

Э. ЛИПМАА, А. СЮГИС

ИССЛЕДОВАНИЕ СПИН-ГЕНЕРАТОРА НА БОКОВОЙ ПОЛОСЕ С ФАЗОВО-СИНХРОНИЗИРОВАННОЙ ЧАСТОТОЙ МОДУЛЯЦИИ

Спин-генераторы для измерения и стабилизации магнитного поля описаны многими исследователями. Первые генераторы работали с резонансным усилителем, замкнутым на себя через скрещенные катушки [1, 2], и обладали недостаточной стабильностью. Применение модуляции и низкочастотной обратной связи на магнитное поле [3-7] или на частотно-модулированный генератор высокой частоты [8] позволило получить стабильно работающие генераторы, частота которых очень точно следует за изменениями магнитного поля. Спин-генератор на боковой полосе является основой очень стабильного и распространенного спектрометра А-60 фирмы «Вариан» [9]. Еще выше стабильность самонастраивающегося спектрометра с одним образцом [3, 6]. Описанные спин-генераторы, однако, мало подходят для стабилизации спектрометров двойного ядерного резонанса, так как радиочастотные поля H_1 и H_2 могут быть получены только в виде боковых полос. При работе с сильным полем H_2 и в экспериментах с двойным резонансом различных ядер необходим спин-генератор, высокая частота которого следовала бы за изменениями магнитного поля. Такой генератор может быть создан путем применения частотной модуляции высокой частоты в цепи обратной связи [7, 8] или однополосной модуляции [9] после генератора. Последний метод трудно осуществить в широком диапазоне звуковых частот, а первый не обеспечивает нужной стабильности и чистоты сигнала. Поэтому мы применим фазовую синхронизацию частоты модуляции к внешней стабильной частоте.

Модуляция магнитного поля

В случае синусоидальной модуляции магнитного поля поперечная компонента макроскопического магнитного момента $F(t)$ равна [10, 11]:

$$F(t) = v + iu = - \sum_{n, k = -\infty}^{+\infty} J_k(\beta) J_n(\beta) e^{i(k-n)\omega_m t} \frac{|\gamma| H_1 M_0 T_2 (1 - i \Delta_k \omega T_2)}{[1 + T_2^2 (\Delta_k \omega)^2 + \gamma^2 T_1 T_2 J_k^2(\beta) H_1^2]},$$

где $J_k(\beta)$ и $J_n(\beta)$ — функции Бесселя, ω_m — частота модуляции, $\beta = \frac{|\gamma| H_m}{\omega_m}$ — индекс модуляции, $|\gamma| H_m$ — глубина (амплитуда) модуляции, $\Delta_k \omega = |\gamma| H_0 + k \omega_m - \omega$ — отклонение измерительной частоты ω от резонансной для боковой полосы k ; остальные обозначения обычные [12, 13].

Если после высокочастотного детектора фильтром или низкочастотным фазовым детектором выбирается частота ω_m , то при $k=1$ (работа на 1-й боковой полосе) значение $F(t)$ пропорционально членам суммы, где $k-n = \pm 1$. В этом случае

$$F(t) = J_1[(J_0 + J_2) \cos \omega_m t + i(J_0 - J_2) \sin \omega_m t] \frac{|\gamma| H_1 M_0 T_2 (1 - i \Delta_k \omega T_2)}{[1 + T_2^2 (\Delta_k \omega)^2 + \gamma^2 T_1 T_2 J_1^2(\beta) H_1^2]},$$

где $J_1 J_0 e^{i \omega_m t} + J_1 J_2 e^{-i \omega_m t} = J_1[(J_0 + J_2) \cos \omega_m t + i(J_0 - J_2) \sin \omega_m t]$.

Из свойств функции Бесселя следует, что сигнал поглощения, пропорциональный действительной части v последнего выражения, приближается к максимуму, если $\beta \rightarrow 0$. Выражая функции Бесселя через степенные ряды, находим, что $F(t)$ и фактор насыщения

$$s = \gamma^2 (\frac{1}{2} \beta H_1)^2 T_1 T_2$$

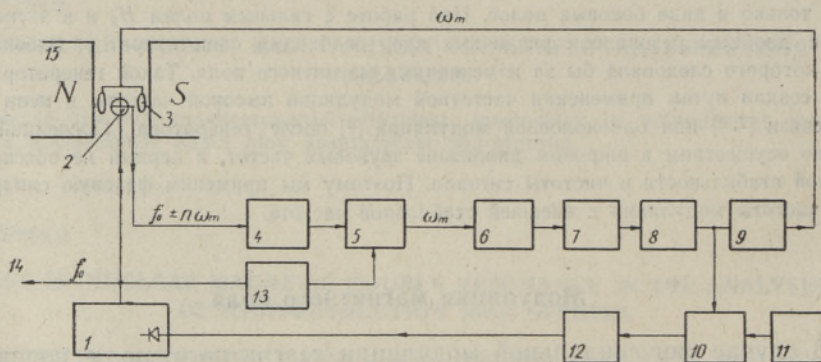
зависят от силы радиочастотного поля H_1 и индекса модуляции β .

Если глубина модуляции $|\gamma| H_m$ достаточно мала ($\beta = 0,01 \div 0,1$), то сигнал практически равняется сигналу прямого прохождения без модуляции. H_1 должно быть соответственно больше на $20 \div 40$ дБ. Верхний предел для увеличения H_1 определяется конструктивными соображениями. Целесообразно применение скрещенных катушек [14].

Чрезмерное увеличение β вызывает уменьшение сигнала, и в генераторном режиме в результате частичного насыщения образца [15] возникают релаксационные колебания.

Блок-схема спин-генератора

Блок-схема генератора, работающего на частоте 40 МГц с частотой модуляции 5 или 10 кГц, приведена на рисунке.



Блок-схема спин-генератора: 1 — высокочастотный генератор, управляемый параметрическим диодом; 2 — скрещенные катушки; 3 — модуляционные катушки; 4 — усилитель высокой частоты; 5 — фазовый детектор; 6 — усилитель низкой частоты; 7 — диодный ограничитель; 8 — фильтр; 9 — выходной каскад усилителя низкой частоты; 10 — фазовый детектор; 11 — кварцевый генератор низкой частоты; 12 — фильтр; 13 — фазовращатель; 14 — выход высокой частоты; 15 — электромагнит.

Высокочастотный сигнал из блока синтеза частоты 1 [4] поступает в скрещенные катушки 2, магнитное поле в которых модулируется катушками 3. После усиления в резонансном усилителе 4 и детектирования в высокочастотном фазовом детекторе 5 полученная низкая частота ω_m проходит через диодный ограничитель и фильтр частоты 10 кГц с полосой пропускания 0,9 кГц, усиливается в усилителе 9 и подается на модуляционные катушки 3. В фазовом детекторе 10 низкочастотный сигнал сравнивается со стабильной частотой 5 или 10 кГц от кварцевого

генератора 11, фильтруется в фильтре нижних частот 12 и используется для подстройки высокой частоты генератора 1. От генератора 1 можно получить чистый высокочастотный сигнал практически без модуляционных боковых полос, точно следующий за изменениями магнитного поля, и использовать его для управления другими блоками синтеза частоты в спектрометре двойного магнитного резонанса.

Характеристики спин-генератора

Были использованы две головки со скрещенными катушками на расстоянии 3 см друг от друга. Образец в датчике спин-генератора — ампула $\varnothing 5$ мм с 0,1M водным раствором $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ с собственной шириной линии на полувысоте $\frac{1}{T_2} = 32$ гц. Приборная ширина линии без насыщения $\frac{1}{T_2^*} = 64$ гц. Оптимальная собственная ширина линии определяется однородностью магнитного поля, так как требуется максимальный сигнал с минимальной насыщаемостью.

В оптимальных условиях (высокочастотное поле H_1 на 30 дБ превышает величину этого же поля, обеспечивающего максимальный сигнал в условиях медленного прохождения без модуляции; $\beta < 0,02$) коэффициент стабилизации равен 1250; при увеличении β в 10 раз он снижается на 13%. На частоте 5 кгц коэффициент стабилизации выше, чем при 10 кгц, составляя без дополнительного фильтра в оптимальных условиях 1390.

Изменение амплитуды модуляции (или β) в 2 раза вызывает изменение частоты высокой частоты на 0,3 гц и изменение уровня высокой частоты также в 2 раза — на 1,0 гц. Изменение фазы опорного напряжения в высокочастотном фазовом детекторе на 90° вызывает сдвиг высокой частоты, примерно равный ширине линии на полувысоте (76 гц).

Без дополнительного фильтра на частоте 10 кгц отношение сигнал—шум уменьшается и коэффициент стабилизации падает до 960.

В режиме с изменяющейся низкой частотой 5 и 10 кгц коэффициент стабилизации в 5 раз ниже и равен, в среднем, 300.

Частотные характеристики спин-генератора вполне удовлетворительны. Для магнитных помех с амплитудой $\gamma H_m = \pm 130$ гц в режиме с изменяющейся частотой модуляции (10 кгц) коэффициент стабилизации падает на 30% (до 880) при частоте 100 гц, а в режиме с изменяющейся высокой частотой — при частоте помех 250 гц. Некоторая стабилизация сохраняется до частоты $600 \div 700$ гц.

Практически помехи с амплитудой 130 гц наблюдаются редко. Но и при наличии таких помех стабильность положения резонансной линии в измерительной головке лучше, чем 0,1 гц. Быстродействие спин-генератора значительно превышает быстродействие супер-стабилизаторов с гальванометрическим усилителем.

Максимальная устойчивая рабочая частота построенного спин-генератора — 26 кгц. При отключенном фильтре нижних частот 12 (см. рисунок) прибор может работать с частотной модуляцией высокой частоты без модуляции магнитного поля катушками 3. Однако в таком режиме дрейф нулевой линии скрещенных катушек не устранен и оказывает отрицательное влияние на стабильность прибора.

Выводы

1. Исследованы характеристики спин-генератора с постоянной фазово-синхронизированной частотой модуляции и высокой частотой, следующей за изменениями магнитного поля.

2. Коэффициент стабилизации спин-генератора составляет в оптимальных условиях на частоте 10 кГц 1250 и увеличивается с уменьшением рабочей частоты.

3. Коэффициент стабилизации падает до 0,7 от своего начального значения на частоте 250 Гц для помех с амплитудой ± 130 Гц.

4. Генератор используется для управления блоками синтеза частоты спектрометра двойного ядерного магнитного резонанса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lösche A., Kerninduktion, Berlin, 1957.
2. Schmelzer Ch., Lectures on the theory and design of an alternating gradient proton-synchrotron, CERN, 1953, 115.
3. Vladimírsky K. V., Labzov B. A., Nucl. Instr. & Methods, **14**, 94 (1961).
4. Липпмаа Э. Т., Тр. Таллинск. политехн. ин-та, Сер. А 195, 65 (1962).
5. Липпмаа Э. Т., Сюгис А. Ю., Тр. Таллинск. политехн. ин-та, Сер. А 195, 59 (1962).
6. Владимирский К. В., Лабзов Б. А., Приборы и техн. эксп., **7**, 103 (1962).
7. Anderson W. A., Rev. Sci. Instr., **33**, 1160 (1962).
8. Kaiser, R., Rev. Sci. Instr., **33**, 495 (1962).
9. Varian Associates, Palo Alto, California, USA.
10. ЯМР- и ЭПР-спектроскопия, М., 1964, стр. 153 и 330.
11. Acrivas J. V., J. Chem. Phys., **36**, 1097 (1962).
12. Попл Дж., Шнейдер В., Бернштейн Г., Спектры ядерного магнитного резонанса высокого разрешения, Изд. иностр. лит., М., 1962.
13. Абрагам А., Ядерный магнетизм, Изд. иностр. лит., М., 1963.
14. Abrahamson D. E., Heinen C., J. Sci. Instr., **39**, 513 (1962).
15. Vladimírsky K. V., Labzov B. A., Xth Colloquium Spectroscopicum Internationale, Spartan Books, 1963, 677.

Институт кибернетики
Академии наук Эстонской ССР

Поступила в редакцию
6/I 1965

E. LIPPMAA, A. SUGIS

FAASSUNKRONISEERITUD MODULATSIOONISAGEDUSEGA KÜLGRIBA-SPINGENERAATORI UURIMINE

Uuritud spingeneraator võimaldab saada kõrgsageduslikku, magnetvälja täpselt järgivat signaali topeltresonants-spektromeetri plokkide juhtimiseks. Generaator tagab 10 kHz sagedusel stabilisatsioonikoefitsiendi 1250, mis suureneb töösageduse langemisel. Stabilisatsioonikoefitsient langeb 0,7 oma algväärtusest alles 250 Hz sagedusel, kui magnetvälja hääre amplituud on ± 130 Hz.

E. LIPPMAA, A. SUGIS

SIDEBAND SPIN GENERATOR WITH PHASE SYNCHRONISED MODULATION FREQUENCY

A sideband spin generator with magnetic field modulation and variable high frequency has been investigated. The audio frequency signal (5 or 10 kc/sec) from high frequency phase detector is clipped in a diode limiter, filtered, and applied to the modulation coils through a power amplifier. In order to hold the modulation frequency constant, the filtered audio signal is led to a phase detector where it is compared with a very stable audio signal from a quartz oscillator. The output voltage is applied to a parametric diode of the high-frequency oscillator, whose frequency now follows exactly the variations of the magnetic field. The coefficient of stabilization is 1250 and falls to 70% at 250 cps (for a 130 cps magnetic noise amplitude). The spin generator is used as stabilizer in a nuclear double resonance spectrometer.