

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

НОВЫЕ ПРИБОРЫ

УДК 621.317.4

Б. М. Рогачевский

(Новосибирск)

СВЕРХПРОВОДНИКОВЫЕ СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

Представлен обзор работ кафедры информационно-измерительной техники Новосибирского электротехнического института в области нового класса средств измерений, основанных на использовании эффектов сверхпроводимости. Рассмотрены теоретические вопросы, принципы построения и созданные сверхпроводниковые приборы и измерительные системы: одно- и трехкомпонентные магнитометры, диагональные и недиагональные градиентометры, многоканальные системы для изучения тонкой структуры магнитного поля, в том числе магнитокардиографы и магнитоэнцефалографы, измерители малых токов и компараторы токов и т. д. Данные средства уже нашли применение в научных исследованиях, метрологии, медицине, геофизике и других областях.

Открытие эффектов Джозефсона в 1962 году послужило значительным толчком в развитии сверхпроводниковых (СП) средств измерений. Во второй половине 60-х годов в США с использованием этих эффектов были разработаны макеты СП-приборов для измерения электрических и магнитных величин, эксперименты с которыми показали, что их точность может быть на несколько порядков выше, а порог чувствительности на несколько порядков ниже, чем у приборов того же назначения, но основанных на традиционных принципах [1, 2 и др.]. Выпуск таких СП-приборов организован в США (с 1970 г.), Германии, Финляндии и в других странах. Многие страны имеют собственную программу исследований по дальнейшему совершенствованию СП-приборов и расширению областей их применения.

В конце 60-х — начале 70-х годов в ряде физических институтов СССР были начаты работы по использованию эффектов сверхпроводимости для создания высокочувствительных магнитометрических средств, как правило, для собственных нужд (ОИЯИ, Дубна (Б. В. Васильев); ФТИНТ АН УССР, Харьков (И. М. Дмитренко); ИФП АН СССР, Москва (Н. В. Заварицкий)) [3—5 и др.]. Усилиями этих ученых и их учеников был создан теоретический и экспериментальный фундамент для развития СП-средств измерения в России. Значительный вклад в данное направление внес К. К. Лихарев с сотрудниками (МГУ) [6 и др.]. На этом фундаменте стали развиваться работы в других организациях, в частности, по инициативе автора этой статьи в конце 70-х годов такие исследования были развернуты в Новосибирском электротехническом институте [7].

Применение новых устройств для измерения параметров магнитного поля открывает возможности заметного прогресса в биологии и медицине — для получения магнитограмм различных органов человека и животных с целью повышения достоверности диагностики и массового ее проведения (уровень измеряемых сигналов — от 10^{-11} (около грудной клетки) до 10^{-13} Тл (на внешней стороне головы), частотный диапазон — от 0 до нескольких сотен герц); в геофизике — для измерения флуктуаций естественного электромагнитного поля и его градиентов на поверхности Земли и моря, а также под водой;

электромагнитных полей, генерируемых волнами; для предсказания землетрясений (измеряемый уровень сигналов — $10^{-8} \div 10^{-15}$ Тл, частотный диапазон — $10^{-3} \div 10^5$ Гц); в специальных применениях — для обнаружения перемещений объектов, имеющих магнитный момент; для связи на низких и инфранизких частотах; для навигации (уровень измеряемых сигналов — $10^{-5} \div 10^{-15}$ Тл, частотный диапазон — $0 \div 10^5$ Гц). Измерение столь малых сигналов и решение перечисленных задач невозможно традиционными средствами. Весьма перспективно применение СП-приборов в метрологии (построение образцовых установок высшей точности для воспроизведения магнитных и электрических величин), в научных исследованиях (измерение малых токов — менее 10^{-12} А и напряжений — менее 10^{-13} В в цепях с малым электрическим сопротивлением, измерение магнитной восприимчивости слабомагнитных веществ, изучение тонкой структуры магнитного поля и т. д.).

Усилия коллектива, приступившего в НЭТИ в конце 70-х годов к разработке нового класса средств измерений, основанного на использовании эффектов сверхпроводимости, были направлены вначале на отработку ядра этих средств — СП-всербметра (преобразователя магнитного потока в напряжение) на базе высокочастотного (ВЧ) сквида.

ВЧ-сквид (см. рисунок) состоит [1—6] из сверхпроводникового квантового интерферометра (СКИ), представляющего собой СП-кольцо с одной слабой связью (переход Джозефсона); индуктивно связанного со СКИ резонансного $L_k C_k$ -контура, настроенного на частоту, близкую к частоте ВЧ-генератора накачки (ГВЧ), питающего контур; предварительного усилителя (ПУ) и детектора (Д). СКИ и $L_k C_k$ -контур находятся при температуре, меньшей температуры перехода СКИ в СП-состояние. Для охлаждения до такой температуры в то время применялся жидкий гелий.

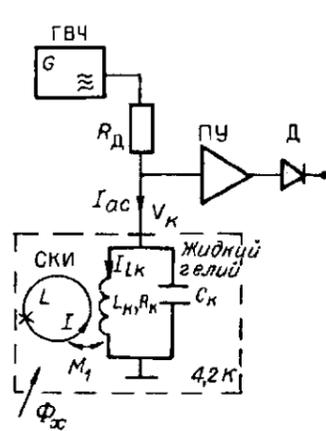
Поведение ВЧ-сквида в случае идеального перехода Джозефсона может быть описано следующей системой нелинейных дифференциальных уравнений [6, 8]:

$$\frac{d^2 V_k}{dt^2} + \frac{R_k}{L_k} \frac{dV_k}{dt} + \omega_0^2 V_k = \frac{1}{C_k} \frac{dI_{ac}}{dt} + R_k \omega_0^2 I_{ac} - \omega_0^2 M_1 \frac{d\Phi}{dt},$$

$$\Phi_k = M_1 I_{L_k} = M_1 I_{ac} - M_1 C_k \frac{dV_k}{dt},$$

$$\Phi = \Phi_x + \Phi_k - \frac{1}{2\pi} \Phi_0 \sin 2\pi \frac{\Phi}{\Phi_0},$$
(1)

где $\Phi_0 = \frac{h}{2e}$ — квант магнитного потока, h — постоянная Планка, e — заряд электрона; Φ_x — измеряемый магнитный поток; Φ — полный магнитный по-



ток, сцепленный с СП-кольцом; $l = \frac{2\pi I_c L}{\Phi_0}$ — постоянная СКИ, L — индуктивность кольца СКИ, I_c — критическое значение СП-тока перехода Джозефсона; $\omega_0^2 = \frac{1}{L_k C_k}$ (остальные обозначения даны на рисунке).

Ранее было известно решение данной системы уравнений при $l \ll 1$ и $l \gg 1$ [1, 4, 6 и др.]. Проведенная нами отработка технологии изготовления и настройки точечных контактов, принятых в качестве переходов Джозефсона, как наиболее доступных и обеспечивающих большой верхний предел измерения магнитного потока, показала, что стабильность СКИ к многократному термодиклированию при малом уровне шумов уда-

ется реализовать лишь в ограниченном диапазоне l : от $0,7 + 0,8$ до $3 + 5$. Но именно в этом диапазоне l количественный анализ затруднен из-за существенной нелинейности системы (1), определяемой ее 3-м уравнением. Решение (1) в указанном диапазоне l проводилось: для $l < 1$ (безгистерезисный режим) с использованием представления 3-го уравнения в явном виде путем разложения его по функциям Бесселя 1-го рода [8—11]; для $l > 1$ (гистерезисный режим) прямым решением на ЭВМ [8, 12—14]. В результате удалось детально исследовать сигнальные характеристики ВЧ-сквида (зависимость V_k от Φ_x при различных токах накачки I_{ac} и отношениях ω/ω_0 , ω — частота генератора накачки) и выявить следующее:

1. На вольт-амперной характеристике (ВАХ) ВЧ-сквида — зависимости $V_k(I_{ac})$ — при различных Φ_x обнаружен при $l > 1$ и отсутствии шумов наклон «плато» — почти горизонтального участка в области наибольшей чувствительности V_k к Φ_x ; этот наклон можно рассматривать как эффективную детерминированную добротность $Q_{эф}^n$, значение которой колеблется от 1,6 до 3,5 для различных значений отношения ω/ω_0 и $k^2 = \frac{M_1}{L_k}$ и быстро возрастает к краям «плато» вплоть до $Q_{эф}^n > 10$.

2. В безгистерезисном режиме ($l < 1$) наклон «плато» больше, чем при $l > 1$, а при определенных условиях $\frac{dV_k}{d\Phi_x}$ может быть очень значительным.

3. Модуляция амплитуды высших гармоник напряжения V_k (при настройке $L_k C_k$ -контура на соответствующую гармонику) измеряемым магнитным потоком Φ_x может иметь в несколько раз большую глубину, чем у первой гармоники [8, 12], особенно в области значений $1 < l < 3$. При этом определенное преимущество имеют четные гармоники, так как они появляются только при $\Phi_x \neq 0$.

Следует заметить, что особенность работы ВЧ-сквида в гистерезисном режиме заключается в том, что либо дважды за период тока накачки I_{ac} , либо реже (в зависимости от амплитуды I_{ac}) происходит скачкообразное изменение тока СКИ, приводящее к переходным процессам в $L_k C_k$ -контуре. Проведено детальное изучение этого явления [8, 12, 14].

Необходимость иметь малые размеры узлов, погружаемых в жидкий гелий, невысокую стоимость ВЧ-сквидов делает обоснованным применение частот накачки в несколько десятков мегагерц и расположение предварительного усилителя при комнатной температуре. Тогда $L_k C_k$ -контур и ПУ соединяются между собой фидером длиной от десятых долей до нескольких метров, который является источником шумового тока $I_{шф}$. Этот ток вместе с шумовым током ПУ $I_{шу}$ вследствие наклона «плато» ВАХ должен оказывать заметное влияние на порог чувствительности ВЧ-сквидов. С учетом данных составляющих шума, а также других, обычно учитываемых: собственного теплового шума слабой связи I_f , теплового шума $L_k C_k$ -контура $E_{шк}$, шумовой ЭДС ПУ $E_{шу}$, внешнего шумового магнитного потока — была исследована эквивалентная шумовая схема ВЧ-сквида [8, 15—17].

Наличие шума приводит к уменьшению наибольшей глубины модуляции напряжения V_k на $L_k C_k$ -контуре от Φ_x и изменению наклона ВАХ. Показано, например, что при $l = 3 + 5$ и $k^2 = 0,05 + 0,1$ шумовая составляющая добротности $Q_{эф}^m$ в центральной части «плато» мало отличается от $Q_{эф}^n$, а ближе к его краям — $Q_{эф}^n > Q_{эф}^m$. Рост $Q_{эф}^n$ к краям «плато» — основная причина наблюдаемого на практике возрастания шума ВЧ-сквидов при $l > 1$ в данной области «плато» за счет увеличения вклада $I_{шф}$ и $I_{шу}$. По этой же причине $k^2 Q$ ($Q = \frac{\omega L_k}{R_k}$), необходимое для обеспечения работы ВЧ-сквида при минимальном шуме для любого Φ_x , в несколько раз превышает значение $k^2 Q \approx 1$, рекомендуемое в ряде работ.

Поскольку наклон центральной части «плато» в гистерезисном режиме меньше, чем в безгистерезисном, несмотря на лучшие потенциальные возмож-

ности последнего по $\Phi_{\text{хш}}^f$ ($\Phi_{\text{хш}}^f$ — составляющая шумового магнитного потока ВЧ-сквида, приведенная ко входу и обусловленная собственным тепловым шумом СКИ), его результирующий шумовой магнитный поток, приведенный ко входу, $\Phi_{\text{хш}}^e$ обычно больше из-за большего влияния шумовых токов фидера. При $l > 1$ выявлен различный характер частотной зависимости $\Phi_{\text{хш}}^e$ (включая наличие минимума), определяемый в основном соотношением вклада $I_{\text{шф}}$ и $I_{\text{шу}}$. При использовании гистерезисного режима и отечественных малошумящих полевых транзисторов получено $(\Phi_{\text{хш}}^e)_{\text{min}} \approx 6 \cdot 10^{-5} \Phi_0 / \sqrt{\Gamma \text{ц}}$, если длина фидера ≈ 1 м, а частота накачки 15 МГц, и $(\Phi_{\text{хш}}^e)_{\text{min}} \approx 3 \cdot 10^{-5} \Phi_0 / \sqrt{\Gamma \text{ц}}$, если длина фидера $\approx 0,3$ м, а частота накачки 20—25 МГц.

Проведенные исследования позволили создать ВЧ-сквиды с указанным порогом чувствительности, которые стабильны к многократному термоциклированию, устойчиво работают в широком температурном диапазоне, имеют постоянную спектральную плотность шума вплоть до частот ниже 0,1 Гц и малый диаметр погружаемого зонда (~ 8 —10 мм).

СП-веберметр представляет собой последовательно соединенные ВЧ-сквид, усилитель низкой частоты, синхронный детектор, интегратор, охваченные отрицательной обратной связью [18 и др.]. В состав СП-веберметра входит также генератор низкочастотной модуляции (чаще всего используется прямоугольная форма модуляции). Здесь нами основное внимание было уделено анализу динамической погрешности СП-веберметра [12, 19, 20]. Особенность такого анализа обусловлена многозначной зависимостью V_x от Φ_x сквида, имеющей период по магнитному потоку, равный Φ_0 .

Получены и исследованы дифференциальные уравнения, описывающие поведение СП-веберметра во времени при различной форме изменения $\Phi_x(t)$. Основные результаты проведенного рассмотрения следующие:

- если относительная скорость нарастания входного воздействия $\bar{A} = \frac{\Phi_{x\text{max}}}{\Phi_0} \frac{1}{f_n} < 0,5\pi$ ($\Phi_{x\text{max}}$ — максимальная скорость изменения $\Phi_x(t)$, f_n — верхняя граница полосы пропускания СП-веберметра), то характер изменения динамической погрешности соответствует линейной системе первого порядка;
- если $\bar{A} > 0,5\pi$, то динамическая погрешность резко возрастает, осциллирует во времени при монотонно возрастающей Φ_x , амплитуда осцилляции со временем уменьшается;
- импульсное воздействие может оставлять после себя «след» в виде нового устойчивого состояния, отличного от того, в котором СП-веберметр находился до появления импульса; необходимые условия для этого — $\bar{A} > 0,5\pi$, $\Phi_{x\text{max}}/\Phi_0 > 0,5$; достаточные условия — существенно различные \bar{A} на переднем и заднем фронте импульса.

Предложено, используя экстремальные точки осцилляций, осуществлять «восстановление» входного импульса, применяя соответствующие алгоритмы, и тем самым уменьшать динамическую погрешность. Изучено влияние шумов СП-веберметра на максимально допустимую скорость изменения входного сигнала [12].

Предложены, теоретически и экспериментально исследованы новые принципы построения СП-веберметров, использующие в качестве меры квант магнитного потока Φ_0 , известный с точностью до седьмого знака. В одном из них к схеме рассмотренного выше аналогового СП-веберметра добавлен канал формирования опорного напряжения $V_{\text{оп}}$, пропорционального Φ_0 , которое используется в качестве меры аналого-цифрового преобразователя [21]. В состав такого СП-веберметра входят также модулятор, обеспечивающий получение специальной импульсной формы магнитного потока НЧ-модуляции амплитудой $\Phi_0/2$, и реверсивный счетчик для подсчета числа квантов магнитного потока. Данный принцип построения обладает следующими достоинствами:

— максимальный ток в цепи обратной связи соответствует Φ_0 , что способствует уменьшению погрешности из-за нелинейности при $\Phi_x \gg \Phi_0$, а верхний предел измерения при медленных изменениях входного сигнала ограничивается только зависимостью критического тока СКИ от Φ_x ;

— автоматически устанавливаются при вводе в режим и поддерживаются в процессе работы амплитуда модуляции $\Phi_0/2$ и общий коэффициент передачи СП-веберметра.

В основе принципа построения СП-веберметра, предназначенного для подсчетов только целого числа квантов магнитного потока Φ_0 , лежит формирование асимметричной вольт-веберной характеристики сквида введением обратной связи с его выхода на вход [7, 22, 23]. В таком случае на выходе сквида при достижении Φ_x значений $n\Phi_0$ (n — целое число) будут происходить скачкообразные изменения, знак первой производной которых однозначно связан с направлением изменения Φ_x . Схема формирования импульсов используется для выделения знака первой производной Φ_x и управления направлением счета n . Верхний предел измерения $\Phi_{x\max}$ ограничен зависимостью критического тока при больших Φ_x . Экспериментально получено $\Phi_{x\max} = 150000\Phi_0 \approx 3 \cdot 10^{-10}$ Вб с приведенной погрешностью менее 0,001 %. Намечены пути дальнейшего увеличения $\Phi_{x\max}$.

Отличительная особенность еще одного принципа построения СП-веберметра [24, 25] — возможность работы в условиях сильных помех промышленной частоты. С этой целью к обычному СП-веберметру добавлены: узел счета числа квантов магнитного потока Φ_0 , создаваемых помехой, устройство формирования интервала времени, равного периоду помехи, устройство формирования двух ортогональных компенсирующих напряжений на частоте помехи, устройство, сравнивающее допустимый уровень остатка помехи с текущим остатком. Компенсация помехи на входе СП-веберметра осуществляется при разорванной его собственной обратной связи, которая автоматически включается после того, как некомпенсированная часть помехи окажется меньше допустимого уровня. Полученное значение напряжения компенсации запоминается и непрерывно подается на вход СП-веберметра. По существу, данный СП-веберметр работает как автокомпенсатор переменного магнитного потока с мерой, равной Φ_0 . Его можно использовать для измерения переменных токов и напряжений, предварительно преобразованных в магнитный поток.

Большинство применений СП-веберметра связано с использованием его в качестве основы (ядра) СП-средств измерений различных физических величин. СП-средства в таком случае отличаются лишь видом входного преобразователя физической величины в магнитный поток [1 и др.]. В частности, широко распространенный преобразователь магнитной индукции в магнитный поток (СП-трансформатор магнитного потока) представляет собой последовательное СП-соединение СП-приемного контура, ось которого совпадает с осью измеряемой компоненты вектора магнитной индукции, с СП-катушкой, индуктивно связанной со СКИ сквида. Во входном преобразователе градиента магнитной индукции в магнитный поток вместо одного СП-приемного контура используются два одинаковых СП-контура, включенные так, что сигналы, создаваемые в каждом из них однородным внешним полем, взаимно компенсируются. Если контуры лежат в одной плоскости на расстоянии друг от друга, равном базе градиентометра, то могут быть измерены недиагональные компоненты тензора градиента магнитной индукции \bar{B} : $\frac{dB_x}{dx}, \frac{dB_x}{dy}, \frac{dB_x}{dz}, \frac{dB_y}{dx}, \frac{dB_y}{dy}, \frac{dB_y}{dz}$ (B_x, B_y, B_z — составляющие вектора \bar{B} , ось z вертикальная, оси x и y взаимно перпендикулярны и расположены в горизонтальной плоскости). Если контуры находятся перпендикулярно их общей оси (плоскости контуров параллельны и разнесены на расстояние, равное базе градиентометра), то могут быть измерены диагональные компоненты тензора градиента магнитной индукции: $\frac{dB_z}{dz}, \frac{dB_x}{dx}, \frac{dB_y}{dy}$.

Существенная особенность СП-средств измерения параметров магнитного поля — небольшие размеры СП-приемных контуров (порядка 1—2 см), что обеспечивает высокую пространственную разрешающую способность при малом значении их порога чувствительности — менее 10^{-13} Тл/ $\sqrt{\text{Гц}}$. Такой уровень собственных шумов, в частности, имел созданный нами однокомпонентный СП-тесламетр, который прошел впервые в СССР в 1986 г. метрологическую аттестацию в рабочем эталоне ВЭТ 42-3-85 единицы магнитной индукции слабого переменного поля [26], при этом погрешность СП-тесламетра находилась на уровне, обеспечиваемом эталоном (до 0,1 %).

Трехкомпонентные СП-тесламетры предназначены для измерения трех взаимно перпендикулярных составляющих B : B_x, B_y, B_z . Очевидно использование для их построения трех однокомпонентных СП-тесламетров, приемные СП-контур которых расположены в трех взаимно перпендикулярных направлениях, например на гранях кубического основания в одном криостате с жидким гелием [27]. Однако в таком случае возникает дополнительная погрешность, связанная с взаимным влиянием каналов [28]. Так, при $2d/D = 1,07$ (D — диаметр приемного контура, d — расстояние между его плоскостью и осью приемного контура соседнего канала) взаимное влияние одного канала на другой составляет $\sim 4,7$ %. Если в каждом канале вместо одного приемного контура использовать два одинаковых, расположенных на противоположных гранях кубического основания и включенных согласно, то при том же $2d/D$ погрешность от взаимного влияния каналов составляет 0,023 % с одновременным увеличением чувствительности в $\sqrt{2}$ раз. Применение такого способа предпочтительнее симметричного друг относительно друга расположения трех СП-приемных контуров вследствие менее жестких требований к технологии изготовления СП-контуров и возможности получения большей чувствительности при том же объеме пространства, занимаемом приемными контурами. Созданные нами на этой основе трехкомпонентные СП-тесламетры имели общий диаметр погружаемого зонда 20 мм, собственный шум и погрешность не хуже, чем у однокомпонентного СП-тесламетра [27].

Основная проблема при изготовлении СП-градиентометров — обеспечение высокой степени стабильного подавления однородной составляющей магнитного поля, что зависит, прежде всего, от неидентичности СП-приемных контуров СП-градиентометра. Неидентичность обусловлена несовершенством технологии изготовления СП-приемных контуров, вследствие чего оказывается, что плоскости их непараллельны, площади и индуктивности неодинаковы. В результате в однородном поле появляется паразитный сигнал (небаланс), хотя градиент равен нулю. Разработан принцип построения СП-градиентометра с малым небалансом, основанный на одновременном использовании двух методов измерения: дифференциального и компенсационного [12, 29]. Реализуется этот принцип на двух независимых СП-тесламетрах, выходы которых включены дифференциально, и с выхода одного из СП-тесламетров вводится обратная связь по магнитной индукции, охватывающая приемные контуры обоих СП-тесламетров*. Такое решение позволяет уменьшить требования к точности подбора коэффициентов преобразования трактов, их стабильности и исключить часто применяемые механические балансировочные узлы. Экспериментально был получен небаланс $3 \cdot 10^{-6}$ в течение длительного времени по отношению к однородному полю, параллельному осям приемных контуров. При этом небаланс только за счет применения дифференциального метода составлял 10^{-4} . Другой широко распространенный и неоднократно применявшийся нами способ уменьшения небаланса («электронная» балансировка) [31] состоит во введении в состав СП-градиентометра дополнительно трехкомпонентного СП-тесламетра для измерения всех ортогональных составляющих внешнего магнитного поля; выходные сигналы этого тесламетра с определенным весом используются для внесения на выходе

* Аналогичная обратная связь, охватывающая криостат, в котором находится СП-приемный контур тесламетра, применялась для расширения полосы пропускания последнего [30].

СП-градиентометра соответствующих поправок. Иногда целесообразно сочетание указанных двух способов.

СП-измерительные системы. На базе перечисленных выше разработок были созданы СП-измерительные системы для изучения различных сторон (в зависимости от решаемой задачи) тонкой структуры магнитного поля:

— система для одновременного измерения трех ортогональных компонент вектора магнитной индукции и трех диагональных градиентов магнитного поля [32] предназначена для исследований в области связи на низких частотах (по сравнению с традиционным построением уменьшено число СП-приемных контуров с одновременным уменьшением взаимного влияния каналов; упрощается зонд, погружаемый в жидкий гелий);

— система для измерения пяти независимых градиентов магнитного поля предназначена для исследования неоднородностей этого поля в образцовой установке высшей точности для поверки тесламетров (базовый комплект системы состоит из трехкомпонентного тесламетра, используемого для электронной балансировки градиентометров, и сменной градиентометрической антенны);

— система, входные преобразователи которой размещаются в различных удаленных друг от друга криостатах, соответствующим образом расположенных в горизонтальной плоскости [33], предназначена для решения задач обнаружения и определения координат объекта, имеющего магнитный момент;

— многоканальный магнитокардиограф, состоящий из нескольких независимых СП-градиентометров второго порядка d^2B_z/dz^2 с базой 80 мм и трехкомпонентного СП-тесламетра для электронной балансировки градиентометров, предназначен для картирования магнитного поля сердца человека и измерения вызванных магнитных полей его мозга [34].

Во всех перечисленных выше приборах и системах в качестве основного узла использовался СП-веберметр на ВЧ-сквидах. В общей сложности было изготовлено свыше 70 каналов либо в виде отдельных приборов, либо собранных в системы. По нашим разработкам на Уральском электромеханическом заводе с 1990 года организован выпуск таких приборов и систем.

Интерес представляет предложенная (но еще не реализованная) СП-система с одним криостатом, предназначенная для одновременного измерения трех магнитных и трех электрических составляющих электромагнитного поля в проводящей среде [35]. Необходимость в этом возникает при районировании морей и океанов по характеру естественного электромагнитного поля Земли, разработке методов обнаружения объектов по вызываемым ими искажениям электромагнитного поля и т. д. Система состоит из одного 3-компонентного и двух 2-компонентных СП-тесламетров, соответствующим образом расположенных между двумя соосными заглушенными с торцов цилиндрическими оболочками из изолирующего материала с тремя взаимно перпендикулярными сквозными отверстиями. Нам неизвестны попытки применить СП-устройства для измерения малых напряженностей электрического поля в проводящей среде.

В последние годы мы сосредоточили внимание на следующих направлениях: применение в СП-веберметрах сквидов постоянного тока вместо или наряду с ВЧ-сквидами; автоматизация процессов ввода в режим каждого канала и компенсации внешних помех; обеспечение устойчивой работы СП-приборов и систем при заметном уровне внешних помех, в том числе в городских условиях без использования специальных экранирующих помещений; исследование потенциальных возможностей СП-приборов по дрейфу нуля, шумам вида $1/f$, погрешностям нелинейности и т. д.; построение некоторых средств измерения электрических величин; и наконец, применение эффектов высокотемпературной сверхпроводимости для построения средств измерения. Остановимся несколько подробнее на некоторых из перечисленных направлений.

СКИ сквида постоянного тока (ПТ-сквида) содержит два перехода Джозефсона, замкнутых СП-кольцом [1 и др.]. Это кольцо подключается к внешнему источнику постоянного (переменного) тока в точках между переходами

Джозефсона так, что переходы оказываются по отношению к этому источнику параллельно соединенными. Под действием внешнего измеряемого магнитного потока Φ_x происходит изменение (модуляция) падения напряжения \bar{V}_x на СКИ, которое затем усиливается. Зависимость напряжения на выходе ПТ-сквида от Φ_x при непрерывном увеличении последнего, как и в ВЧ-сквидах, имеет периодический характер с периодом, равным Φ_0 . Для построения СП-веберметра на основе ПТ-сквида нужны те же узлы, что и при использовании ВЧ-сквида. Привлекательная особенность ПТ-сквидов — меньший уровень собственных шумов по сравнению с ВЧ-сквидами (до $10^{-6} \Phi_0/\sqrt{\text{Гц}}$ и даже менее). Однако их технология изготовления более сложна, они обеспечивают меньшее значение верхнего предела измерения по Φ_x , с больших частот начинается подъем шума вида $1/f$, они часто выходят из строя при возникновении электростатических разрядов.

Нами разработана малошумящая электронная схема согласования СКИ ПТ-сквида с последующей «теплой» электроникой, вклад которой в общий шум ПТ-сквида заметно меньше шумового вклада собственно СКИ. Это позволило создать на СКИ, изготовленных по отечественной технологии, ПТ-сквиды, не уступающие по своим шумовым свойствам лучшим зарубежным. На основе таких ПТ-сквидов сотрудниками кафедры ИИТ НЭТИ совместно с сотрудниками ИРЭ РАН (Москва) создан усовершенствованный вариант магнитокардиографа, а также магнитоэнцефалограф, которые используются в ИРЭ РАН. Детально исследованы ПТ-сквиды на NbN-туннельных переходах, отличающиеся повышенной стабильностью к многократному термоциклированию, влиянию влажности и электростатических разрядов. Экспериментально продемонстрировано [36], что такие ПТ-сквиды могут иметь белый шум и шум вида $1/f$ практически не хуже, чем у лучших зарубежных и отечественных ПТ-сквидов на Nb—AlO—Nb-туннельных переходах.

В СП-веберметрах, а следовательно во всех приборах на их основе, трудно получить небольшие линейные искажения, если частота измеряемого сигнала возрастает. Это связано с тем, что обратная связь «не успевает» отслеживать входной сигнал, вследствие чего амплитуда разностного сигнала возрастает и оказывается на нелинейном участке характеристики $V_x(\Phi_x)$ сквида. Нами показано [37], что амплитуда возникающих при этом гармоник пропорциональна частоте сигнала в степени, равной номеру гармоники. Найдены простые методы, которые позволили получать нелинейные искажения менее чем 0,001 % на частоте сигнала 100 Гц в СП-веберметрах на ВЧ-сквидах и 0,1 % на частоте сигнала 1000 Гц в СП-веберметрах на ПТ-сквидах.

Для автоматического ввода в режим СП-веберметра на ПТ-сквидах необходимо реализовать две стадии:

— на первой определяются значения параметров сквида, обеспечивающие его устойчивую работу (грубая настройка), обратная связь СП-веберметра при этом разомкнута;

— на второй замыкается обратная связь и осуществляется более точная настройка, обеспечивающая получение наибольшего отношения сигнал/шум и необходимой полосы пропускания. Проблемы, возникающие при этом, и аппаратные и программные методы их решения отражены в [38—40].

Выше отмечалось, что из-за несовершенства СП-градиентометров на выходе последних имеется остаточный сигнал помехи, для уменьшения которого широко используется электронная балансировка. Нами исследовались несколько алгоритмов автоматизации такого процесса:

— в тестовом магнитном поле определяется чувствительность СП-градиентометра по трем взаимно перпендикулярным направлениям, по соответствующим формулам вычисляются, а затем устанавливаются необходимые весовые коэффициенты [31];

— все весовые коэффициенты по очереди изменяются от минимального до максимального значения до получения минимального остаточного сигнала на выходе СП-градиентометра от внешнего шума [41];

— для подбора весовых коэффициентов используются алгоритмы адаптивной фильтрации [42].

Экспериментально все алгоритмы давали примерно один и тот же результат: на частотах ниже 100 Гц степень компенсации остаточного сигнала составляла 10^2 раз и даже больше. Наименьшие аппаратные, программные и временные затраты получаются при использовании второго алгоритма.

Основная структура, применяемая, как правило, в СП-измерительных системах, параллельная; в ней число каналов равно числу точек и числу измеряемых величин. С целью сокращения аппаратуры представляет интерес многоточечная структура с временным разделением, в которой используется один канал, к которому поочередно подключаются измеряемые величины. Мы разработали и исследовали для этих целей сверхпроводниковый коммутатор с оптическим управлением [43—45], вводимым в криостат с помощью волоконных световодов. Коммутация СП-цепей имеет существенные особенности по сравнению с коммутацией в обычных цепях. Выявлены причины ошибок, возникающих при СП-коммутации, и предложены методы их уменьшения. Это направление представляется очень перспективным, особенно в СП-системах для биомагнитных исследований, где число каналов уже приближается к сотне.

На базе СП-веберметров были созданы также измерители малых токов в низкоомных цепях и компараторы токов [46, 47]. В этих приборах для преобразования тока в магнитный поток применены катушки и СП-трансформаторы магнитного потока, причем в компараторах эти катушки заключены в СП-экран специальной конфигурации типа «змеи, глотающей свой хвост». Благодаря такой конструкции, например, удалось получить ошибку до $5 \cdot 10^{-9}$ в сравнении двух токов, имеющих значение около 5 мА. Сравнимые отношения токов могут быть 1 : 1 : 2 : 4 : 8 : 16. Данные разработки использованы в квантовых мерах напряжения на эффекте Джозефсона. В этих применениях, а также в ряде других, где требуется долговременная стабильность, важным параметром является дрейф нуля СП-приборов [12, 48]. Важнейшая причина дрейфа нуля — нестабильность, в том числе и температурная, «вмороженного» в СП-узлы магнитного поля при их охлаждении [12, 47, 48]. Для уменьшения этой составляющей дрейфа в СП-измерителях тока был опробован внешний экран, состоящий из двух слоев: верхний выполнен из сверхпроводника с большей температурой перехода в СП-состояние, нижний — с меньшей [47]. При охлаждении первым переходит в СП-состояние верхний слой, в нижнем слое формируется СП-состояние в остаточном магнитном поле, «вмороженном» в верхний слой. Таким образом, удавалось уменьшить дрейф нуля, по крайней мере, на порядок вследствие уменьшения «вмороженного» магнитного поля во внутреннем слое экрана.

После открытия высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП) в НЭТИ были предприняты попытки создания на иттриевой керамике ВЧ-сквидов* с точечными контактами и исследования их в комплекте с электроникой, разработанной ранее для НТСП ВЧ-сквидов. Полученные результаты в этом направлении следующие [49]. Собственный уровень шума ВТСП-веберметров и тесламетров на частоте 100 Гц — $(2 \div 3)10^{-4} \Phi_0/\sqrt{\Gamma\text{ц}}$ и $(2 \div 3)10^{-13} \text{Тл}/\sqrt{\Gamma\text{ц}}$ — в несколько раз хуже, чем у соответствующих НТСП-приборов. Из-за повышенного уровня шума они менее стабильны в работе в незранированном помещении. Вращение СКИ вокруг собственной оси приводило к нарушению работоспособности ВТСП сквид-магнитометра, несмотря на попытку подобрать подходящий уровень ВЧ-смещения. Число таких «мертвых» зон у различных СКИ при вращении их вокруг собственной оси на 360° различно и колебалось от нескольких единиц до десятков. Был исследован ВТСП-градиентометр на основе двух таких ВТСП сквид-магнитометров, выходы которых включены встречно. Для обеспечения работоспособности каждого из каналов ВТСП-градиентометра требовалось экспериментально подбирать положение соответствующего СКИ вращением его вокруг собственной

* ВТСП ВЧ—СКИ изготавливались на кафедре полупроводниковой и квантовой электроники НЭТИ.

оси. Удавалось получать степень подавления однородного магнитного поля ВТСП-градиентометром в несколько тысяч раз.

Несмотря на сложности создания ВТСП-приборов, работы в этом направлении продолжают, поскольку стоимость жидкого азота существенно ниже стоимости жидкого гелия.

В заключении настоящего обзора приводятся основные характеристики НТСП-магнитокардиографа на ПТ-сквидах.

Магнитокардиограф предназначен для исследования и диагностики сердечной деятельности человека. Он позволяет получить дополнительную информацию о нарушениях в работе сердца, а также проводить локализацию областей, где они возникают. Одно из достоинств магнитокардиографии по сравнению с электрокардиографией — меньшая чувствительность к искажающему влиянию проводимости тела человека. Порог чувствительности созданного магнитокардиографа по магнитному полю — 10^{-14} Тл/ $\sqrt{\text{Гц}}$, диапазон частот — $0,1 \div 150$ Гц, число измерительных каналов — до 10. Рабочий режим устанавливается автоматически под управлением от персонального компьютера. Применена эффективная система подавления помех, обеспечивающая работу магнитокардиографа в обычной клинике в городских условиях.

Заключение. Наиболее интересны работы кафедры, относящиеся к повышению точности и улучшению эксплуатационных свойств СП-средств измерений.

Разработаны СП-средства измерений с основной погрешностью менее 0,1 %, экспериментально неоднократно продемонстрирована возможность получения погрешности вплоть до тысячных долей процента. В проспектах лучших зарубежных фирм ("Biomagnetic Technol. Inc."; "Quantum Design"; S. H. E.), в публикациях ведущих исследовательских групп и разработчиков США, Германии, Финляндии, Японии и других стран либо отсутствуют сведения о точностных характеристиках СП-средств измерений, либо приводятся худшие цифры.

До сих пор СП-средства измерений относят к «тепличным» как с точки зрения небольшого уровня помех, при котором они еще работают, так и с точки зрения высококвалифицированного персонала, необходимого для их обслуживания (как правило, это сами разработчики). Комплекс принципиальных, конструктивных и схемотехнических решений позволил нам создать СП-средства измерений, надежно функционирующие на уровне предельной чувствительности без магнитозащищенных комнат как в полевых условиях в диапазоне температур $-30 \div +40$ °С, так и в помещениях, насыщенных электро- и радиооборудованием и расположенных недалеко от метро и больших автодорог. Благодаря высокому уровню автоматизации, в том числе вводу в режим, заметно уменьшен расход жидкого гелия, не требуется обслуживающий персонал высокой квалификации. Совокупностью указанных потребительских свойств, насколько нам известно, не обладает ни один из зарубежных или отечественных образцов.

Представляются перспективными работы в направлении уменьшения дрейфа нуля за длительный период как НТСП-, так и ВТСП-средств измерений до уровня их собственных шумов, создания стабильно работающих ВТСП-магнитокардиографов, дальнейшего расширения областей применения и улучшения характеристик этих средств измерения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кларк Дж. Сверхпроводящие квантовые интерференционные приборы для низкочастотных применений // Слабая сверхпроводимость. Квантовые интерферометры и их применения. — М.: Мир, 1980.
2. Бароне А., Патерно Дж. Эффект Джозефсона. Физика и применения. — М.: Мир, 1984.
3. Волков А. Ф., Заварицкий Н. В., Надь Ф. Я. Электронные устройства на основе слабосвязанных проводников. — М.: Сов. радио, 1978.

4. Васильев Б. В., Данилов В. В., Лихарев К. К. Некоторые вопросы оптимизации сверхпроводящих квантовых интерферометров.—Дубна, 1974.—(Препр. /Объед. ин-т ядер. исслед.; Р 13-8233).
5. Дмитриенко И. М. В мире сверхпроводимости.—Киев: Наук. думка, 1981.
6. Лихарев К. К., Ульрих Б. Т. Системы с джозефсоновскими контактами.—М.: Изд-во МГУ, 1978.
7. Рогачевский Б. М. О применении эффектов сверхпроводимости для средств измерений // Измерительные информационные системы: Межвуз. сб. науч. тр.—Новосибирск: НЭТИ, 1979.
8. Рогачевский Б. М. Сверхпроводниковые средства измерений: Учебн. пособ. для студентов.—Новосибирск: НЭТИ, 1986.
9. Гринберг Я. С., Рогачевский Б. М. Анализ работы сверхпроводникового интерферометра с одной слабой связью (безгистерезисный режим) // Метрология.—1981.—№ 6.
10. Рогачевский Б. М. О максимально возможном коэффициенте преобразования сверхпроводникового квантового интерферометра с одной слабой связью // Изв. вузов. Приборостроение.—1982.—№ 1.
11. Рогачевский Б. М. Анализ характеристик высокочастотного сквида в безгистерезисном режиме // Радиотехника и электроника.—1986.—№ 6.
12. Рогачевский Б. М. Сверхпроводниковые средства измерения параметров магнитного поля: Автореф. дис... д-ра техн. наук.—Новосибирск, 1987.
13. Гринберг Я. С. Аналитическая модель вольт-амперной характеристики гистерезисного сквида // ЖТФ.—1987.—57, № 12.
14. Гринберг Я. С., Катрук Ю. М., Рогачевский Б. М. Особенности плато на ВАХ ВЧ-сквидов при отсутствии шумов // Измер. техника.—1988.—№ 4.
15. Рогачевский Б. М. Сравнение схем детектирования для высокочастотного сквида // Измерительно-вычислительные системы (теория и реализация): Межвуз. сб. науч. тр.—Новосибирск: НЭТИ, 1984.
16. Рогачевский Б. М. Шумовые характеристики высокочастотных сквидов в безгистерезисном режиме // Там же.—1986.
17. Гольшев Н. В., Рогачевский Б. М. Оценка шумового магнитного потока реальных высокочастотных сквидов // Изв. вузов. Приборостроение.—1987.—№ 5.
18. Горбовский М. М., Моторин С. В., Рогачевский Б. М. и др. Сверхпроводниковый субаттосекундомер // Приборы и системы управления.—1983.—№ 8.
19. Петров А. Ю., Рогачевский Б. М. Оценка возможности увеличения диапазона измерения сверхпроводникового флюксметра // Измерительные информационные системы: Межвуз. сб. науч. тр.—Новосибирск: НЭТИ, 1979.
20. Петров А. Ю., Рогачевский Б. М. Переходные процессы в сверхпроводниковом субаттосекундомере // Метрология.—1982.—№ 9.
21. А. с. 1245095 СССР, МКИ³ G01R 33/00. Сверхпроводниковый цифровой веберметр / О. Ф. Арифудин, А. Ю. Петров, Б. М. Рогачевский.—Заявл. 13.12.83.
22. А. с. 782511 СССР, МКИ³ G01R 33/00. Сверхпроводниковый цифровой флюксметр / А. Ю. Петров, Б. М. Рогачевский.—Заявл. 26.06.79.
23. Маркин А. С., Петров А. Ю., Рогачевский Б. М. Цифровой сверхпроводниковый фемтовеберметр // Приборы и системы управления.—1983.—№ 3.
24. Моторин С. В., Рогачевский Б. М. Подавление в субаттосекундомере «сильных» помех промышленной частоты // Измерительные информационные системы: Межвуз. сб. науч. тр.—Новосибирск: НЭТИ, 1981.
25. А. с. 1155065 СССР, МКИ³ G01R 33/00. Автокомпенсатор помех промышленной частоты в сверхпроводниковом магнитометре / С. В. Моторин.—Заявл. 26.03.84.
26. Гольшев Н. В., Горст В. Г., Щербаков В. А. и др. Исследования сверхпроводникового тесламетра в рабочем эталоне единицы магнитной индукции слабого переменного поля // Измер. техника.—1989.—№ 6.
27. Лисицын В. А., Моторин С. В., Сырецкий Г. А., Рогачевский Б. М. Трехкомпонентный сверхпроводниковый магнитометр // ПТЭ.—1985.—№ 3.
28. Лисицын В. А., Моторин С. В., Рогачевский Б. М. Методы уменьшения взаимного влияния каналов в трехкомпонентном сверхпроводниковом магнитометре // Изв. вузов. Приборостроение.—1984.—№ 6.
29. А. с. 1316410 СССР, МКИ³ G01R 33/00. Способ измерения градиента индукции магнитного поля и сверхпроводниковое устройство для измерения градиента индукции магнитного поля / С. В. Моторин, Б. М. Рогачевский.—Заявл. 23.05.85.

30. Моторин С. В., Рогачевский Б. М. Сверхпроводниковый тесламетр с обратной связью по магнитной индукции // Методы и средства измерения параметров магнитного поля: Тез. докл. III Всесоюз. конф.—Л.: ВНИИМ, 1985.
31. А. с. 1443597 СССР, МКИ³ G01R 33/02. Способ измерения градиента индукции магнитного поля /Н. В. Гольшев, Я. С. Гринберг, С. В. Моторин, Б. М. Рогачевский.—Заявл. 10.03.87.
32. А. с. 1292463 СССР, МКИ³ G01R 33/035. Сверхпроводниковое устройство для измерения магнитного поля /Б. М. Рогачевский.—Заявл. 11.01.85.
33. А. с. 1372261 СССР, МКИ³ G01R 33/02. Способ определения местоположения на плоскости объекта, обладающего магнитным моментом /А. В. Витков, Я. С. Гринберг, Ю. М. Катрук, Б. М. Рогачевский.—Заявл. 24.07.86.
34. Журавлев Ю. Е., Матлашов А. И., Годик Э. Э. и др. Динамическое картирование вызванных магнитных полей мозга человека // ДАН СССР.—1987.—296, № 1.
35. А. с. 1693988 СССР, МКИ³ G01R 33/035. Способ измерения электромагнитного поля в проводящей среде и устройство для его осуществления /Б. М. Рогачевский.—Заявл. 07.04.88.
36. Гольшев Н. В., Зеленкевич Р. Л., Комашко В. А. и др. Шумы NbN—Nb₂O₅—Nb-свидов постоянного тока // Автометрия.—1993.—№ 1.
37. Гольшев Н. В., Гринберг Я. С., Моторин С. В., Рогачевский Б. М. Оценка гармонических искажений в сквиде постоянного тока // Изв. вузов. Приборостроение.—1991.—№ 4.
38. А. с. 1400297 СССР, МКИ³ G01R 33/035. Сверхпроводниковый квантовый интерференционный датчик /Н. В. Гольшев, С. В. Моторин, Б. М. Рогачевский.—Заявл. 09.07.86.
39. Береснев В. К., Гольшев Н. В., Моторин С. В. и др. Автоматизированный комплекс для измерения слабых магнитных полей // ПТЭ.—1989.—№ 4.
40. Гольшев Н. В., Моторин С. В., Рогачевский Б. М. Автоматический ввод в режим сквид-приборов // Автометрия.—1993.—№ 1.
41. Береснев В. К., Гольшев Н. В., Катрук Ю. М. и др. Компенсация помех промышленной частоты в сверхпроводниковом магнитокардиографе // Изв. вузов. Приборостроение.—1992.—№ 6.
42. Щетинин Ю. И. Балансировка сквид-магнитометров методами адаптивной фильтрации // Всесоюз. науч.-техн. конф. «Методология измерений».—Л.: ВНИИЭП, 1991.
43. А. с. 644249 СССР, МКИ³ G01R 33/02. Сверхпроводящий магнитометр /В. А. Кочнев, Б. М. Рогачевский.—Заявл. 23.03.77.
44. Грибановский В. К. Исследование неустойчивости криатрона с оптическим управлением // Изв. вузов. Приборостроение.—1991.—№ 6.
45. Грибановский В. К., Рогачевский Б. М. Многоточечная магнитометрическая система с оптически управляемым сверхпроводниковым коммутатором // Там же.—1992.—№ 1.
46. Береснев В. К., Гольшев Н. В., Маркин А. С. и др. Экспериментальное изучение СП-компараторов токов // Измер. техника.—1989.—№ 4.
47. Блохин В. А., Маркин А. С. Исследование шумовых характеристик и дрейфа нуля гальванометров на основе ВЧ-свидов // Исследования в области общей и квантовой метрологии: Сб. науч. тр. ВНИИФТРИ.—М., 1991.
48. Береснев В. К., Маркин А. С., Рогачевский Б. М. О возможности уменьшения дрейфа нуля сверхпроводниковых веберметров // Проблемы магнитных измерений и магнитоизмерительной аппаратуры: Тез. докл. VII Всесоюз. конф.—Л.: ВНИИМ, 1989.
49. Петров А. Ю., Рогачевский Б. М. Экспериментальное исследование ВТСП градиентометра на ВЧ-свидах // Изв. вузов. Приборостроение.—1992.—№ 6.

Поступила в редакцию 27 ноября 1992 г.