 2NkpU_0 \quad /1/$$

Здесь $k = \partial f / \partial U$ - коэффициент преобразования ПНЧ; $U(t)$ - амплитуда сигнала; p - коэффициент формы импульса, для прямоугольного импульса $p=1$, для синусоидального - $p=2/\pi$, для треугольного - $p=1/2$.

Если случайный процесс на входе прибора представляет собой "белый" шум с мощностью $\langle U_N^2 \rangle = B^2 / \Gamma$, то дисперсия процесса ^{/3/} на выходе будет равна:

$$D = k^2 \langle U_N^2 \rangle / NT. \quad /2/$$

При ширине энергетического спектра шума на основной частоте

$$f_0 = 1/2T, \quad \Delta f = 1/4NT \quad /3/$$

относительная среднеквадратичная погрешность измерения амплитуды /для прибора с идеальным ПНЧ/ равна:

$$\delta = (\sqrt{\langle U_N^2 \rangle} / 2U_0) \cdot 1 / \sqrt{NT}. \quad /4/$$

Из формул /1/ и /4/ видно, что отношение сигнал/шум на выходе примерно в $m = 2p\sqrt{N}$ раз больше входного.

При конструировании цифрового синхронного детектора внимание было обращено на достижение линейности характеристик и малой инерционности ПНЧ, а также малого времени переключения всех логических элементов и близкой к 0,5 скажности управляющего меандра.

В приборе были использованы микросхемы 1ЛБ554, полученная длительность фронтов импульсов не превышала 0,5 мкс. Калибровка производилась по меандру фиксированной амплитуды. Для времени накопления 10000 импульсов длительностью 16 мс каждая погрешность измерения амплитуды δ составила примерно $10^{-4} B$, при изменении времени накопления она изменялась в соответствии с формулой /4/.

При работе со сверхпроводящим квантовым интерферометром, шумы которого лежали на уровне $5 \cdot 10^{-4} \phi_0 / \sqrt{\Gamma}$, за время накопления, равное ~200 мин, описанный цифровой синхронный детектор позволил достигнуть точности измерения магнитного потока на уровне $5 \cdot 10^{-6} \phi_0$, что соответствовало чувствительности по магнитному полю на уровне $4 \cdot 10^{-11} \text{ Э /1/}$.

Мы благодарны Л.Б.Пикельнеру и Ю.М.Останевичу, обратившим внимание авторов на целесообразность данной работы и давшим ценные советы, реализованные при разработке.

Литература

1. Васильев Б.В., Колычева Е.В. ОИЯИ, Р13-10948, Дубна, 1977.
2. Куликов С.В. Управляемые мультивибраторы на транзисторах. Изд. "Энергия", М., 1966.
3. Б.Р.Левин. Теоретические основы статистической радиотехники, кн. 1. Изд. "Советское радио", М., 1974.
4. Гусев В.В. и др. Основы импульсной и цифровой техники. Изд. "Советское радио", М., 1975.

Рукопись поступила в издательский отдел
12 сентября 1977 года.