

**сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна**

13-85-177

Ю.В.Никитенко

**МНОГОКАНАЛЬНЫЕ СХЕМЫ
СТАБИЛИЗАТОРА МАГНИТНОГО ПОЛЯ**

1985

ВВЕДЕНИЕ

Многоканальный стабилизатор находит применение для стабилизации неоднородного в пространстве магнитного поля. Это имеет, например, место при осуществлении магнитного резонанса на ультрахолодных нейтронах /УХН/, когда из-за небольшой плотности используют накопительные сосуды больших размеров. При этом изменения амплитуды магнитной помехи на протяжении характерных размеров сосуда могут быть значительными. Двухканальные стабилизаторы были описаны ранее ^{1,2/}. В ^{1/} дана теория и проведены испытания стабилизатора, в котором каналы включены параллельно через сумматор сигналов. Во ^{2/} дана теория и проведены испытания стабилизатора, каналы которого, благодаря введению дополнительных компенсационных катушек, включены по последовательной схеме.

В настоящей работе описываются различные схемы стабилизатора с произвольным числом каналов, включенных параллельно и последовательно. Для описания работы схем вводятся понятия динамических диапазонов для средней амплитуды помехи и для пространственного изменения амплитуды помехи в объеме, занимаемом первичными преобразователями. Из условия устойчивости к самовозбуждению проводится сравнение схем по максимально возможным динамическим диапазонам и коэффициенту стабилизации среднего поля.

1. СТАБИЛИЗАТОР С ОБЩЕЙ КАТУШКОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ /СХЕМА 1/

При описании работы этой и остальных схем сделаны следующие допущения: 1/ не учитываются собственные шумы каналов; 2/ катушки создают в рассматриваемых объемах однородное магнитное поле и имеют одинаковые амплитудно-фазовые характеристики; 3/ не учитываются индуктивные связи между катушками, т.е. рассматриваются низкочастотные изменения магнитного поля; 4/ характерное расстояние изменения амплитуды помехи в пространстве значительно превышает расстояние между первичными преобразователями; 5/ максимальное значение коэффициента передачи канала разомкнутого стабилизатора определяется устойчивостью стабилизатора к самовозбуждению.

Структурная схема стабилизатора приведена на рис.1. В точках $A_1 \div A_n$ пространства размещены первичные преобразователи /ПП/ 1. Сигналы с ПП усиливаются и преобразуются аппаратурой 2, имеющей коэффициенты передачи $k_{n,1} \div k_{n,n}$ /коэффициенты передачи ПП счи-

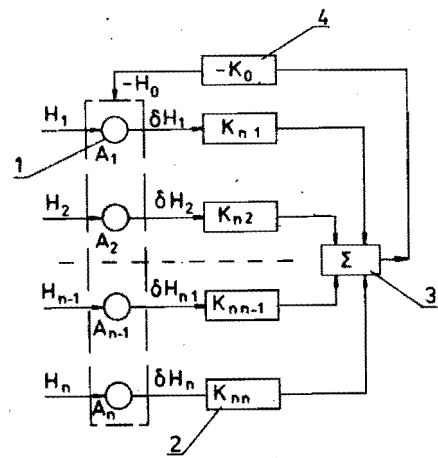


Рис.1. Структурная схема многоканального стабилизатора с общей катушкой обратной связи. 1 - первичные преобразователи, 2 - усилительно-преобразующая аппаратура, 3 - сумматор сигналов, 4 - катушка обратной связи.

таются равными единице/, и суммируются в сумматоре 3. К сумматору подключена катушка обратной связи 4 с коэффициентом передачи $-k_0$. На ПП стабилизатора воздействует помеха с амплитудой $H_1 \div H_n$. Так как стабилизатор представляет собой цепь с отрицательной обратной связью, то катушка обратной связи создает компенсирующее поле $-H_0$, в результате чего возникает недокомпенсация помехи $\delta H_j = H_j - H_0$:

$$\delta H_j = H_j - H_0, \quad /1/$$

где $j=1 \div n$ - индекс канала.

Сигнал катушки обратной связи определяется суммой сигналов каналов:

$$H_0 = \sum_{j=1}^n k_j \delta H_j, \quad /2/$$

где $k_j = k_{n,j} \cdot k_0$ - коэффициент передачи канала разомкнутого стабилизатора.

Умножив /1/ на k_j и просуммировав по числу каналов, получим для H_0 :

$$H_0 = \frac{\sum H_j k_j}{1 + n\bar{k}}, \quad /3/$$

где $\bar{k} = \frac{\sum k_j}{n}$ - средний коэффициент передачи канала. Введем среднюю амплитуду помехи $\bar{H} = \frac{\sum H_j}{n}$ и представим $k_j = \bar{k} + \Delta k_j$, тогда для недокомпенсации в точке расположения ПП получим:

$$\delta H_j = \Delta H_j + \frac{\bar{H}}{1 + n\bar{k}} - \frac{\sum \Delta H_j \Delta k_j}{1 + n\bar{k}}. \quad /4/$$

Для средней недокомпенсации, определяемой как $\bar{\delta H} = \frac{\sum \delta H_j}{n}$, получим:

$$\bar{\delta H} = \frac{\bar{H}}{1 + n\bar{k}} - \frac{\sum \Delta H_j \Delta k_j}{1 + n\bar{k}}. \quad /5/$$

Для дальнейшего описания введем такие характеристики, как динамический диапазон для пространственного изменения амплитуды помехи $D(\Delta H)$, и динамический диапазон для средней амплитуды помехи $D(\bar{H})$, определяемые как максимальные изменения амплитуды помехи и средняя амплитуда, при которых недокомпенсация в точке нахождения одного из ПП равна динамическому диапазону канала разомкнутого стабилизатора D_k . Из формулы /4/ следует, что $D(\Delta H) = D_k$ и $D(\bar{H}) = (1 + n\bar{k})D_k$. Из /5/ для коэффициента стабилизации среднего значения поля, определяемого как $\eta = |\bar{H}|/|\bar{\delta H}|$, получим:

$$\eta = \left| \frac{1 + n\bar{k}}{1 - \sum \Delta H_j \Delta k_j / \bar{H}} \right|. \quad /6/$$

Из /6/ можно заключить, что коэффициент стабилизации среднего поля определяется и нестабильностью коэффициентов передачи каналов.

2. СТАБИЛИЗАТОР С ОБЩЕЙ И ЛОКАЛЬНЫМИ КАТУШКАМИ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ /СХЕМА 2/

Структурная схема стабилизатора изображена на рис.3. Отличие этой схемы от схемы 1 состоит в том, что имеются локальные катушки обратной связи 3 с коэффициентом передачи $-k_{0j}$. Для недокомпенсации в точке нахождения ПП имеем:

$$\delta H_j = H_j - H_{0j} - H_0, \quad /7/$$

где $H_0 = \sum k_j \delta H_j$ - магнитное поле общей катушки обратной связи; $H_{0j} = k_{0j} \delta H_j$ - магнитное поле локальной катушки обратной связи.

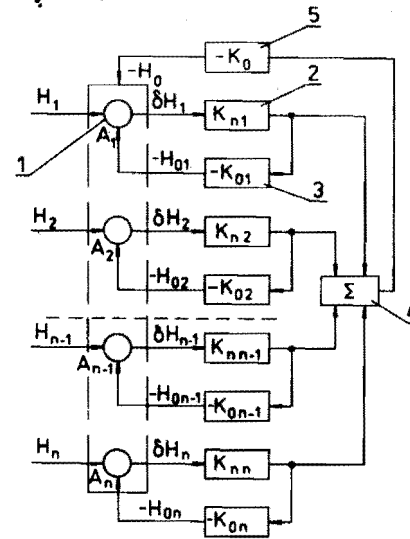


Рис.2. Структурная схема многоканального стабилизатора с общей и локальными катушками обратной связи. 1 - первичные преобразователи, 2 - усилительно-преобразующая аппаратура, 3 - локальные катушки обратной связи, 4 - сумматор сигналов, 5 - общая катушка обратной связи.

При $k_{\rho j} = k_{\rho}$ получим, используя уравнение /7/:

$$\delta H_j = \frac{\bar{H}}{1 + nk + k_{\rho}} + \frac{\Delta H_j}{1 + k_{\rho}} - \frac{\Sigma \Delta H_j \Delta k_j}{(1 + k_{\rho})(1 + nk + k_{\rho})} \quad /8/$$

Из /8/ для динамических диапазонов получим $D(\Delta H) = (1 + k_{\rho}) D_k$ и $D(\bar{H}) = (1 + nk + k_{\rho}) D_k$.

Для средней недокомпенсации магнитного поля в объеме, охватываемом общей катушкой, исключая объемы, охватываемые локальными катушками, получим:

$$\bar{\delta H} = \frac{1 + k_{\rho}}{1 + nk + k_{\rho}} \bar{H} - \frac{\Sigma \Delta H_j \Delta k_j}{1 + nk + k_{\rho}} \quad /9/$$

Из /9/ для коэффициента стабилизации среднего значения поля имеем:

$$\eta = \left| \frac{1 + nk + k_{\rho}}{1 + k_{\rho} - \Sigma \Delta H_j \Delta k_j / \bar{H}} \right| \quad /10/$$

Схему 2, по сравнению со схемой /1/, отличают большие значения динамических диапазонов, но меньший коэффициент стабилизации среднего поля.

3. СТАБИЛИЗАТОР С ОБЩЕЙ И ЛОКАЛЬНЫМИ КАТУШКАМИ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ И ЛОКАЛЬНЫМИ КОМПЕНСАЦИОННЫМИ КАТУШКАМИ /СХЕМА 3/

Структурная схема стабилизатора приведена на рис.3. Ее отличие от схемы 2 состоит в том, что введены локальные компенсационные катушки /на рисунке не показаны/, охватывающие ПП. Компенсационные катушки включены параллельно общей катушке 5 обратной связи, но создают в точках A_j на первичных преобразователях магнитное поле в противофазе магнитному полю катушки 5, компенсируя его. Для недокомпенсации в точке нахождения ПП имеем:

$$\delta H_j = \frac{\bar{H}}{1 + k_{\rho}} + \frac{\Delta H_j}{1 + k_{\rho}} \quad /11/$$

где k_{ρ} - коэффициент передачи канала с локальной катушкой обратной связи. Из /11/ следует для динамических диапазонов $D(\Delta H) = (1 + k_{\rho}) D_k$ и $D(\bar{H}) = (1 + k_{\rho}) D_k$.

Для средней недокомпенсации по объему, охватываемому общей катушкой обратной связи, исключая объемы, охватываемые локальными катушками, получим:

$$\bar{\delta H} = \frac{\bar{H}}{1 + nk} - \frac{\Sigma \Delta H_j \Delta k_j}{1 + nk} \quad /12/$$

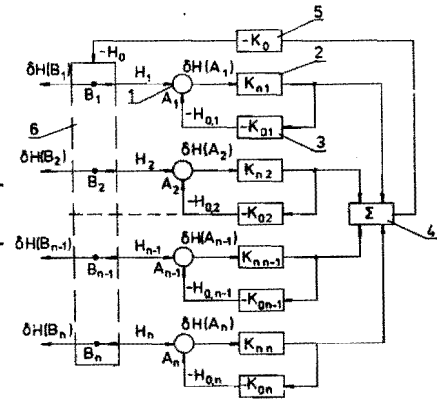
где k_j - коэффициент передачи канала, включающего общую катушку обратной связи. При выводе /12/ использовано условие $k_{\rho} = nk$. Необходимость поддерживать это условие постоянным является недостатком схемы. В то же время надо подчеркнуть, что на самом деле такое условие достаточно поддерживать для коэффициентов передачи локальных и общей катушек обратной связи. Коэффициенты же передачи катушек можно поддерживать постоянными с точностью $5 \cdot 10^{-6}$ /8/.

Сравним схемы 1, 2 и 3 по максимальным значениям динамических диапазонов и коэффициенту стабилизации среднего магнитного поля. Будем считать, что максимальные значения вышеупомянутых характеристик стабилизатора определяются его самовозбуждением. Тогда для коэффициентов передачи всех трех схем имеем соотношение:

$$nk_1 = nk_2 + k_{2\rho} = nk_3 \quad /13/$$

где индексы 1, 2 и 3 указывают номер схемы.

Рис.3. Структурная схема многоканального стабилизатора с общей и локальными катушками обратной связи и локальными компенсационными катушками. 1 - первичные преобразователи, 2 - усилительно-преобразующая аппаратура, 3 - локальные катушки обратной связи, 4 - сумматор сигналов, 5 - общая катушка обратной связи, 6 - объем, охватываемый общей катушкой обратной связи, за исключением объемов, охватываемых локальными катушками.



Из условия /13/ следуют соотношения, связывающие максимальные значения динамических диапазонов и коэффициентов стабилизации среднего поля для трех схем:

$$D_1(\Delta H) = D_2(\Delta H) / (1 + k_{2\rho}) = D_3(\Delta H) / (1 + nk_1) \quad /14/$$

$$D_1(\bar{H}) = D_2(\bar{H}) = D_3(\bar{H}), \quad \eta_1 = (1 + k_{2\rho}) \eta_2 = \eta_3$$

Из соотношений /14/ следуют неравенства:

$$D_1(\Delta H) < D_2(\Delta H) < D_3(\Delta H), \quad \eta_2 < \eta_1 = \eta_3 \quad /15/$$

Из соотношений /14/ и неравенств /15/ можно сделать вывод о том, что схема 3 предпочтительнее по всем сравниваемым параметрам.

4. СТАБИЛИЗАТОР С N СИСТЕМАМИ КАНАЛОВ /СХЕМА 4/

Общим недостатком схем 1÷3 является невозможность получения недокомпенсации магнитного поля на уровне собственных шумов для помех с амплитудой порядка динамического диапазона. Например, если в качестве ПП стабилизатора взять датчик квантового оптического магнитометра ^{4/}, то недокомпенсация может превышать собственный шум в $10^4 \div 10^5$ раз. Этот недостаток устраняется в схеме 4 /рис.4/. N систем каналов /первый индекс обозначает номер системы, второй - номер канала/ имеют каждая в своем составе п ПП 1, п каналов усилительно-преобразующей аппаратуры 2, включенных параллельно через сумматоры 3 и катушку обратной связи 4. Катушка обратной связи каждой последующей системы каналов воздействует на первичные преобразователи всех предыдущих систем каналов.

Для недокомпенсации в точке размещения A_{ij} первичного преобразователя из системы каналов i имеем:

$$\delta H_{ij} = H_{ij} - \sum_{m=1}^n \delta H_{im} k_{im} - \dots - \sum_{m=1}^n \delta H_{im} k_{1m}, \quad /16/$$

где $i = 1 \div N, j = 1 \div n$.

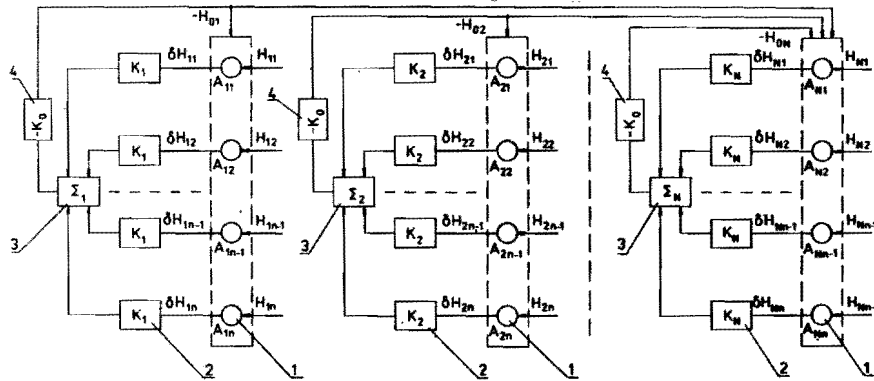


Рис.4. Структурная схема многоканального стабилизатора с N системами по n первичных преобразователей. 1 - первичные преобразователи, 2 - усилительно-преобразующая аппаратура, 3 - сумматоры, 4 - катушки обратной связи.

Для средних недокомпенсаций по точкам размещения ПП в системах при условии $\bar{H}_1 = \dots = \bar{H}_N = \bar{H}$ получим, используя /16/:

$$\bar{\delta H}_i = \frac{\bar{H}}{(1 + nk_1) \times \dots \times (1 + nk_i)}, \quad \text{где } i = 1 \div N. \quad /17/$$

Из формулы /17/ следует, что коэффициент стабилизации среднего магнитного поля в точках расположения ПП i системы каналов равен произведению коэффициента стабилизации в точках размещения ПП предыдущей i-1 системы каналов на коэффициент стабилизации стабилизатора, образуемого только элементами i системы.

Особенностью схемы 4 является то, что несмотря на увеличение коэффициента стабилизации, устойчивость стабилизатора к самовозбуждению определяется устойчивостью отдельных каналов.

5. СТАБИЛИЗАТОР ЭФФЕКТИВНО ДЕЙСТВУЮЩЕГО НА УХН МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Многоканальный стабилизатор, выполненный по одной из схем 1÷4, не решает задачу стабилизации эффективно действующего на УХН магнитного поля. Пусть в объеме 1 /рис.5/ находятся УХН. Из-за действия силы тяготения плотность нейтронов $n(z)$ будет неоднородной. Тогда, при магнитной помехе $H(\vec{r})$ действующая на УХН помеха будет $H_g = (H(\vec{r})n(z)d^3r)$. Для конкретности будем считать, что имеется стабилизатор по схеме 1 с n каналами. Для действующей на УХН недокомпенсации $\delta H_g = \sum_{i=1}^N n(z_i) \delta H_i$ получим:

$$\delta H_g = \sum n(z_i) H_i = \bar{H} \frac{Nk}{1 + Nk}, \quad /18/$$

где \bar{H} - средняя помеха, k - коэффициент передачи канала, $\sum n(z_i) = 1$.

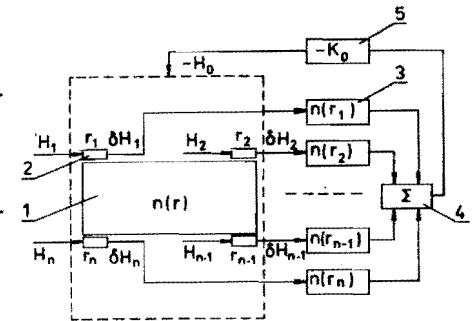


Рис.5. Структурная схема стабилизатора, эффективно действующего на УХН магнитного поля. 1 - сосуд с УХН, 2 - первичные преобразователи, 3 - усилительно-преобразующая аппаратура, 4 - сумматор сигналов, 5 - катушка обратной связи.

Рассмотрим пример, показывающий, какие следует ожидать значения коэффициента стабилизации $\eta_g = H_g / \delta H_g$ действующего поля. Пусть ловушка УХН является цилиндрической диаметром 50 см с осью, перпендикулярной направлению силы тяжести. УХН имеют максвелловский спектр в интервале $0 \div v_m$. Пусть также помеха имеет вид $H(z) = az$, где ось z направлена по направлению силы

тяжести. Расчет показывает, что для $v_{ш} = (4 \div 7) \text{ м/с}$ коэффициент стабилизации изменяется от 5 до 23.

Поставим задачу отыскания определенной зависимости для коэффициентов передачи каналов, при которой недокомпенсация действующего поля δH_g была бы связана с коэффициентами передачи аналогично тому, какая связь существует между недокомпенсацией магнитного поля в объеме и коэффициентами передачи в стабилизаторе магнитного поля. Такой зависимостью будет $k_i = k_0 v(z_i)$, где z_i - координата ПП i -го канала. Действительно, для δH_g имеем в этом случае:

$$\delta H_g = \frac{H_g}{1 + k_0} \quad /19/$$

Таким образом, мы пришли к формуле, эквивалентной /5/, и решили поставленную задачу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Никитенко Ю.В. и др. ОИЯИ, P13-12847, Дубна, 1979.
2. Kozlov A.N., Nikitenko Yu.V., Taran Yu.V. Nucl. Instr. and Meth., 1982, 192, p.379; Козлов А.Н. и др. ОИЯИ, P13-80-709, Дубна, 1980.
3. Афанасьев Ю.В. и др. Средства измерений параметров магнитного поля. "Энергия", Л., 1979.
4. Померанцев Н.М., Рыжков В.М., Скроцкий Г.В. Физические основы квантовой магнитометрии. "Наука", М., 1972.

Рукопись поступила в издательский отдел
7 марта 1985 года.

Никитенко Ю.В.

13-85-177

Многоканальные схемы стабилизатора магнитного поля

Описаны многоканальные схемы стабилизатора магнитного поля. Многоканальные стабилизаторы находят применение для стабилизации неоднородного магнитного поля. Введены понятия динамических диапазонов для средней амплитуды помехи и для изменения амплитуды помехи в объеме пространства. Из условия устойчивости стабилизатора к самовозбуждению проведено сравнение схем. При использовании ультрахолодных нейтронов предпочтительнее схема стабилизатора эффективно действующего магнитного поля.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1985

Перевод О.С.Виноградовой

Nikitenko Yu.V.

13-85-177

Multichannel Circuits of the Magnetic Field Stabilizer

Multichannel circuits of the magnetic field stabilizer are described. The multichannel stabilizers are used for stabilization of inhomogeneous magnetic noises. Concepts of dynamical ranges for the average amplitude of magnetic noises and for the magnetic noise amplitude variation are introduced. The circuits are compared with the condition of stability to unwanted oscillations. In the experiments with ultracold neutrons the circuit of the stabilizer of effective magnetic field is preferable.

The investigation has been performed at the Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1985