

А.Н. Козлов, С.Е. Синельникова, Л.А. Шумов

## КВАНТОВЫЙ САМОГЕНЕРИРУЮЩИЙ МАГНИТОМЕТР С АВТОПОДСТРОЙКОЙ

Квантовые магнитометры, основанные на методах оптической ориентации атомов щелочных металлов и магнитного резонанса, обладают рядом достоинств. Ими являются высокое отношение сигнал-шум и как следствие большая чувствительность, широкий динамический диапазон, перекрываемый без переключений, высокое быстродействие, необходимое, например, для аэромагнитных измерений и при регистрации короткопериодных вариаций магнитного поля.

Простейшей схемой построения датчика квантового самогенерирующего магнитометра (СГМ) является однокамерная, в которой осуществляется самогенерация на частоте зеемановского перехода [1]. Но схема имеет ряд недостатков, главные из которых: несоответствие частоты генерации частоте центра линии магнитного резонанса из-за неизбежных фазовых погрешностей в петле обратной связи, ориентационные сдвиги частоты генерации - ухудшают метрологические характеристики магнитометра.

Погрешности цезиевого СГМ в зависимости от качества ячеек поглощения, конструкции датчика и схемного выполнения узлов электроники равны примерно 2-3 нТл в пределах зоны генерации.

Ориентационные погрешности СГМ при измерении с подвижных устройств ограничивают точность измерений или вынуждают использовать дополнительные ориентирующие системы для сохранения положения датчика относительно направления магнитного поля.

Построение датчика по более сложной схеме с применением в СГМ двух ячеек поглощения, облучаемых светом противоположной круговой поляризации, позволяет снизить ориентационные погрешности до  $\pm 0,01$  нТл в угловом растворе  $\pm 15^\circ$  относительно оптимального положения датчика в пространстве, но в пределах зоны генерации погрешность составляет  $\pm 1 - 1,5$  нТл [2,3].

Отклонение по фазе требуемой в кольце обратной связи СГМ ведет к отклонению частоты генерации от частоты центра линии магнитного резонанса, что увеличивает погрешность магнитометра или требует

проведения сравнений с другим абсолютным магнитометром, например протонным.

Одним из способов уменьшения ориентационных погрешностей и погрешностей, обусловленных фазовыми искажениями в кольце обратной связи, является введение в самогенерирующий датчик системы автоподстройки частоты генерации под центр линии магнитного резонанса [4,5].

Другой путь построения СГМ с автоподстройкой заключается в том, что его частота генерации сравнивается с частотой центра линии магнитного резонанса другого опорного датчика, имеющего малые погрешности, а сигнал рассогласования управляет напряженностью магнитного поля в окрестности датчика СГМ [6].

В течение 1971-1972 гг. нами были проведены исследования двух макетов магнитометров, построенных по схеме СГМ с автоподстройкой по опорному датчику и отличающихся размерами ячеек поглощения (диаметр 40 и 25 мм, длина 50 и 25 см соответственно). В качестве рабочего вещества использовался щелочной металл-цезий.

На рис. I приведена блок-схема такого датчика. Его самогенерирующая часть (верхняя часть рисунка) состояла из двух ячеек I, разнесенных в пространстве под углом  $45^\circ$  и облучаемых светом одного знака круговой поляризации от цезиевой лампы 2 через световоды 3, кругового поляризатора 4 и линзы 5. Спектральная лампа возбуждалась от высокочастотного генератора 15. Стабилизация светового потока производилась цепью обратной связи через вспомогательный фотоприемник 16. Кремниевые фотоприемники б включались параллельно. Сигнал на частоте резонанса после усиления и фазирования в блоке 7 поступал в катушки обратной связи 8, на выход оконечного усилителя S и радиочастотные катушки 10 опорного датчика.

Включение двух ячеек поглощения в петлю обратной связи позволяет достичь углового раствора зоны генерации около  $150 - 160^\circ$  в пределах одной полусферы.

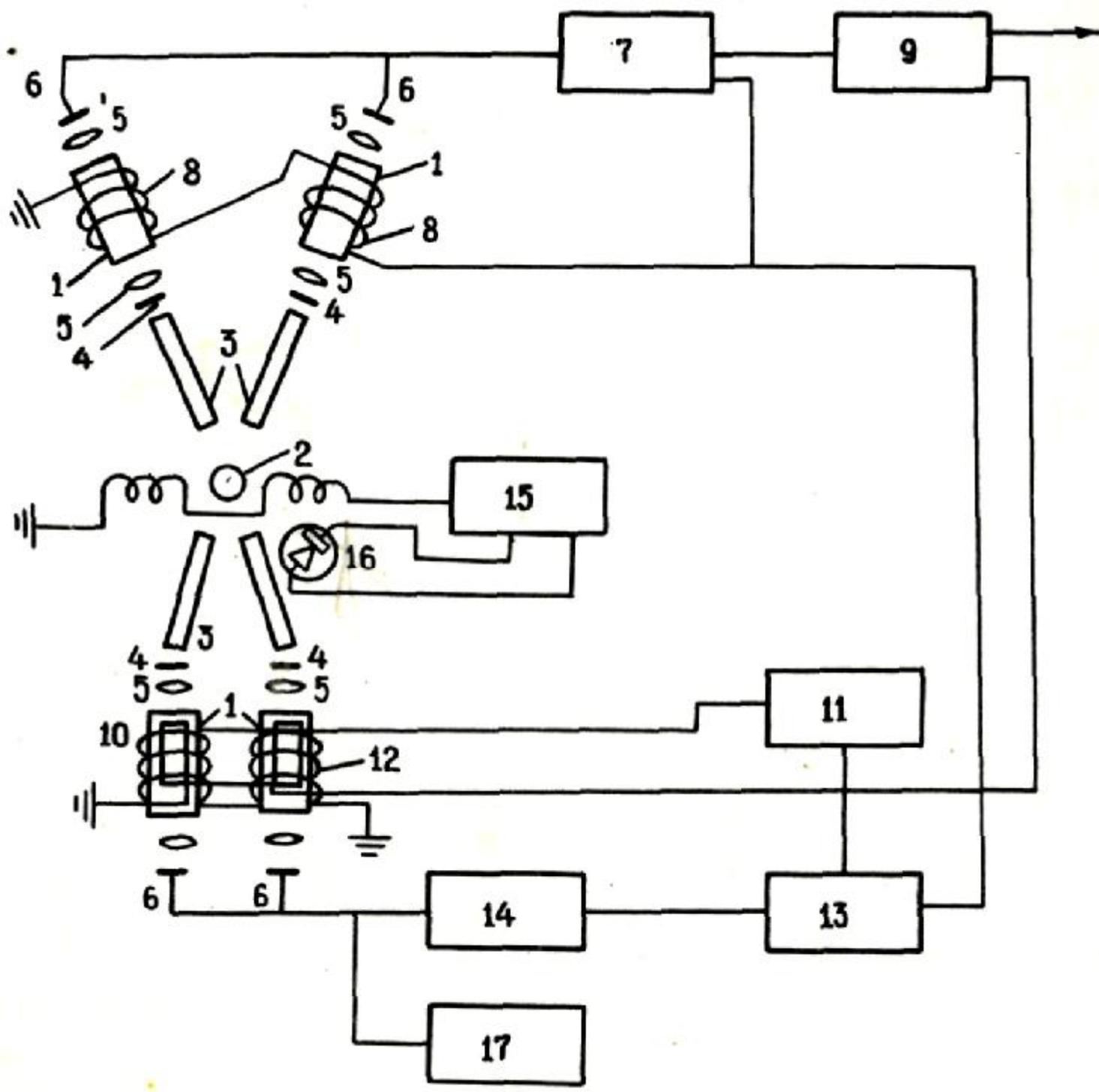


Рис. 1

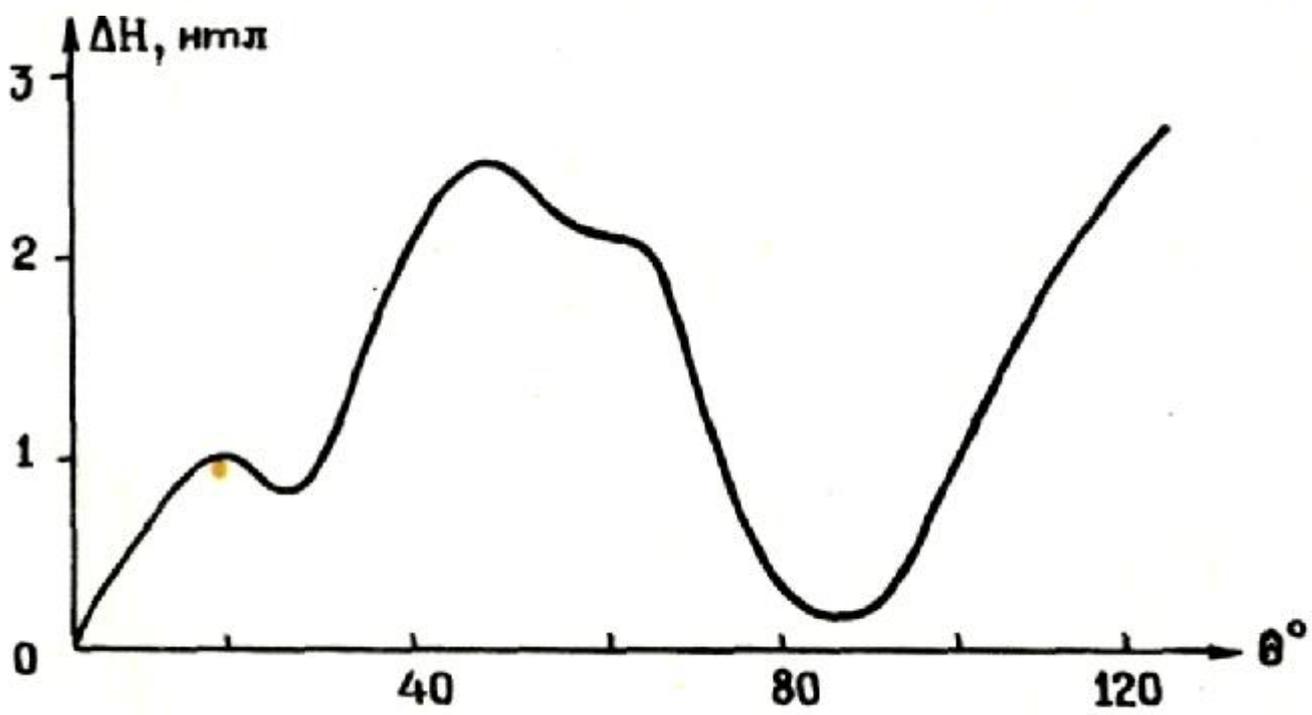


Рис. 2

Опорная часть датчика (нижняя часть рис.1) состоит из двух ячеек поглощения, оси которых параллельны. Ориентация атомов цезия в одной из ячеек осуществляется светом круговой поляризации  $\sigma^+$ , в другой -  $\sigma^-$ .

Генератор II низкой частоты (137 Гц) совместно с модуляционными катушками 12 создавал переменное магнитное поле для сканирования резонансных условий в опорном датчике. В зависимости от величины и знака расстройки частоты генерации СГМ относительно частоты центра суммы двух линий магнитного резонанса опорного датчика на выходе фазового детектора 13 появляется сигнал ошибки. Последний в виде магнитного поля воздействовал на ячейки поглощения СГМ. Необходимое усиление сигнала ошибки до фазового детектора обеспечивалось узкополосным усилителем 14.

Зона ориентации относительно направления магнитного поля  $H_0$ , в которой эффективно осуществляется автоподстройка, составляла для опорного датчика  $\pm 50-55^\circ$ . Она может быть несколько расширена при замене сканирования по магнитному полю сканированием по частоте.

Контроль работы системы автоподстройки производился по величине сигнала опорного датчика на частоте второй гармоники поля модуляции (блок 17).

Анализ показывает, что датчик с автоподстройкой через магнитное поле имеет статическую ошибку, равную

$$\Delta H = \Delta H_0 / (1 + K \cdot \cos^4 \theta),$$

где  $\Delta H_0$  - начальное отклонение частоты генерации относительно центра линии опорного датчика;  $K$  - коэффициент передачи разомкнутой цепи обратной связи;  $\theta$  - угол между направлениями светового луча в опорном датчике и магнитного поля.

Коэффициент передачи  $K$  цепи обратной связи равен

$$K = S_d \cdot S_y,$$

где  $S_d$  - крутизна дискриминатора в мА/нТл;  $S_y$  - крутизна управляющего элемента в нТл/мА. Крутизна дискриминатора  $S_d$  определяется как крутизна производной по магнитному полю от линии магнитного резонанса опорного датчика.  $S_d$  с достаточной точностью равна

$$S_d = K_1 K_2 \cdot 2S / \Delta H \cdot R,$$

где  $K_1$  - коэффициент передачи усилителя;  $K_2$  - коэффициент передачи фазового детектора;  $2S / \Delta H^*$  - крутизна изменения сигнала на выходе фотоприемника в пределах ширины линии магнитного резонанса  $\Delta H^*$  (в/нТл);  $R$  - выходное сопротивление фазового детектора. Крутизна управляющего элемента  $S_y$  тождественно равна постоянной катушки, посредством которой создается управляющее магнитное поле.

Минимальная ориентационная погрешность магнитометра определяется степенью взаимной компенсации погрешностей в его опорной части [7]. Для этой цепи ячейки поглощения и фотоприемники необходимо выбирать с идентичными параметрами.

Исследование магнитометров осуществлялось в натуральных условиях при перепаде температур от +17 до + 26°C. Процесс определения погрешностей СГМ с автоподстройкой производился в режиме градиентометра. В этом режиме чувствительность системы регистрации была избрана в 0,02 нТл при 10 измерениях в секунду. В качестве другого датчика градиентометра применялся СГМ без автоподстройки. Ниже приводятся результаты измерений для магнитометра с ячейками поглощения диаметром 40 мм, длиной 50 мм.

На рис. 2 приведена зависимость погрешности СГМ от ориентации датчика в плоскости магнитного меридиана при выключенной системе автоподстройки в магнитном поле порядка 51 мкТл. При включении системы автоподстройки эти погрешности существенно уменьшаются в зависимости от коэффициента автоподстройки  $K$ .

На рис.3 представлена угловая зависимость погрешности СГМ с автоподстройкой при  $K = 20$  и при температурах +17, +23, +26°C. На рис.4 представлена та же зависимость, но при  $K=100$  и при температуре + 22°C.

СГМ с автоподстройкой имеет полосу пропускания от 0 до 0,9 Гц. Она определяется постоянной времени фазового детектора и регистрации.

Определение динамических характеристик магнитометра было исследовано путем качания датчика относительно направления вектора магнитного поля. Величина динамической ошибки составляла 0,1 и 0,2 нТл при скорости изменения угла ориентации 30 и 60° в секунду соответственно в диапазоне изменения углов  $\pm 50^\circ$ .

Магнитометр с малыми ячейками поглощения (диаметр 25 мм,

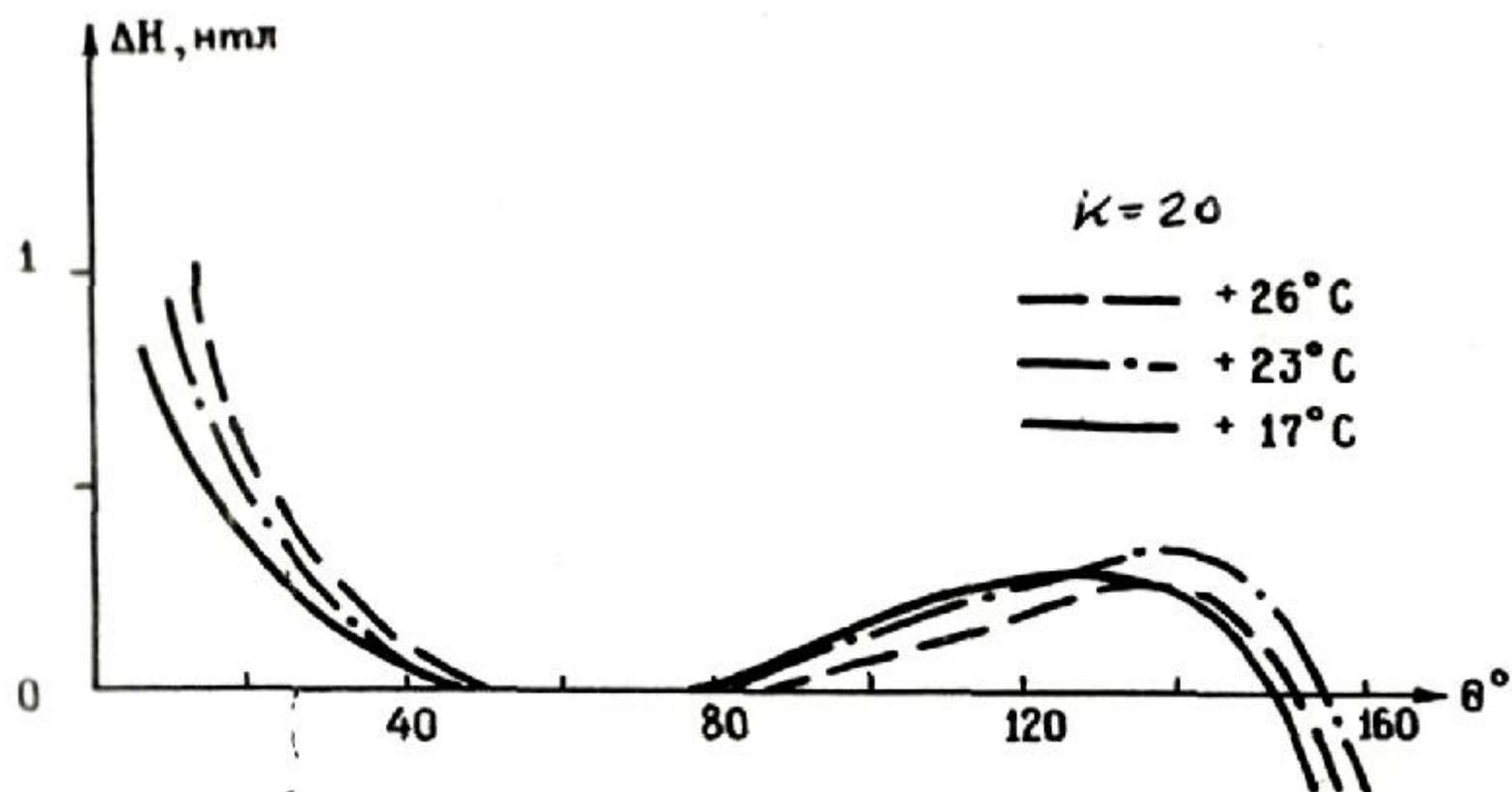


Рис. 3

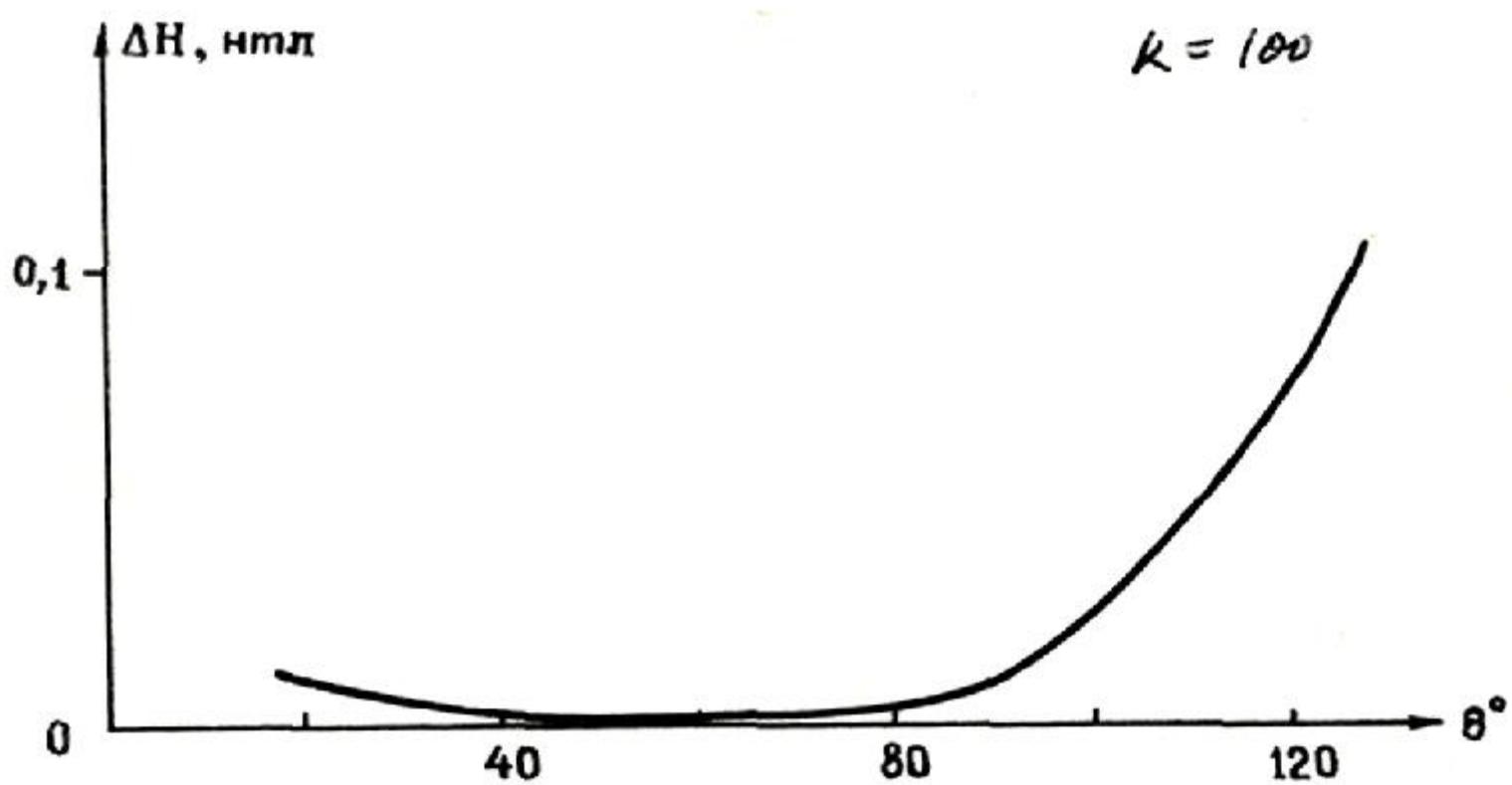


Рис. 4

длина 25 мм) обладал худшими параметрами из-за меньшего отношения сигнал-шум. Так, ориентационные погрешности составили  $\pm 0,2 - 0,3$  нТл в угловом растворе около  $100^\circ$ .

В результате проведенных исследований установлено, что:

а) ориентационные погрешности СГМ могут быть существенно уменьшены путем введения автоподстройки его по опорному датчику ( $\pm 0,1$  нТл в  $100 - 110^\circ$  угловом растворе и  $\pm 0,02$  нТл в  $60^\circ$  угловом растворе);

б) ориентационная погрешность существенно не изменяется при колебаниях температуры датчика от  $+17$  до  $+ 26^\circ\text{C}$ ;

в) балансировка сигналов в опорном датчике должна быть не хуже 5-7% для достижения погрешности  $\pm 0,1$  нТл в угловом растворе приблизительно  $100^\circ$ ;

г) динамическая ошибка системы автоподстройки определяется её полосой пропускания и зависит от конкретного исполнения электронных узлов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. A.Bloom. *Appl.optics*, 1962, 1 ,N 1,61.
2. W.Farthing, W.Folz. *Rev.sci.intr.*, 1967, 38, N 8, 1023.
3. H.Slack, V.Lynch, L.Langan. *Geophysics*, 1967, 32, N5, 877.
4. W.Bell. Patent USA N 3.187.251, кл, 324-5.
5. Н.А.Доватор, Р.А.Житников, П.П.Кулешов. *Геофиз.аппаратура*, 1974, вып.56, 15.
6. J.Allen, P.Bender. *J.Geomag.Geolect.*, 1972, 24, 105.
7. J.Meilleroux. *Rev.phys.appl.*, 1970, 5, 121.

Опубликовано в сборнике работ «Анализ пространственно – временной структуры геомагнитного поля», М. Наука, 1975, с. 236–242.