

ЯДЕРНЫЙ МАГНИТОМЕТР С ВЫСОКОСТАБИЛЬНЫМ И ВЫСОКОТОЧНЫМ АВТОГЕНЕРАТОРОМ

*А. Г. Гордиенко, О. И. Губернаторов, В. Т. Пивовар,
Р. М. Пивовар*

Х а р ь к о в

В современных ускорителях элементарных частиц, магнитных масс-спектрометрах и других радиофизических устройствах широко применяются ядерные магнитометры (я.м.), которые обеспечивают мгновенное измерение напряженности магнитного поля (H) с погрешностью, определяемой точностью измерения гиромагнитного отношения γ . Ядерные магнитометры выполняются на высокочувствительных протонных датчи-

ках с широким диапазоном измерения H , для которых γ определено с точностью

$$\delta_{\gamma} = 2 \cdot 10^{-5}.$$

Их можно также выполнить с дистанционным управлением, что особенно важно для магнитометров, работающих в средах с большими ионизирующими излучениями.

Предельная чувствительность я. м. обеспечивается протонными датчиками, которые чувствительнее литиевых и дейтериевых соответственно в 9 и 50 раз, в то же время гиромагнитное отношение для лития γ_L в 2,5 раза меньше гиромагнитного отношения для протонов γ_H , а гиромагнитное отношение для дейтерия γ_D меньше γ_H в 6,5 раза [1]. При измерении больших значений H с использованием протонных датчиков значительно увеличивается частота электромагнитных колебаний, поскольку ядерно-магнитный резонанс (я. м. р.) наблюдается при условии

$$2\pi f = \gamma H. \quad (1)$$

Конструктивно частотный диапазон автогенератора повышается следующим образом: короткозамкнутую эквивалентную длинную линию, которая состоит из индуктивности датчика я. м. р. и отрезка высокочастотного (ВЧ) кабеля, шунтируют укорачивающей катушкой индуктивности. Длина короткозамкнутой длинной линии выбирается равной

$$l_{э. д. л.} \leq \frac{\lambda}{4}, \quad (2)$$

где λ — длина волны электромагнитных колебаний в ВЧ кабеле. В этом случае входное сопротивление имеет индуктивный характер. Частота автогенератора перестраивается конденсатором переменной емкости, а также переключением укорачивающих катушек и датчиков с соединительным кабелем. Были разработаны автогенераторы с $f = 114 \text{ Мгц}$ для измерения $H = 26,8 \text{ кэ}$ [2].

Дистанционность я. м. достигается изменением длины линии в соответствии с выражением

$$l_{э. д. л.} \leq \frac{\lambda}{4} + \frac{\lambda}{2} n, \quad (3)$$

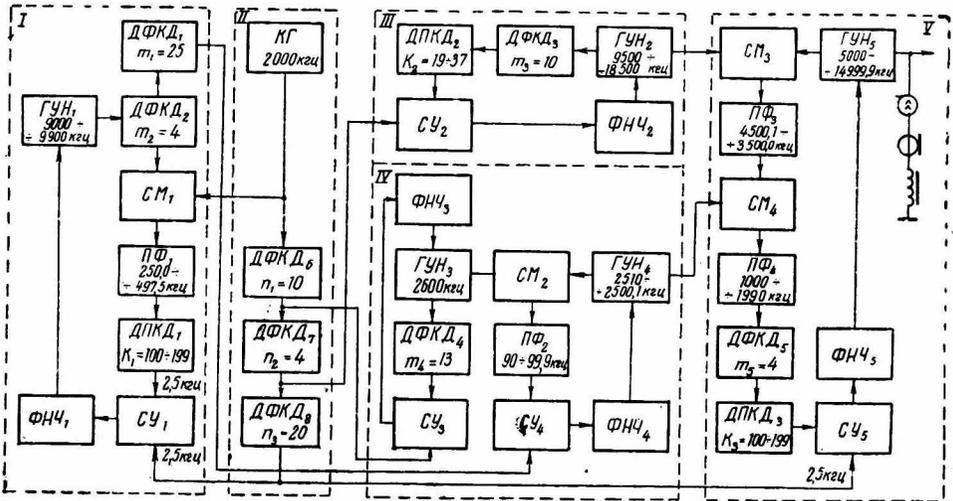
где $n = 1, 2, 3 \dots$

Датчики я. м. р., включаемые непосредственно в автоколебательную схему, имеют чувствительность на порядок выше я. м., собранных по схеме с буферным каскадом, поскольку в первом случае датчик я. м. р. является составной частью автогенератора. Такие схемы могут генерировать колебания с различными частотами; требуемая частота получается включением в цепь обратной связи автогенератора селективных элементов, пропускающих заданную полосу частот.

Однако в широкодиапазонных я. м. не реализуется потенциальная возможность метода я. м. р. измерять H с точностью, с которой измерено γ , из-за большой инструментальной погрешности аппаратуры, поскольку применяемые схемные решения автогенераторов я. м. не обеспечивают требуемой стабильности частоты. Сложный колебательный контур автогенератора получается геометрически рассредоточенным и легко подвержен механическим, климатическим и другим воздействиям, поэтому стабильность частоты такого автогенератора оказывается весьма низкой. Для повышения стабильности частоты в я. м. в качестве широкодиапазонного автогенератора используется цифровой синтезатор частоты (ЦСЧ). Стабильность ЦСЧ в любой точке диапазона равна или выше погрешности измерения гиромагнитного отношения. Предложенный метод повышает класс точности я. м. до предельно возможной величины.

Ниже описывается высокочувствительный я.м. с протонным датчиком, автогенератор в котором выполнен по схеме ЦСЧ, разработанной для непрерывного измерения H в диапазоне $1,2 \div 3,5$ кэ. Учитывая перекрытие по концам диапазона, ЦСЧ обеспечивает генерацию в диапазоне $5 \cdot 10^6 - 15 \cdot 10^6$ гц. Как известно, частота в ЦСЧ изменяется с шагом Δf . Дискретная перестройка частоты ЦСЧ может рассматриваться как непрерывное изменение частоты в я.м., если относительное приращение частоты $\frac{\Delta f}{f}$ выбирается того же порядка, что и погрешность измерения γ

$$\frac{\Delta f}{f} \approx \frac{\Delta \gamma}{\gamma} \quad (4)$$



Функциональная схема автогенератора в ядерном магнитометре.

Шаг дискретности определяется нижней границей диапазона $f_H = 5 \cdot 10^6$ гц и точностью измерения γ . В нашем случае шаг дискретности составляет $\Delta f = 100$ гц. Стабильность и точность частоты ЦСЧ в любой точке диапазона определяется стабильностью эталонного генератора.

На рисунке представлена функциональная схема высокостабильного генератора для ядерного магнитометра. Схема состоит из пяти каналов. В канале I создается дискретная сетка из 100 частот с шагом дискретности 100 гц в диапазоне 100 кГц, которая в канале IV трансформируется в диапазон 2,5 Мгц. Канал III формирует десять частот подставки в диапазоне 9,5—18,5 Мгц с шагом 1 Мгц, поступающие в канал V, где происходит формирование выходных частот сетки. Перестройка частоты автогенератора производится переключателями канала I, устанавливающими сотни герц и единицы килогерц; канала V, устанавливающими десятки и сотни килогерц; канала III — единицы мегагерц.

Рассмотрим более подробно работу отдельных узлов. Канал II состоит из высокостабильного кварцевого генератора (КГ) на 2 Мгц, определяющего необходимую стабильность выходных частот синтезатора, и трех делителей частоты с фиксированными коэффициентами деления (ДФКД) $n_1 = 10$; $n_2 = 4$; $n_3 = 20$, необходимых для получения опорных частот 2000, 200, 50, 2,5 кГц. Все делители частоты выполнены на триггерах.

Канал I представляет собой цифровой синтезатор частот, выполненный по схеме с предварительным делением и последующим преобразованием частоты [3]. В состав канала I входят: генератор, управляемый напряжением (ГУН₁), работающий в диапазоне частот $f_1 = 9000 \div 9990$ кГц, ДФКД₂ с коэффициентом деления $m_2 = 4$, смеситель частоты (СМ₁), нагрузкой которого является полосовой фильтр (ПФ) с полосой пропускания 500 кГц; делитель частоты с переменным коэффициентом деления (ДПКД₁) $K_1 = 100 \div 199$; сравнивающее устройство (СУ₁); фильтр нижних частот (ФНЧ) с частотой максимального подавления 2,5 кГц и ДФКД₁ с коэффициентом деления $m_1 = 25$.

Работает схема следующим образом. Колебания ГУН₁ поступают на ДФКД₂ и их частота понижается в четыре раза. На СМ₁ приходят колебания с частотами 2000 кГц и 2250—2497,5 кГц и фильтром ПФ выделяется их разница 250,0—497,5 кГц, которая делителем ДПКД₁ понижается до 2,5 кГц. В СУ₁ происходит сравнение поделенной и преобразованной частоты ГУН₁ с опорной частотой 2,5 кГц. Сигнал управления с СУ₁ поступает на управляющий элемент ГУН₁ для изменения частоты генератора таким образом, чтобы частота на выходе ДПКД₁ всегда была равна частоте сравнения. Для изменения частоты ГУН₁ достаточно в ДПКД₁ установить новое значение коэффициента деления при помощи двух галетных переключателей на десять положений каждый. В режиме синхронизации можно записать равенство

$$\left(\frac{f_1}{m_2} - f_{\text{КГ}}\right) : K_1 = \frac{f_{\text{КГ}}}{n_1 n_2 n_3}, \quad (5)$$

откуда после преобразования имеем

$$f_1 = \left(K_1 \frac{m_2}{n_1 n_2 n_3} + m_2\right) f_{\text{КГ}}. \quad (6)$$

Таким образом, на выходе ГУН₁ имеем дискретную сетку частот с шагом 10 кГц. ДФКД₁ и ДФКД₂ с общим коэффициентом деления $m = m_1 m_2 = 100$ понижают шаг сетки частот до 100 Гц.

Применение предварительного деления и преобразование частоты ГУН₁ вызвано относительно невысоким быстродействием ДПКД. Постановка ДФКД₂ перед СМ₁, а не после него позволяет обойтись без умножения частоты КГ и уменьшить значение коэффициента деления ДПКД₁. Канал III обеспечивает получение редкой сетки частот подставки с шагом 1 МГц, выполнен по схеме ЦСЧ с предварительным делением частоты и состоит из ГУН₂, работающего в диапазоне $f_2 = 9,5 \div 18,5$ МГц; ДФКД₃ с коэффициентом деления $m_3 = 10$; ДПКД₂ с коэффициентом деления $K_2 = 19 \div 37$, изменяющимся через две единицы; СУ₂ и ФНЧ₂ с частотой максимального подавления 50 кГц. В установившемся режиме

$$\frac{f_2}{m_3 K_2} = \frac{f_{\text{КГ}}}{n_1 n_2}, \quad (7)$$

откуда находим

$$f_2 = K_2 \frac{m_3}{n_1 n_2} f_{\text{КГ}}. \quad (8)$$

Канал IV состоит из двух схем: схемы формирования частоты переноса и схемы линейной трансформации сетки с шагом 100 Гц. Схема переноса представляет собой ЦСЧ на одну фиксированную частоту. В состав схемы входят ГУН₃ на частоту $f_3 = 2,6$ МГц, ДФКД₄ с коэффициентом деления $m_4 = 13$; СУ₃ и ФНЧ₄ с частотой максимального подавления 200 кГц.

В режиме синхронизации

$$\frac{f_3}{m_4} = \frac{f_{\text{КГ}}}{n_1}, \quad (9)$$

откуда

$$f_3 = \frac{m_4}{n_1} \cdot f_{\text{КГ}}. \quad (10)$$

В схему линейной трансформации входят ГУН₄ на частоту $f_4 = 2500,1 \div 2510,0$ кГц, СМ₂, ПФ₂ с полосой пропускания 10 кГц; СУ₄ и ФНЧ₄ с частотой максимального подавления 90 кГц. На вход СУ₄ в качестве частоты сравнения поступают колебания из канала 1 с частотами $90,0 \div 99,9$ кГц. При синхронизации

$$f_3 - f_4 = \frac{f_1}{m_1 m_2}. \quad (11)$$

После преобразования и подстановки значений f_1 и f_3 из выражений (6) и (10) получим

$$f_4 = \left(\frac{m_4}{n_1} - \frac{K_1}{n_1 n_2 n_3 m_1} - \frac{1}{m_1} \right) f_{\text{КГ}}. \quad (12)$$

Канал V является суммирующим. В нем формируются выходные частоты в диапазоне $f_5 = 5000,0 \div 14999,9$ кГц с шагом 100 гц. Выполнен он по схеме ЦСЧ с двойным преобразованием и последующим предварительным делением частоты. Особенностью этой схемы является то, что изменяется не только первая частота гетеродинирования, но и частота второго преобразования. В канале V происходит формирование шага перестройки 10 кГц. В состав канала V входят: ГУН₅, генерирующий в диапазоне $f_5 = 5000,0 \div 14999,9$ кГц; СМ₃, на входы которого поступают колебания с ГУН₂ и ГУН₅; ПФ₃ с полосой пропускания 1 МГц; СМ₄, на входы которого поступают колебания разностной частоты $f_2 - f_5$ и частоты f_4 ; ДПКД₅ с коэффициентом $m_5 = 4$; ДПКД₃ с переменным коэффициентом деления $K_3 = 100 \div 199$, меняющимся через единицу с помощью двух галетных переключателей на 10 положений каждый; СУ₅, ФНЧ₅ с частотой максимального подавления 2,5 кГц.

В режиме синхронизации

$$\frac{f_2 - f_5 - f_4}{m_5 K_3} = \frac{f_{\text{КГ}}}{n_1 n_2 n_3}. \quad (13)$$

После соответствующих преобразований получим

$$f_5 = \left(\frac{K_1}{n_1 n_2 n_3 m_1} - \frac{K_3 m_5}{n_1 n_2 n_3} + \frac{K_2 m_3}{n_1 n_2} - \frac{m_4}{n_1} + \frac{1}{m_1} \right) f_{\text{КГ}}. \quad (14)$$

При изменении значения K_3 в ДПКД₃ на выходе устройства происходит изменение частоты через десятки и сотни килогерц. Изменение K_1 приводит к изменению частот через сотни герц и единицы килогерц, а изменение K_2 — к изменению частот через единицы мегагерц.

В результате исследования ядерного магнитометра с цифровым синтезатором частот выяснилось, что стабильность выходных частот соответствовала стабильности опорного кварцевого генератора.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Г. Гордиенко, Н. Г. Афанасьев. «Украинский физический журнал», т. VI, № 2, 1961.
2. А. Г. Гордиенко, И. О. Антоненко. «Автоматика и приборостроение», 1962, № 3.
3. О. И. Губернаторов, А. Г. Гордиенко, В. Т. Пивовар, Р. М. Пивовар. ПТЭ, № 1, 1970.